UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO FRENTE AOS AFUNDAMENTOS E ELEVAÇÕES DE TENSÃO

DANIEL MAIA FONSECA DE JESUS

Uberlândia, 03 de agosto de 2006

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO FRENTE AOS AFUNDAMENTOS E ELEVAÇÕES DE TENSÃO

Dissertação apresentada por Daniel Maia Fonseca de Jesus à Universidade Federal de Uberlândia para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora:

Prof. Milton Itsuo Samesima, Dr. (UFU) - Orientador
Prof. Luís Carlos Origa de Oliveira, Dr. (UNESP)
Prof. Antonio Carlos Delaiba, Dr. (UFU)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

J58a Jesus, Daniel Maia Fonseca de, 1979
Avaliação do desempenho do restaurador dinâmico de tensão frente aos afundamentos e elevações de tensão / Daniel Maia Fonseca de Jesus. - 2006.
182 f. : il.

Orientador: Milton Itsuo Samesima.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Energia elétrica - Qualidade - Teses. I. Samesima, Milton Itsuo. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 621.311

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DO RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO FRENTE AOS AFUNDAMENTOS E ELEVAÇÕES DE TENSÃO

Dissertação apresentada por Daniel Maia Fonseca de Jesus à Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Prof. Milton Itsuo Samesima, Dr. Orientador	Prof. Darizon Alves de Andrade, Ph.D. Coordenador do Curso de Pós-Graudação

À minha esposa Tanany, fonte de força e inspiração essenciais para o cumprimento desta etapa de nossas vidas.

Aos meus pais, Roberto e Nadja, meus grandes mestres na escola da vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela realização de mais um sonho.

Ao professor Milton Itsuo Samesima, pela orientação.

À minha esposa Tanany por todo amor e dedicação e pela coragem de ter me acompanhado nessa jornada.

Aos meus pais, meus maiores incentivadores.

A toda a minha família por sempre acreditarem no meu potencial.

À colega Walkyria Martins por disponibilizar todo o acervo de sua pesquisa.

Aos colegas Adeon e Rogério pelo auxílio na elaboração deste trabalho.

À minha tia Simone Rubim de Pinho pelo apoio na revisão da dissertação.

À Marli, secretária da Pós-Graduação, pelo auxílio e esclarecimento.

Aos professores e colegas da pós-graduação pelo apoio e amizade.

A Peter pela recepção e apoio nos primeiros dias em Uberlândia e aos "paladinos baianos" Ciro e Ilvan que, juntamente com Peter, foram grandes companheiros de jornada.

Aos amigos uberlandenses Karinna, Marcos, João Ruitter, Hexaner, Marco Túlio, Elisângela e Érica pela amizade, carinho e acolhimento.

RESUMO

As preocupações com os diversos assuntos relacionados à Qualidade da Energia Elétrica têm sido cada vez mais comuns às empresas de energia e aos consumidores em geral, e vêm assumindo importância destacada nos cenários nacional e internacional. Tais preocupações são voltadas para a ocorrência de distúrbios elétricos capazes de comprometer o desempenho e a vida útil de equipamentos e dispositivos, além de afetar ou interromper variados processos industriais. Desses distúrbios, as VTCDs (Variações de Tensão de Curta Duração) são consideradas as que mais causam prejuízos aos consumidores. Com isso, já existe na literatura técnica uma série de metodologias de prevenção e variados dispositivos de atenuação dos efeitos das VTCDs. Destes dispositivos, destaca-se o Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR – *Dynamic Voltage Restorer*) que é um compensador estático série avançado aplicado à distribuição de energia elétrica e que representa hoje o que há de mais moderno em termos de mitigação de afundamentos e elevações de tensão. O presente trabalho visa contribuir para o estudo do desempenho de algumas topologias de DVR, comparando a atuação de três opções de configuração através de simulações computacionais em plataforma SABER. A análise comparativa do desempenho das topologias não considera apenas a eficiência na compensação dos distúrbios elétricos, mas também os efeitos que causam na qualidade da tensão do sistema elétrico, sejam por injeção de harmônicos ou por oscilações transitórias.

Palavras Chave: Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR), Qualidade da Energia Elétrica, Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD), *Custom Power*.

ABSTRACT

Nowadays, national and international electric utilities and end users are becoming more and more concerned about the quality of the electrical power. Such concerns are related with the occurrence of electric disturbances capable to effect the operation and the life expectance of equipments and devices, as well as affecting and interrupting varied industrial processes. Of the above mentioned phenomena, short-duration voltage variations deserve special attention once they are the disturbances that cause the largest damages to the consumers. As a consequence of that, there are several devices available that minimize the effects of such disturbances on the equipments. Among those devices, the Dynamic Voltage Restorer (DVR) represents a modern proposal for the solution of the problems caused by voltage sags and swells. In this work, three different system topologies for DVRs are analysed throughout computer implementations. Comparisons are made between these topologies, with focus on both the general performance and on the electrical power quality of the entire system.

***Key Words**: Dynamic Voltage Restorer (DVR), Electrical Power Quality, Voltage Sags and Swells, Custom Power.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Afundamento de tensão devido à partida de um motor de indução. **17**

Figura 2.2 - Afundamento de tensão devido a um curto-circuito. **19**

Figura 2.3 - Modelo de divisor de tensão para avaliação da magnitude do afundamento de tensão. **20**

Figura 2.4 – Defasamento súbito do ângulo de fase da tensão em razão de um afundamento. **22**

Figura 2.5 - Elevação de tensão em uma fase sã em razão de uma falta fase-terra **23**

Figura 2.6 – Tensão eficaz das três fases de uma interrupção de curta duração devida a uma falta fase-terra. **24**

Figura 2.7 – Curva ITIC de sensibilidade de equipamentos e dispositivos de informática às VTCDs. **32**

Figura 2.8 – Configuração básica do *D-StatCom*. **43**

Figura 2.9 – Configuração básica do Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR). **46**

Figura 2.10 – Configuração básica do Condicionador Unificado de Distribuição (UCPC). **48**

Figura 3.1 – Ilustração esquemática do princípio de funcionamento e dos elementos básicos que compõem o restaurador dinâmico de tensão. **54**

Figura 3.2 – Descrição das localidades de curtos-circuitos cujos afundamentos de tensão podem ser mitigados: (a) a montante do transformador série e (b) nas cargas e alimentadores em paralelo. **56**

Figura 3.3 – Diagrama fasorial e modos de operação de um DVR. **58**

Figura 3.4 – Análise experimental do desempenho de um DVR com capacitor conectado ao sistema pelo lado da fonte. (a) Tensão de suprimento sob distúrbio. (b) Tensão injetada pelo DVR. (c) Tensão nos terminais da carga. (d) Tensão CC no capacitor. **60**

Figura 3.5 – Representação vetorial de uma variável trifásica. **62**

Figura 3.6 – Exemplo de uma trajetória vetorial. **63**

Figura 3.7 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal estacionário. **64**

Figura 3.8 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal síncrono. **67**

Figura 3.9 – Esquema básico do sistema de controle de um DVR e sua interação com o sistema elétrico. **69**

Figura 3.10 – Diagrama de blocos do sistema de detecção e compensação de distúrbios elétricos do DVR, dotado de controle vetorial e PLL (Phase Locked Loop). **71**

Figura 3.11 – Diagrama de blocos de um PLL (Phase Locked Loop). **73**

Figura 3.12 – Sinais de comparação para o disparo das chaves do inversor. **74**

Figura 3.13 – Configuração das chaves semicondutoras do inversor do DVR, seus respectivos pulsos de disparo e forma de conexão através do transformador série. **75**

Figura 3.14 – Formas de onda na saída de um inversor VSI-PWM: (a) Tensão nos comparadores; (b) Tensão na fase *a*, (c) Tensão na fase *b*; (d) Tensão na fase *c*. **76**

Figura 3.15 – Configuração básica de um DVR sem suprimento adicional de energia ao barramento CC. **78**

Figura 3.16 – Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede, a montante do transformador série. **82**

Figura 3.17 – Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede, a jusante do transformador série. **86**

Figura 3.18 – Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através de um sistema de armazenamento de energia **89**

Figura 3.19 – Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através de um sistema CA independente do sistema protegido pelo DVR. **90**

Figura 3.20 – Circuito equivalente de Thevenin da fonte de um sistema dotado de DVR. **93**

Figura 3.21 – Diagrama fasorial da compensação de um afundamento de tensão, sem a injeção de potência ativa **96**

Figura 3.22 – Esquema de ligação de um inversor trifásico com divisão do barramento CC **101**

Figura 3.23 – Esquema de ligação de um inversor trifásico dotado de 4 braços. **102**

Figura 3.24 – Diagrama esquemático de um DVR conectado a um sistema de distribuição. (a) Filtro capacitivo conectado no lado do sistema. (b) Filtro LC conectado no lado do inversor. **110**

Figura 3.25 – Diagrama esquemático dos principais tipos de proteção de um DVR. **112**

Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado **121**

Figura 4.2 – Topologia 1: DVR sem suprimento adicional de energia ao barramento CC. **126**

Figura 4.3 – Topologia 2: DVR com suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede, à montante do transformador série. **127**

Figura 4.4 – Topologia 3: DVR com suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede, à jusante do transformador série. **127**

Figura 4.5 – Topologia 1: Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **132**

Figura 4.6 – Topologia 1: (a) Tensão no barramento CC e (b) Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **133**

Figura 4.7 – Topologia 1**:** Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **134**

Figura 4.8 – Topologia 1: Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de início de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **135**

Figura 4.9 – Topologia 1: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **136**

Figura 4.10 – Topologia 1: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **136**

Figura 4.11 – Topologia 1: (a) tensão no barramento CC e (b) Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **137**

Figura 4.12 – Topologia 1: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de término de uma elevação de tensão trifásica equilibrada para 1,25 pu. **138**

Figura 4.13 – Topologia 1: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de início de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **138**

Figura 4.14 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **140**

Figura 4.15 – Topologia 2: (a) tensão no barramento CC e (b) Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **141**

Figura 4.16 – Topologia 2: Correntes da linha "a" que: (a) vem da fonte a montante do retificador, (b) entra no retificador não-controlado de 6 pulsos e (c) que chega na carga , na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **142**

Figura 4.17 – Topologia 2: Correntes da linha "a" que vem da fonte a montante do retificador e que chega na carga , na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **143**

Figura 4.18 – Topologia 2: Corrente da linha "a" que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **144**

Figura 4.19 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada), nos instantes de término do afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **144**

Figura 4.20 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série e à jusante do mesmo, em condições normais de operação, em um intervalo de tempo imediatamente anterior à ocorrência do afundamento equilibrado de tensão. **146**

Figura 4.21 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série e à jusante do mesmo, em condições normais de operação, em um intervalo de tempo posterior à ocorrência do afundamento equilibrado de tensão. **146**

Figura 4.22 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **147**

Figura 4.23 – Topologia 2: (a) tensão no barramento CC e (b) Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **148**

Figura 4.24 – Topologia 2**:** Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de término da elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **149**

Figura 4.25 – Topologia 2: Tensões de linha à jusante do transformador série (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de início de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **149**

Figura 4.26 – Topologia 2: Correntes da linha "a" que: (a) vem da fonte a montante do retificador, (b) entra no retificador não-controlado de 6 pulsos e (c) que chega na carga , na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **150**

Figura 4.27 – Topologia 2: Correntes da linha "a"que: vem da fonte a montante do retificador e que chega na carga , na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **151**

Figura 4.28 – Topologia 2: Corrente da linha "a"que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **152**

Figura 4.29 – Topologia 3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **153**

Figura 4.30 – Topologia 3: (a) tensão no barramento CC e (b) Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de um afundamento de tensão trifásico equilibrado para 0,5 pu. **154**

Figura 4.31 – Topologia 3: Correntes da linha "a" que: (a) vem da fonte a montante do retificador, (b) que chega na carga e (c) que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **156**

Figura 4.32 – Topologia 3: Correntes da linha "a"que: vem da fonte a montante do retificador e que chega na carga , na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **157**

Figura 4.33 – Topologia 3: Corrente da linha "a" que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu. **158**

Figura 4.34 – Topologia 3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada), nos instantes de término do afundamento equilibrado de tensão. **159**

Figura 4.35 – Topologia 3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série e à jusante do mesmo, em condições normais de operação, em um intervalo de tempo posterior à ocorrência do afundamento trifásico equilibrado de tensão. **160**

Figura 4.36 – Topologia 3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **161**

Figura 4.37 – Topologia 3: (a) tensão no barramento CC e (b) Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **162**

Figura 4.38 – Topologia3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de término da elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **163**

Figura 4.39 – Topologia 3: Correntes da linha "a" que: (a) vem da fonte a montante do retificador, (b) entra no retificador não-controlado de 6 pulsos e (c) que chega na carga , na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **163**

Figura 4.40 – Topologia 3: Correntes da linha "a"que: vem da fonte a montante do transformador série e que chega na carga , na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **164**

Figura 4.41 – Topologia 3: Corrente da linha "a" que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu. **165**

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Categorias e características típicas das VTCDs segundo o IEEE. **26**

Tabela 2.2 – Denominações das VTCDs segundo o ONS. **27**

Tabela 4.1 – Parâmetros do suprimento de energia (Concessionária). **122**

Tabela 4.2 – Parâmetros da linha de transmissão. **122**

Tabela 4.3 – Dados do transformador 69-13,8 kV. **122**

Tabela 4.4 – Dados do transformador 69-34,5 kV. **122**

Tabela 4.5 – Dados da carga sensível. **123**

Tabela 4.6 – Dados da carga industrial. **123**

Tabela 4.7 – Denominação das topologias de DVR simuladas. **126**

Tabela 4.8 – Parâmetros do inversor VSI-PWM. **127**

Tabela 4.9 – Parâmetros do transformador série. **128**

Tabela 4.10 – Parâmetros do barramento CC. **128**

Tabela 4.11 – Parâmetros do retificador de 6 pulsos. **128**

Tabela 4.12 – Parâmetros do filtro sintonizado na 5ª harmônica. **128**

Tabela 4.13 – Comparação do desempenho das topologias de DVR: **166**

SUMÁRIO

Lista de Figuras vii

Lista de Tabelas xii

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO GERAL 1

1.1 Considerações Iniciais 1

1.2 O Contexto da Presente Dissertação 5

1.3 O Estado da Arte 6

1.4 As Contribuições dessa Dissertação 10

1.5 A Estrutura da Dissertação 12

CAPÍTULO 2 – VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO: CAUSAS, EFEITOS E SOLUÇÕES 15

2.1 Considerações Iniciais 15

2.2 Definição e Descrição dos Fenômenos 16

2.2.1 Afundamento de Tensão 16

2.2.2 Elevação de Tensão 22

2.2.3 Interrupção de Curta Duração 23

2.3 Classificação das VTCD´s 25

2.3.1 Segundo o IEEE 25

2.3.2 Segundo o ONS e a Aneel 27

2.4 Efeitos e Prejuízos Causados pelas VTCD´s 29

2.5 Métodos de Mitigação dos Distúrbios 37

2.5.1 Modificação no Sistema de Alimentação 38

2.5.2 Instalação de Equipamentos Inibidores dos Efeitos 40

2.5.2.1 Compensadores Estáticos Avançados de Sistemas de Distribuição – “Custom Power” 41

a) Compensador Paralelo Avançado – D-StatCom 43

b) Restaurador Dinâmico de Tensão – DVR 45
c)Compensador Unificado de Distribuição – UCPC 48
2.5.3 Melhoria da Imunidade do Acionamento e da Carga 49
2.6 Considerações Finais 50
CAPÍTULO 3 – O RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO 53
3.1 Considerações Iniciais 53
3.2 Princípio de Funcionamento 57
3.2.1 Modos de Operação 57
3.2.2 Representação Vetorial de Grandezas Trifásicas 61
3.2.2.1 Representação no Sistema Ortogonal Estacionário (d – q) 64
3.2.2.2 Representação no Sistema Ortogonal Síncrono (α – β) 66
3.2.3 Sistema de Controle do DVR 69
3.3 Tipos de Topologia 76
3.3.1 Suprimento de Energia sem Fonte Adicional 77
3.3.2 Suprimento de Energia através da Própria Rede 81
3.3.2.1 Conversor CA-CC ligado no lado da Fonte 82
3.3.2.2 Conversor CA-CC ligado no lado da Carga 86
3.3.3 Suprimento de Energia através de Fonte Adicional 88
3.3.4 Suprimento de Energia através de Sistema Elétrico Independente 90
3.4 Filosofias de Compensação 92
3.4.1 Injeção de Potências Ativa e Reativa 93
3.4.2 Injeção de Potência Reativa 95
3.4.3 Minimização da Potência Aparente 98
3.4.4 Injeção de Tensão de Seqüência Zero 100
3.5 Componentes Básicos do DVR 103
3.5.1 O Inversor de Freqüência 104
3.5.2 O Capacitor do Barramento CC 105
3.5.3 O Transformador Série 108

3.5.4 O Filtro do Transformador Série **109**

3.6 Esquemas de Proteção do DVR **111**

3.7 Considerações Finais **114**

CAPÍTULO 4 – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS **119**

4.1 Considerações Iniciais **119**

4.2 Descrição do Sistema Elétrico Simulado **121**

4.3 Descrição dos Parâmetros do DVR **123**

4.4 Descrição dos Casos Simulados **130**

4.4.1 Desempenho da Topologia 1 Frente aos Afundamentos e Elevações de Tensão **131**

4.4.1.1 Afundamento de Tensão **132**

4.4.1.2 Elevação de Tensão **135**

4.4.2 Desempenho da Topologia 2 Frente aos Afundamentos e Elevações de Tensão **139**

4.4.2.1 Afundamento de Tensão **139**

4.4.2.2 Elevação de Tensão **146**

4.4.3 Desempenho da Topologia 3 Frente aos Afundamentos e Elevações de Tensão **152**

4.4.3.1 Afundamento de Tensão **153**

4.4.3.2 Elevação de Tensão **161**

4.5 Comparações do Desempenho e Aplicação das Topologias de DVR **165**

4.6 Considerações Finais **170**

CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES GERAIS **175**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **181**

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Com o passar dos tempos, as preocupações com os diversos temas relacionados à Qualidade da Energia Elétrica têm sido cada vez mais comuns às empresas de energia elétrica e aos consumidores em geral, e vêm assumindo importância destacada nos cenários nacional e internacional.

Assim, caracteriza-se como um distúrbio de Qualidade de Energia Elétrica qualquer variação transitória ou permanente na forma de onda, amplitude ou freqüência da tensão e/ou corrente elétrica, e ainda qualquer desequilíbrio de tensão ou interrupção no fornecimento de energia de um sistema [1]. Portanto, qualquer rede elétrica cuja tensão ou corrente se encontra fora dos padrões considerados ideais, apresenta pelo menos um distúrbio de qualidade de energia. Se essa deterioração da qualidade da energia vai ser prejudicial ao desempenho e à vida útil de um equipamento, isso vai depender da severidade do distúrbio e do nível de suportabilidade do equipamento.

Embora os problemas causados pela deterioração da qualidade da energia não sejam recentes, as preocupações que geram em consumidores, fabricantes e concessionárias têm aumentado consideravelmente. Isto pode ser atribuído, dentre outros, aos seguintes motivos:

- Na década de 90, ocorreram grandes avanços e ampla utilização de equipamentos baseados em microeletrônica, eletrônica de

potência e microprocessamento. Estes tipos de cargas, se por um lado contribuem para o aumento da eficiência e racionalização energética, por outro, são causadores da deterioração da energia elétrica suprida, principalmente pela geração de componentes harmônicos de diversas ordens, com efeitos drásticos tanto sobre a forma de onda quanto sobre a amplitude da tensão. Em um sistema elétrico, a intensidade do problema é diretamente proporcional ao número dos respectivos equipamentos conectados ao mesmo;

- Paradoxalmente, estes tipos de cargas, além de serem geradores de distorções, são também altamente sensíveis a variações da tensão eficaz de suprimento;
- A privatização de parte das empresas que compõem o setor elétrico e a sempre crescente demanda de energia elétrica fizeram com que o mercado ficasse mais competitivo.
- Fabricantes e fornecedores de equipamentos necessitam de parâmetros técnicos que orientem e certifiquem o grau de sensibilidade de seus produtos frente aos distúrbios da qualidade da energia;
- O aumento do nível de consciência dos consumidores e a aplicação de multas mais rigorosas por parte da Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica – fizeram com que as concessionárias de energia intensificassem o trabalho de redução de distúrbios como variações de tensão e interrupções de fornecimento de energia;
- Vários sistemas e processos são interligados em rede, o que significa que a falha de um equipamento pode trazer conseqüências danosas para todo o processo.

Uma vez reconhecido este quadro, vários grupos de estudo nacionais e internacionais se esforçaram na identificação, classificação e quantificação dos diversos fenômenos eletromagnéticos relacionados ao padrão de qualidade da energia elétrica. Dentre os resultados internacionais considerados de maior aceitação, pode-se citar os termos e definições propostos pelo IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) [2] e dentre os nacionais, serve como referência os termos e definições propostos pelo ONS [3]. Ambas as referências caracterizam os distúrbios da qualidade da energia basicamente da seguinte forma:

- Transitórios eletromagnéticos impulsivos e oscilatórios;
- Desequilíbrio de tensão;
- Distorção da forma de onda: harmônico, inter-harmônico, "notching" e ruído;
- Flutuação de tensão;
- Variação da freqüência do sistema;
- Variação de tensão de longa duração: interrupção sustentada, subtensão e sobretensão;
- **Variação de tensão de curta duração (VTCD):** interrupção de curta duração, afundamento de tensão ("voltage sag") e elevação de tensão ("voltage swell").

Dos fenômenos supracitados, os afundamentos de tensão e as interrupções de curta duração merecem especiais destaques uma vez que são os distúrbios que mais causam prejuízos aos consumidores em geral, tendo como principais vítimas as grandes indústrias [1].

Como forma de atenuar os efeitos danosos causados pelos diversos distúrbios da qualidade, vários métodos e dispositivos foram desenvolvidos com o passar dos anos. No caso específico das VTCDs, já existem diversas

metodologias de prevenção e vários dispositivos de atenuação dos seus efeitos sobre os equipamentos elétricos.

Com o contínuo avanço da eletrônica de potência, os compensadores estáticos avançados foram se tornando opções atraentes na mitigação dos efeitos das VTCDs e de outros distúrbios elétricos. Na década de 80 surgiram as primeiras publicações a respeito dos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*), que são equipamentos encarregados de promover alternativas de transporte de energia elétrica pelos sistemas de transmissão, elevando o seu carregamento até seus limites térmicos e garantindo simultaneamente, dentre outros fatores, a sua confiabilidade [4]. Posteriormente, no início da década de 90, começaram os estudos de aplicação desses equipamentos nos sistemas elétricos de distribuição, dando início a um novo conceito (*Custom Power*), com o intuito de aumentar a confiabilidade desses sistemas através do controle do fluxo de energia reativa e da redução dos problemas causados pelos distúrbios da qualidade da energia [5].

Da família dos dispositivos *Custom Power*, o restaurador dinâmico de tensão (DVR – *Dynamic Voltage Restorer*) vem se popularizando como a solução mais eficiente na compensação de distúrbios relacionados à variação da tensão eficaz do sistema, com especial destaque para os afundamentos e as elevações de tensão. Adicionalmente, já existem diversos estudos voltados para a aplicação do DVR como filtro harmônico ativo.

Apesar de já existirem diversas publicações relacionadas ao restaurador dinâmico de tensão, muitas pesquisas ainda precisam ser feitas para que haja aumento da sua eficiência na compensação de distúrbios elétricos. Tais estudos devem estar relacionados à busca ou aperfeiçoamento de filosofias de compensação, estratégias de controle e topologias de suprimento de energia para o seu pleno funcionamento.

No contexto brasileiro, a necessidade de pesquisas voltadas à aplicação do restaurador dinâmico de tensão é ainda maior, uma vez que há poucas publicações relacionadas com o assunto e ainda não existem fabricantes nacionais para esse tipo de tecnologia.

1.2 O CONTEXTO DA PRESENTE DISSERTAÇÃO

No estado atual em que se encontram as pesquisas e os estudos nacionais relacionados ao restaurador dinâmico de tensão, verifica-se a necessidade de recursos que permitam a análise do seu comportamento dinâmico em sistemas elétricos de distribuição. Neste sentido, se faz necessária a disponibilização de um modelo computacional que permita a simulação da operação de diferentes configurações de DVR, associado a redes de distribuição de variados tipos.

Existe hoje, na literatura técnica internacional, uma série de publicações que comprovam a eficiência do restaurador dinâmico de tensão na compensação de afundamentos de tensão em sistemas de distribuição. Tais estudos apresentam resultados teóricos, frutos de simulações computacionais e experimentais, que ilustram o desempenho do DVR frente a afundamentos de tensão de diferentes magnitudes e durações. Adicionalmente, existem ainda diversos trabalhos técnicos que abordam outros temas associados a esse dispositivo, tais como desenvolvimento de novos métodos de controle e estratégias de compensação. Porém, poucas pesquisas foram publicadas, discutindo e comparando as diversas possibilidades de topologia de suprimento de energia ao DVR [6], uma vez que a grande maioria das publicações leva sempre em consideração apenas uma dessas configurações.

Complementarmente, nota-se também que a maior parte dos trabalhos relacionados à aplicação do DVR para a mitigação dos afundamentos de tensão, não descrevem o seu desempenho frente às elevações de tensão.

Dessa maneira, reconhecendo todos esses aspectos e considerando que o restaurador dinâmico de tensão tende a se tornar uma tecnologia cada vez mais difundida, surge a proposta desta dissertação, que possui como objetivos principais a implementação computacional deste dispositivo no simulador SABER e a análise do desempenho de três topologias na compensação de afundamentos e elevações de tensão em sistemas de distribuição de média tensão.

1.3 O ESTADO DA ARTE

Apesar do restaurador dinâmico de tensão ser uma tecnologia relativamente recente, já existem várias pesquisas e trabalhos publicados relacionados à sua aplicação na compensação de distúrbios elétricos. Portanto, neste momento, torna-se necessário descrever em que níveis se encontram essas pesquisas, relacionando as publicações de maiores relevâncias para essa tecnologia.

- ***Quanto ao princípio de funcionamento do sistema de controle***

O sistema de controle de qualquer compensador estático avançado, dedicado à mitigação de distúrbios elétricos, é sempre composto por dois blocos básicos: o de identificação do distúrbio elétrico e o de estratégia de compensação [7]. Há na literatura técnica uma considerável diversidade de filosofias de detecção e compensação dos variados distúrbios elétricos. Dentre

outras, pode-se citar a filosofia baseada em controle vetorial, detalhada nas referências [8, 9, 10], em componentes simétricas [7, 11], transformada Wavelet [10], e redes neurais [12].

Os estudos dedicados à inovação e ao aperfeiçoamento de filosofias de detecção e compensação são feitos sempre visando não só o aumento da eficiência do DVR na mitigação de um distúrbio elétrico específico, mas também na capacidade do dispositivo de mitigar outros distúrbios elétricos.

- ***Quanto às formas de suprimento de energia necessária ao pleno funcionamento***

Existe hoje, na literatura técnica, uma série de estudos voltados para as alternativas de suprimento de energia necessária para a efetiva operação do restaurador dinâmico de tensão. Dentre essas topologias de fornecimento de energia, pode-se citar as que utilizam armazenadores de energia [13], as que suprem energia ao DVR através da própria rede onde o mesmo está conectado [14, 15, 16], e as que aproveitam a existência de outro sistema elétrico em corrente alternada para essa finalidade [17, 18].

Os armazenadores de energia mais comumente utilizados são as baterias [13] e os bancos de capacitores [19]. Entretanto, a referência [6] ressalta que outras tecnologias, tais como supercapacitores, volantes de inércia (*flywheel*) e sistemas supercondutores de armazenamento de energia magnética (SMES) também podem ser consideradas no suprimento de energia ao DVR.

- ***Quanto à habilidade em compensar distúrbios elétricos***

A depender do tipo de controle e da fonte de energia do inversor, o DVR pode atuar não somente como compensador de distúrbios relacionados à variação da tensão eficaz do sistema, mas também de outros distúrbios elétricos, tais como as distorções harmônicas de tensão, agregando assim mais valores ao equipamento.

São diversas as publicações que demonstram a eficiência do DVR na compensação de variações da tensão eficaz do sistema. Dentre esses trabalhos, podem-se citar as referências [6, 14, 20, 21, 22, 23].

As referências [9, 24] detalham o princípio de funcionamento e o desempenho de protótipos de restaurador dinâmico de tensão projetados para operar como filtros harmônicos ativos, aplicados à média e à baixa tensão, respectivamente.

- ***Quanto às unidades em operação***

O primeiro restaurador dinâmico de tensão a operar em uma rede elétrica foi projetado pela Siemens e instalado em agosto de 1996 na rede de distribuição de 12,47 kV da companhia Duke Power, em Anderson, Carolina do Sul, Estados Unidos. Atualmente, já existem aplicações de DVR na média tensão protegendo cargas sensíveis de até 50 MVA em indústrias de alimentos, papeis, semicondutores, têxtil, entre outras [19].

Como exemplo de unidade em operação, pode-se citar a instalação de um restaurador dinâmico de tensão de 4 MVA em uma grande indústria de papel da Escócia, com potência instalada de 47 MW, que sofria prejuízos associados a paradas de produção como conseqüência de afundamentos

severos de tensão. Nesse caso específico, o DVR foi instalado em um sistema de 11kV, protegendo 8 MVA de carga sensível [19].

Outro exemplo de unidades em operação é a instalação de dois restauradores dinâmicos de tensão no sistema de distribuição da Salt River Project, localizada próxima à cidade de Phoenix, Estados Unidos. Ao contrário do exemplo anterior, os DVRs, de potência total de 6 MVA, foram instalados nos dois alimentadores de 12,47kV, protegendo todos os equipamentos da planta industrial, totalizando 42 MVA de carga elétrica protegida [19].

Adicionalmente, existe na literatura técnica uma série de publicações que descrevem testes experimentais de protótipos de DVR aplicados na média e na baixa tensão. Como exemplo, pode-se citar as referências [21, 23], que descrevem os testes feitos com um restaurador dinâmico de tensão, de 200 kVA de potência nominal, aplicado no nível de tensão de 10 kV para a proteção de uma carga de 400 kVA.

- ***Quanto aos estudos, pesquisas e aplicações nacionais***

A maioria das publicações nacionais relacionadas com o assunto descreve simulações computacionais da operação do DVR [8], estudos relacionados ao desenvolvimento de sistemas de controle [25], e até a construção e testes de protótipos de baixa tensão com função de filtro harmônico ativo [24].

No Brasil, ainda não há registros de restauradores dinâmicos de tensão operando continuamente em redes elétricas de média ou de baixa tensão.

1.4 AS CONTRIBUIÇÕES DESTA DISSERTAÇÃO

As principais contribuições desta dissertação são resumidas a seguir:

- No estado atual em que se encontram as pesquisas e os estudos envolvendo o restaurador dinâmico de tensão, verifica-se a necessidade de se disponibilizar um modelo computacional que permita a simulação das mais variadas topologias, sistemas de controle e filosofias de compensação desse dispositivo. Baseado nisso, uma das contribuições desta dissertação reside na implementação em plataforma SABER de três diferentes topologias de DVR. A disponibilização de tais recursos tem por meta principal contribuir para a capacitação técnica nacional, visto que tal tecnologia tende a ser cada vez mais difundida e aplicada em sistemas de distribuição brasileiros.

- Essa dissertação pode ser considerada um trabalho de continuação da referência [4], uma vez que o modelo do sistema de controle utilizado nas simulações computacionais das configurações de DVR foi originalmente concebido para um compensador estático série avançado (ASC) aplicado a estudos de um sistema de transmissão em anel, no nível de tensão de 69 kV. Esse trabalho confirmará a eficiência da modelagem desse tipo de sistema de controle e demonstrará a viabilidade da sua aplicação em restauradores dinâmicos de tensão associados a uma rede de distribuição radial de 13,8 kV, representando uma configuração de sistema elétrico diferente da utilizada na referência [4].

- Uma vez ajustado o sistema de controle e implementadas e testadas as diferentes topologias de DVR, procede-se, na seqüência, aos estudos de desempenho dessas configurações na compensação de afundamentos e elevações de tensão. Estas investigações serão desenvolvidas com o objetivo de confirmar as potencialidades do restaurador dinâmico de tensão na compensação desses distúrbios elétricos e ainda de comparar o desempenho de cada uma das topologias consideradas, sendo que esta segunda análise representa um enfoque muito pouco explorado na literatura técnica.

- A análise comparativa do desempenho das topologias de DVR não levará em consideração apenas a eficiência na compensação dos distúrbios elétricos, mas também os efeitos que a operação de tais configurações de restaurador dinâmico de tensão causa na qualidade da tensão do sistema elétrico, sejam por injeção de harmônicos ou por oscilações transitórias.

- Além das contribuições supracitadas, esta dissertação ainda proverá um material didático com informações detalhadas sobre o princípio de funcionamento e as características construtivas e operativas do DVR, tecnologia essa que ainda é pouco difundida dentro e principalmente fora dos meios acadêmicos nacionais.

1.5 A ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A fim de atingir os objetivos propostos, além de um capítulo introdutório, esta dissertação será desenvolvida obedecendo a seguinte estrutura:

CAPÍTULO 2

VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO: CAUSAS, EFEITOS E SOLUÇÕES

Este capítulo terá como objetivo principal abordar os principais aspectos relacionados às Variações de Tensão de Curta Duração, enfocando suas principais causas, conseqüências e possíveis prejuízos associados às suas ocorrências nos sistemas elétricos de distribuição. Adicionalmente, ainda apresentará a classificação desses distúrbios segundo normas e procedimentos nacionais e internacionais, e descreverá os principais métodos e dispositivos utilizados na prevenção das suas ocorrências ou na atenuação dos seus efeitos.

CAPÍTULO 3

O RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

O Capítulo 3 tratará especificamente do restaurador dinâmico de tensão (DVR), onde serão descritos o seu princípio de funcionamento, os tipos de topologia de DVR existentes, suas características construtivas e operativas, as filosofias de compensação dos distúrbios elétricos, técnicas de

dimensionamento dos seus elementos básicos e seus principais esquemas de proteção contra avarias provocadas por certos distúrbios elétricos.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

O Capítulo 4 terá como enfoque principal a análise computacional do desempenho de algumas topologias de DVR na compensação de afundamentos e elevações de tensão, onde serão avaliadas as principais vantagens e desvantagens da aplicação de tais configurações, ressaltando seus impactos operacionais e financeiros.

Para tanto, será feita uma apresentação dos resultados de desempenho das configurações de DVR na compensação de um afundamento e de uma elevação de tensão, com intensidades e tempos de duração definidos, seguida de uma análise comparativa do desempenho dessas topologias na compensação dos distúrbios elétricos apresentados e de outros afundamentos e elevações de tensão, com variados graus de severidade e duração.

As configurações de restaurador dinâmico de tensão enfocadas nas simulações computacionais foram as 3 topologias consideradas de maiores aplicabilidades e menores custos de aquisição.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Finalmente, este capítulo destina-se a apresentar as principais conclusões e contribuições obtidas em toda a dissertação. Adicionalmente, serão sugeridos temas para futuros trabalhos de continuidade.

CAPÍTULO 2

VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO: CAUSAS, EFEITOS E SOLUÇÕES

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

De acordo com o que foi exposto anteriormente, dentre os distúrbios da qualidade de energia, as variações de tensão de curta duração (VTCD) têm sido apontadas como as que mais causam problemas aos consumidores [1, 26]. Entre os tipos de VTCDs, os afundamentos de tensão são os mais danosos economicamente por serem os mais freqüentes, principalmente nas ocorrências de curtos-circuitos nos sistemas elétricos.

A necessidade de classificação desses distúrbios em função da sua amplitude e duração fez com que cada país adotasse uma terminologia e regulamentação específicas, havendo similaridades e diferenças entre elas.

Das classes de consumidores, pode-se dizer que a industrial é a que mais sofre prejuízos como conseqüências de interrupções parciais ou totais de processos produtivos. Apesar disso, os prejuízos relacionados às classes residencial e comercial não devem ser ignorados pela comunidade da engenharia elétrica.

Nesse sentido, a busca pela redução cada vez maior de prejuízos fez com que diversas técnicas de minimização dos efeitos dos distúrbios fossem desenvolvidas e exploradas. Essas técnicas e metodologias vão desde a prevenção da ocorrência da VTCD no sistema elétrico até o aumento da

imunidade do equipamento, passando pela inserção de dispositivos especiais entre a carga sensível e a concessionária.

2.2 DEFINIÇÃO E DESCRIÇÃO DOS FENÔMENOS

Define-se como Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD) qualquer alteração no valor eficaz da tensão para acima de 1,1 pu ou abaixo de 0,9 pu, por curtos intervalos de tempo [2, 27].

Assim sendo, são três os distúrbios elétricos que compõem as VTCDs: afundamento de tensão, elevação de tensão e interrupção de curta duração. Esses distúrbios mencionados serão descritos e caracterizados a seguir.

2.2.1 AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Define-se afundamento de tensão como sendo a redução do valor eficaz da tensão de 0,1 a 0,9 pu por um curto período de tempo. As três principais causas de sua origem são: partida de grandes motores, energização de transformadores de grande porte e ocorrência de curtos-circuitos.

Conforme já foi dito, a preocupação com esse fenômeno reside, principalmente, nos problemas que pode causar em vários tipos de equipamentos, na sua maioria eletrônicos, tais como ASDs, PLCs e computadores, bastante sensíveis a essas variações de tensão. Os efeitos de tais distúrbios serão discutidos no item 2.4 deste trabalho.

Durante a partida, os motores absorvem do sistema elétrico correntes da ordem de 5 a 8 vezes a corrente nominal. Se o motor for de grande porte, isso significa dizer que a circulação dessa alta corrente de partida pela impedância do sistema, sobretudo em redes de baixo nível de curto-circuito, poderá

resultar em afundamentos de tensão severos. Mas, em geral, os consumidores industriais adotam medidas para reduzir a tensão na partida dos motores, de forma a minimizar os impactos dessa alta corrente. Isso torna os efeitos das partidas de motores menos relevantes na geração do distúrbio, quando comparados aos provenientes da ocorrência de curtos-circuitos no sistema [28]. A título de ilustração, a figura 2.1 mostra um afundamento de tensão de 3,2 segundos de duração causada pela partida de um motor de indução.

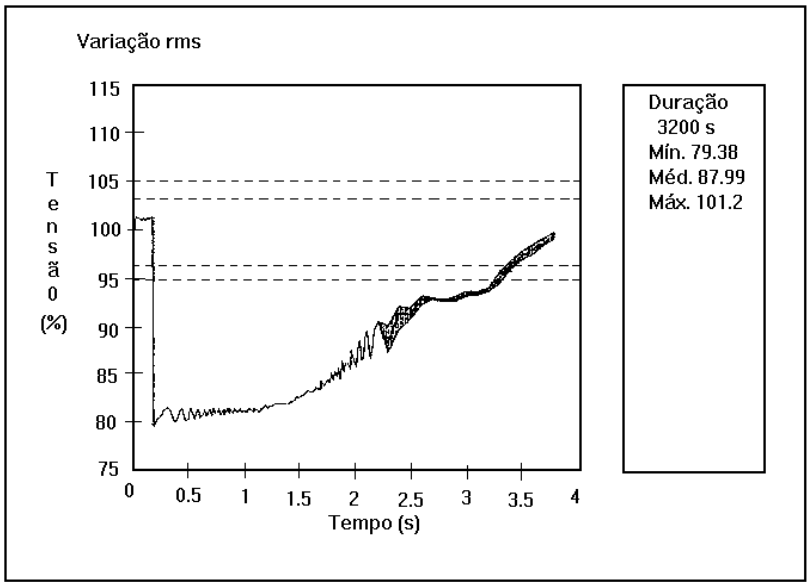

Figura 2.1 – Afundamento de tensão devido à partida de um motor de indução [1].

Outra fonte geradora do distúrbio é a energização de transformadores de grande porte, cujas correntes de magnetização, também conhecidas como correntes de *inrush*, além de serem desequilibradas, possuem um comportamento extremamente aleatório. Verifica-se que, nos instantes subseqüentes à energização, dependendo do momento de fechamento do disjuntor, do fluxo remanescente e das características do circuito magnético, tais correntes podem chegar a cerca de 15 vezes a corrente nominal do transformador, acarretando afundamentos trifásicos desequilibrados [28].

As faltas no sistema elétrico são a principal causa dos afundamentos de tensão, sobretudo aquelas originadas no sistema da concessionária, devidas à existência de centenas de quilômetros de linhas aéreas de transmissão e distribuição, que ficam sujeitas a vários tipos de fenômenos naturais e outras adversidades. Os curtos-circuitos em subestações terminais de linha e nos sistemas industriais têm menor taxa de ocorrência. Geralmente, nos sistemas industriais, a distribuição primária e secundária é feita através de cabos isolados, que possuem uma menor taxa de falta quando comparados às linhas aéreas [1, 28].

Portanto, das três fontes geradoras mencionadas, a ocorrência de faltas em um sistema elétrico é a que mais freqüentemente causa o afundamento de tensão, com especial destaque para o curto-circuito monofásico. Apesar das faltas trifásicas e bifásicas acarretarem afundamentos de tensão mais severos, os afundamentos provenientes de faltas fase-neutro e fase-terra são os mais freqüentes e, portanto, merecedores de maior atenção no estudo da deterioração da qualidade da energia. Verifica-se, na literatura, que aproximadamente 66% das ocorrências de afundamentos de tensão, observadas nos sistemas de energia, são devidas às faltas monofásicas, e 16%, às faltas bifásicas [8].

Como ilustração do fenômeno, a figura 2.2 mostra a alteração da forma de onda da tensão na ocorrência de um afundamento de tensão devido a um curto-circuito em um sistema elétrico.

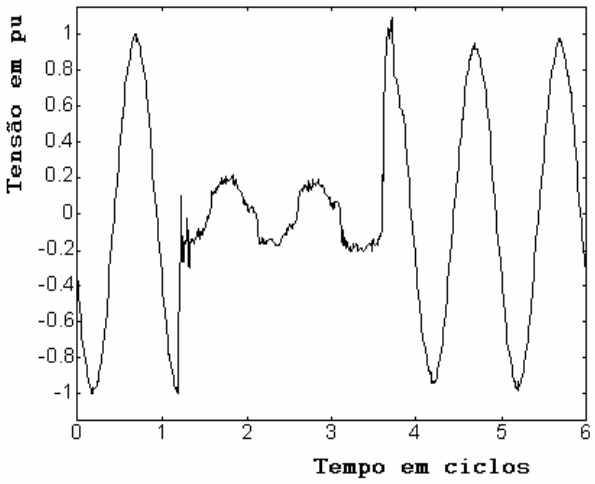

Figura 2.2 - Afundamento de tensão devido a um curto-circuito [28].

Verifica-se, nesta figura, que o valor eficaz da tensão decresce para aproximadamente 20% da amplitude pré-evento, durante um período de cerca de dois ciclos, retornando ao seu valor nominal ao término do distúrbio. Nesse caso, diz-se que o afundamento de tensão foi de 0,8 pu, uma vez que reduziu a tensão em 80% durante o evento. Da mesma forma, pode-se dizer que o afundamento de tensão foi para 0,2 pu, que é o valor da tensão remanescente no sistema durante a ocorrência do distúrbio. Esse assunto voltará a ser tratado com mais detalhes nos itens 2.3.1 e 2.3.2, que se seguem nesta dissertação.

Sabe-se que o nível de severidade do afundamento de tensão é proporcional ao decréscimo da tensão durante o distúrbio, à sua duração, ao número de fases envolvidas e ao grau de sensibilidade do equipamento sob distúrbio. Vale ressaltar que o número de fases envolvidas no afundamento tem influência direta sobre o seu grau de severidade. Assim, um afundamento de tensão para 0,7 pu proveniente de um curto-circuito fase-terra com determinada duração, por exemplo, poderá não causar danos e prejuízos a um determinado sistema elétrico, enquanto um afundamento de tensão para 0,8 pu devido a um curto-circuito fase-fase ou trifásico de mesma duração poderá causar a parada ou o mau funcionamento de equipamentos deste sistema [8].

Objetivando, assim, a determinação da magnitude do afundamento, a referência [29] ilustra um método utilizado para se estimar o afundamento de tensão mais crítico que uma carga pode sofrer em razão de uma determinada falta em uma outra carga ou linha pertencente a um mesmo barramento. Nesse método, considera-se um afundamento trifásico (por ser o mais crítico) e equilibrado (para simplificação dos cálculos). Para tanto, utiliza-se o circuito divisor de tensão mostrado na figura 2.3, o qual desconsidera, em um primeiro momento, os transformadores eventualmente existentes entre o barramento da fonte de alimentação e o local de ocorrência do curto-circuito.

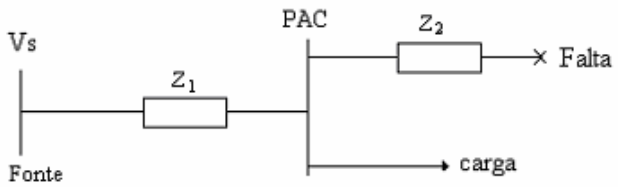

Figura 2.3 - Modelo de divisor de tensão para avaliação da magnitude do afundamento de tensão.

Desprezando-se a corrente de carga, antes e durante o afundamento, não haverá queda de tensão entre a carga e o ponto de acoplamento comum (PAC). Portanto, a tensão no PAC, que é igual à tensão nos terminais do equipamento, pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$V_{PAC} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} V_s \tag{2.1}$$

Onde:

V_{PAC}: Magnitude do afundamento de tensão no PAC, em pu;

V_s: Magnitude da tensão da fonte, em pu;

Z_1: Impedância equivalente entre a fonte e o PAC, em pu;

Z_2: Impedância equivalente entre o PAC e o ponto onde ocorreu a falta, em pu.

Na equação ora apresentada, caso a impedância de falta tenha um valor significativo, esta poderá ser incluída no valor de Z_2.

Deve-se ainda levar em conta que, além da queda de tensão durante um afundamento, freqüentemente se associa um defasamento entre as tensões pré-evento e durante o afundamento, por causa da alteração na relação X/R entre a fonte e o alimentador. Assim, para o modelo usado e descrito na figura 2.3, esse defasamento súbito do ângulo de fase (*phase-angle jump*) pode ser expresso pela relação:

$$\Delta\Phi = \arg\left[\dot{V}_{PAC}\right] = arctg\left(\frac{X_2}{R_2}\right) - arctg\left(\frac{X_1 + X_2}{R_1 + R_2}\right) \qquad (2.2)$$

Onde:

$\Delta\Phi$: Defasamento súbito do ângulo de fase (*phase-angle jump*);

X_1 e X_2: Reatâncias das impedâncias Z_1 e Z_2, respectivamente;

R_1 e R_2: Resistências das impedâncias Z_1 e Z_2, respectivamente.

A Figura 2.4 mostra como ilustração o exemplo de um defasamento súbito do ângulo de fase da tensão, devido a um afundamento de tensão. A tensão tracejada em cor verde, correspondente à tensão do sistema, caso não houvesse o afundamento de tensão, ressalta o tamanho do defasamento do ângulo de fase.

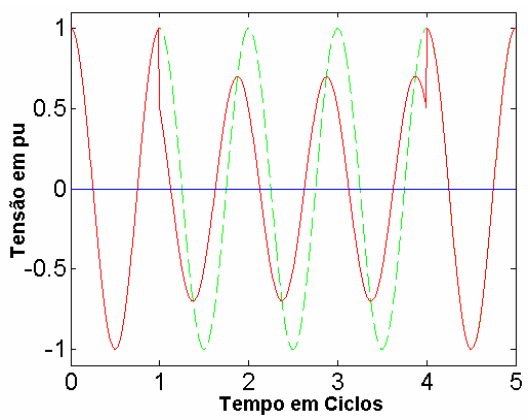

Figura 2.4 – Defasamento súbito do ângulo de fase da tensão em razão de um afundamento [29].

Assim como a variação súbita da amplitude da tensão, o defasamento súbito do ângulo de fase também pode acarretar falhas na operação de dispositivos e equipamentos elétricos, como será descrito no item 2.4 a seguir.

2.2.2 ELEVAÇÃO DE TENSÃO

Define-se elevação de tensão como o aumento do valor eficaz da tensão para acima de 1,1 pu por um curto período de tempo. Essas elevações são mais comumente causadas por faltas fase-terra no sistema, mas podem também ocorrer por manobra de cargas, tais como motores de grande porte, e pela entrada em operação de bancos de capacitores.

Durante uma falta fase-terra, enquanto a fase afetada sofre um afundamento de tensão, as fases sãs ou não afetadas podem sofrer uma elevação de tensão. É a relação X_0/X_1 da reatância de seqüência zero para a reatância de seqüência positiva do sistema que irá determinar o coeficiente de aterramento e, conseqüentemente, a amplitude das tensões nas fases sãs [30]. Com isso, conclui-se que, apesar de a principal causa da elevação de tensão ser a mesma do afundamento de tensão, a ocorrência da primeira não chega a ser tão freqüente quanto a do segundo.

A figura 2.5 ilustra o aparecimento de uma elevação de tensão em uma fase sã como conseqüência de uma falta fase-terra.

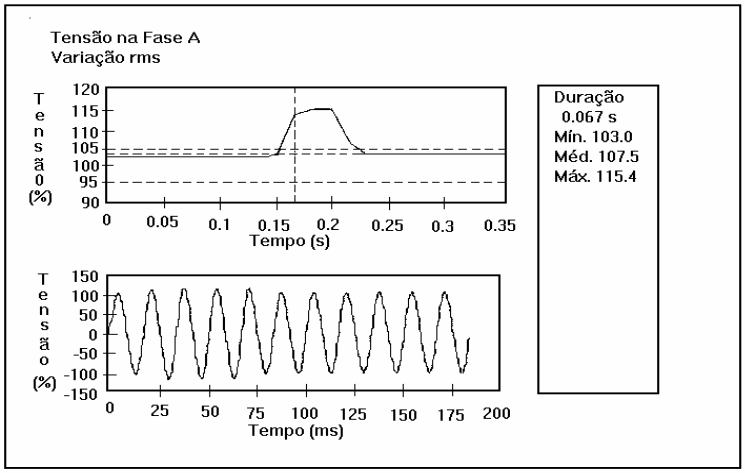

Figura 2.5 - Elevação de tensão em uma fase sã em razão de uma falta fase-terra [1].

Os efeitos das elevações de tensão nos equipamentos e os custos envolvidos serão discutidos mais detalhadamente no item 2.4.

2.2.3 INTERRUPÇÃO DE CURTA DURAÇÃO

A interrupção de curta duração ocorre quando a tensão eficaz reduz para um valor menor ou igual a 0,1 pu por um curto período de tempo. Esse distúrbio ocorre principalmente como conseqüência da atuação da proteção, decorrente de curtos-circuitos no sistema, falhas em equipamentos ou mau funcionamento de sistemas de controle [1].

Nesse sentido, a duração de uma interrupção devida a uma falta no sistema elétrico é determinada pelo tempo de operação dos dispositivos de proteção. Os religamentos instantâneos, por exemplo, geralmente limitam a interrupção causada por uma falta não-sustentada a um tempo de duração inferior a 0,5 segundo. A duração de uma interrupção decorrente de uma falha

no funcionamento do equipamento ou da perda de conexão pode variar bastante [1].

Algumas interrupções podem ser precedidas por afundamentos e até elevações de tensão, quando essas interrupções são devidas às faltas no sistema. Os distúrbios que precedem à interrupção ocorrem no intervalo de tempo entre o início da falta e a atuação da proteção, como ilustra a figura 2.6 para um sistema cuja tensão nominal é de 8 kV, aproximadamente [1].

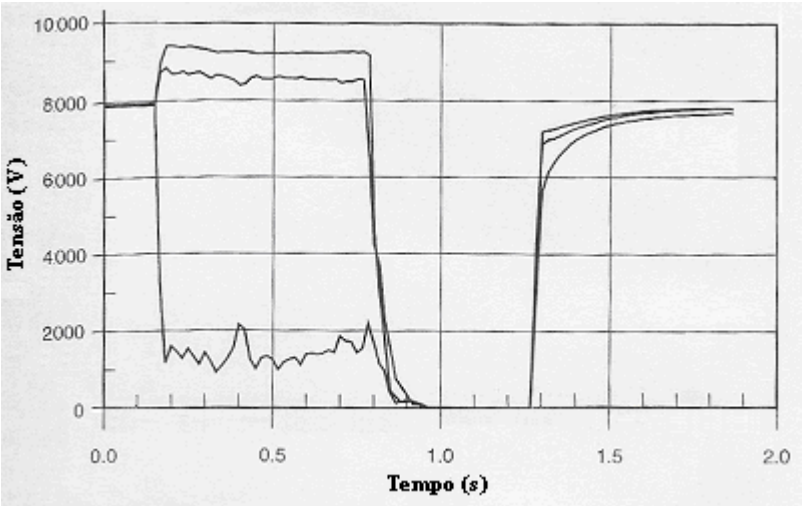

Figura 2.6 – Tensão eficaz das três fases de uma interrupção de curta duração devida a uma falta fase-terra [1].

A figura 2.6 ilustra o exemplo de uma falta fase-terra responsável pelo surgimento dos três distúrbios que compõem as VTCDs. Entre o início da falta e a atuação do religador, ocorrem um afundamento de tensão na fase afetada e elevações de tensão nas fases sãs, seguidos de interrupção e subseqüente restabelecimento das tensões nas três fases.

2.3 CLASSIFICAÇÃO DAS VTCDS

Para melhor caracterização da severidade de cada um dos distúrbios que compõem as VTCDs, não só em função da sua amplitude, mas também da sua duração, várias normas foram propostas.

Cada norma possui os seus valores típicos de duração e amplitude de tensão que caracterizam as categorias das VTCDs. No geral, há semelhanças e diferenças entre elas.

Nesse contexto, serão descritas a seguir as definições e classificações adotadas pela norma internacional mais conhecida e comumente utilizada como referência, a IEEE Std 1159, e pelos procedimentos de rede nacionais formulados pelo ONS e pela Aneel.

2.3.1 SEGUNDO O IEEE

A norma IEEE Std 1159 [2] trata das práticas recomendadas pelo IEEE para o monitoramento da qualidade da energia elétrica. Nela estão as definições e classificações para os diversos distúrbios da qualidade da energia. Seguem as suas definições relativas às VTCDs.

- **Afundamento de tensão:** "Um decréscimo entre 0,1 e 0,9 pu do valor eficaz da tensão, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto";
- **Elevação de tensão:** "Um acréscimo do valor eficaz da tensão, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. Os valores típicos estão compreendidos entre 1,1 e 1,8 pu";
- **Interrupção de curta duração** (a norma classifica esse distúrbio em duas categorias);

- ✓ **Interrupção momentânea:** "A completa perda de tensão (<0,1 pu) em uma ou mais fases por um período de tempo entre 0,5 ciclo e 3 segundos";
- ✓ **Interrupção temporária:** "A completa perda de tensão (<0,1 pu) em uma ou mais fases por um período de tempo entre 3 segundos e 1 minuto".

As categorias e as características típicas das VTCDs descritas pela norma são detalhadas na tabela 2.1, a seguir.

Tabela 2.1 – Categorias e características típicas das VTCDs segundo o IEEE [2].

Categoria	Duração Típica	Magnitude de Tensão Típica
1. Instantânea		
1.1 Afundamento de tensão	0,5 a 30 ciclos	0,1 a 0,9 pu
1.2 Elevação de tensão	0,5 a 30 ciclos	1,1 a 1,8 pu
2. Momentânea		
2.1 Interrupção	0,5 ciclos a 3s	< 0,1 pu
2.2 Afundamento de tensão	30 ciclos a 3s	0,1 a 0,9 pu
2.3 Elevação de tensão	30 ciclos a 3s	1,1 a 1,4 pu
3. Temporária		
3.1 Interrupção	3s a 1 min	< 0,1 pu
3.2 Afundamento de tensão	3s a 1 min	0,1 a 0,9 pu
3.3 Elevação de tensão	3s a 1 min	1,1 a 1,2 pu

A tabela 2.1 mostra que, segundo o IEEE, qualquer alteração no valor da tensão eficaz com duração inferior a 0,5 ciclo não será caracterizada como VTCD. Da mesma forma, qualquer variação no valor eficaz da tensão com uma duração maior do que um minuto também não será caracterizada como

VTCD. Nesse caso específico, será caracterizada como uma VTLD (Variação de Tensão de Longa Duração).

Essa mesma norma recomenda ainda a utilização da tensão remanescente do sistema para caracterizar a magnitude da VTCD, ou seja, um afundamento de 20% significa que a tensão foi reduzida para 0,8 pu de seu valor normal, e não reduzida para 0,2 pu. Da mesma forma, uma elevação de tensão para 1,1 pu significa que a tensão do sistema aumentou em 10% e não em 110%.

2.3.2 SEGUNDO O ONS E A ANEEL

De acordo com os Procedimentos de Rede [3], elaborados pelo ONS, no item Padrões de Desempenho da Rede Básica, Submódulo 2.2, entende-se por Variação de Tensão de Curta Duração: "um desvio significativo da amplitude da tensão por um curto intervalo de tempo".

As denominações das VTCDs segundo o ONS são descritas na tabela 2.2, a seguir.

Tabela 2.2 – Denominações das VTCDs segundo o ONS [3].

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da Tensão*
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	$t \leq 3s$	$V < 0{,}1\,pu$
	Afundamento Momentâneo de Tensão	$1ciclo \leq t \leq 3s$	$0{,}1\,pu \leq V < 0{,}9\,pu$
	Elevação Momentânea de Tensão		$V > 1{,}1\,pu$
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	$3s < t \leq 1\min$	$V < 0{,}1\,pu$
	Afundamento Temporária de Tensão		$0{,}1\,pu \leq V < 0{,}9\,pu$
	Elevação Temporária de Tensão		$V > 1{,}1\,pu$

*valor eficaz em relação à tensão nominal.

Esse documento ainda esclarece como se deve mensurar a amplitude, a duração e a severidade do distúrbio.

- A amplitude da VTCD é definida pelo valor extremo do valor eficaz (média quadrática) da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado, enquanto perdurar o evento.
- A duração do distúrbio é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão ultrapassa determinado limite e o instante em que o mesmo volta a cruzar este limite. Em outras palavras, se um sistema com tensão de 1 pu sofre um curto-circuito levando essa tensão para 0,5 pu, e considerando que há restauração completa da tensão após o término do distúrbio, o afundamento só se iniciará no instante em que a tensão remanescente ficar abaixo de 0,9 pu e terminará quando a mesma se igualar ou ultrapassar esse mesmo valor. Portanto, nesse caso, a duração do afundamento de tensão é inferior à duração do curto-circuito.
- A severidade da VTCD em cada fase deve ser avaliada levando-se em conta não só a sua amplitude e duração, mas também a freqüência de ocorrência em determinado período de tempo.

Entre agosto e setembro de 2005, a Aneel deu início aos trabalhos de elaboração e posterior consolidação dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (Prodist) [27]. Uma vez consolidados, os Procedimentos de Distribuição servirão como documentos regulatórios na forma de regulamentações, normatizações e padronizações que têm como objetivo possibilitar a conexão elétrica aos sistemas de distribuição por usuários, garantindo que os indicadores de desempenho ou de qualidade de serviço sejam atingidos de forma clara e transparente [31].

O Módulo 8 destes Procedimentos contempla os conceitos da Qualidade da Energia Elétrica, fornecendo definições e procedimentos apropriados para os distúrbios elétricos. Todos os procedimentos referentes às VTCDs são direcionados para os consumidores do grupo A, que correspondem às unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou ainda inferior a 2,3 kV, e que são atendidas a partir de sistema de distribuição subterrâneo [32].

Uma das referências utilizadas na elaboração do Módulo 8 do Prodist foi justamente o submódulo 2.2 dos Procedimentos de Rede elaborados pelo ONS [3], de modo que a classificação das VTCDs ficou idêntica à utilizada nessa referência, sendo desnecessário, portanto, fazer-se uma repetição da tabela 2.2 ilustrada anteriormente. Adicionalmente, o documento descreve uma metodologia de medição das VTCDs, a qual também considera a freqüência de ocorrência para avaliação da severidade do distúrbio.

Ambos os documentos nacionais não mencionam se a tensão remanescente do sistema deve ou não ser utilizada para caracterizar a amplitude da VTCD. Portanto, neste trabalho, utilizar-se-á a tensão remanescente para caracterizar a magnitude do distúrbio, em concordância com a proposição do IEEE descrita no item anterior.

2.4 EFEITOS E PREJUÍZOS CAUSADOS PELAS VTCDS

Consumidores residenciais, comerciais e, principalmente, os industriais de todo o mundo têm vivenciado problemas de falha de funcionamento dos equipamentos como conseqüência das VTCDs. Essas falhas têm representado custos que podem variar de um valor ínfimo a milhões de dólares, dependendo do equipamento afetado e do tipo de processo envolvido.

Essa situação vem se intensificando de dez anos para cá, com a crescente utilização de equipamentos à base de microeletrônica e eletrônica de potência, tendo em vista sua alta sensibilidade às variações da tensão de suprimento.

Pode-se dizer que os equipamentos elétricos, em geral, possuem diferentes graus de sensibilidade às VTCDs. Essa sensibilidade está associada ao tipo de equipamento, sistema de controle e aplicação. Conseqüentemente, há uma dificuldade em se identificar que características de uma certa VTCD terão maiores possibilidades de acarretar falha de operação de um determinado equipamento. As características mais comumente utilizadas na quantificação dos efeitos são a amplitude e a duração do distúrbio. Outras, menos utilizadas, são o defasamento súbito do ângulo de fase, o desequilíbrio de tensão durante o evento e pontos da onda onde se inicia e termina o distúrbio. Nesse sentido, a referência [1] divide os equipamentos sensíveis às VTCDs em três categorias:

- **Equipamentos sensíveis somente à variação de amplitude**: Nesse grupo, estão inclusos dispositivos como relés de sobre-corrente e subtensão, controles de processos e controle de acionamento de motores. Os dispositivos desse grupo são sensíveis à mínima (ou máxima) magnitude de tensão existente durante o distúrbio. A duração do distúrbio tem um menor grau de importância.
- **Equipamentos sensíveis tanto à amplitude quanto à duração**: Esse grupo é formado por todos os equipamentos que virtualmente utilizam fontes eletrônicas de energia. Um equipamento desse grupo falha ou pára de funcionar quando a tensão de suprimento reduz (ou se eleva) além dos limites especificados. Portanto, a característica mais importante desse

tipo de equipamento é o tempo em que a tensão permanecerá fora dos limites que garantem o seu correto funcionamento.

- **Equipamentos sensíveis a outras características além da amplitude e da duração:** Alguns dispositivos são sensíveis a outras características das VTCDs, tais como desvio súbito do ângulo de fase (que gera problemas no ângulo de disparo dos ASDs), o ponto da onda onde se iniciou o distúrbio, ou qualquer oscilação transitória durante o evento. Essas são características mais sutis do que a duração e a amplitude, e os seus impactos são bem mais difíceis de ser generalizados.

Apesar de haver equipamentos sensíveis a outras características do distúrbio além da amplitude e da duração, um dos métodos mais comuns de quantificação da sensibilidade dos equipamentos às VTCDs consiste na utilização de gráficos de magnitude em função da duração do distúrbio, denominado de curva de sensibilidade (ou tolerância) de um dado equipamento. Vários estudos relacionados ao levantamento de curvas de sensibilidade de diversos equipamentos e dispositivos têm sido registrados na literatura.

A parada ou o mau funcionamento de equipamentos devido às VTCDs nem sempre está associado à sensibilidade dos mesmos. Muitas vezes, o seu desligamento inoportuno está relacionado à atuação de proteções que promovem o corte no fornecimento de energia de um ou mais equipamentos. Nesse contexto, o conhecimento dos limites de tolerância dos equipamentos sensíveis às variações de tensão, além de orientar para a sua proteção contra falhas e danos, pode permitir também a ampliação do limiar de sensibilidade dos dispositivos de proteção, promovendo a redução do número de paradas inoportunas.

A figura 2.7 mostra a curva de sensibilidade do *Information Tecnology Industrial Council* (ITIC), a qual é aplicável à maioria dos equipamentos e dispositivos monofásicos de informática, para uma tensão nominal de 120V e freqüência de 60Hz.

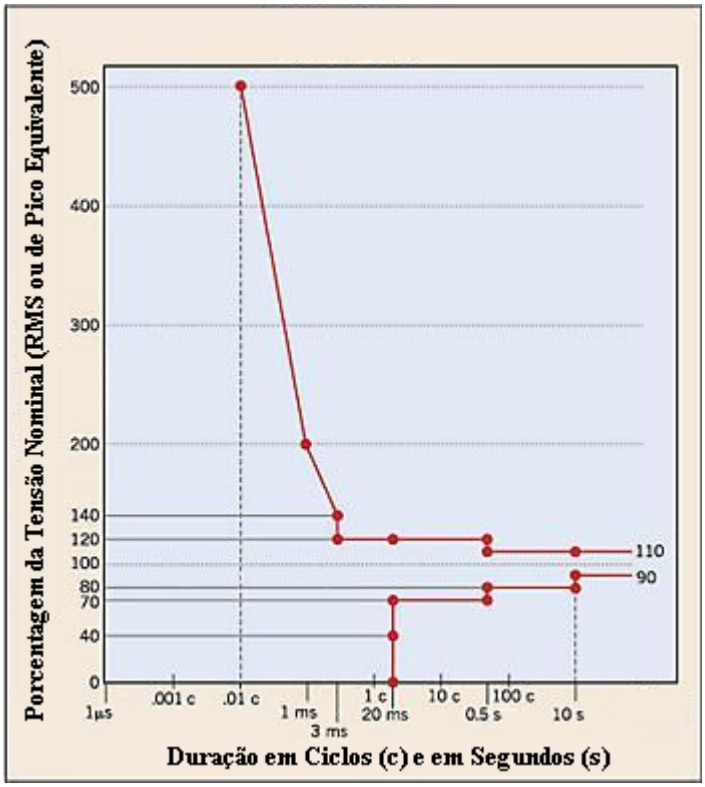

Figura 2.7 – Curva ITIC de sensibilidade de equipamentos e dispositivos de informática às VTCDs [1].

Nesta figura, o eixo das abscissas indica a duração do distúrbio em ciclos ou em segundos e o eixo das ordenadas, a magnitude da tensão eficaz durante o distúrbio, expressa na forma percentual da tensão nominal. Se o ponto considerado para uma determinada VTCD ficar na região compreendida entre as duas curvas, o equipamento não apresentará falha na operação. Se ficar acima da curva superior, poderá haver algum tipo de dano no equipamento, como a queima de um ou mais acessórios. Se o ponto estiver abaixo da curva inferior, haverá a falha na sua operação, mas provavelmente não ocorrerão danos no equipamento.

A interpretação das curvas da figura 2.7, feita anteriormente, está relacionada aos efeitos mais comuns dos tipos de VTCDs nos equipamentos eletro-eletrônicos em geral. As interrupções e os afundamentos de tensão normalmente não causam danos às cargas sensíveis, mas podem afetar a correta operação desses equipamentos. Já as elevações de tensão podem causar desde a redução da vida útil, sem efeitos significativos sobre o desempenho na operação, até a completa queima dos equipamentos [33].

Os impactos das VTCDs sobre os consumidores industriais, comerciais e residenciais ocorrem de maneira diferenciada para cada um deles. Isso se deve, dentre outros fatores, ao grau de sensibilidade dos equipamentos eletro-eletrônicos presentes em cada instalação, das particularidades dos processos e dos sistemas de controle envolvidos. Como na área industrial há uma maior concentração de cargas eletrônicas sensíveis, devida inclusive aos contínuos investimentos na automatização de processos, é natural que esta seja a classe de consumidores considerada a maior vítima da ocorrência desses distúrbios. As alterações no desempenho dos equipamentos podem provocar interrupções parciais ou totais de processos produtivos, com os conseqüentes prejuízos associados a paradas de produção, perda de produtividade, perda de insumos, reparo e reposição de equipamentos danificados etc.

Dos tipos de VTCDs, o afundamento de tensão tem sido o maior causador de prejuízos às classes de consumidores, com especial destaque para os consumidores industriais. Um único afundamento de tensão pode não ser tão danoso a uma indústria, quando comparado a uma única interrupção de curta ou longa duração. Entretanto, como ocorrem mais afundamentos do que interrupções, o prejuízo total devido ao conjunto dos primeiros é significativamente maior. Além disso, existem alguns casos em que a ocorrência de um único afundamento de tensão pode ser tão prejudicial quanto uma interrupção de longa duração. Pode-se citar como exemplo as

indústrias têxteis com processos e sistemas acionados a velocidade variável, cujo afundamento de tensão para 0,8 pu, com duração de apenas 6 ciclos, pode ser tão prejudicial quanto a perda de produtividade causada pela interrupção do fornecimento de energia por 2 horas [34].

Os efeitos das VTCDs sobre os principais equipamentos eletro-eletrônicos utilizados na indústria são resumidos a seguir [35, 36]:

- Perda de programação de microprocessadores e CLPs;
- Atuação das bobinas de contatores e relés auxiliares, com conseqüentes desligamentos de cargas e equipamentos através da lógica do sistema de comando e controle;
- Desligamento temporário de lâmpadas de descarga, como as de vapor de mercúrio, que demoram alguns minutos para reacenderem;
- Variações de velocidade ou torque dos acionamentos em corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), que, dependendo do tipo de processo, poderá comprometer a qualidade do produto, ou até provocar a parada de produção;
- Desligamento dos acionamentos devido à atuação de dispositivos de proteção associados, quando detectam condições de risco;
- Falhas de comutação em pontes controladas, afetando o disparo das chaves;
- Estresse, redução da vida útil e queima de componentes eletrônicos como conseqüência das elevações de tensão.

Por outro lado, os efeitos das VTCDs sobre os equipamentos eletro-eletrônicos de consumidores residenciais e comerciais podem ser divididos em dois grupos:

- **Efeitos que só geram insatisfação do consumidor:** Estão contidos nesse grupo todos os efeitos que não geram prejuízos diretos aos consumidores e sim um grau de insatisfação perante a concessionária de energia. Como exemplo, pode-se citar a perda de memória e de programação de relógios digitais, fornos de microondas, videocassetes, desligamento de microcomputadores e televisores etc.
- **Efeitos causadores de prejuízos financeiros:** Estão contidos nesse grupo efeitos como a queima de equipamentos, geralmente relacionados com as elevações de tensão, e perdas de arquivos e documentos importantes contidos em microcomputadores, como uma conseqüência da interrupção na operação ou queima de algum elemento vital dos equipamentos.

Na literatura, têm sido relatados resultados de pesquisas e estimativas indicando que países desenvolvidos têm sofrido prejuízos anuais da ordem de dezenas de bilhões de dólares [37] em decorrência de falhas de equipamentos eletrônicos provocadas pelas VTCDs.

No Brasil, embora não haja estimativas globais de custos associados a esses distúrbios, pode-se inferir que, mesmo em escala menor, as indústrias têm tido prejuízos elevados devidos às VTCDs [35].

A determinação dos custos relativos às paradas dos processos produtivos devidas às VTCDs em um determinado período deve ser feita de forma individualizada para cada consumidor. Para que seja possível determinar esses custos, é necessário proceder-se a um levantamento de algumas informações operacionais dos consumidores, tais como [8, 38]:

- Horário de funcionamento (comercial ou 24 horas por dia);
- Valor estimado do faturamento do consumidor por minuto;

- Tempo necessário em minutos para a retomada da produção quando ocorrem paradas por VTCDs;
- Perda de material em caso de paradas;
- Custo para o reprocessamento de materiais;
- Custo de mão-de-obra para reiniciar a produção;
- Danos causados a equipamentos da planta industrial;
- Multas devidas a atrasos nas entregas do produto;
- Insatisfação do cliente;
- Dentre outras.

O tempo gasto para a retomada da produção após a ocorrência de um afundamento de tensão pode variar de 1 a 3 horas, para afundamentos com duração inferior a 300 ms. Em termos médios, o custo total causado pela interrupção do fornecimento de energia por 4 horas é de US$ 74.835,00. Já para um afundamento de tensão para 0,9 pu ou 0,8 pu com duração de apenas 15 ciclos, esse custo médio pode ser de US$ 7.694,00, o que mostra a grandeza dos custos relacionados ao fenômeno afundamento de tensão em relação aos custos decorrentes da perda total do fornecimento de energia [8].

Como exemplo de custo de parada de processos devida a uma interrupção de curta duração, pode-se citar o caso descrito na referência [39] onde 5 ciclos de interrupção em uma indústria de fabricação de vidro pode significar um prejuízo de US$ 200.000,00.

Consumidores residenciais são muito numerosos, mas a ordem de grandeza dos prejuízos relacionados às VTCDs é relativamente pequena, podendo atingir US$ 64,00 com média em torno de US$5,40 para casos extremos de interrupção por 1 hora. Já para os consumidores industriais na mesma situação, tais cifras podem alcançar valores superiores a 1 milhão de dólares, com média em torno de US$9.400,00 [8].

2.5 MÉTODOS DE MITIGAÇÃO DOS DISTÚRBIOS

Conforme observado no item anterior, a necessidade da minimização dos prejuízos causados pelas VTCDs fez com que diversas técnicas e dispositivos mitigadores dos efeitos dos distúrbios fossem desenvolvidos, visando desde à prevenção da sua ocorrência até à redução ou extinção dos seus efeitos. Dessa forma, as alternativas de mitigação desses distúrbios podem ser divididas em 3 grandes grupos:

- **Grupo 1**: Modificações de características do sistema de potência da concessionária até o usuário final;
- **Grupo 2**: Instalação de equipamentos inibidores dos distúrbios entre o suprimento e a carga sensível;
- **Grupo 3**: Melhorias na imunidade das cargas e equipamentos.

Na prática, observa-se que à medida que se percorre o sistema de energia no sentido do usuário final para a fonte do sistema de alimentação, mais onerosa se torna a solução para os distúrbios de qualidade de energia [1]. Assim, os itens a seguir mostram que, a depender do sistema, podem existir exceções a essa regra quando o distúrbio em questão é uma VTCD. De qualquer forma, para um determinado sistema elétrico, as medidas de mitigação de qualquer distúrbio elétrico devem ser agrupadas em uma escala de eficiência e custos. Nesse sentido, a realização de estudos econômicos deve indicar qual medida ou conjunto delas terá a menor relação custo/benefício.

2.5.1 MODIFICAÇÃO NO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO

Nesse grupo, estão enquadradas todas as ações de modificação de características do sistema elétrico que resultem desde a redução da ocorrência do distúrbio até o aumento de sua suportabilidade.

Como a principal causa da ocorrência das VTCDs são os curtos-circuitos, a maioria das ações desse grupo estão dirigidas para a redução das suas freqüências de ocorrência, e do impacto gerado na rede elétrica. Tais técnicas já eram constantemente utilizadas antes mesmo do conceito de Qualidade da Energia Elétrica e de suas características serem concebidas, uma vez que sempre houve uma intensa preocupação com a ocorrência e os efeitos das faltas no sistema elétrico. Essas ações podem ser divididas em 3 subgrupos [29]:

- **Redução do número de curtos-circuitos**: As ações desse subgrupo podem ser resumidas em:
  - ✓ Substituição de redes aéreas por subterrâneas;
  - ✓ Proteção de redes aéreas através da utilização de cabos cobertos;
  - ✓ Implantação de podas contínuas de árvores próximas às redes aéreas convencionais;
  - ✓ Aumento do espaçamento entre condutores de fases;
  - ✓ Aumento do nível de isolação;
  - ✓ Limpeza regular das cadeias de isoladores das torres instaladas em locais de grande poluição ou sob efeitos de acumulação de sal;
  - ✓ Aumento da freqüência de manutenção e inspeção;
  - ✓ Dentre outras.

- **Ajustes e alterações nos sistemas de proteção***:* Constituem esse subgrupo todas as ações que visem à redução do tempo de eliminação da falta e, quando possível, ao aumento do limiar de sensibilidade dos dispositivos de proteção. Como dito anteriormente, através do conhecimento dos limites de sensibilidade dos equipamentos, pode ser possível a ampliação do limiar de sensibilidade das proteções, o que representa uma ação que geralmente está livre de custos de aquisição de novos equipamentos. Por isso, essa ação costuma ser a primeira proposta no sentido de se reduzir ao máximo as falhas causadas por tais fenômenos [8]. As ações que visam à redução do tempo de eliminação da falta são resumidas a seguir:
  - ✓ Utilização de disjuntores mais rápidos;
  - ✓ Utilização de relé de sobrecorrente de tempo reverso;
  - ✓ Instalação de disjuntores e religadores em pontos estratégicos, dependendo da localização das cargas críticas;
  - ✓ Utilização de chaves de interrupção rápida na transmissão;
  - ✓ Redução do intervalo de tempo de coordenação na transmissão;
  - ✓ Proteção de *back up* rápida em sistemas de transmissão através da sobreposição de relés para proteção de distância e utilização de proteção de falhas de atuação (*breaker-failure protection*);
  - ✓ Dentre outras.

- **Aumento da suportabilidade do sistema de potência***:* Compõem esse subgrupo todas as ações que objetivem mudanças

no sistema de forma que os curtos-circuitos resultem em eventos menos severos na interface com o consumidor. São ações desse subgrupo:

- ✓ Instalação de componentes de redundância para a redução das interrupções;
- ✓ Em sistemas com geração distribuída, instalação do gerador próximo às cargas sensíveis; dentre outras.

Deve-se ressaltar que a instalação de componentes de redundância, apesar de fazer com que as cargas fiquem mais imunes às interrupções, pode deixá-las mais susceptíveis aos afundamentos de tensão. Assim, a sua utilização vai depender dos tipos de cargas e dos níveis típicos de afundamentos que ocorrem no sistema.

2.5.2 INSTALAÇÃO DE EQUIPAMENTOS INIBIDORES DOS EFEITOS

Fazem parte do Grupo 2 todos os equipamentos a serem instalados com o intuito de dar condição de operação contínua às cargas durante a ocorrência de uma VTCD. Enquanto o Grupo 1 compõe técnicas e dispositivos que vão desde a prevenção da ocorrência do distúrbio até o aumento da suportabilidade do sistema para a redução dos efeitos das VTCDs, esse grupo tem como objetivo único e exclusivo fazer com que as cargas sensíveis não sofram os efeitos desses distúrbios.

Compõem esse grupo equipamentos de eletrônica de potência (UPS e compensadores estáticos avançados), eletromagnéticos (transformadores ferrorressonantes) e eletromecânicos (conjunto motor-gerador). Dependendo das características, tais como potência, nível de tensão e princípio de funcionamento, esses equipamentos podem ser inseridos no sistema de média

tensão, a jusante do transformador de potência e a montante do transformador de distribuição ou próximo à(s) carga(s) sensível(is), imediatamente anterior(es) à(s) mesma(s) ou ao(s) seu(s) acionamento(s).

Vale ressaltar que nem todos os equipamentos citados anteriormente podem estar aptos a inibir todos os tipos de VTCD. Por outro lado, alguns desses equipamentos podem mitigar outros distúrbios elétricos, tais como flutuação e distorção harmônica de tensão.

Como a maioria dos equipamentos inibidores dos efeitos das VTCDs já está devidamente detalhada nas referências [1, 4, 8, 28, 29, 35], a apresentação dos mesmos é desnecessária. Contudo, se torna oportuno o detalhamento do princípio de funcionamento dos compensadores estáticos avançados que compõem a família de dispositivos *Custom Power*.

2.5.2.1 COMPENSADORES ESTÁTICOS AVANÇADOS DE SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO – *CUSTOM POWER*

Como já foi explicado no Capítulo 1, o conceito *Custom Power* surgiu da verificação de que os compensadores estáticos avançados, até então utilizados nos sistemas de transmissão dentro da concepção FACTS, possuíam grandes potencialidades como controladores de fluxo de potência e reguladores de tensão. Essas habilidades, aliadas à necessidade de um melhor controle do reativo nas cargas elétricas e, principalmente, à contínua preocupação com a proteção de cargas sensíveis frente aos distúrbios elétricos, fizeram com que tais tecnologias fossem adaptadas e aplicadas aos sistemas de distribuição.

Os compensadores estáticos avançados de distribuição representam, hoje, o que há de mais moderno em termos de mitigação de distúrbios elétricos, com especial destaque para as variações de tensão de curta duração.

O fato de utilizarem conversores VSI-PWM, dotados de controle vetorial, faz com que o tempo de resposta dos compensadores seja muito curto, chegando em muitos casos a valores inferiores a 4 ms, representando um tempo bem menor do que o de reguladores tradicionais como os *tap-changing transformers* (reguladores de tensão através de *taps* em transformadores).

Existem basicamente 3 tipos de compensadores estáticos avançados de distribuição, que são apresentados a seguir, de acordo com a forma de conexão com a rede:

- Conexão paralela: Compensador Estático Paralelo Avançado de Distribuição (*D-StatCom*);
- Conexão série: Restaurador Dinâmico de Tensão, objeto de estudo desta dissertação (DVR);
- Conexão série-paralela: Compensador Unificado de Distribuição (UCPC).

Dependendo das características da rede elétrica e dos próprios compensadores, a injeção de harmônicos no sistema, por parte desses equipamentos, pode ser um motivo de preocupação. Por isso, diversos estudos ocupam-se em desenvolver variadas topologias para os compensadores, sejam elas baseadas em conversores de seis e doze pulsos, multi-níveis ou PWM [36], com o intuito de reduzir as taxas de distorção harmônica geradas. Outra opção para a resolução desse tipo de problema pode ser a adoção de filtros sintonizados ou amortecidos.

Serão descritos a seguir os princípios de funcionamento desses três equipamentos, bem como suas vantagens e desvantagens na mitigação das VTCDs. Apesar de todos serem equipamentos trifásicos, as suas configurações básicas serão apresentadas através de ilustrações unifilares.

a) Compensador Paralelo Avançado de Distribuição (*D-StatCom*)

O D-StatCom (*Distribution Advanced Static Var Compensator*) é um compensador estático avançado ligado em derivação com o sistema que possui como objetivo principal o controle e limitação da flutuação de potência reativa requerida pela carga. Embora não seja especificamente projetado para a mitigação das VTCDs, vem sendo utilizado também para esse fim, uma vez que seu princípio de funcionamento possibilita a minimização dos efeitos das VTCDs.

Na sua configuração mais simples, o *D-StatCom* possui um inversor VSI-PWM associado a um circuito de controle, um capacitor conectado ao lado CC do inversor e um transformador de acoplamento conectando o inversor em derivação com o sistema CA, conforme mostrado na figura 2.8. Existem outras topologias utilizadas, porém os componentes básicos, suas formas de conexão e o princípio de funcionamento do equipamento são semelhantes.

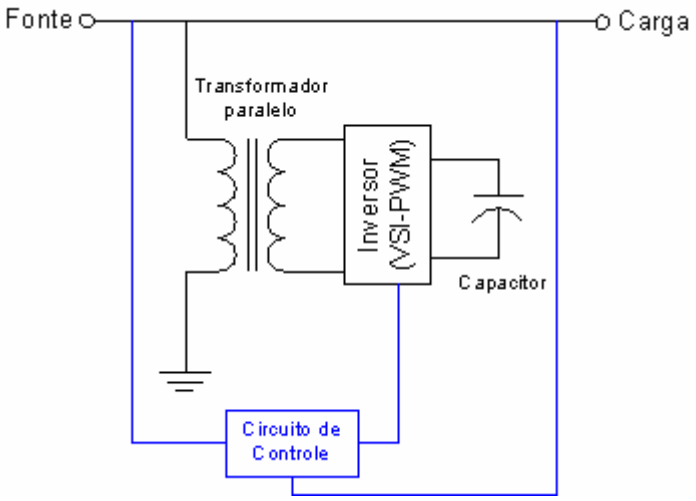

Figura 2.8 – Configuração básica do *D-StatCom*.

O *D-StatCom* comporta-se como uma fonte de tensão controlada em amplitude e em fase através do circuito inversor. O capacitor, que é o armazenador de energia do equipamento, simula uma fonte de tensão em corrente contínua. Já o transformador possui duas funções básicas: compatibilizar os níveis de impedância do compensador e do sistema CA e, muitas vezes, minimizar o conteúdo harmônico da tensão injetada pelo inversor (dependendo do arranjo adotado) [36].

Para a mitigação dos afundamentos e elevações de tensão, o *D-StatCom* gera uma tensão CA que provoca a injeção de uma corrente no sistema através do transformador de acoplamento, acarretando a correção da amplitude da tensão da carga sensível. Como a tensão gerada pelo equipamento tem o controle não só da amplitude, mas ainda do ângulo de fase, possíveis deslocamentos súbitos do ângulo de fase durante a ocorrência do distúrbio são prontamente corrigidos.

Esse compensador estático também tem a capacidade de suprir completamente a tensão do sistema, em uma interrupção de curta duração. Durante a ocorrência desse distúrbio, o *D-StatCom* se comporta como um gerador, suprindo a tensão nominal da carga. É claro que, para a eficaz mitigação desse distúrbio e de todos os tipos de VTCDs, é necessário não apenas que o conjunto tenha um tempo de resposta rápido, mas também que haja energia suficiente armazenada no capacitor.

Como o *D-StatCom* é mais comumente utilizado na média tensão, apresenta a vantagem de proteger um maior número de cargas sensíveis às VTCDs. Porém, possui a desvantagem de demandar um elevado valor de potência aparente durante a mitigação do distúrbio. Enquanto a maioria dos equipamentos mitigadores corrige apenas a tensão do lado da carga, o *D-StatCom* corrige também a tensão do lado da fonte [20], demandando a injeção de elevadas correntes.

Todo o sistema *D-StatCom* é projetado considerando um tempo máximo de duração e um valor máximo de magnitude do distúrbio. Ultrapassando-se esses valores, o distúrbio não será integralmente mitigado.

Existem algumas topologias que ainda utilizam fontes de energia externas, como bancos de baterias, alimentando o capacitor do lado CC para aumentar a capacidade do compensador nas suas diversas funções. Quando não há fonte de energia externa, o recarregamento do capacitor pode ser feito através do inversor, que absorve energia do próprio sistema.

A depender do tipo de controle e da fonte de energia no lado CC do inversor, o *D-StatCom* pode atuar ainda como mitigador de outros distúrbios elétricos, através da compensação de correntes harmônicas e correção de desequilíbrios de corrente, por exemplo.

b) Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR)

O *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), ou Restaurador Dinâmico de Tensão, é um compensador estático série avançado, aplicado à distribuição, cuja finalidade principal é a mitigação de afundamentos e elevações de tensão, foco principal desta dissertação.

Os seus elementos básicos são os mesmos do *D-StatCom*, com a diferença que o transformador de acoplamento é ligado em série com o sistema, como mostrado na figura 2.9, possibilitando que o equipamento atue como um controlador série da amplitude e do ângulo de fase da tensão.

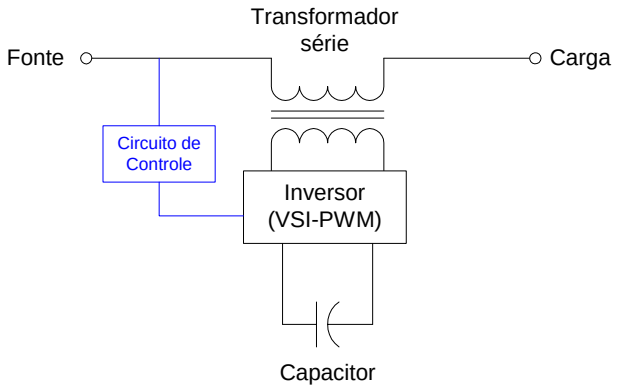

Figura 2.9 – Configuração básica do Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR)

A mitigação do afundamento ou da elevação de tensão se dá através da injeção da tensão complementar durante o distúrbio. Em outras palavras, durante a ocorrência do distúrbio, o restaurador dinâmico de tensão injeta a diferença entre a tensão desejada para a carga e a tensão remanescente do sistema. Sob condições normais de operação, o DVR injeta apenas uma pequena tensão para compensar a reatância série do transformador e as perdas do equipamento.

Analogamente ao que ocorre quando se utiliza o *D-StatCom*, as tensões injetadas pelo DVR têm a sua amplitude e ângulo controlados, fazendo com que os deslocamentos súbitos do ângulo de fase também sejam prontamente corrigidos.

O DVR é uma tecnologia que pode ser aplicada na média tensão, protegendo um grande número de cargas sensíveis, ou na baixa tensão, dedicada exclusivamente a um pequeno conjunto de equipamentos.

Assim como acontece com o *D-StatCom*, o DVR é projetado considerando um tempo máximo de duração e um valor máximo de magnitude do distúrbio. Ultrapassando-se esses valores, o distúrbio não será integralmente mitigado.

Essa tecnologia apresenta variadas topologias, como a que utiliza fontes de energia externas, a exemplo de bancos de baterias, alimentando o

capacitor do lado CC para aumentar a capacidade do DVR nas suas diversas funções. Outras topologias consideram a ligação do capacitor com outro sistema independente ou com a própria rede através de um conversor CA/CC. Quando não há fonte de energia externa e nem ligação do lado CC com qualquer sistema, como mostrado na figura 2.9, o recarregamento do capacitor pode ser feito através do inversor, que absorve energia do próprio sistema. As descrições das variadas topologias, suas vantagens e desvantagens serão apresentadas e discutidas detalhadamente nos capítulos posteriores.

Além do tempo curto de resposta na mitigação de distúrbios, que em certos casos pode ser inferior a 4 ms, esse equipamento ainda possui a vantagem de ter a potência menor do que a da carga, uma vez que supre apenas complementos da tensão para a carga.

Além do alto custo de aquisição, o DVR apresenta outra desvantagem: apesar da alta eficiência na mitigação de elevações e afundamentos de tensão, esse equipamento é incapaz de mitigar interrupções, característica esta comum a todos os compensadores série.

Embora não possua uma atuação tão eficiente quanto o *D-StatCom*, o DVR pode também atuar como compensador de reativo. Mas a sua aplicação para essa função é pouco difundida.

A depender do tipo de controle e da fonte de energia no lado CC do inversor, o DVR pode atuar ainda como mitigador de outros distúrbios elétricos, tais como tensões harmônicas e desequilíbrios de tensão. Maiores detalhes sobre esse equipamento serão descritos no capítulo 3 desta dissertação.

c) Compensador Unificado de Distribuição (UCPC)

O *Universal Custom Power Conditioner* (UCPC), ou Compensador Unificado de Distribuição, é um equipamento que possui as configurações *shunt* e série, idênticas às do *D-StatCom* e do DVR respectivamente, com o diferencial de trabalharem de forma integrada. Como conseqüência, essa tecnologia agrega as funções dos outros dois compensadores avançados, com a diferença de não necessitar de qualquer tipo de armazenador de energia, como ilustra a figura 2.10.

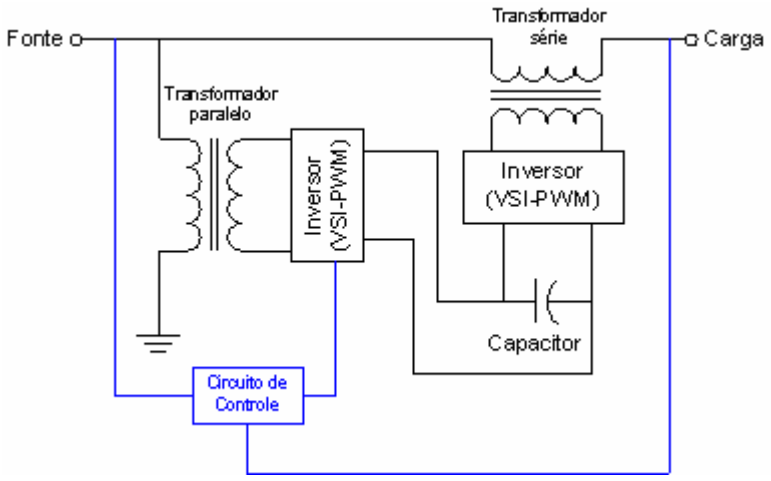

Figura 2.10 – Configuração básica do Condicionador Unificado de Distribuição (UCPC).

A aplicação desse equipamento nos sistemas de distribuição é altamente atrativa, já que pode reunir todas as filosofias *Custom Power* de compensação de reativos e mitigação de distúrbios elétricos [40].

Como os inversores *shunt* e série estão conectados através de um elo CC, a energia necessária para a mitigação de afundamentos e elevações de tensão é retirada da própria fonte do sistema, através da absorção de corrente, feita pelo inversor *shunt*, e injeção pelo inversor série. Apesar de essa característica tornar desnecessária a utilização de fontes externas de energia, pode representar uma limitação operativa na mitigação desses distúrbios, uma

vez que um elevado valor de corrente é requerido pelo inversor *shunt* durante a ocorrência do distúrbio.

A variação da energia instaurada no capacitor é determinada pela diferença das potências injetada e absorvida.

A maior quantidade de componentes, aliada à complexidade do sistema de controle, devida à variedade nas formas de operação, faz com que esse equipamento tenha um custo de aquisição consideravelmente maior do que os outros tipos de compensadores estáticos avançados de distribuição. Por isso, sua utilização em um determinado sistema se tornará mais viável economicamente, se existir a necessidade de compensação de variados distúrbios elétricos.

2.5.3 MELHORIA DA IMUNIDADE DO ACIONAMENTO E DA CARGA

As referências [28, 29, 35] descrevem as soluções mais efetivas para o aumento da suportabilidade dos acionamentos e das cargas elétricas frente às ocorrências das VTCDs, que podem ser resumidas da seguinte forma:

- **Aumento da capacitância no elo CC de cargas eletrônicas:** O capacitor dimensionado pelo fabricante serve apenas para filtrar a tensão retificada. O incremento da capacitância original aumenta a suportabilidade e reduz o *ripple* CC. Porém, tal alteração pode resultar em maiores picos de corrente, em regime permanente e durante o distúrbio. Essa solução é simples e melhor aplicável às pequenas cargas, mas, para certas aplicações, pode necessitar de considerável espaço extra e circuitos adicionais para pré-carga;
- **Ajuste das proteções intrínsecas ao equipamento:** Com o conhecimento das curvas de sensibilidade da carga, é possível promover a redução da sensibilidade das suas proteções para que

haja uma redução na freqüência de parada devida a afundamentos e elevações de tensão;

- **Aumento da constante de inércia de motores:** Essa ação é aplicável a motores com e sem acionamento, apresentando bastante êxito na minimização da variação de velocidade da carga. Porém, tal modificação implica o aumento do tempo de partida do motor, e de recuperação das condições iniciais do acionamento.

Essas referências, citadas no início desta seção, ainda fazem menção aos principais métodos de melhoria da imunidade dos *Adjustable Speed Drives* (ASDs), equipamentos esses que figuram entre as grandes vítimas da ocorrência de VTCDs, uma vez que são cargas eletrônicas sensíveis, amplamente utilizadas em ambientes industriais.

2.6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, foram descritas as definições e as classificações das VTCDs, bem como suas causas, conseqüências e principais métodos de prevenção e mitigação dos efeitos de sua ocorrência.

Dos tipos de VTCDs, destacou-se o afundamento de tensão, por ser o distúrbio mais freqüente em redes elétricas e, por isso mesmo, o principal causador de prejuízos às classes de consumidores. Dessas classes, a industrial é considerada a principal vítima de prejuízos, devido à quantidade de cargas elétricas e ao volume de dinheiro envolvido em seus processos.

Apesar de o Restaurador Dinâmico de Tensão, foco principal desta dissertação, não ser capaz de mitigar interrupções de curta duração, a

descrição desse distúrbio foi válida, uma vez que compõe as VTCDs e que sua ocorrência pode estar condicionada à ocorrência de elevações ou afundamentos de tensão.

Apesar do Prodist ainda não ser um conjunto de documentos consolidados, a sua descrição é válida, considerando-se a importância que terá perante o setor elétrico brasileiro, principalmente para os envolvidos com a distribuição de energia elétrica.

Ambos os procedimentos de rede nacionais ainda possuem limitações referentes às descrições e normalizações de termos relacionados às VTCDs. Essas referências não mencionam se a tensão remanescente do sistema durante a VTCD deve ou não ser utilizada para caracterizar a amplitude do distúrbio.

Já é reconhecido que existem outras características das VTCDs, além da amplitude e duração do distúrbio, que afetam os equipamentos. Porém, tais características não são sequer abordadas nos procedimentos nacionais.

Quanto às diversas técnicas de inibição dos efeitos das VTCDs, conclui-se que, apesar de existirem diversos métodos e dispositivos com desempenhos e custos de aquisição dos mais variados níveis, a escolha de uma ou mais opções de mitigação deve ser feita, baseada em estudos econômicos que apontem a menor relação custo/benefício.

Levando em consideração os tipos de conexão dos compensadores *Custom Power* e, como conseqüência, as diferenças nos desempenhos frente às VTCDs, cabe aqui uma sucinta comparação entre eles.

Comparando o desempenho do DVR com o do *D-StatCom*, a referência [20] mostra a significativa superioridade do primeiro frente aos afundamentos e elevações de tensão. Porém, além de prover uma melhor compensação de reativo, o *D-StatCom* tem o diferencial de mitigar interrupções de curta duração. Por isso, conclui-se que, para um sistema que necessite de um

dispositivo especialista em mitigação de elevações e, principalmente, afundamentos de tensão severos e de maior duração, a melhor opção é o DVR. Já para um sistema que precise de mitigação de todos os tipos de VTCDs, ou que necessite da mitigação de afundamentos e elevações menos severos, aliada à necessidade de compensação mais eficaz do reativo das cargas, a opção mais indicada seria o *D-StatCom*. Contudo, é importante salientar que, apesar de o DVR ter um melhor desempenho frente às elevações e afundamentos de tensão, a capacidade do *D-StatCom* de mitigar tais distúrbios não pode ser subestimada, como mostram as referências [20, 36].

Pode-se dizer que o princípio de mitigação de VTCDs utilizado pelo UCPC é o mesmo daquele usado pelo DVR, uma vez que ambos utilizam o inversor e o transformador série para a injeção do complemento de tensão. Mas o fato de o primeiro retirar da própria rede elétrica a energia necessária para a mitigação não o torna uma opção mais atrativa do que o segundo. Existem topologias de DVR capazes de retirar essa energia do próprio sistema, bem como de outros sistemas independentes, conforme será detalhado no capítulo 3. Por isso, pode-se dizer que, apesar de o UCPC ter uma conexão série com mesmo princípio de funcionamento, o DVR é a melhor opção para a mitigação exclusiva de afundamentos e elevações de tensão, por ser um equipamento mais barato. O UCPC só se torna uma alternativa mais viável, quando existir a necessidade adicional de mitigação de distúrbios elétricos, a qual o DVR está inapto a fazer.

CAPÍTULO 3

O RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO (DVR)

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O Restaurador Dinâmico de Tensão (DVR) é um compensador estático série avançado, aplicado à distribuição, cuja finalidade principal é a mitigação de afundamentos e elevações de tensão.

A utilização do DVR vem se popularizando como uma solução viável para a proteção de equipamentos sensíveis a esses distúrbios, com ótima aplicação para consumidores que utilizam equipamentos com potência total na faixa de 100 kW a 10 MW [29]. A sua instalação pode ocorrer tanto na baixa quanto na média tensão, possibilitando assim a proteção de equipamentos sensíveis de alta potência aos efeitos dos distúrbios acima mencionados.

Atualmente, o sucesso da sua aplicação está relacionado ao alto desempenho apresentado pela utilização de inversor VSI-PWM com controle vetorial e, também, ao fato de ser a potência nominal do DVR, geralmente, inferior à da carga protegida, uma vez que o dispositivo supre apenas complementos da tensão durante o distúrbio.

O fato de o DVR ficar ocioso durante longos períodos compreendidos entre o término de uma VTCD e o início de outra, aliado aos avanços nas tecnologias dos controles e à capacidade de injeção de variadas formas de tensão, despertou a necessidade e a capacidade de utilização dessa tecnologia para a compensação de outros distúrbios elétricos. Por isso, dependendo do

tipo de controle e da fonte de energia no lado CC do inversor, o DVR pode atuar, ainda, como mitigador de outros distúrbios elétricos, tais como tensões harmônicas e desequilíbrios de tensão, agregando assim mais valores ao equipamento.

A mitigação do afundamento ou da elevação de tensão se dá pela injeção da tensão complementar, através de um transformador de acoplamento ligado em série com o sistema, como ilustra, de forma esquemática, a figura 3.1.

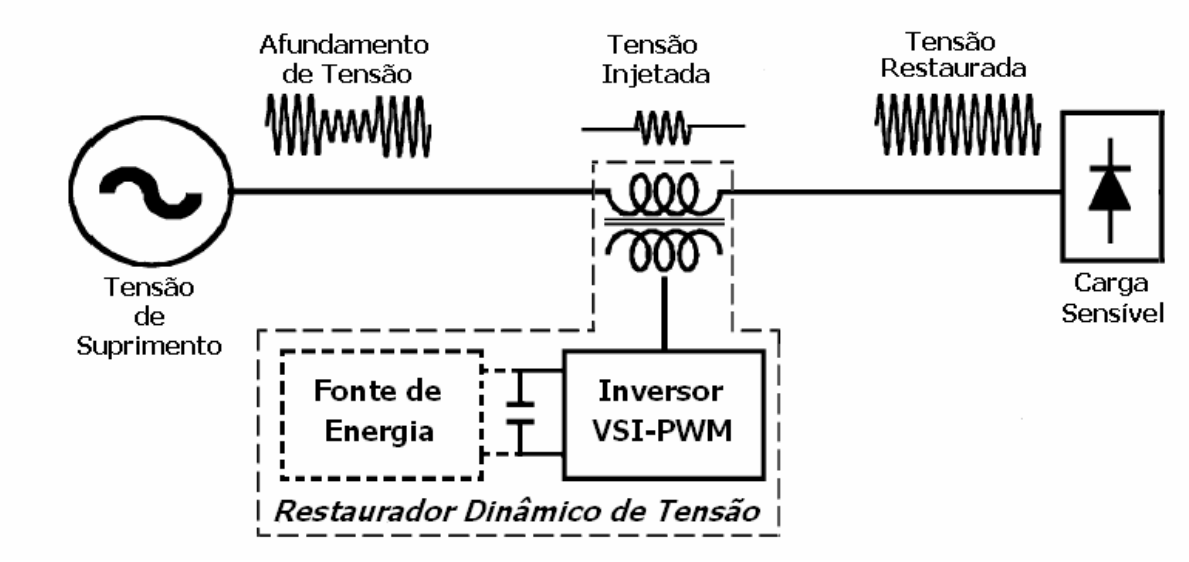

Figura 3.1 – Ilustração esquemática do princípio de funcionamento e dos elementos básicos que compõem o restaurador dinâmico de tensão.

Durante a ocorrência do distúrbio, o restaurador dinâmico de tensão injeta a diferença entre a tensão desejada para a carga e a tensão remanescente do sistema, restabelecendo, assim, a amplitude da tensão pré-distúrbio. A tensão injetada pelo DVR pode ter não só sua amplitude, mas também seu ângulo de fase controlados de forma vetorial, garantindo, dessa forma, que defasamentos súbitos do ângulo de fase também sejam prontamente corrigidos.

O capacitor, que é o armazenador de energia disponível no equipamento, simula uma fonte de tensão em corrente contínua. Para proceder

à compensação, o inversor VSI-PWM absorve a energia armazenada no capacitor para sintetizar uma tensão a ser injetada no sistema através do transformador série.

Sob condições normais de operação, o DVR injeta apenas uma pequena tensão para compensar a reatância série do transformador e as perdas do equipamento.

Dependendo da topologia do DVR, pode ou não existir uma fonte de energia suprindo o capacitor para a melhoria do seu desempenho durante o distúrbio e para recarregá-lo ao término do mesmo, conforme é ilustrado na figura 3.1. Essa fonte de energia pode ser o próprio sistema ou outro sistema independente, através da conexão de um conversor CA-CC, ou, até mesmo, uma fonte de armazenagem de energia, como banco de baterias. Quando não há fonte de energia ligada ao capacitor, a sua recarga pode ser feita através do próprio inversor, que absorve energia do sistema até que o nível de tensão CC desejado seja atingido.

Apesar de existirem poucos estudos publicados, pode-se afirmar que o tipo de topologia influi significativamente no desempenho do equipamento em relação aos afundamentos e elevações de tensão, como será detalhado no item 3.3 e nos capítulos posteriores desta dissertação.

Como o DVR é um compensador série, no momento em que entra em operação, além de estar injetando uma tensão, poderá estar promovendo o intercâmbio de potências ativa e reativa entre ele mesmo e o sistema CA, a depender da sua topologia e do seu modo de operação. Essa característica possibilita o projeto de diversas filosofias de compensação, tais como a de injeção de potência ativa e reativa, além da de tensões de seqüência zero, como será descrito no item 3.4.

Para a mitigação de afundamentos e elevações de tensão, o DVR é projetado considerando-se um tempo máximo de duração e um valor máximo

de magnitude desses distúrbios. Para alcançar esse nível de eficiência, é necessário que seus componentes, tais como o transformador, o inversor, o capacitor e o seu controle, sejam dimensionados e ajustados de forma bastante criteriosa, conforme descrição nos itens posteriores deste capítulo. Tais ações podem representar melhorias de desempenho e redução da possibilidade de avarias do equipamento.

A compensação de interrupções de tensão por parte do DVR é inviável, uma vez que este só supre tensões séries às cargas sensíveis, sendo incapaz de suprir correntes. Além disso, o restaurador dinâmico de tensão também não é capaz de mitigar afundamentos provenientes de curtos-circuitos ocorridos entre o transformador série e as cargas sensíveis. A mitigação de afundamentos, provenientes de curtos-circuitos, só é viável quando estes ocorrem a montante do transformador série, como no sistema de transmissão, ou em cargas e alimentadores paralelos ao dispositivo, de acordo com a ilustração da figura 3.2.

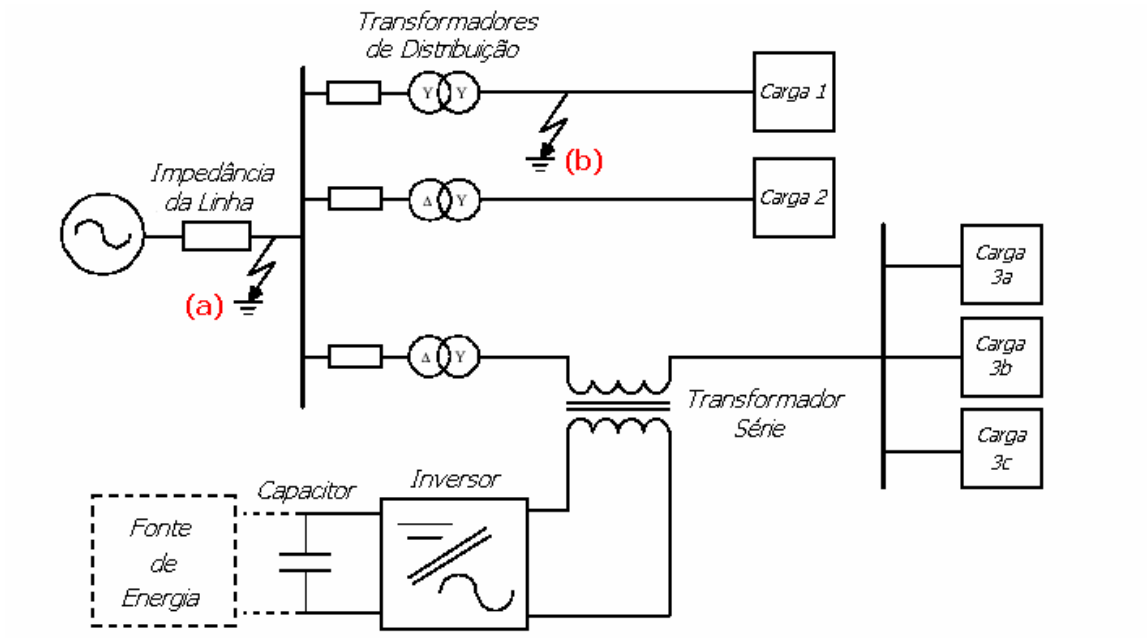

Figura 3.2 – Descrição das localidades de curtos-circuitos cujos afundamentos de tensão podem ser mitigados: (a) a montante do transformador série e (b) nas cargas e alimentadores em paralelo.

Caso ocorra um curto-circuito nos terminais de uma das cargas ligadas ao DVR (*cargas 3a, 3b* ou *3c* da figura 3.2), além de as demais cargas sofrerem afundamentos de tensão, o próprio compensador pode sofrer avarias, a depender do nível de corrente da falta. Para que isso não aconteça, é necessário que o equipamento esteja associado a esquemas especiais de proteção. Os sistemas existentes de proteção do DVR, que atuam não só contra curtos-circuitos a jusante do transformador série, mas também contra sobretensões transitórias devidas a chaveamento de banco de capacitores e descargas atmosféricas, serão detalhados no item 3.6 deste capítulo.

3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Para entender o princípio de operação do DVR, é necessário, primeiramente, que se compreenda seus modos de operação como compensador série avançado, para que depois se faça o entendimento sobre o funcionamento de cada uma das unidades que compõem o seu sistema de controle.

3.2.1 MODOS DE OPERAÇÃO

Assim como acontece com qualquer compensador estático avançado, seja ele série, *shunt* ou unificado, o DVR pode prover o intercâmbio de potências ativa e reativa entre ele mesmo e o sistema CA. A figura 3.3 ilustra os modos de operação do restaurador dinâmico de tensão, onde v_{DVR} é a tensão injetada pelo equipamento e i_L, a corrente da carga.

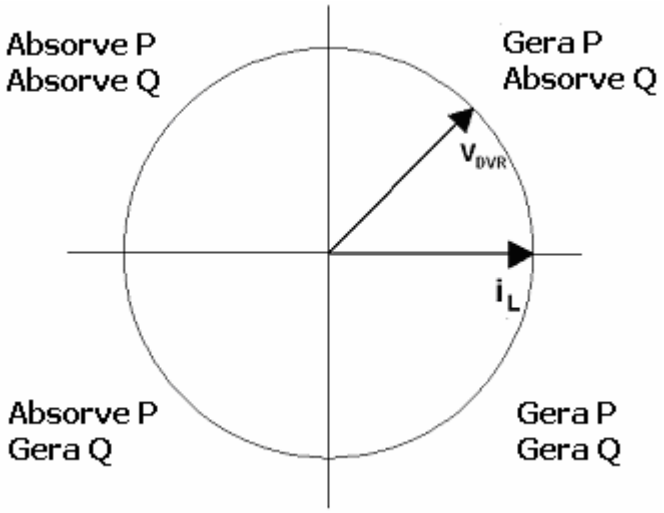

Figura 3.3 – Diagrama fasorial e modos de operação de um DVR.

Tomando a corrente da carga como referência, o que vai determinar o modo de operação do DVR é o defasamento entre a tensão série injetada e a corrente da carga.

Analisando a figura 3.3, pode-se concluir que se o fasor da tensão injetada pelo DVR estiver no primeiro ou no quarto quadrante, o compensador estará injetando potência ativa na rede. Se a tensão do DVR estiver em fase com a corrente da linha, então existirá fluxo apenas de potência ativa do compensador para o sistema. Vale ressaltar, porém, que a geração de potência ativa, seja no primeiro ou no quarto quadrante, só será possível se o capacitor estiver conectado a alguma fonte de energia adicional [20].

Se a referida tensão estiver adiantada de 90º em relação à corrente, haverá troca apenas de potência reativa indutiva, fazendo com que o DVR opere como um reator série. Analogamente, se a tensão estiver atrasada de 90º, ocorrerá troca unicamente de potência reativa capacitiva, fazendo com que ele opere como um capacitor série.

Considerando uma carga indutiva que sofre um afundamento de tensão, com nenhum ou com pequenos defasamentos súbitos do ângulo de fase, a

tensão injetada necessária para a mitigação deverá ter um ângulo de fase muito próximo ao da tensão pré-distúrbio da carga. Se isso acontecer, a tensão injetada estará também adiantada em relação à corrente de carga, caracterizando um modo de operação de 1º quadrante. Nessa situação, caso não haja um controle da tensão CC no capacitor, ocorrerá sempre uma queda no nível dessa grandeza durante o distúrbio.

Analogamente, se essa mesma carga indutiva sofrer uma elevação de tensão, a tensão injetada necessária para a mitigação deverá ter um ângulo de fase com defasamento de aproximadamente 180º em relação à tensão pré-distúrbio da carga. Se isso acontecer, estará caracterizado um modo de operação de 3º quadrante. Nessa situação, caso não haja um controle da tensão CC no capacitor, ocorrerá uma elevação do nível CC da tensão neste capacitor durante o distúrbio.

A variação da tensão CC no capacitor durante o distúrbio pode ser mais ou menos acentuada, a depender da topologia, do tamanho do capacitor e do nível de energia nele armazenada. Após o término do distúrbio, o nível de tensão CC nominal deve ser prontamente restabelecido. Essa variação de tensão CC é sempre levada em consideração na concepção do projeto, como será visto nos itens 3.3 e 3.5.2.

A título de ilustração, a figura 3.4 apresenta o desempenho de um DVR diante de um afundamento de tensão trifásico equilibrado [6].

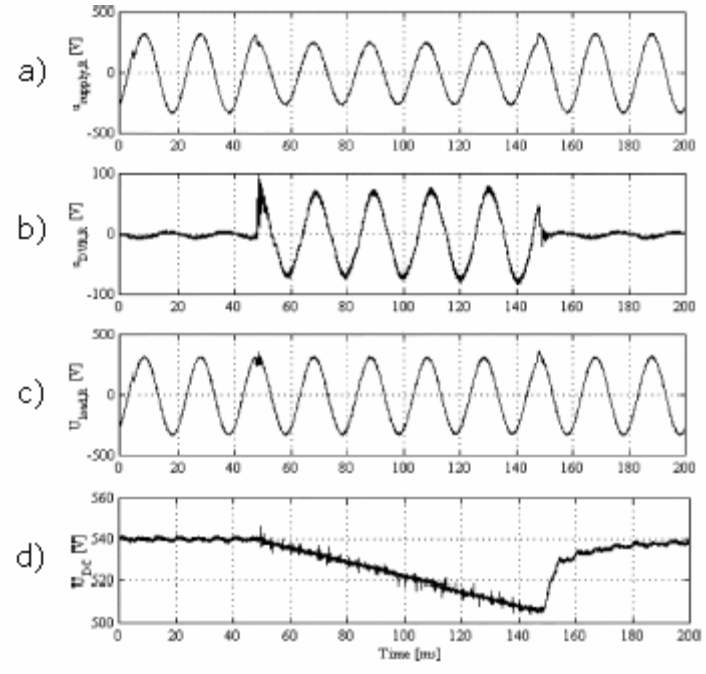

Figura 3.4 – Análise experimental do desempenho de um DVR com capacitor conectado ao sistema pelo lado da fonte. (a) Tensão de suprimento sob distúrbio. (b) Tensão injetada pelo DVR. (c) Tensão nos terminais da carga. (d) Tensão CC no capacitor. [6]

Esse DVR possui 10 kVA de potência nominal e capacitor de 2 mF conectado ao sistema pelo lado da fonte, através de um conversor CA-CC. Tal topologia é descrita no item 3.3.2.1.

Observa-se, no gráfico (a) da figura 3.4, um determinado nível de afundamento da tensão de suprimento da rede. Além da tensão injetada no sistema para a mitigação durante o distúrbio, o gráfico (b) ainda mostra a injeção de uma pequena tensão nos momentos anteriores e posteriores à ocorrência do distúrbio, a qual serve apenas para compensar a reatância série do transformador e as perdas do equipamento durante o período que este está ocioso na rede elétrica. Já o gráfico (c) mostra que a tensão nos terminais da carga foi plenamente restaurada. Porém, ocorreram pequenos transitórios na tensão da carga nos instantes de início e de término do afundamento. Tais transitórios são conseqüência da atuação do controle e do início e término do fluxo de potências entre o DVR e a rede elétrica. Finalmente, o gráfico (d) mostra a queda da tensão CC no capacitor durante o distúrbio e a posterior

recuperação do nível de tensão nominal. O tempo de restabelecimento da tensão CC pode ser considerado rápido – cerca de metade da duração do distúrbio.

A figura 3.4 ainda evidencia a rapidez de atuação do DVR. Tal velocidade só se tornou possível graças ao sistema de detecção dos distúrbios e de geração de pulsos para as chaves semicondutoras que compõem o controle vetorial do equipamento. Para se entender o funcionamento desse controle, é necessário que haja o conhecimento prévio da representação vetorial de grandezas trifásicas, cuja descrição será feita a seguir.

3.2.2 REPRESENTAÇÃO VETORIAL DE GRANDEZAS TRIFÁSICAS

A representação vetorial de grandezas trifásicas é muito utilizada na análise de máquinas elétricas. Com o passar dos anos, essa metodologia passou também a ser aplicada na análise e no controle de sistemas elétricos. Com o advento dos compensadores estáticos avançados, verificou-se a grande utilidade que essa metodologia teria na representação matemática de correntes e tensões dos compensadores avançados, uma vez que a quantidade de equações envolvidas nos algoritmos de controle seria significativamente reduzida.

Desse modo, um conjunto de variáveis trifásicas, cuja soma fasorial em qualquer instante seja igual a zero, pode ser representado por um simples ponto P em um plano, conforme ilustrado na figura 3.5 [4].

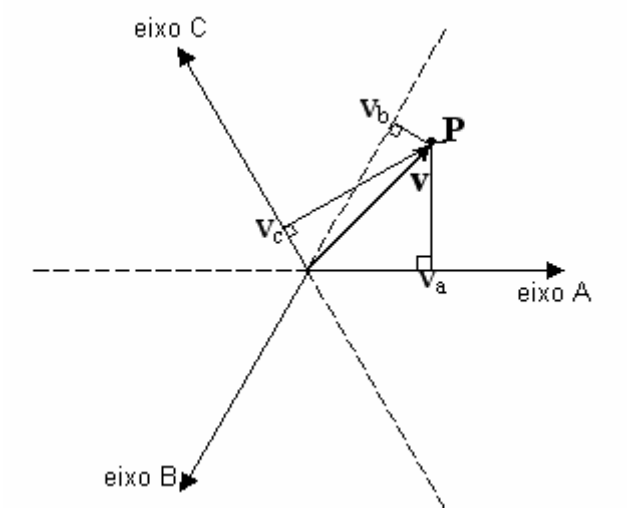

Figura 3.5 – Representação vetorial de uma variável trifásica.

Observando a figura 3.5, conclui-se que a linha traçada a partir da origem dos eixos até o ponto "P" pode ser considerada um vetor, uma vez que tem magnitude e direção que podem ser unicamente definidas para aquele instante particular. Esse vetor possui uma projeção sobre cada um dos três eixos das fases, dispostos simetricamente, que corresponde aos valores instantâneos da variável da fase associada (tensão ou corrente). À medida que os valores das grandezas de fase mudam, o vetor associado descreve uma trajetória, ou seja, um lugar no plano. Portanto, esse lugar no plano contém as informações a respeito do conjunto das variáveis trifásicas, incluindo distorções harmônicas e componentes transitórias [4]. Como exemplo, a figura 3.6 ilustra uma trajetória referente a um conjunto trifásico altamente distorcido. Caso os sinais elétricos fossem senoidais e equilibrados, o lugar geométrico decorrente da trajetória do ponto seria circular.

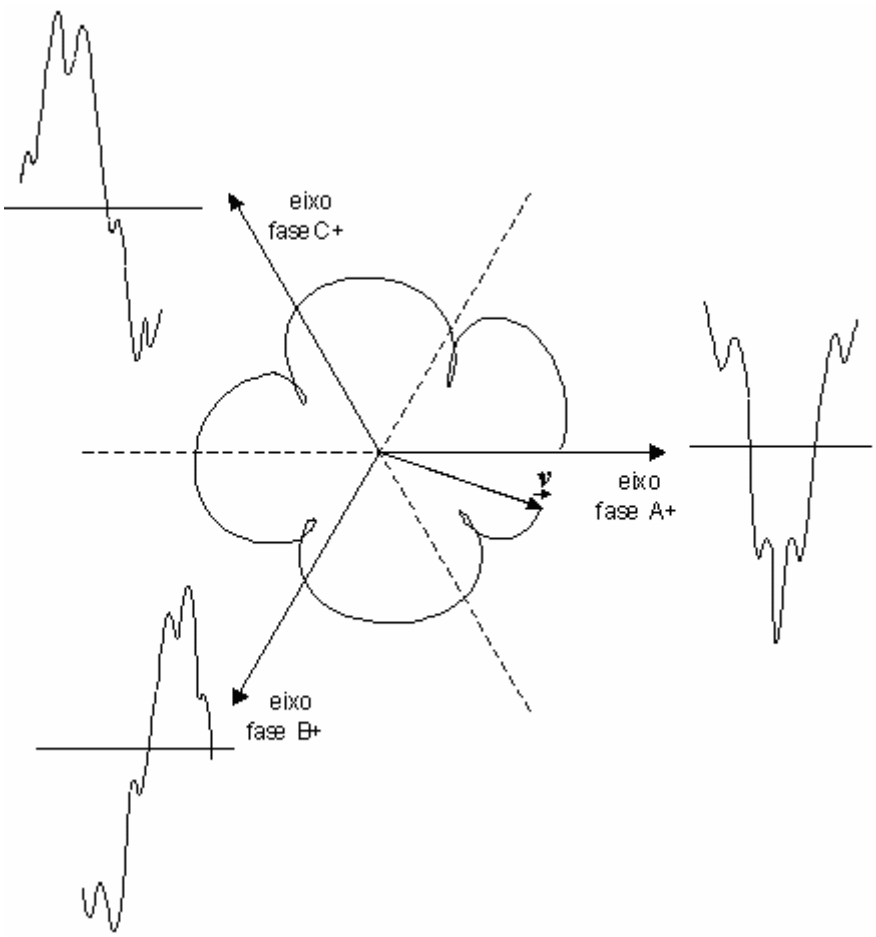

Figura 3.6 – Exemplo de uma trajetória vetorial.

De outra forma, a representação de um determinado vetor pode ser feita através das coordenadas de um sistema ortogonal, seja ele estacionário ou rotativo na velocidade síncrona. Além da redução do número de equações envolvidas nos algoritmos de controle, o uso de modelos de análise vetorial em um sistema ortogonal representa a fácil obtenção de informações importantes, como defasagem angular, módulo e potências. Isso se deve ao fato de variáveis trifásicas serem transformadas em duas coordenadas de um sistema ortogonal (a terceira é zero) através de uma matriz de transformação, de acordo com descrição a seguir.

3.2.2.1 REPRESENTAÇÃO NO SISTEMA ORTOGONAL ESTACIONÁRIO (d – q)

No sistema ortogonal estacionário, um vetor de tensão ou de corrente é descrito pelas suas componentes d e q, como mostrado na figura 3.7.

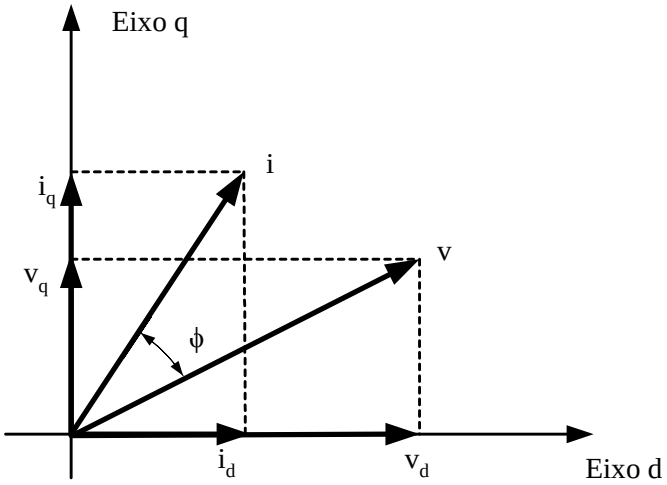

Figura 3.7 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal estacionário [36].

As equações (3.1) mostram como são feitas as transformações das variáveis de fase (tensão e corrente) para as coordenadas d e q:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ 0 \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \qquad \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ 0 \end{bmatrix} = C \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

Onde:

$v_{d,q}$ – componentes da tensão nos eixos estacionários d e q

$i_{d,q}$ – componentes da corrente nos eixos estacionários d e q

$v_{a,\,b,\,c}$ – componentes da tensão nas fases a, b e c

$i_{a,\,b,\,c}$ – componentes da corrente nas fases a, b e c

C – matriz de conversão ou de transformação

A matriz de conversão *C* é dada pela equação (3.2).

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

Vale ressaltar que o sistema de seqüência zero também é considerando na matriz de conversão *C* [4].

Considerando que a figura 3.7 representa os vetores de tensão e corrente associados a um ponto de um sistema elétrico, a potência ativa instantânea nesse ponto é dada pela equação a seguir:

$$p = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c \tag{3.3}$$

Substituindo (3.1) em (3.3), chega-se à equação da potência ativa instantânea em função das grandezas d e q de tensão e corrente, como mostra a equação (3.4).

$$p = \frac{3}{2}\left(v_d i_d + v_q i_q\right) = \frac{3}{2}|v| \cdot |i| \cdot \cos(\phi) \tag{3.4}$$

Onde:

p – potência ativa instantânea

v – vetor de tensão

i – vetor de corrente

ϕ – ângulo de defasamento entre os vetores de tensão e corrente

Avaliando a equação (3.4), fica evidente que apenas a componente do vetor de corrente que está em fase com o vetor de tensão é que contribui para o valor da potência ativa instantânea. Com isso, a componente do vetor de corrente que está em quadratura com o vetor de tensão pode ser removida sem que a potência varie. Contudo, essa corrente é responsável pela transmissão da potência reativa instantânea q [4], dada pela equação (3.5).

$$q = \frac{3}{2}\left(v_d i_q - v_q i_d\right) = \frac{3}{2}|v| \cdot |i| \cdot \mathrm{sen}(\phi) \tag{3.5}$$

3.2.2.2 REPRESENTAÇÃO NO SISTEMA ORTOGONAL SÍNCRONO (α - β)

Em um sistema elétrico de potência, o qual contém vários conjuntos de tensões e correntes trifásicas, é conveniente determinar as tensões trifásicas de uma barra como sendo a referência, o que, conseqüentemente, define o vetor de tensão de referência para o sistema. Tendo isso em mente, procura-se estabelecer um novo sistema de coordenadas ortogonais, cujo eixo d deslocado, chamado de α, coincida com a direção do referido vetor de tensão de referência do sistema, e o eixo q deslocado, referido como β, esteja em quadratura com α. A coincidência do vetor da tensão de referência com o eixo α ($|v| = v_\alpha$) implica em um valor nulo da sua componente em quadratura ($v_\beta = 0$) [4]. Isso é melhor visualizado através da figura 3.8:

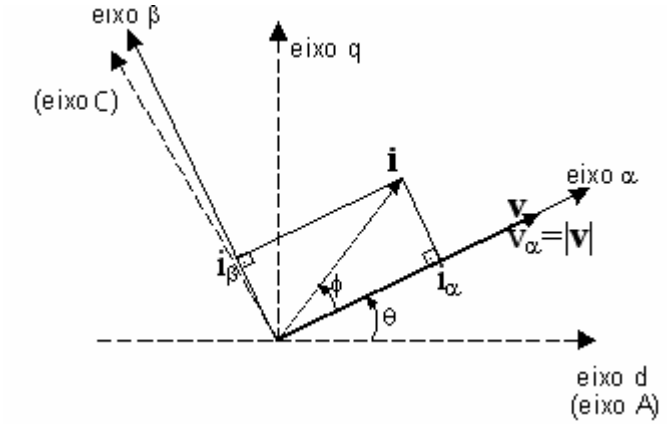

Figura 3.8 – Representação vetorial de tensão e corrente no sistema ortogonal síncrono.

Os eixos α e β seguem a trajetória do vetor da tensão de referência, girando na velocidade síncrona. Dessa forma, as componentes da tensão e da corrente nos eixos rotativos α e β podem ser obtidas através das seguintes transformações:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \tag{3.6}$$

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = C_1 \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \tag{3.7}$$

Onde:

$i_{\alpha,\beta}$ – componentes da corrente nos eixos rotativos α e β

$v_{\alpha,\beta}$ – componentes da tensão nos eixos rotativos α e β

C_1 – matriz de conversão

A matriz de conversão C_1 é dada pela equação a seguir:

$$C_1 = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\operatorname{sen}(\theta) & -\operatorname{sen}\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\operatorname{sen}\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix}, \tag{3.8}$$

sendo θ, na equação (3.8), correspondente ao ângulo entre os eixos α e d, obtidos segundo a equação (3.9):

$$\theta = arc\ tg\left(\frac{v_q}{v_d}\right) \tag{3.9}$$

Fazendo as devidas substituições, as equações (3.4) e (3.5) transformam-se, respectivamente, em:

$$p = \frac{3}{2} \cdot |v| \cdot i_\alpha \tag{3.10}$$

$$q = \frac{3}{2} \cdot |v| \cdot i_\beta \tag{3.11}$$

Onde:

$|v|$ – módulo do vetor da tensão de referência ($v = v_\alpha + jv_\beta$)

Nas equações acima, observa-se que, no sistema de referência síncrono, apenas a componente de corrente i_β é responsável pela potência reativa instantânea e apenas a i_α, pela potência ativa instantânea. Entretanto, se v não corresponder ao vetor de referência e, portanto, tiver as componentes v_α e v_β diferentes de zero, as equações (3.10) e (3.11) tornam-se, respectivamente:

$$p = \frac{3}{2}\left(v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta\right) \tag{3.12}$$

$$q = \frac{3}{2}\left(v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha\right) \tag{3.13}$$

Através da análise das equações apresentadas, fica evidente que, sob condições balanceadas de regime permanente, as coordenadas dos vetores de tensão e corrente no sistema de referência síncrono são grandezas constantes. Essa característica da análise vetorial a torna uma ferramenta muito útil para o controle de sistemas trifásicos [4].

3.2.3 SISTEMA DE CONTROLE DO DVR

Qualquer sistema de controle que compõe um DVR é formado por dois blocos principais: o bloco de identificação de distúrbios e o bloco de estratégia de compensação [7], como ilustrado na figura 3.9 a seguir:

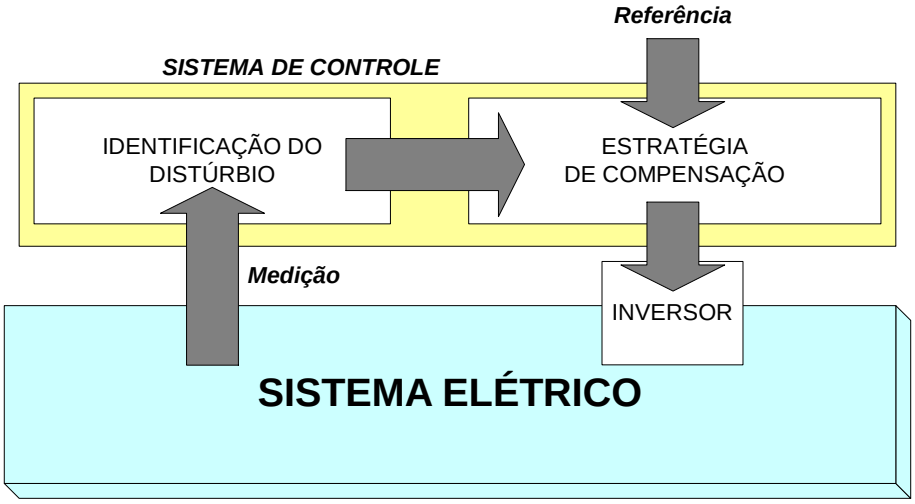

Figura 3.9 – Esquema básico do sistema de controle de um DVR e sua interação com o sistema elétrico [7].

O princípio básico de funcionamento do controle de um restaurador dinâmico de tensão é a medição da grandeza controlada, que, quando comparada com o respectivo valor de referência, produz um sinal de erro. Através de uma estratégia de compensação específica, esse erro é reduzido até a sua completa extinção. A emissão das informações indispensáveis ao gerador de pulsos da ponte inversora estabelece na saída do conversor, uma tensão necessária à compensação requerida. O tempo suficiente para a extinção desse erro, ou para a completa mitigação do distúrbio, é o fator que determina a eficiência não só do sistema de controle, mas de todo o conjunto que compõe o DVR.

No caso de afundamentos e elevações de tensão, o valor de referência necessário para a mitigação é obtido através de medição no próprio sistema, imediatamente antes do início do distúrbio. E este mesmo valor de referência determina o instante de término do distúrbio. Em outras palavras, quando a tensão do sistema a montante do transformador série sofre alterações, de forma que seu módulo e/ou ângulo difiram da referência, iniciam-se o distúrbio elétrico e, conseqüentemente, a compensação por parte do DVR. O momento em que a tensão volta a coincidir com a referência corresponde ao instante de término do distúrbio e da estratégia de compensação adotada.

Existem várias filosofias de detecção e compensação de distúrbios que podem ser aplicadas ao DVR, ou que ainda estão em fase de desenvolvimento, tais como as baseadas em controle vetorial [8, 9, 10], componentes simétricas [7, 11], transformada Wavelet [10] e redes neurais [12]. Dessas estratégias, as mais comumente utilizadas, exclusivamente para a mitigação de afundamentos e elevações de tensão, são as que usam controle vetorial associado a um PLL (*phase locked loop*). Esses tipos de estratégia possuem um mecanismo de identificação dos distúrbios relativamente simples

[7]. A figura 3.10 mostra como ilustração o diagrama de blocos de um exemplo desses tipos de filosofia.

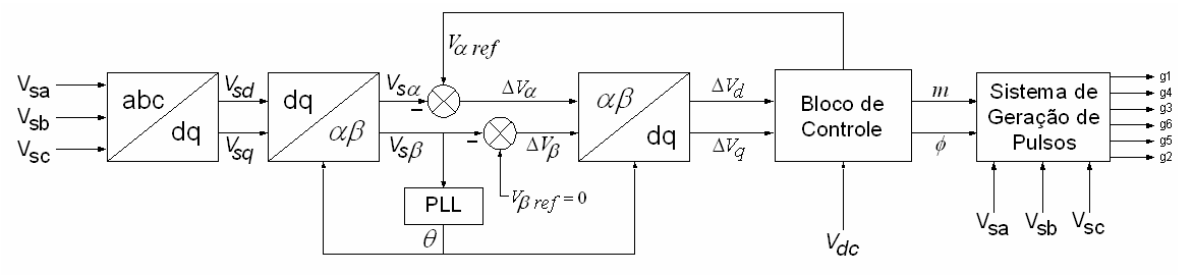

Figura 3.10 – Diagrama de blocos do sistema de detecção e compensação de distúrbios elétricos do DVR, dotado de controle vetorial e PLL (Phase Locked Loop).

Vale ressaltar, porém, que para a mitigação de outros distúrbios que não sejam afundamentos ou elevações de tensão, esse sistema de detecção e compensação pode não ser adequado. Para a mitigação de outros distúrbios relacionados com a variação da tensão eficaz, tais como sobretensão, subtensão e desequilíbrios de tensão, esse sistema pode ser uma opção viável, caso a topologia do DVR permita o suprimento de energia ao capacitor CC por longos períodos, como será explicado no item 3.3 desta dissertação. Para a mitigação dos demais distúrbios, sistemas de detecção e compensação mais sofisticados se fazem necessários.

Para a detecção e a imediata mitigação do distúrbio, o sistema de detecção e compensação da figura 3.10 converte as tensões do sistema a montante do transformador série (V_{sa}, V_{sb} e V_{sc}) em componentes estacionárias (V_{sd} e V_{sq}) e depois converte as mesmas em componentes síncronas ($V_{s\alpha}$ e $V_{s\beta}$). Estas últimas são comparadas, respectivamente, com as componentes síncronas de tensão de referência da carga ($V_{\alpha\, ref}$ e $V_{\beta\, ref}$) e as diferenças entre elas (ΔV_α e ΔV_β) são convertidas em componentes estacionárias (ΔV_d e ΔV_q) e enviadas para o bloco de controle, que também recebe um sinal relativo ao nível de tensão CC do capacitor. De posse dessas informações, o controle

calcula um fator de modulação m e um ângulo ϕ e os envia para o sistema de geração de pulsos. Desse último bloco, saem os pulsos necessários ao disparo das chaves na ponte inversora do DVR, concretizando a mitigação do distúrbio.

Como em condições normais de operação, a coincidência do vetor da tensão de referência com o eixo α ($|v| = v_\alpha$) implica a sua componente em quadratura ser nula ($v_\beta = 0$), o valor de referência adotado para $V_{\beta\, ref}$ é sempre zero.

Dois pontos críticos relacionados ao desempenho do DVR são a detecção da ocorrência do distúrbio em tempo hábil [8] e o sincronismo entre as tensões do sistema e as tensões geradas pelo conjunto inversor/transformador série. Tais habilidades são garantidas pelo PLL através do fornecimento do valor do ângulo θ, correspondente ao ângulo entre os eixos α e d, aos blocos de conversão d-q/α-β e α-β/d-q, em concordância com as equações (3.6), (3.8) e (3.9), sendo útil, inclusive, para a geração da tensão de referência $V_{\alpha\ ref}$ pelo bloco de controle. Para tanto, o valor de θ considerado é o obtido em um instante anterior ao início do distúrbio, ou seja, em condições normais de operação do sistema.

A topologia do PLL é similar à de um controlador por orientação de campo, utilizado no controle vetorial de máquinas elétricas [8]. Um exemplo de topologia aplicável ao sistema descrito na figura 3.10 é ilustrado através de diagrama de blocos na figura 3.11 a seguir:

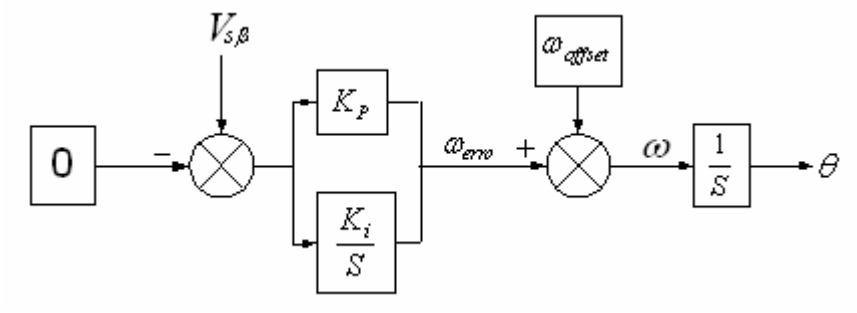

Figura 3.11 – Diagrama de blocos de um PLL (Phase Locked Loop).

A malha de controle do PLL é dotada de um controlador proporcional e integral (PI), cujos ganhos K_p e K_i podem ser calculados pelo método de alocação de pólos [41], e um integrador que converte a freqüência angular do sistema ω no ângulo θ.

No diagrama da figura 3.11, um ponto que merece especial atenção diz respeito ao comando direto de freqüência angular, ω_{offset}. Como a freqüência ω da rede elétrica é conhecida e seu valor sujeito apenas a pequenos desvios, que resultam em ω_{erro}, a inclusão desse comando direto faz com que o controlador PI opere, corrigindo esses pequenos desvios, sem necessidade de fornecer o valor da freqüência angular da rede [8].

O bloco de controle da figura 3.10, que também é dotado de um controlador PI, utiliza as componentes estacionárias (ΔV_d e ΔV_q) para obter os valores do fator modulação m e do ângulo ϕ [4], necessários para a geração dos pulsos de disparo das chaves semicondutoras da ponte inversora.

O chaveamento do inversor emprega a técnica de PWM senoidal, que consiste na comparação de uma onda triangular de alta freqüência (portadora) com uma onda senoidal (senóide de controle) na freqüência industrial (60 ou 50 Hz) para a geração dos pulsos.

O fator de modulação m equivale à relação entre as amplitudes das ondas senoidais (amp_{sen}), e da onda triangular (amp_{tri}), como descrito a seguir [4]:

$$m = \frac{amp_{\text{sen}}}{amp_{tri}} \tag{3.14}$$

A figura 3.12 ilustra a situação em que a onda triangular tem freqüência de 1,8 kHz e amplitude igual a amp_{tri}, enquanto as ondas senoidais, defasadas entre si de 120º, possuem freqüência de 60 Hz e amplitude igual a amp_{sen}.

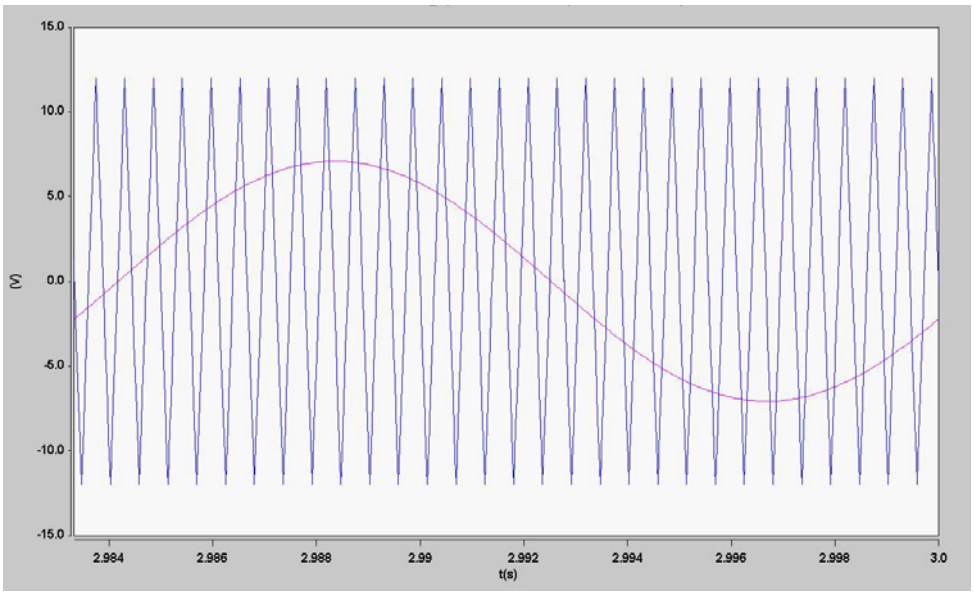

Figura 3.12 – Sinais de comparação para o disparo das chaves do inversor [4].

De posse do valor de *m* e tendo como referência as tensões do sistema (V_{sa}, V_{sb} e V_{sc}), o bloco de geração de pulsos define as três ondas senoidais (sen_a, sen_b e sen_c) defasadas entre si de 120º. O ângulo ϕ define o defasamento entre a senóide de controle da fase "a" (sen_a) e a tensão da mesma fase no barramento ao qual o DVR está conectado. Já a amplitude e a freqüência da onda portadora são definidas pelo usuário.

Nesse sentido, os pontos de cruzamento de cada uma das ondas senoidais com a onda portadora triangular definem a lógica de disparo dos semicondutores do inversor. Dessa forma, considerando que os pulsos *g1* e *g4* são responsáveis, respectivamente, pelo disparo das chaves *S1* e *S4*, correspondentes à fase *a*, como descrito na figura 3.13, quando a senóide de controle dessa fase é maior do que a portadora, a chave *S1* é fechada e a *S4* é

aberta, e quando a senóide de controle é menor, a chave *S1* é aberta e a *S4*, fechada. A mesma regra é válida para as chaves das outras fases.

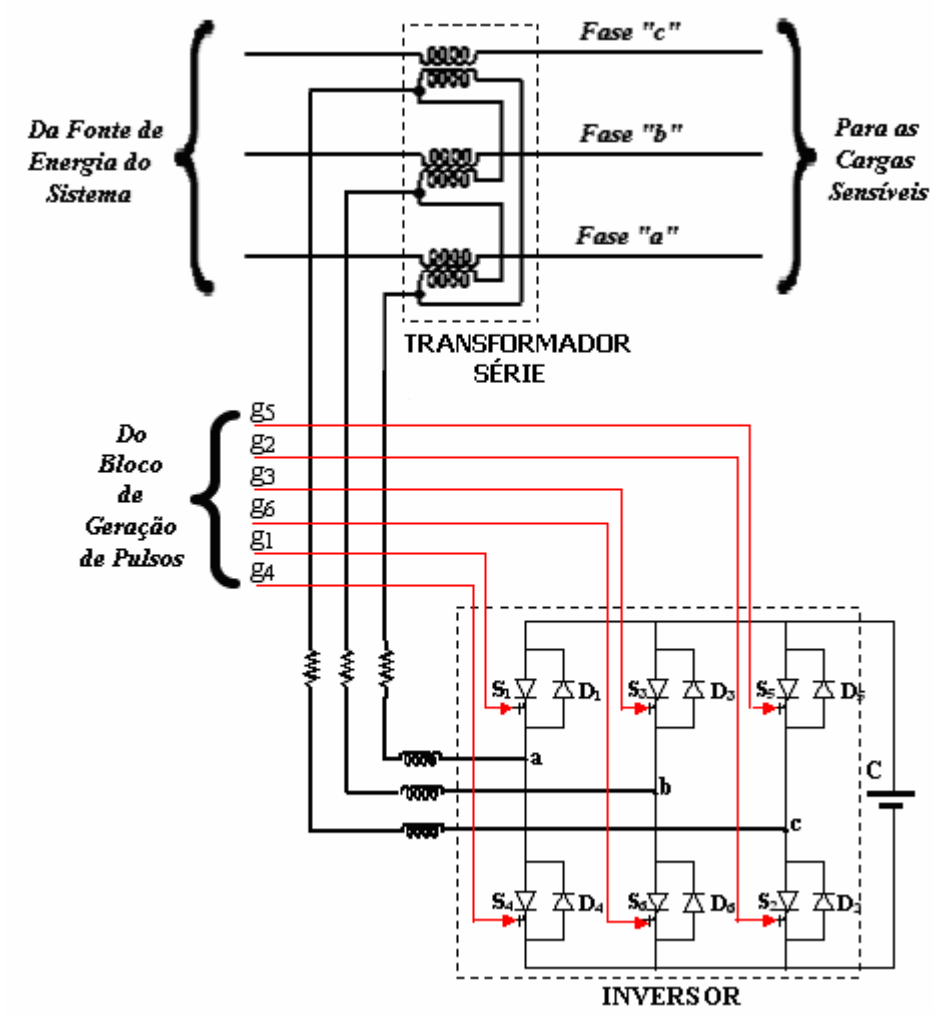

Figura 3.13 – Configuração das chaves semicondutoras do inversor do DVR, seus respectivos pulsos de disparo e forma de conexão através do transformador série.

Para melhor ilustrar o funcionamento da técnica de chaveamento PWM senoidal, a figura 3.14 mostra um exemplo dessa aplicação, onde V_A, V_B e V_C correspondem às tensões de saída do inversor nas três fases do sistema.

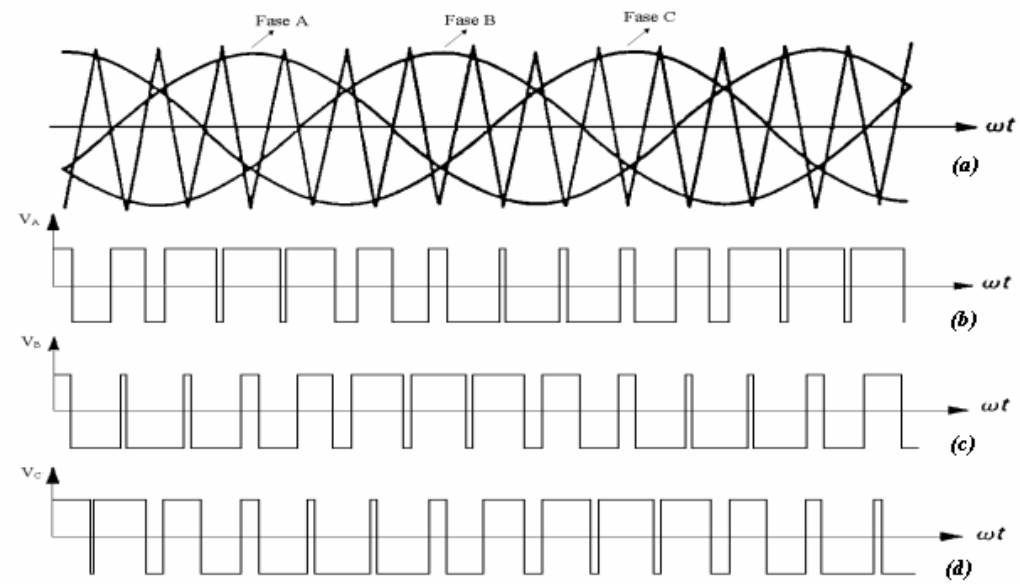

Figura 3.14 – Formas de onda na saída de um inversor VSI-PWM: (a) Tensão nos comparadores; (b) Tensão na fase *a*, (c) Tensão na fase *b*; (d) Tensão na fase *c*.

Vale salientar que o sistema de controle descrito na figura 3.10 se baseia na restauração das tensões de seqüência positiva do sistema, através da compensação das tensões de seqüência negativa, uma vez que a ligação em delta do transformador série impede a injeção de tensões de seqüência zero, de acordo com a figura 3.13. Por isso, para que um DVR seja capaz de compensar tensões de seqüência zero, é preciso que o mesmo tenha, dentre outras características, um sistema de controle diferenciado [42], como será descrito no item 3.4.4 desta dissertação.

3.3 TIPOS DE TOPOLOGIA

Conforme considerado anteriormente no item 3.2.1, durante a mitigação do distúrbio elétrico, aqui focalizado, pode haver a troca tanto de energia ativa quanto reativa do DVR para o sistema. Porém, para que haja fluxo de potência ativa do restaurador dinâmico de tensão para o sistema, é necessário que o compensador tenha um suprimento de energia conectado ao

capacitor em corrente contínua. Esse suprimento de energia pode ser feito através de armazenadores de energia, da própria rede sob distúrbio ou, até mesmo, de sistemas elétricos independentes.

O suprimento de energia para o capacitor CC, através da própria rede onde o DVR está conectado, resulta da conexão de um conversor CA/CC, que pode ser ligado no lado da fonte, a montante do transformador série, ou no lado da carga, a jusante do transformador série.

Quando o suprimento de energia é feito através de outro sistema elétrico, é preferível que o mesmo seja independente da rede onde se encontra o DVR. Caso contrário, dependendo da origem do distúrbio, o suprimento de energia poderá sofrer os mesmos efeitos do sistema com DVR.

Assim, essas topologias variam em desempenho, complexidade, custo de aquisição e custo operacional, como será descrito a seguir.

3.3.1 SUPRIMENTO DE ENERGIA SEM FONTE ADICIONAL

De todas as topologias de DVR, essa pode ser considerada a mais simples, uma vez que não possui sistema auxiliar para fornecimento de energia ao barramento CC, resultando em um menor número de componentes e um princípio de funcionamento de mais fácil compreensão. No entanto, a sua operacionalidade nem sempre é tão simples, já que pode apresentar uma variação significativa do nível de tensão CC durante o distúrbio. A figura 3.15 ilustra, de forma simplificada, a configuração dessa topologia.

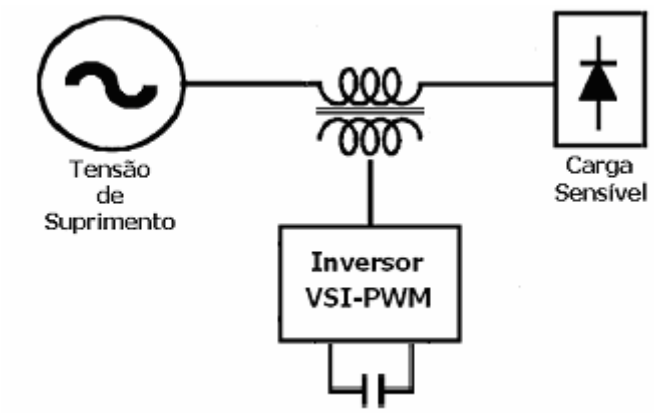

Figura 3.15 – Configuração básica de um DVR sem suprimento adicional de energia ao barramento CC.

De acordo com a figura 3.15, como não há fonte de energia ligada ao barramento CC, toda a energia necessária à mitigação fica armazenada no capacitor. Com isso, pode-se dizer que, em comparação com topologias que utilizam fontes de energia no barramento CC, esse arranjo possui o inconveniente de necessitar valores relativamente maiores de capacitância no barramento CC, em decorrência da necessidade de altos níveis de energia armazenada [8]. Logo após o término do distúrbio, o restabelecimento do nível de tensão nominal CC pode ser promovido pelo próprio inversor, através de trocas estratégicas de energia com o sistema ou através de outras fontes auxiliares de energia.

Sabe-se que a energia E armazenada no capacitor C é proporcional ao quadrado da sua tensão nominal CC, V_{CC}, como descrito na equação a seguir:

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{CC}^2 \tag{3.15}$$

Durante a mitigação de um afundamento de tensão, a tensão CC diminui exponencialmente e, à medida que isso acontece, a habilidade na compensação de afundamentos vai se deteriorando, caracterizando uma topologia com tensão no barramento CC não-controlável durante o distúrbio.

Por isso, pode-se dizer que a mitigação de afundamentos de tensão feita por esse tipo de topologia só terá êxito até que se atinja um nível mínimo de tensão CC aceitável. Considerando esse fato, pode-se dizer que, do total de energia armazenada no capacitor, apenas uma parcela ΔE pode ser aproveitada na mitigação, conforme a equação (3.16).

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left(V_{CC\,i}^{2} - V_{CC\,f}^{2} \right) \tag{3.16}$$

Onde:

$V_{CC\,i}$ = Tensão CC no instante de início da mitigação

$V_{CC\,f}$ = Tensão CC mínima aceitável para a operação do DVR

Durante afundamentos de tensão severos, uma fração significativa da energia armazenada no barramento CC pode não ser usada se o inversor entrar rapidamente em sobremodulação, na tentativa de injetar o máximo de amplitude de tensão possível [6]. Essas dificuldades operacionais podem ser amenizadas, levando a um aprimoramento geral do desempenho do DVR. Uma forma de se proceder a essas melhorias pode-se dar através do aumento do nível de tensão e/ou do incremento de capacitância no elo CC. Porém, tais medidas representam custos adicionais, uma vez que a elevação da tensão CC traz um impacto no custo dos dispositivos de potência do DVR.

Considerando a relação $V_{r(pu)}$ entre a tensão remanescente do sistema durante a ocorrência de um afundamento ou de uma elevação de tensão, V_r, e a tensão nominal da carga sensível, V_{nom}, conforme a equação (3.17),

$$V_{r(pu)} = \frac{V_r}{V_{nom}} \tag{3.17}$$

a potência nominal do inversor VSI-PWM para essa topologia, S_{serie}, é determinada segundo a seguinte equação [6]:

$$S_{serie} = \left|1 - V_{r(pu)}\right| \cdot S_L = V_{DVR(pu)} \cdot S_L \tag{3.18}$$

Onde:

S_L = Potência nominal da carga sensível

$V_{DVR(pu)}$ = Tensão injetada pelo DVR, em pu

Considerando outras topologias, pode-se dizer que o desempenho dessa topologia na mitigação de afundamentos ou elevações de tensão possui a limitação de restaurar a amplitude da tensão sem garantir a manutenção do valor do ângulo de fase da tensão pré-distúrbio. Esse fator limitante pode inviabilizar a aplicação dessa topologia de DVR na proteção de cargas sensíveis aos defasamentos súbitos do ângulo de fase. Além disso, o desempenho relativo dessa topologia na mitigação de afundamentos mais severos ou duradouros é consideravelmente inferior. Isso se deve à impossibilidade de injeção de potência ativa pelo DVR, já que essa topologia não possui uma fonte de energia que supra o barramento CC durante a ocorrência do distúrbio, como será visto no item 3.4.2.

Contudo, para a mitigação de afundamentos de tensão com menor intensidade e duração, a injeção exclusiva de potência reativa pelo DVR é suficiente para a restauração da tensão.

Portanto, pode-se dizer que essa topologia pode ser a mais indicada para sistemas cujos afundamentos são menos severos e duradouros e cujas cargas são insensíveis a defasamentos súbitos do ângulo de fase.

3.3.2 - SUPRIMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DA PRÓPRIA REDE

Assim como acontece com a topologia descrita anteriormente, as topologias com suprimento de energia através da própria rede são independentes de sistemas adicionais de armazenagem de energia ou de outros sistemas elétricos. Sua dinâmica de funcionamento considera que toda energia necessária para o restabelecimento da tensão deve ser retirada do próprio sistema sob distúrbio.

A ligação do barramento CC em derivação com a rede elétrica é feita através de um conversor CA-CC trifásico, que pode ser ligado do lado da fonte, a montante do transformador série, ou do lado da carga, a jusante do transformador série. Por uma questão de economia e de maior simplicidade operacional, o conversor CA-CC mais comumente utilizado para essa ligação é o retificador de 6 pulsos não-controlado, no entanto, a utilização de retificadores mais sofisticados, como o de 6 pulsos controlado ou o arranjo de 12 pulsos, também, pode ser considerada.

Estas topologias possuem a desvantagem de demandarem elevadas correntes que decorrem da mitigação de afundamentos de tensão, podendo contribuir para a intensificação desses afundamentos nos terminais das cargas ligadas a montante do DVR, em paralelo às cargas sensíveis protegidas. Por outro lado, verifica-se uma maior capacidade de compensação de afundamentos de maior severidade e duração, em comparação com a topologia sem fonte adicional de armazenagem de energia, e ainda a possibilidade de compensação de outros distúrbios elétricos, tais como sobretensões, subtensões e desequilíbrios de tensão. O fato de estar o barramento CC conectado à própria rede sob distúrbio, possibilita que o DVR compense distúrbios através da injeção não só de potência reativa, como também de potência ativa.

As duas possibilidades de suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede são descritas a seguir. O princípio de funcionamento de tais topologias e seu desempenho são apresentados considerando-se a utilização de um retificador de 6 pulsos não-controlado como conversor CA-CC *shunt*.

3.3.2.1 CONVERSOR CA-CC LIGADO NO LADO DA FONTE

A topologia que considera um conversor CA-CC ligado no lado da fonte, ou a montante do transformador série do DVR, é ilustrada de forma simplificada na figura 3.16 a seguir:

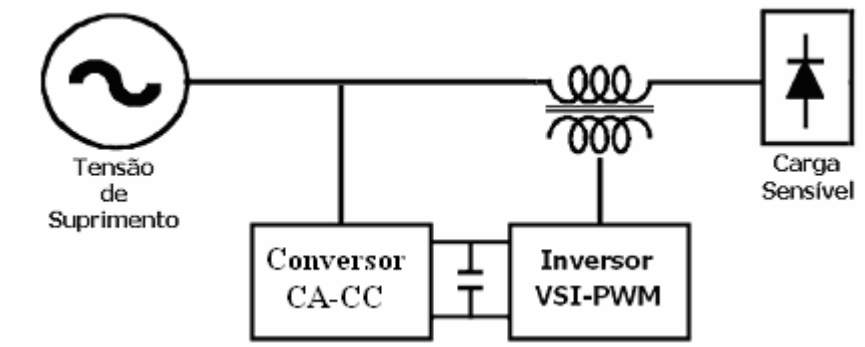

Figura 3.16 – Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede, a montante do transformador série.

Pode-se dizer que essa topologia também possui uma tensão CC não-controlável durante o distúrbio, uma vez que, na ocorrência de um afundamento ou elevação de tensão, a tensão do barramento CC varia de acordo com a tensão da rede. Por isso, a aplicação de tal topologia deve vir precedida de um estudo minucioso que garanta a existência de condições suficientes para a completa restauração da tensão sob distúrbio, uma vez que, durante a ocorrência de um afundamento de tensão, ou seja, no momento em que o retificador necessita retirar energia da rede, as amplitudes das tensões

poderão estar bastante reduzidas. Em situações mais críticas, em que se faz necessário um aumento da capacidade de armazenamento do barramento CC, pode-se recorrer à utilização de um transformador elevador conectando o conversor CA-CC ao sistema elétrico, aumentando assim o aproveitamento das tensões sob distúrbio. Porém, tal aplicação representa custos adicionais referentes à aquisição do referido transformador e às perdas elétricas inerentes a este, além de elevar os custos dos dispositivos de potência do DVR [8].

Analisando a figura 3.16, pode-se dizer que, em condições normais de operação, a tensão CC é aproximadamente igual ao valor de pico da tensão fase-fase do sistema. Assim, considerando a adoção de um retificador de 6 pulsos não-controlado, durante a ocorrência de um afundamento ou elevação de tensão, a tensão do barramento CC tenderá ao valor da tensão remanescente do sistema, v_r, como descrito na equação (3.19) a seguir [6]:

$$V_{CC} \approx |v_r| \tag{3.19}$$

Tomando os valores de pico das grandezas elétricas da carga como referência e considerando um afundamento de tensão trifásico, as máximas tensões experimentadas pelos conversores série (inversor VSI-PWM) e *shunt* (retificador não-controlado de 6 pulsos) são, respectivamente,

$$|v_{serie}| = |1 - V_{r(pu)}| = |V_{DVR(pu)}| \tag{3.20}$$

$$|v_{shunt}| = 1\ pu \tag{3.21}$$

e as máximas correntes são, respectivamente:

$$\left|i_{serie}\right| = 1\ pu \tag{3.22}$$

$$\left|i_{shunt}\right| = \frac{\left|1 - V_{r(pu)}\right|}{\left|V_{r(pu)}\right|} = \frac{\left|V_{DVR(pu)}\right|}{\left|V_{r(pu)}\right|} \tag{3.23}$$

A característica dessa topologia de demandar elevadas correntes para a mitigação de afundamentos de tensão pode ser ilustrada através da equação (3.23). Se o afundamento em questão for para 0,3 pu, por exemplo, a corrente que fluirá através do retificador será de 2,33 pu. Esse fato evidencia a baixa eficiência dessa topologia na mitigação de afundamentos severos, uma vez que a solicitação de elevadas correntes intensifica ainda mais a queda de tensão a montante do transformador série durante o distúrbio e, como conseqüência, a queda de tensão no barramento CC.

As correntes não-senoidais do retificador ainda são capazes de provocar distorções de tensão que, dependendo da situação, podem ser prejudiciais ao pleno funcionamento das diversas cargas ligadas ao sistema. Tais distorções podem ser amenizadas através da adoção de filtros amortecidos ou sintonizados.

Através da combinação das equações (3.20) e (3.21) com as equações (3.22) e (3.23), respectivamente, obtém-se os valores apropriados de potência nominal que os conversores série e *shunt* devem possuir, considerando uma afundamento de tensão trifásico para $V_r(pu)$, como se segue:

$$S_{serie} = \left|v_{serie}\right| \cdot \left|i_{serie}\right| = \left|1 - V_{r(pu)}\right| = \left|V_{DVR(pu)}\right| \tag{3.24}$$

$$S_{shunt} = \left|v_{shunt}\right| \cdot \left|i_{shunt}\right| = \frac{\left|1 - V_{r(pu)}\right|}{\left|V_{r(pu)}\right|} = \frac{\left|V_{DVR(pu)}\right|}{\left|V_{r(pu)}\right|} \tag{3.25}$$

Os valores máximos de corrente e tensão no conversor *shunt* não ocorrem simultaneamente. Mas, ainda assim, a equação (3.25) tem a sua validade, pois conduz a um dimensionamento seguro do nível de potência dos elementos que compõem o equipamento.

As equações (3.24) e (3.25) mostram a diferença existente entre as potências dos conversores e a dependência que esses valores têm com o nível de afundamento mais severo que o DVR deverá compensar. O projeto de um DVR com essa topologia que deva estar apto a mitigar afundamentos de tensão trifásicos para até 0,5 pu, por exemplo, terá um inversor VSI-PWM de potência equivalente à metade da carga protegida, e um retificador com potência igual à da carga. Se o afundamento considerado no projeto for para um valor abaixo de 0,5 pu, a potência do inversor passa a ser maior do que 0,5 pu e a do retificador, supera a potência nominal da carga. Por outro lado, se o afundamento de referência for maior do que 0,5 pu, a potência do inversor se reduz e a do retificador diminui ainda mais, resultando em potências nominais relativamente menores.

Apesar de, geralmente, essa topologia apresentar um desempenho inferior na mitigação de afundamentos severos, em comparação com outras topologias, o mesmo não ocorre para o caso de afundamentos de menor severidade e maior duração. Durante a ocorrência de afundamentos de maior duração, se o nível de tensão CC diminui para um valor menor ou igual à tensão de pico remanescente do sistema, sem ficar abaixo do limite mínimo de tensão CC aceitável, $V_{CC\ f}$, o retificador continuará a fornecer a energia necessária para a mitigação do distúrbio.

Apesar de não apresentar resultados que comprovem essa afirmativa, a referência [6] faz uma ressalva ao citar que a substituição do retificador não-controlado por um controlado pode representar a eliminação de algumas das desvantagens apresentadas por essa topologia. Porém, tal implementação

também implicará o aumento do custo e da complexidade operacional do DVR.

3.3.2.2 CONVERSOR CA-CC LIGADO NO LADO DA CARGA

A topologia que utiliza um conversor CA-CC ligado no lado da carga, ou a jusante do transformador série do DVR, é ilustrada de forma simplificada a seguir, na figura 3.17:

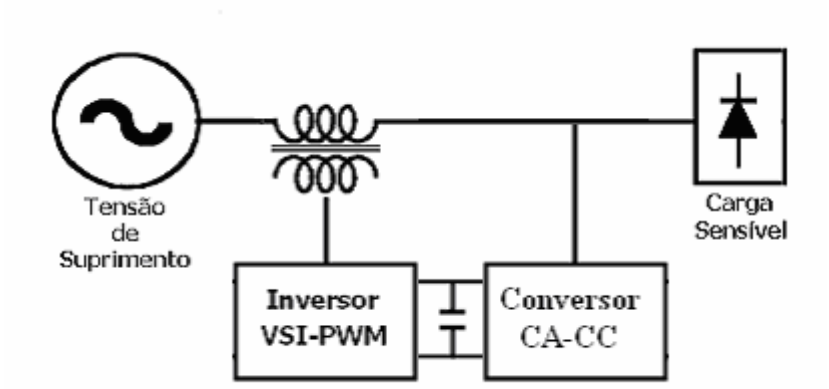

Figura 3.17 – Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede, a jusante do transformador série.

Como o barramento CC está conectado entre o transformador série e a carga sensível, a tensão de entrada do retificador é praticamente a mesma daquela dos terminais da carga sensível, o que equivale dizer que se trata de uma tensão constante ou com pequenas variações, uma vez que esta é prontamente restaurada na ocorrência de distúrbios. Como conseqüência, a tensão do barramento CC também será praticamente constante ou terá uma pequena redução do seu valor, podendo representar uma topologia com tensão CC controlável durante o distúrbio. Com isso, considerando que a tensão nos terminais da carga protegida praticamente não varia, para qualquer situação dessa topologia, o nível de tensão CC é expressa por:

$$V_{CC} \approx \left| V_{r(pu)} + V_{DVR(pu)} \right| \approx 1\ pu \tag{3.26}$$

Os valores máximos de tensão em pu, experimentados pelos conversores série e *shunt*, são os mesmos das equações (3.20) e (3.21), respectivamente, enquanto que os valores máximos de corrente são apresentados nas equações (3.27) e (3.28) a seguir [6]:

$$i_{serie} = \frac{1}{\left| V_{r(pu)} \right|} \tag{3.27}$$

$$i_{shunt} = \frac{\left| 1 - V_{r(pu)} \right|}{\left| V_{r(pu)} \right|} \tag{3.28}$$

Através da combinação das equações (3.19) e (3.20) com as equações (3.27) e (3.28), respectivamente, obtém-se o mesmo valor de potência nominal a ser adotado pelos conversores série e *shunt*, considerando um afundamento de tensão trifásico para $V_{r(pu)}$, como se define a seguir:

$$S_{serie} = S_{shunt} = \frac{\left| 1 - V_{r(pu)} \right|}{\left| V_{r(pu)} \right|} = \frac{\left| V_{DVR(pu)} \right|}{\left| V_{r(pu)} \right|} \tag{3.29}$$

Análogo ao que acontece com a topologia de suprimento pelo lado da fonte, quando se deseja aumentar o nível de tensão operacional do barramento CC, para o acréscimo da sua capacidade de armazenagem, um transformador elevador pode ser utilizado conectando o conversor CA-CC ao sistema elétrico. Porém, tal aplicação representa custos adicionais referentes à

aquisição do transformador e às perdas elétricas inerentes ao mesmo, além de aumentar os custos dos dispositivos de potência do DVR [8].

Também análogo à topologia que considera o suprimento de energia ao barramento CC pelo lado da fonte, a topologia com suprimento do lado da carga tem a desvantagem de demandar elevadas correntes pelo retificador para a mitigação do afundamento. Considerando um afundamento de tensão para 0,3 pu, por exemplo, a corrente que fluirá pelo transformador série, correspondente à corrente de saída do inversor VSI-PWM conforme a equação (3.27), será de 3,33 pu. Assim, 1 pu de corrente fluirá para o suprimento da carga e 2,33 pu de corrente, para o suprimento do retificador, conforme a equação (3.28). Nessa situação, as correntes não-senoidais do retificador podem provocar distorções de tensão prejudiciais ao pleno funcionamento das cargas sensíveis. Tais distorções podem ser amenizadas pela adoção de filtros amortecidos ou sintonizados.

Apesar das desvantagens apontadas, um DVR que adota esse tipo de topologia pode representar uma solução eficiente na mitigação de afundamentos e elevações de tensão pelo fato de a própria injeção de tensão série poder promover um controle da tensão do barramento CC. Essa configuração de DVR apresenta bastante eficiência na mitigação de afundamentos de tensão severos e de maiores durações [6].

3.3.3 - SUPRIMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DE FONTE ADICIONAL

Sistemas de armazenamento de energia, tais como as baterias, os supercapacitores, os volantes de inércia (*flywheel*) e os sistemas supercondutores (SMES), podem ser utilizados no suprimento de energia ao barramento CC de um DVR, empregando-se um conversor de alta potência entre eles [6], como ilustrado na figura 3.18 a seguir:

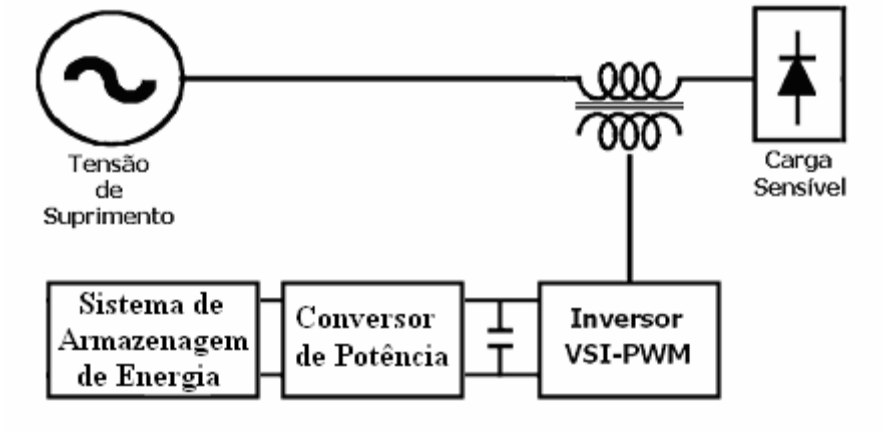

Figura 3.18 – Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através de um sistema de armazenamento de energia

A utilização do conversor de potência é fundamental para tornar tal topologia viável tecnologicamente. Durante a ocorrência do distúrbio, esse conversor promove a transferência da energia necessária para a mitigação, de um grande armazenador de energia, que é a fonte adicional, para um armazenador de menor porte em termos relativos, que é o capacitor do barramento CC. Essa transferência de energia é feita de forma que a tensão no capacitor fique praticamente constante, o que significa dizer que essa topologia tem como característica o controle da tensão CC durante a ocorrência do distúrbio. A potência desse conversor de transferência de energia pode ser calculada segundo a equação (3.30) a seguir [6]:

$$s_{transf} = s_{serie} = \left|1 - V_{r(pu)}\right| = \left|V_{DVR(pu)}\right| \tag{3.30}$$

Essa topologia apresenta-se bastante eficiente na mitigação de afundamentos de tensão severos, com a vantagem de não demandar grandes correntes da rede durante a compensação e também de não produzir efeitos indesejáveis significativos nas cargas protegidas durante a sua operação contínua, tais como distorções de corrente e tensão. Contudo, essa

configuração de DVR não possui um bom desempenho na compensação de afundamentos de tensão com duração relativamente mais longa, se comparado a outras topologias. Esse arranjo apresenta, ainda, como desvantagem, elevados custos associados à aquisição e à manutenção do sistema de armazenamento de energia, do conversor de potência, além do conjunto apresentar uma maior complexidade operacional [6].

3.3.4 SUPRIMENTO DE ENERGIA ATRAVÉS DE SISTEMA ELÉTRICO INDEPENDENTE

O fornecimento de energia ao barramento CC do DVR, através de um sistema CA independente, permite a compensação de afundamentos e elevações de tensão severos e com duração mais longa, desde que esse sistema de suprimento disponha de capacidade suficiente [8]. O suprimento de energia é feito através de um conversor CA-CC, que liga o barramento CC a uma rede de alimentação independente e isolada do sistema principal, como mostra, de forma simplificada, a figura 3.19.

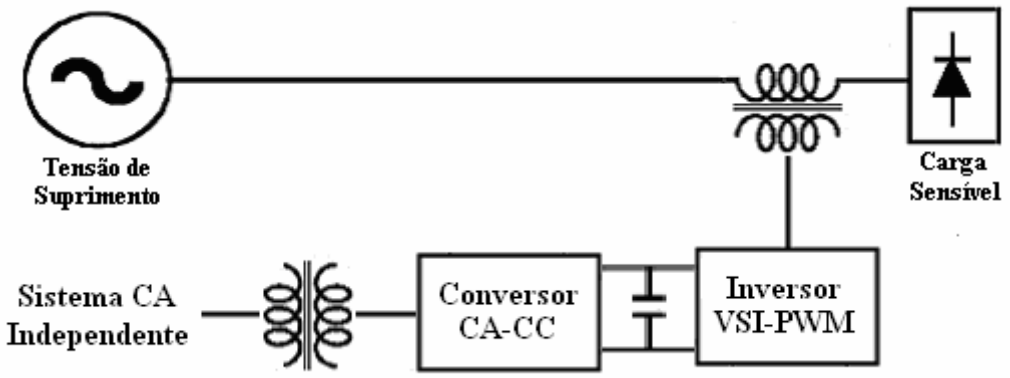

Figura 3.19 – Configuração básica de um DVR com suprimento de energia ao barramento CC através de um sistema CA independente do sistema protegido pelo DVR.

Quando há diferença entre as tensões nominais dos dois sistemas, ou quando existe a necessidade de um maior nível de tensão no barramento CC, um transformador pode ser utilizado entre o retificador e o sistema independente, como ilustra a figura 3.19.

Essa topologia apresenta o inconveniente de requisitar uma rede de energia independente. Tal condição, por si só, é um fator que inviabiliza a aplicação dessa filosofia na maioria dos casos [8], uma vez que não é comum a existência de duas redes elétricas vizinhas completamente independentes entre si, ou seja, sem nenhum ponto de conexão entre elas. Se os dois sistemas elétricos fossem supridos por uma mesma linha de transmissão, por exemplo, a ocorrência de uma VTCD originada na transmissão afetaria ambas as redes elétricas. Essa situação torna desnecessária a utilização da topologia com suprimento de energia através de sistema independente, uma vez que pelo menos uma das topologias que consideram o suprimento ao barramento CC através do próprio sistema, descrito anteriormente, teria uma capacidade de mitigação no mínimo equivalente a essa topologia.

Além da completa independência, o sistema CA de suprimento do barramento CC precisa ter uma tensão praticamente constante em condições normais de operação e, ainda, deve ser robusto o suficiente para suportar as correntes demandadas pelo retificador durante a mitigação dos distúrbios. Dessa maneira, o barramento CC terá uma tensão praticamente constante durante a ocorrência do distúrbio, representando uma topologia com controle do nível de tensão CC.

Assim sendo, pode-se dizer que esse arranjo apresenta todas as vantagens comuns à topologia que considera um suprimento ao barramento CC através da própria rede do DVR, a jusante do transformador série, com o diferencial de não possuir suas desvantagens. Ambas as topologias possuem basicamente as mesmas quantidades e tipos de componentes, e ainda

apresentam ótimo desempenho na compensação de elevações e afundamentos de tensão severos e de maior duração, além de poderem estar aptas para a compensação de outros distúrbios elétricos, tais como sobretensões, subtensões e desequilíbrios de tensão. Porém, ao contrário do que acontece com a topologia descrita no item 3.3.2.2, essa topologia não demanda elevadas correntes do próprio sistema sob distúrbio, para a mitigação. Tais correntes são solicitadas ao sistema independente e, como possuem formas de onda não-senoidais, podem provocar distorções de tensão prejudiciais ao pleno funcionamento das cargas desse sistema. Entretanto, tais distorções podem ser amenizadas pela adoção de filtros amortecidos ou sintonizados.

3.4 FILOSOFIAS DE COMPENSAÇÃO

Quando se parte para os estudos preliminares da instalação de um DVR em um determinado sistema, é de suma importância que se faça de antemão uma estimativa dos níveis mais severos de magnitude e duração das elevações e, principalmente, dos afundamentos de tensão que podem ocorrer no sistema. Adicionalmente, deve-se conhecer os valores de potência aparente e fator de potência típico da carga a ser protegida, pois são essas grandezas, associadas às características do distúrbio mais severo, que determinarão a filosofia de compensação do DVR. Em outras palavras, com base nessas informações, será avaliada a necessidade de fluxo de potências ativa e reativa do restaurador dinâmico de tensão a ser instalado no sistema elétrico. Vale ressaltar, porém, que, uma vez verificada a necessidade da injeção de potência ativa, a topologia a ser empregada deverá ter obrigatoriamente um suprimento de energia ao barramento CC do DVR.

Portanto, um DVR pode ser classificado não só em função do tipo de sistema de controle e de sua topologia, mas também, e principalmente, em função da sua capacidade de injeção de potências ativa e reativa no sistema elétrico. Finalmente, a necessidade da aplicação de uma determinada filosofia de compensação pode ser fator determinante para a escolha do tipo de topologia e do sistema de controle a serem adotados.

Para detalhar melhor essa questão, nas seções seguintes são descritas as filosofias de compensação que podem ser adotadas pelo DVR.

3.4.1 INJEÇÃO DE POTÊNCIAS ATIVA E REATIVA

Conforme foi descrito anteriormente no item 3.2.1, quando a tensão V_{DVR} injetada é mantida em quadratura com a corrente da carga protegida, ocorrem apenas fluxos de potência reativa entre o restaurador dinâmico de tensão e o sistema elétrico. Porém, para a compensação efetiva de um distúrbio elétrico, a tensão injetada só pode ser mantida em quadratura com a corrente de carga somente até certo nível de distúrbio. Uma vez ultrapassado esse limite, a completa restauração do ângulo de fase e da amplitude da tensão sob distúrbio só será garantida se houver um fluxo adicional de potência ativa entre o DVR e o sistema. Para um melhor entendimento dessa condição, serão considerados a seguir os princípios empregados na ocorrência de um afundamento de tensão em um sistema dotado de DVR.

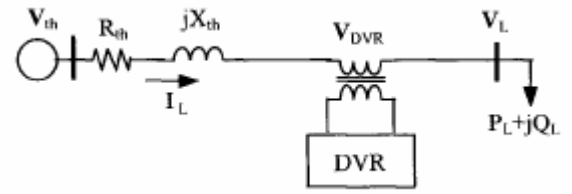

Figura 3.20 – Circuito equivalente de Thevenin da fonte de um sistema dotado de DVR.

A figura 3.20 ilustra um diagrama esquemático de um sistema elétrico de distribuição com cargas (P_L+jQ_L) protegidas por um DVR, cuja resistência, reatância e fonte de tensão equivalentes a montante do DVR são representadas por um circuito equivalente de Thévenin. Sabe-se que o valor da impedância equivalente do sistema ($Z_{th}=R_{th}+jX_{th}$) é dependente do nível de curto-circuito no barramento da carga. Quando a tensão do sistema V_{th} reduz, o restaurador dinâmico de tensão imediatamente injeta uma tensão V_{DVR}, de forma que a tensão nominal da carga, V_L, não sofra nenhuma variação. A tensão série injetada pelo DVR pode ser obtida através da seguinte equação [20]:

$$V_{DVR} = V_L + Z_{th} \cdot I_L - V_{th}, \tag{3.31}$$

Onde I_L é a corrente da carga, que pode escrita segundo a equação a seguir:

$$I_L = \left(\frac{P_L + jQ_L}{V_L} \right) \tag{3.32}$$

Tomando V_L como referência, a equação (3.31) pode ser reescrita de forma fasorial como se segue:

$$V_{DVR}\angle\alpha = V_L\angle 0 + Z_{th} \cdot I_L\angle(\beta - \varphi) - V_{th}\angle\delta, \tag{3.33}$$

Onde: α, β e δ são os ângulos de fase de V_{DVR}, Z_{th} e V_{th}, respectivamente, e φ é o ângulo do fator de potência da carga.

Como a filosofia empregada considera a possibilidade de injeção e absorção não só de potência reativa, mas também de potência ativa, a

topologia de DVR a ser adotada deve possuir, obrigatoriamente, um suprimento de energia ao barramento CC. Com isso, a magnitude e o ângulo de fase da tensão injetada podem assumir quaisquer valores, contanto que estes sejam suficientes para a plena restauração do ângulo e do módulo da tensão na carga, não importando os sentidos de fluxo de potências ativa e reativa. Assim, essa filosofia de compensação possibilita ao DVR uma maior eficiência na mitigação de afundamentos de tensão, uma vez que, dependendo do grau de severidade do distúrbio, a injeção de potência ativa pode se fazer necessária.

Porém, quando há uma predisposição para a adoção de uma filosofia de compensação que pressupõe a não-injeção de potência ativa ou a minimização da potência aparente injetada, esforços devem ser feitos para a verificação de sua viabilidade na plena restauração da tensão da carga, uma vez que certos níveis de distúrbio poderão não permitir que haja uma completa compensação, como será descrito nos itens a seguir.

3.4.2 INJEÇÃO DE POTÊNCIA REATIVA

A metodologia de injeção de potência reativa, também conhecida como filosofia de mínima injeção de potência ativa, ou de injeção nula de potência ativa (*Zero Active Power Injection* – Zapi) [20], considera a restauração da amplitude da tensão da carga com a mínima injeção de potência ativa no sistema. Porém, a utilização de tal filosofia, apesar de promover a plena restauração da amplitude da tensão na ocorrência de qualquer distúrbio, poderá não promover a manutenção do ângulo de fase da tensão pré-distúrbio, como ilustra a figura 3.21 [8].

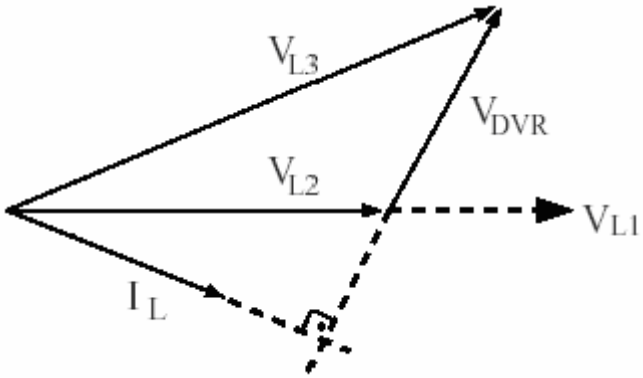

Figura 3.21 – Diagrama fasorial da compensação de um afundamento de tensão, sem a injeção de potência ativa [8].

No diagrama da figura 3.21, V_{L1} corresponde à tensão nos terminais da carga em um instante anterior ao distúrbio, V_{L2} representa a tensão remanescente no sistema durante o afundamento de tensão e V_{L3}, a tensão resultante nos terminais da carga como uma conseqüência da injeção de V_{DVR}. Como não há a injeção de potência ativa, a tensão injetada está em quadratura com a corrente I_L da carga. Como conseqüência, a tensão restaurada pelo DVR, V_{L3}, não está em fase com a tensão pré-distúrbio, V_{L1}, acarretando um defasamento súbito do ângulo de fase. Conforme foi dito anteriormente, essa variação de ângulo pode ser prejudicial a determinadas cargas sensíveis, o que representaria a inviabilização da aplicação dessa filosofia de compensação nesses casos.

Como o distúrbio mitigado descrito na figura 3.21 corresponde a um afundamento de tensão, fez-se necessária a injeção de uma tensão adiantada de 90º em relação à corrente da carga, representando a operação do DVR como um reator série. Caso esse distúrbio fosse uma elevação de tensão, seria necessária a injeção de uma tensão atrasada de 90º em relação à corrente da carga, fazendo com que o DVR opere como um capacitor série.

Esse tipo de filosofia de compensação pode ser utilizado em duas situações distintas: primeiro, quando existe a viabilidade de se usar uma

topologia sem suprimento de energia ao barramento CC, e segundo, quando se utiliza uma topologia com sistema adicional de armazenamento de energia, mas existe a necessidade de se minimizar a injeção de potência ativa para o aumento da vida útil do armazenador [43]. Para essa segunda situação, a não-injeção de potência ativa só pode ser garantida se o ângulo de fase α da tensão injetada, descrito na equação (3.33), obedecer à seguinte relação [20]:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \varphi \tag{3.34}$$

A partir da equação (3.33), chega-se ao valor de α, através da relação a seguir:

$$\alpha = arctg\left(\frac{Z_{th} I_L \operatorname{sen}(\beta - \varphi) - V_{th} \operatorname{sen}(\delta)}{V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \varphi) - V_{th} \cos(\delta)} \right) \tag{3.35}$$

Igualando as equações (3.34) e (3.35), o ângulo de fase de V_{th} pode ser expresso por [20]:

$$\delta = \arccos\left(\frac{c_1 - c_2}{\sqrt{c_3^2 + c_4^2}} \right) - \varphi \tag{3.36}$$

Onde:

$$c_1 = V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \varphi)$$

$$c_2 = Z_{th} I_L \, tg(\varphi) \operatorname{sen}(\beta - \varphi)$$

$$c_3 = V_{th}$$

$$c_4 = V_{th} \, tg(\varphi)$$

Para um valor possível de δ, a seguinte relação deve ser satisfeita:

$$\frac{c_1 - c_2}{\sqrt{c_3^2 + c_4^2}} \leq 1 \tag{3.37}$$

Através de algumas manipulações matemáticas, a equação (3.37) pode ser reescrita da seguinte forma:

$$V_{th} \geq \left(V_L \cos(\varphi) + Z_{th} I_L \cos(\beta)\right) \tag{3.38}$$

Como pode ser notado e esperado, o lado direito da equação (3.38) é dependente da impedância equivalente do sistema, dos valores de fator de potência, da corrente e da tensão nominal da carga. Através de implementações no sistema de controle, para que a condição da equação (3.33) seja satisfeita, a tensão de correção V_{DVR} poderá ficar desprovida de injeção de potência ativa, se a magnitude da tensão equivalente de *Thevenin* sob distúrbio também satisfizer a condição da equação (3.38). Caso contrário, a aplicação da filosofia de injeção nula de potência ativa se tornará inviável.

3.4.3 MINIMIZAÇÃO DA POTÊNCIA APARENTE

A filosofia de minimização da potência aparente injetada é aplicável às topologias de DVR que consideram a injeção de potência ativa no sistema e têm como finalidade a redução da potência total do DVR [8], além de promover a redução das correntes demandadas pelos conversores CA-CC na compensação dos distúrbios, para as topologias com suprimento de energia através da própria rede, e a redução do porte do armazenador de energia, para a topologia com suprimento de energia através de fonte adicional. Contudo,

assim como ocorre com a filosofia de injeção nula de potência ativa, essa filosofia de compensação apresenta limitações que podem inviabilizar a sua aplicação.

A troca de potência aparente promovida pelo DVR é sempre diretamente proporcional à tensão injetada e à corrente de carga, conforme a relação a seguir:

$$S_{DVR} = V_{DVR} \cdot I_L \tag{3.39}$$

Como a corrente de carga é uma grandeza que não pode ser controlada pelo DVR, a única forma de se proceder à minimização da potência aparente se dá através da redução da amplitude da tensão injetada.

Segundo a referência [20], para que haja a injeção mínima de potência aparente, ou a injeção da menor amplitude de tensão, a seguinte condição deve ser satisfeita:

$$\frac{\partial V_{DVR}^2}{\partial \delta} = 0 \tag{3.40}$$

A combinação das equações (3.33) e (3.40) resultam em um valor para o ângulo de fase δ da tensão equivalente de *Thevenin*, de acordo com a equação a seguir:

$$\delta = arctg\left[\frac{Z_{th} I_L \operatorname{sen}(\beta - \varphi)}{V_L + Z_{th} I_L \cos(\beta - \varphi)}\right] \tag{3.41}$$

Portanto, para que a filosofia de minimização da potência aparente seja aplicável em um sistema, é necessário que a condição estabelecida na equação

(3.41) seja satisfeita. Uma vez conhecido o valor de δ, os valores da tensão e da potência aparente injetadas pelo DVR podem ser obtidos através das equações (3.33) e (3.39), respectivamente.

3.4.4 INJEÇÃO DE TENSÃO DE SEQÜÊNCIA ZERO

A depender do nível das tensões de seqüência zero existentes em um sistema, e do grau de sensibilidade de suas cargas, pode haver a necessidade de uma filosofia de compensação que neutralize os efeitos dos distúrbios elétricos. Essa habilidade é independente da filosofia de injeção de potências ativa e reativa, adotada pelo restaurador dinâmico de tensão.

Como já se sabe, a presença de tensões de seqüência zero nos terminais das cargas pode ser bastante prejudicial a estas. As tensões de seqüência zero são causadoras de desequilíbrios no módulo e no ângulo das fases de um sistema elétrico, causando um deslocamento do neutro ou ponto equivalente (para ligação em delta), em uma dada direção. Dependendo da magnitude desse deslocamento, a elevação do potencial de neutro em relação à terra pode acarretar um estresse excessivo no isolamento, podendo levar à redução da vida útil das cargas do sistema [8].

Como as tensões de seqüência zero não se manifestam em sistemas com ligação em delta, a necessidade de se compensar esse tipo de tensão só deve existir em sistemas com ligação estrela aterrada. Portanto, como a média tensão geralmente possui ligação em delta, DVRs conectados nesse nível de tensão não necessitarão de filosofias que incluam a injeção de tensões de seqüência zero. Por outro lado, para DVRs conectados na baixa tensão, na qual geralmente a ligação é em estrela aterrada, a utilização desse tipo de compensação é essencial para que haja o controle das tensões de seqüência

zero durante a ocorrência de afundamentos de tensão proveniente de faltas assimétricas [14].

A adoção de um DVR cuja filosofia de compensação inclua a injeção de tensões de seqüência zero, além de necessitar de um sistema de controle específico que considere a inserção de tais tensões no processo de compensação, carece ainda de alterações nas ligações entre o transformador série e o inversor VSI-PWM. Como a ligação do transformador série do DVR convencional é feita em delta, conforme figura 3.13, a injeção de tensões de seqüência zero torna-se inviável. Para tanto, a referência [8] cita duas simples possibilidades de mudanças nas configurações do DVR que permitem a aplicação desse tipo de compensação, relacionadas a seguir:

- Divisão do barramento CC;
- Adição de um quarto braço ao inversor VSI-PWM.

Quanto à primeira possibilidade, a figura 3.22 ilustra o esquema de ligação de um inversor trifásico com divisão do barramento CC, através da ligação do ponto central do barramento ao neutro do sistema, dividindo-o em duas capacitâncias iguais.

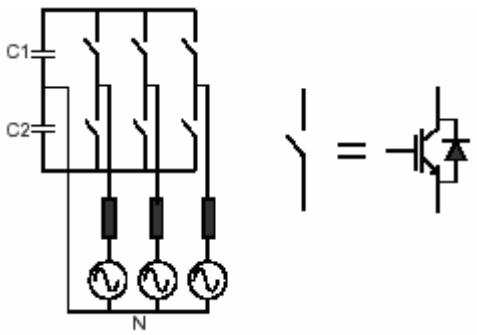

Figura 3.22 – Esquema de ligação de um inversor trifásico com divisão do barramento CC [8].

Apesar de essa configuração representar uma das formas mais simples de habilitar um conversor a produzir tensões de seqüência zero, apresenta os

inconvenientes de redução das amplitudes máximas de tensões geradas pelo conversor e a possibilidade de desbalanço das tensões dos capacitores no barramento CC. A primeira desvantagem pode ser amenizada pela utilização de maiores capacitâncias, e a segunda, através da adoção de um nível de tensão mais elevado no barramento CC [8].

No que se refere à segunda possibilidade, a figura 3.23 ilustra o esquema de ligação de um inversor dotado de 4 braços, cujo quarto braço se conecta com o neutro do sistema.

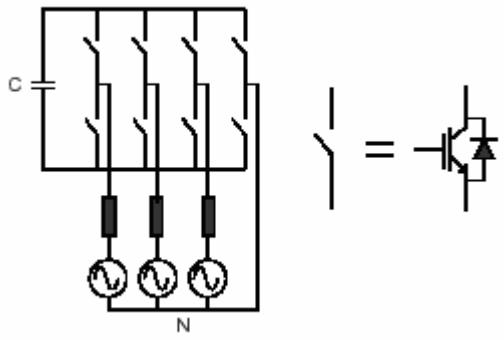

Figura 3.23 – Esquema de ligação de um inversor trifásico dotado de 4 braços [8].

Por estar conectado ao neutro, geralmente a potência requerida para esse quarto braço é consideravelmente menor do que para os demais. Adicionalmente, a inserção de um quarto braço com igual capacidade de potência, associado a uma chave de transferência, pode ser uma opção interessante, pois permite a substituição rápida de um dos braços que por ventura se danifique [8].

3.5 COMPONENTES BÁSICOS DO DVR

Para que um restaurador dinâmico de tensão alcance um nível de eficiência desejado, é necessário que seus componentes sejam dimensionados e ajustados, criteriosamente, de forma conjunta com o sistema de controle. A depender da aplicação, tais ações podem representar, ainda, uma minimização do custo total do equipamento e uma redução da possibilidade de avarias do equipamento. Tais critérios devem levar em consideração, basicamente, certas características da carga a ser protegida, a exemplo de tensões mínimas e máximas toleráveis, fator de potência e potência máxima, e dos distúrbios elétricos a serem mitigados, tais como as máximas e mínimas amplitudes e tempos máximos de duração.

Considerando a configuração mais simples de um restaurador dinâmico de tensão, correspondente à topologia sem fonte adicional de fornecimento de energia ao barramento CC, descrita no item 3.3.1, pode-se dizer que são os seguintes os componentes básicos de um restaurador dinâmico de tensão: o inversor de freqüência, o transformador série e o banco de capacitores do barramento CC. Esses elementos são partes constituintes obrigatórias a qualquer tipo de topologia de DVR, uma vez que são fundamentais para o pleno funcionamento do equipamento.

Dependendo da filosofia adotada pelo inversor de freqüência para a sintetização das tensões a serem injetadas na rede, pode-se verificar uma considerável geração de distorção harmônica nessas tensões. Em certos casos, a distorção harmônica gerada é tão acentuada que a utilização de um filtro associado ao transformador série passa a ser necessária. Com isso, o filtro garante que a tensão restaurada tenha não só o seu valor eficaz coincidente com a tensão pré-distúrbio, mas também a sua forma de onda, aumentando, assim, a eficiência do DVR.

Nesse sentido, serão descritas, a seguir, as formas de dimensionamento e as características dos elementos básicos que compõem um DVR, e estabelecidos alguns comentários sobre os tipos de filtros que podem ser associados ao transformador série.

3.5.1 O INVERSOR DE FREQÜÊNCIA

Para que não seja necessária a utilização de um projeto de inversor de freqüência superdimensionado, é preciso que o inversor seja projetado através de uma série de critérios que tomem como base o comportamento térmico dos seus dispositivos e as características elétricas dos outros elementos do DVR [8].

Dos critérios relacionados aos limites térmicos, dois deles são considerados básicos para a escolha preliminar dos dispositivos de potência: a corrente de pico de saída do inversor e a tensão do barramento CC. Através do valor de pico da corrente de saída, associado aos limites de capacidade térmica dos dispositivos de potência, define-se a corrente nominal do inversor. Já a escolha da tensão de bloqueio é feita de forma que esta seja superior à tensão do barramento CC, uma vez que os limites de tensão dos dispositivos estão relacionados, dentre outros, a fenômenos de ruptura que podem causar avarias aos mesmos. Neste sentido, um critério bastante difundido no meio científico consiste em definir a tensão de bloqueio como um valor aproximadamente igual ao dobro da tensão do barramento CC [8].

A escolha do método de sintetização das tensões a ser empregado em um inversor trifásico pode ser fator determinante para um bom projeto de um restaurador dinâmico de tensão. Nessa escolha, aspectos como a distorção harmônica das tensões de saída e o aproveitamento da tensão no barramento CC devem ser levados em consideração.

Dos métodos existentes, os que utilizam a técnica de modulação em largura de pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM) são os que normalmente apresentam os melhores desempenhos. Como as técnicas de modulação PWM geralmente possuem uma freqüência de chaveamento muito maior do que a freqüência da rede elétrica, podendo chegar a 10 kHz, o espectro harmônico das tensões de saída do inversor apresenta bandas de freqüência em torno da freqüência de chaveamento e seus múltiplos inteiros, levando a um baixo conteúdo harmônico dessas tensões. Quanto maior a freqüência de chaveamento utilizada, menores serão as distorções harmônicas geradas pelas tensões injetadas.

Os métodos de cálculo da potência nominal do inversor, em função da topologia adotada e do afundamento mais severo que o DVR deverá estar apto a mitigar, já foram previamente apresentados e esclarecidos no item 3.3 deste capítulo.

3.5.2 O CAPACITOR DO BARRAMENTO CC

O capacitor, ou banco de capacitores do lado CC do restaurador dinâmico de tensão opera como um armazenador de energia, como nas topologias que consideram o suprimento de energia com e sem fonte adicional. Por outro lado, em certas situações, pode operar como um simples elo CC, promovendo a ligação do conversor CA-CC com o inversor e auxiliando na estabilidade da tensão, como acontece nas topologias que consideram um retificador conectado no lado da carga ou em outro sistema elétrico independente.

Conforme foi citado anteriormente, o correto dimensionamento do barramento CC, através da escolha do nível de tensão operacional e do valor de capacitância, influi diretamente sobre a capacidade do equipamento de

mitigar distúrbios elétricos, sendo, portanto, fundamental para um bom projeto de DVR.

A escolha do nível de tensão e do valor de capacitância do barramento CC pode ser feita de forma diferenciada para topologias com e sem controle do nível de tensão.

Nas topologias desprovidas de controle da tensão CC, a queda de tensão durante a mitigação de um afundamento é inevitável. Entretanto, é possível dimensionar o barramento CC, de forma que o valor de sua tensão não fique inferior a um nível mínimo necessário para a correta operação do inversor. À título de ilustração, suponha que se deseje promover a compensação de afundamentos de tensão em um sistema elétrico de baixa tensão através de uma topologia de DVR com retificador ligado no lado da fonte. A carga a ser protegida requer uma potência mínima de 100 kW, a tensão de linha nominal do sistema é de 380 V e o afundamento trifásico mais severo possui uma magnitude para 0,5 pu e duração de 0,5 segundo. Como o retificador está ligado diretamente no sistema, a montante do transformador série, a tensão do barramento CC é de aproximadamente 537 V, equivalente ao valor de pico da tensão nominal do sistema. Para que não haja falhas na sintetização das tensões feitas pelo inversor durante a ocorrência do distúrbio, é preciso que o nível de tensão do barramento CC não atinja valores inferiores a 60% do seu valor nominal. Para tanto, o cálculo do valor da capacitância do barramento deve ser feito como descrito a seguir.

O cálculo da energia armazenada ΔE disponível para a compensação deve ser feito considerando o nível de potência mínima $P_{mín}$ requerida pela carga e o intervalo de tempo Δt de duração máxima do afundamento mais severo, como descrito na equação a seguir:

$$\Delta E = P_{mín} \cdot \Delta t = (100kW) \cdot (0{,}5s) = 50kJ \tag{3.42}$$

Para a topologia considerada nesse exemplo, tem-se que, durante a ocorrência do afundamento de tensão, a tensão de pico de entrada do retificador fica inferior à tensão no barramento CC, uma vez que seus diodos ficam inversamente polarizados, havendo o bloqueio do fluxo de energia através do retificador. Nessa situação, o suprimento para o inversor é feito através da energia acumulada no capacitor CC. Nessa condição, a equação (3.16), aplicável à topologia sem fonte adicional de energia, passa a ser válida também para a topologia do exemplo em questão, sendo reescrita como:

$$\Delta E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left(V_{CC\,i}^2 - V_{CC\,f}^2 \right) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot \left(537^2 - 322{,}2^2 \right) \tag{3.43}$$

Igualando as equações (3.42) e (3.43), tem-se que o valor calculado para a capacitância do barramento CC deve ser de aproximadamente 540 mF.

Se a topologia utilizada nesse exemplo tivesse o controle do nível de tensão CC do barramento, a obtenção do valor da capacitância seria mais simplificada, e poderia ser feita através da equação (3.15), onde E é equivalente à energia armazenada no capacitor, suficiente para a mitigação do afundamento, equivalente a 50 kJ, e V_{cc} é a tensão nominal de 537 V do barramento CC. Com isso, a capacitância calculada é de aproximadamente 347 mF, valor este 35% inferior ao obtido na topologia sem controle do nível de tensão.

Para os dois exemplos descritos anteriormente, é conveniente salientar que o tamanho dos capacitores calculados provavelmente inviabilizará as suas aplicações sob o ponto de vista técnico e econômico. Assim, a única forma de obtenção de valores de capacitâncias inferiores se dá através da adoção de níveis de tensão operacionais mais elevados no barramento CC.

3.5.3 O TRANSFORMADOR SÉRIE

Conforme descrito anteriormente, o transformador série do DVR, além de ser o elo de ligação do equipamento com o sistema CA, compatibilizando os níveis de impedância do restaurador com o sistema, ainda pode ser responsável pela eliminação das harmônicas de seqüência zero, através da sua ligação em delta. Assim, por se tratar de um equipamento bastante complexo, figura como um dos pontos críticos no projeto de um restaurador dinâmico de tensão [44].

Pelo fato de sua ligação ser em série com o sistema, é desejável que o transformador do restaurador dinâmico de tensão apresente algumas características específicas, basicamente relativas aos valores de resistências e reatâncias do seu circuito equivalente e à sua relação de transformação.

Nesse sentido, para que haja uma minimização das perdas, valores baixos das resistências dos enrolamentos primários e secundários se fazem necessários. A restrição sobre os valores das indutâncias de dispersão depende da queda de tensão e dos erros gerados no transformador [8].

Para a escolha da relação de transformação, devem ser consideradas as tensões máximas e mínimas do barramento CC, bem como a tensão máxima a ser injetada na rede. Dessa forma, a adoção de relações de transformação como 1:2 e 1:3 levaria a um melhor aproveitamento da tensão no barramento CC, principalmente nas topologias em que haja variação do seu nível de tensão durante a ocorrência do distúrbio, levando à mitigação de afundamentos para até 0,33 e 0,25 pu, respectivamente. Entretanto, a escolha dessas relações de transformação resulta em um baixo aproveitamento dos dispositivos semicondutores, que estarão quase sempre com índices de modulação reduzidos. Por outro lado, a utilização de relações de transformação de 2:1 e 3:1 pode ser inviável, uma vez que conduz à

necessidade de elevados níveis de tensões no barramento CC [8]. Assim, conclui-se, por eliminação, que a relação de transformação de 1:1 indica ser a mais apropriada, sendo, inclusive, aquela mais freqüentemente utilizada e citada na literatura.

Para evitar que o transformador série entre em saturação em razão de transitórios ocorridos na compensação de distúrbios mais severos, é necessário que este possua sempre uma potência nominal superior à do inversor. Assim sendo, nos DVRs comercialmente disponíveis, os transformadores série têm sido projetados com o dobro da potência nominal do inversor [8].

3.5.4 O FILTRO DO TRANSFORMADOR SÉRIE

Como já citado anteriormente, dependendo dos níveis de distorção harmônica de tensão, provocados pelos chaveamentos dos semicondutores do inversor, a aplicação de um filtro em combinação com o transformador série do DVR pode ser necessária para que haja uma atenuação das ordens harmônicas mais elevadas. Na literatura, existem relatos de aplicações de filtros puramente capacitivos [45, 46], filtros LC (indutivo-capacitivo) [45, 46] e filtros RC (resistivo-capacitivo) [22, 47], que são ligados nas três fases, em paralelo com o transformador série, no lado do inversor ou no lado sistema elétrico, como ilustra a figura 3.24 a seguir:

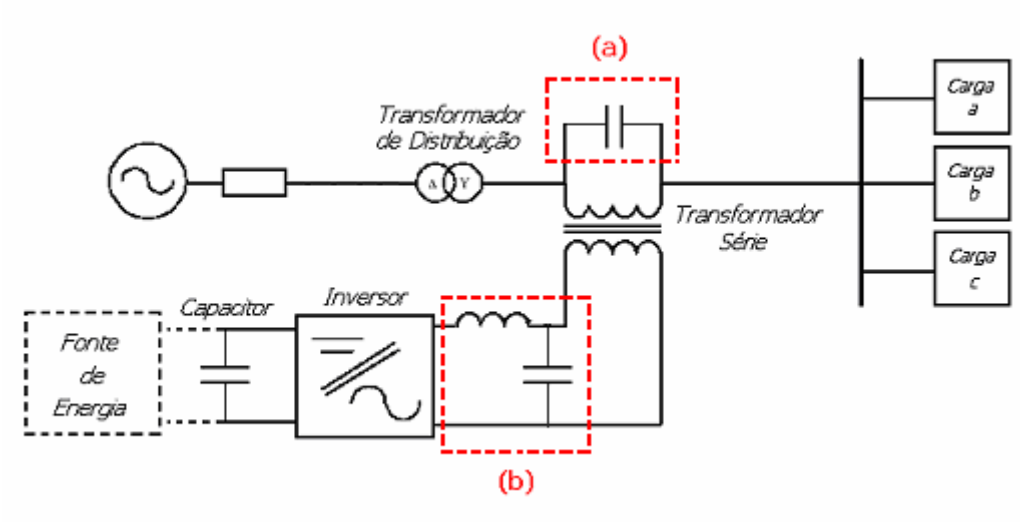

Figura 3.24 – Diagrama esquemático de um DVR conectado a um sistema de distribuição. (a) Filtro capacitivo conectado no lado do sistema. (b) Filtro LC conectado no lado do inversor.

A figura 3.24 mostra os dois filtros mais comumente utilizados nos respectivos tipos de conexão: filtro puramente capacitivo no lado do sistema e filtro LC no lado do inversor. Entretanto, filtros puramente capacitivos também podem ser utilizados no lado do inversor, assim como filtros RC também podem ser aplicados no lado do sistema.

Apesar de estarem em paralelo com o transformador série, ambos os tipos de conexão do filtro apresentam diferentes vantagens e desvantagens durante a operação. A grande vantagem da aplicação do filtro no lado do inversor é a sua proximidade com a fonte geradora de distorções harmônicas. Assim, através da utilização de um filtro LC com essa forma de conexão, por exemplo, pode-se garantir que correntes harmônicas de ordens elevadas não fluirão através do transformador série. Todavia, a indutância desse filtro pode provocar quedas de tensão e defasamentos do ângulo de fase da tensão fundamental de saída do inversor, resultando no comprometimento do desempenho do DVR [46]. A não-utilização do indutor no filtro, tornando-o puramente capacitivo, pode ser bastante bem-vinda nesses casos, uma vez que elimina esse tipo de problema, apesar de diminuir a sua capacidade de filtragem.

A adoção de um filtro no lado do sistema, apesar de não apresentar as desvantagens do outro tipo de conexão, possui outros inconvenientes. Nesse caso, como o filtro está conectado no lado oposto ao inversor, todas as correntes harmônicas fluirão no transformador série, necessitando de um transformador de potência nominal mais elevada. Para um filtro puramente capacitivo, a filtragem ocorre através da combinação da sua capacitância com a impedância do transformador. Nessa situação, a combinação de um valor específico de resistência em série com o capacitor, representando um filtro RC, pode significar o aprimoramento do desempenho do conjunto.

O problema comum a ambas as formas de conexão é que o capacitor do filtro poderá acarretar a necessidade do aumento da potência do inversor. Por isso, a minimização do efeito do filtro na potência do inversor deverá sempre ser considerada no projeto de um restaurador dinâmico de tensão [46].

Segundo a referência [48], a adoção do filtro no lado do inversor é geralmente a mais indicada, tendo em vista a facilidade, no processo de filtragem, promovida pela proximidade do filtro com a fonte geradora das distorções harmônicas. Tal qualidade compensa as possíveis desvantagens inerentes a esse tipo de conexão.

3.6 ESQUEMAS DE PROTEÇÃO DO DVR [49]

Sistemas dotados de compensadores estáticos avançados, principalmente os conectados em série como o DVR e o ASC, necessitam de especial atenção na concepção e projeto dos seus sistemas de proteção. Essa preocupação se deve ao fato de tais dispositivos estarem susceptíveis a avarias devidas à ocorrência de distúrbios severos, tais como curto-circuito a jusante

do transformador série e sobretensões transitórias devidas a chaveamento de banco de capacitores e descargas atmosféricas.

O sistema de proteção de uma rede de distribuição dotada de restaurador dinâmico de tensão, além de estar apto a proteger a carga de distúrbios que o DVR não seja capaz de mitigar, deve também proteger o próprio compensador dos distúrbios que possam causar danos ao mesmo e, ainda, isolá-lo no caso de falha operacional em um dos seus componentes. A figura 3.25 ilustra os principais tipos de dispositivos de proteção de um DVR em um sistema de distribuição.

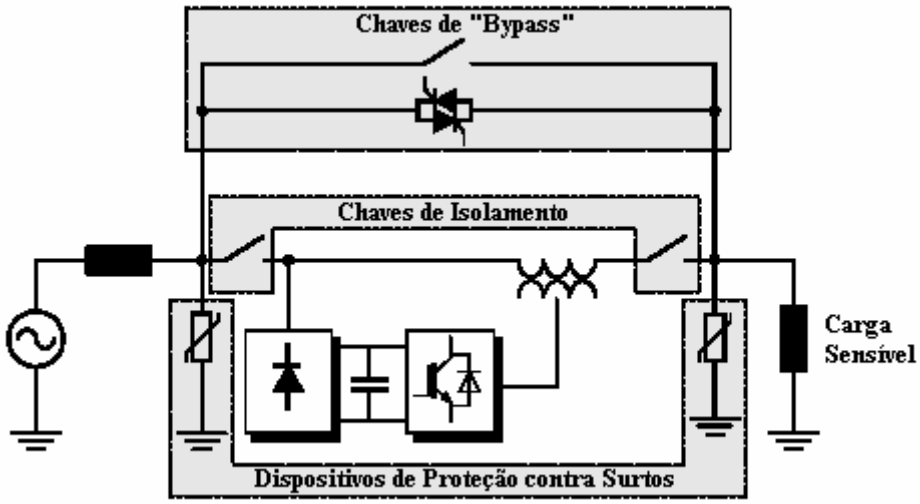

Figura 3.25 – Diagrama esquemático dos principais tipos de proteção de um DVR [49].

Os dispositivos de proteção contra surtos são os elementos responsáveis pela proteção do DVR contra transitórios gerados por descargas atmosféricas e chaveamento de bancos de capacitores. Os principais tipos utilizados são:

- Pára-raios a tubo de gás (*Gás Tube Arrester* – GTA);
- Diodos em avalanche;
- Varistor de metal de óxido (*Metal oxide varistor* – MOV).

A especificação desses dispositivos de proteção depende não só das características dos transitórios, mas do local no sistema onde o DVR está instalado.

Os pára-raios a tubo de gás possuem uma grande capacidade de absorção de energia proveniente do distúrbio. Contudo, a sua aplicação em sistemas de corrente alternada é bastante limitada, pelo fato de ser a extinção do arco elétrico dependente da relação *X/R* do sistema e da relação entre a impedância equivalente do sistema e da resistência efetiva do pára-raio.

Nos diodos em avalanche, a energia do distúrbio é quase que completamente dissipada na sua junção PN. Essa característica reduz, consideravelmente, a capacidade de absorção de energia desse dispositivo, limitando a sua aplicação a sistemas com níveis reduzidos de susceptibilidade a esses distúrbios.

Já para os varistores de metal de óxido, que são compostos por associações em série e em paralelo de micro-varistores formados por grãos de zinco e óxido, a energia do surto é dissipada por todo o seu conjunto. Essa grande capacidade de absorção de energia torna esse dispositivo o mais indicado para a proteção de equipamentos em sistemas com grandes níveis de exposição aos distúrbios.

As chaves de *bypass*, indicadas na figura 3.25, possuem como função principal a proteção do restaurador dinâmico de tensão frente aos curtos-circuitos, originados a jusante do transformador série. Como o DVR é um equipamento conectado em série, ele deve estar apto a suportar qualquer condição de falta no lado da carga protegida, até que as chaves de *bypass* atuem desviando as correntes de curto-circuito do compensador.

Para uma proteção eficaz, o sistema de *bypass* de um DVR deve ser composto por tiristores, para operações rápidas, em paralelo com uma chave eletromecânica dotada de alta suportabilidade às correntes de curto-circuito.

Dessa forma, os tiristores deverão conduzir as correntes de curto-circuito até o completo fechamento da chave eletromecânica.

Finalmente, as chaves de isolamento são responsáveis pela retirada de operação do DVR nos casos de falha na operação ou avaria de algum dos seus componentes, ou na necessidade de se proceder a alguma manutenção no equipamento. A operação dessas chaves deve ser feita em conjunto com o sistema de *bypass*, para que a saída e a nova entrada em operação do restaurador dinâmico de tensão sejam feitas sem que haja interrupções no fornecimento de energia para a carga.

3.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo, inicialmente, objetivou realizar a descrição do princípio de funcionamento e dos modos de operação de um restaurador dinâmico de tensão na compensação de afundamentos e elevações de tensões, além de fazer um detalhamento dos seus elementos básicos, dos tipos de topologia existentes e dos seus possíveis esquemas de proteção.

Neste capítulo, enfatizou-se a importância de se compreender o princípio de funcionamento do DVR a partir do entendimento dos seus modos de operação como compensador série avançado, capaz de injetar e absorver potências ativa e reativa. Nesse sentido, o restaurador dinâmico de tensão é uma tecnologia *Custom Power*, originada a partir da idéia de que um compensador estático série avançado aplicado à transmissão, o qual compõe os dispositivos FACTS, poderia também ser utilizado nos sistemas de distribuição.

O defasamento existente entre a tensão injetada e a corrente da carga, aliado ao tipo de topologia adotada, são os fatores decisivos para que haja a

troca de energias ativa e reativa entre o DVR e o sistema. A capacidade de controle desse defasamento angular, associada a uma topologia apropriada e às características do sistema, determinarão não só a capacidade de mitigação do equipamento, mas também a viabilidade da adoção de filosofias de compensação que considerem uma minimização na injeção de potência ativa ou de potência aparente.

Através da descrição do princípio de funcionamento e do desempenho operacional de cada uma das topologias de DVR, ficou evidenciado que tais topologias possuem diferenças significativas em termos de eficiência na compensação dos distúrbios, de complexidade operacional e de custos de aquisição, manutenção e funcionamento.

Ressaltou-se ainda neste capitulo, a importância de haver um suprimento de energia conectado ao barramento CC do DVR para que o fluxo de potência ativa do restaurador dinâmico de tensão para a rede elétrica se torne viável, representando ganhos de desempenho na mitigação de afundamentos de tensão. Porém, a baixa eficiência relativa da topologia que considera um retificador ligado no lado da fonte na mitigação de afundamentos de maior intensidade e duração, evidencia a necessidade adicional de haver um controle do nível de tensão no barramento CC durante a ocorrência dos distúrbios.

Apesar da topologia sem fonte de energia ligada ao barramento CC apresentar uma elevada variação no nível de tensão do capacitor durante o afundamento, significando uma baixa eficiência relativa do conjunto na compensação de afundamentos severos e de maior duração, a sua aplicação deve sempre ser levada em consideração, em razão de possuir menos elementos e de causar menores distorções harmônicas de tensão na rede elétrica.

As topologias que consideram o suprimento de energia através da própria rede apresentam a facilidade de não necessitar de uma fonte de energia externa para o suprimento do barramento CC. Essa característica faz com que elas tenham uma maior aplicabilidade, em comparação com a topologia com suprimento através de sistema independente, uma maior facilidade operacional e menores custos de aquisição e manutenção, em comparação com a topologia que utiliza fonte de armazenagem de energia. No entanto, tais topologias possuem a desvantagem de demandar elevadas correntes do sistema, como uma conseqüência da mitigação de afundamentos de tensão, além de implicar no aumento da distorção harmônica de tensão do sistema devido à operação do retificador.

A topologia com suprimento ao barramento CC através de fonte adicional de armazenagem de energia, representa uma configuração de DVR bastante eficiente na mitigação de afundamentos de tensão severos e de variados tipos. Além disso, apresenta a vantagem de não demandar grandes correntes da rede durante a compensação e de não produzir efeitos indesejados tão significativos, tais como distorções de tensão nas cargas sensíveis. Porém, a aplicação de tal topologia representa altos custos associados à aquisição e à manutenção do sistema de armazenamento de energia e do conversor de potência, além de possuir uma maior complexidade operacional.

Apesar de todas as vantagens relacionadas a desempenho na compensação, efeitos sobre a rede elétrica, custos e facilidade operacional, apresentadas pela topologia com suprimento de energia através de outro sistema elétrico, tal configuração de DVR apresenta uma baixa aplicabilidade. Isso se deve à necessidade de um sistema elétrico completamente independente da rede onde se encontram as cargas sensíveis aos distúrbios.

Além de detalhar os princípios de funcionamento e os critérios de dimensionamento dos diversos elementos que compõem os vários tipos de topologia de DVR, este capítulo também foi útil para salientar as vantagens e desvantagens da aplicação de tal tecnologia. Através da sua leitura, fica implícito que, independentemente dos tipos de topologia, controle e filosofia de compensação, são as seguintes as principais vantagens da aplicação de um restaurador dinâmico de tensão, na mitigação de afundamentos e elevações de tensão: o alto desempenho na compensação dos distúrbios, o fato de a potência nominal do DVR ser geralmente inferior à da carga protegida, a possibilidade de aplicação tanto na baixa quanto na alta tensão e a alternativa de se mitigar outros distúrbios da qualidade da energia. Por outro lado, pode-se destacar como principais desvantagens o elevado custo de aquisição, em comparação com outros equipamentos inibidores dos efeitos das VTCDs; suas perdas elétricas nos longos períodos em que está em *stand by* e a necessidade de adoção de esquemas de proteção adicionais.

CAPÍTULO 4

SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

4.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Como já foi explicado anteriormente, existe hoje, na literatura técnica, uma série de publicações que comprovam a eficiência do restaurador dinâmico de tensão na compensação de afundamentos de tensão em sistemas de distribuição. Porém, são poucas as pesquisas publicadas que discutem e comparam o desempenho das diversas topologias de DVR [6], uma vez que a grande maioria das publicações leva sempre em consideração apenas uma das configurações de restaurador dinâmico de tensão.

Nesse sentido, as simulações computacionais, apresentadas neste capítulo, visam a contribuir para o estudo do desempenho de algumas topologias de restaurador dinâmico de tensão, aplicadas na média tensão de sistemas de distribuição, enfocando a compensação não só de afundamentos, mas também de elevações de tensão.

As topologias consideradas nas simulações são a de suprimento de energia ao barramento CC sem fonte adicional e as que fazem esse suprimento através da própria rede sob distúrbio, respectivamente descritas nos itens 3.3.1 e 3.3.2.

Como serão detalhadas a seguir, as simulações utilizam um sistema de distribuição com nível elevado de potência das cargas submetidas ao distúrbio e consideram a ocorrência de distúrbios elétricos com um alto grau de severidade. Em virtude disso, a topologia que utiliza suprimento de energia ao

barramento CC através de uma fonte adicional de armazenamento de energia, descrita no item 3.3.3, não será considerada nas simulações, por representar uma aplicação bastante onerosa para esse tipo de situação.

Como a topologia que considera o suprimento de energia ao barramento CC através de um sistema elétrico independente, descrita no item 3.3.4, apresenta uma aplicação inviável, na grande maioria dos casos, uma vez que é bastante incomum a existência de duas redes elétricas vizinhas completamente independentes entre si, tal configuração de DVR também não será considerada nas simulações.

Toda a análise relacionada à operação de compensadores estáticos avançados, bem como qualquer estudo que envolva grandes sistemas elétricos de potência, requer simulações digitais dos seus comportamentos dinâmicos. Tais softwares de simulação devem possuir modelos matemáticos desenvolvidos para uma grande variedade de componentes elétricos, além de estar aptos a realizar simulações específicas relacionadas a fluxo de carga, transitórios eletromagnéticos e distorções harmônicas de tensão e corrente. Nesse sentido, a utilização de uma única ferramenta computacional, capaz de proporcionar simultaneamente os mais diferentes estudos associados à engenharia elétrica, se faz necessária [4]. Por esse motivo, o software utilizado nesses estudos foi o simulador Saber, que utiliza uma variada biblioteca de componentes elétricos, eletroeletrônicos e eletromecânicos, modelados no domínio do tempo através de uma linguagem própria (Mast), além de possuir grande versatilidade gráfica e capacidade de interconexão com rotinas elaboradas em outras linguagens de programação (C e Fortran), permitindo a execução de estudos bastante complexos e análises aprofundadas. Tal simulador é bastante conhecido e amplamente utilizado no meio acadêmico da Universidade Federal de Uberlândia, fazendo-se dispensável descrição mais detalhada desse software.

Vale ressaltar que os modelos matemáticos utilizados para simular o sistema de controle do DVR foram aproveitados das *templates* desenvolvidas para o compensador estático série avançado (ASC) da referência [4]. O princípio de funcionamento desse sistema de controle está devidamente detalhado nesta referência e é bastante semelhante ao apresentado no item 3.2.3.

4.2 – DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO SIMULADO

Para realização das simulações propostas, utilizou-se o sistema elétrico apresentado na figura 4.1, o qual é composto por uma fonte (concessionária) que alimenta dois conjuntos de cargas industriais, possuindo um deles conexão com o restaurador dinâmico de tensão.

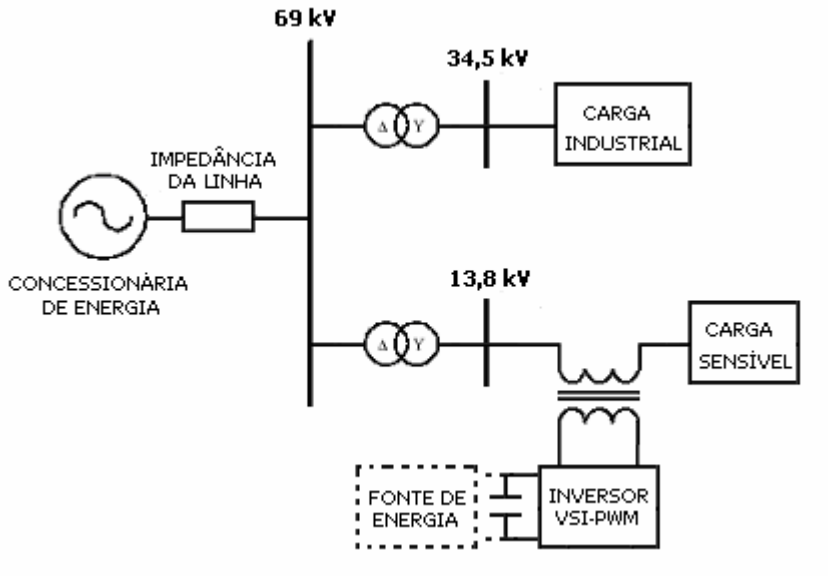

Figura 4.1 – Diagrama unifilar do sistema elétrico simulado

O DVR é conectado ao alimentador de 13,8 kV, que supre diversos transformadores de distribuição com secundários de 220 V e 380 V,

alimentando variadas cargas sensíveis às VTCDs. Para efeito de simplificação, tais transformadores e respectivas cargas são representados por uma grande carga indutiva, denominada "carga sensível". Da mesma forma, o alimentador de 34,5 kV alimenta diversos transformadores e cargas, que também são representados por uma carga indutiva de grande porte, denominada "carga industrial". Os dados dos componentes do sistema elétrico simulado são apresentados da tabela 4.1 à 4.6, a seguir:

Tabela 4.1 – Parâmetros do suprimento de energia (Concessionária)

Descrição	Valor
Potência nominal	300 MVA
Tensão de linha nominal	69 kV
Freqüência	60 Hz

Tabela 4.2 – Parâmetros da linha de transmissão

Resistência por fase (Ω)	Indutância por fase (mH)
0,2	5

Tabela 4.3 – Dados do transformador 69-13,8 kV

Potência Nominal (MVA)	Conexão	Resistência (%)	Reatância (%)
10	Δ-Y aterrada	0,5	6

Tabela 4.4 – Dados do transformador 69-34,5 kV

Potência Nominal (MVA)	Conexão	Resistência (%)	Reatância (%)
25	Δ-Y aterrada	0,5	6

Tabela 4.5 – Dados da carga sensível

Potência Aparente (MVA)	Fator de Potência	Freqüência nominal (Hz)	Tensão nominal (kV)
8	0,92 indutivo	60	13,8

Tabela 4.6 – Dados da carga industrial

Potência Aparente (MVA)	Fator de Potência	Freqüência nominal (Hz)	Tensão nominal (kV)
20	0,92 indutivo	60	34,5

Vale ressaltar que a relação de transformação do transformador de 69-13,8 kV foi ajustada para que, em condições normais de operação, a tensão nos terminais de sua carga seja aproximadamente igual a 13,8 kV, equivalendo ao ajuste que comumente se faz nos *taps* dos transformadores para que haja a compensação da queda de tensão provocada pela rede.

Nas simulações, não foram consideradas cargas elétricas não-lineares para que seja destacado o nível de distorção harmônica de tensão que cada topologia causa no sistema elétrico. Dessa forma, há a certeza de que toda a distorção harmônica existente em uma simulação foi gerada pela respectiva configuração de DVR.

4.3 – DESCRIÇÃO DOS PARÂMETROS DO DVR

As três topologias consideradas nas simulações correspondem à de suprimento de energia ao barramento CC sem fonte adicional e às duas topologias que fazem esse suprimento através da própria rede sob distúrbio,

sendo que uma a montante do transformador série, e a outra a jusante do mesmo.

Os elementos que compõem as topologias consideradas nas simulações foram dimensionados de forma que tais configurações de DVR estejam aptas a compensarem os distúrbios elétricos mais severos e de maiores durações. Porém, apesar de o capítulo 3 ter demonstrado que, para uma mesma aplicação, cada uma dessas topologias pode requisitar dimensionamentos distintos dos seus elementos, tais diferenciações não foram aqui completamente implementadas. Dessa forma, todas as vantagens e desvantagens relativas às configurações de DVR ficam mais evidenciadas, evitando assim que haja um comprometimento na comparação do desempenho das topologias, análogo ao que foi feito na referência [6]. Com isso, certos elementos do DVR apresentaram características idênticas nas três topologias, e outras distintas entre si, como se segue:

- **Barramento CC:** Como foi descrito no capítulo 3 desta dissertação, para uma determinada aplicação, cada uma das topologias deve requisitar níveis de tensão operacional e/ou capacitância do barramento CC diferenciados. Neste sentido, apesar da topologia com suprimento através da rede, a jusante do transformador série, necessitar de níveis de capacitância e de tensão CC comparativamente inferiores, o mesmo foi simulado com os valores dessas grandezas idênticos aos das outras duas topologias.
- **Inversor de Frequência:** Como foi visto no capítulo 3, o inversor de freqüência necessita de valores específicos de potência nominal em cada topologia. Apesar de os modelos simulados levarem em consideração essa distinção na potência nominal do conversor VSI-PWM, sua freqüência de chaveamento e o valor de capacitância do

filtro puramente capacitivo conectado ao inversor foram idênticos nas três topologias.

- **Transformador Série:** Análogo ao dimensionamento do inversor de freqüência, o transformador série também foi considerado nas simulações com valores diferenciados de potência nominal nas três topologias, porém manteve a mesma relação de transformação e os mesmos valores percentuais de resistência e reatância equivalentes.
- **Sistema de Controle e Filosofia de Compensação:** O sistema de controle utilizado nas simulações é o mesmo para as três topologias. Dessa forma, como as três topologias foram simuladas com sistemas de controle completamente idênticos, não houve a preocupação de se implementar uma filosofia de compensação com injeção mínima de potência ativa ou mínima de potência aparente, análogo ao que foi descrito nos itens 3.4.2 e 3.4.3.
- **Conversor CA-CC:** As duas topologias que necessitam de conversor CA-CC conectado em derivação no sistema foram simuladas considerando um retificador de 6 pulsos não-controlado com potências nominais distintas em cada configuração de DVR.
- **Filtro Harmônico Sintonizado:** As mesmas topologias citadas anteriormente adotaram a conexão de um filtro sintonizado na freqüência de 5ª harmônica, para minimizar as distorções na tensão do sistema provocadas pela operação do retificador de 6 pulsos. Em situações específicas, as taxas de distorção harmônica se aproximaram, mas não chegaram a exceder os limites expressos pelos Procedimentos de Rede do ONS [3] e pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da Aneel [27]. Com a inserção do filtro, que foi ligado em estrela aterrada nos mesmos terminais do retificador, as taxas de distorção percentual se reduziram significativamente, melhorando

assim o desempenho de todo o sistema, como será mais bem detalhado nos itens 4.4.2.1 e 4.4.3.1, a seguir.

Para efeito de simplificação, cada uma das topologias de DVR simuladas receberá uma denominação específica, de acordo com a tabela 4.7 a seguir:

Tabela 4.7 – Denominação das topologias de DVR simuladas

Denominação	**Tipo de suprimento ao barramento CC**
Topologia 1	Sem fonte adicional de energia
Topologia 2	Através da própria rede, à montante do transformador série
Topologia 3	Através da própria rede, à jusante do transformador série

A configuração básica das topologias 1, 2 e 3 são respectivamente ilustradas a seguir:

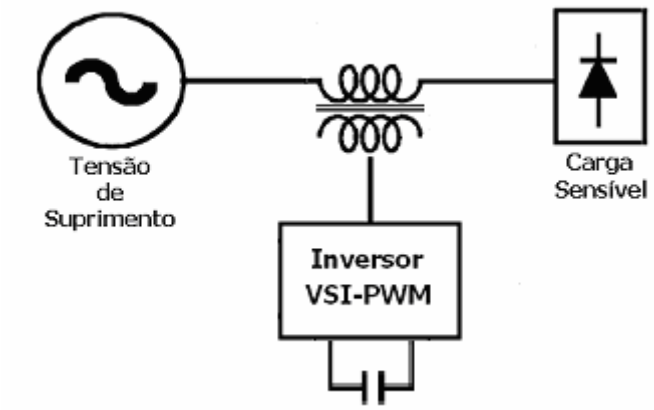

Figura 4.2 – Topologia 1: DVR sem suprimento adicional de energia ao barramento CC.

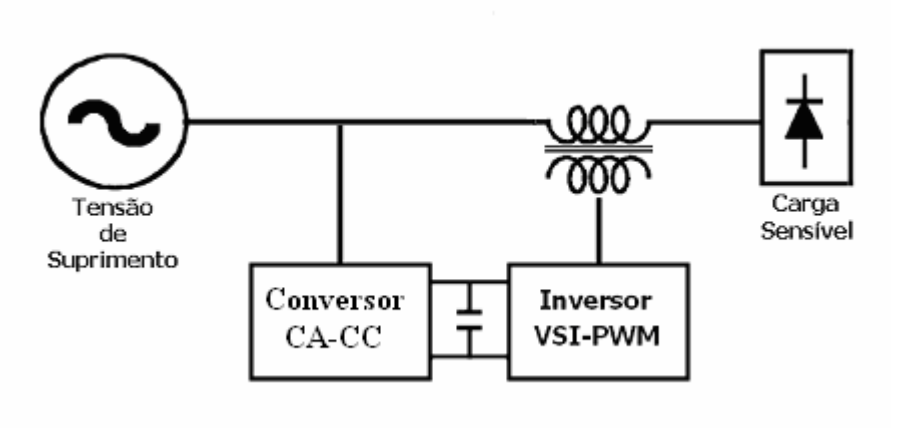

Figura 4.3 – Topologia 2: DVR com suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede, à montante do transformador série.

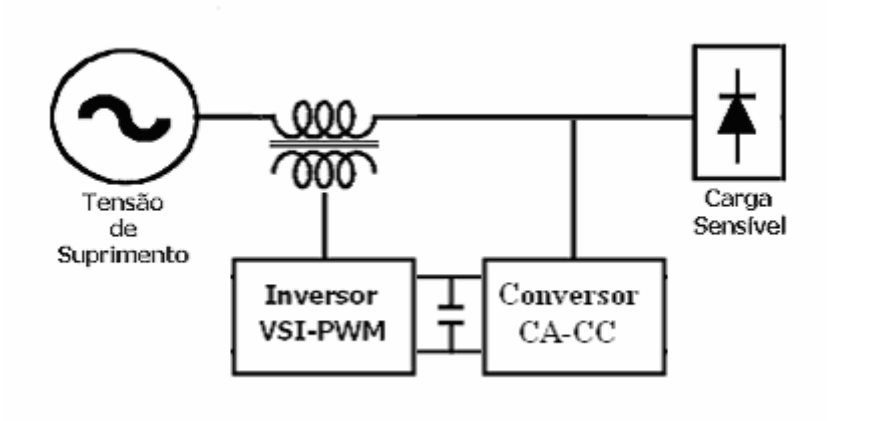

Figura 4.4 – Topologia 3: DVR com suprimento de energia ao barramento CC através da própria rede, à jusante do transformador série.

Os dados dos componentes que compõem as topologias do restaurador dinâmico de tensão são apresentados nas tabelas 4.8 a 4.9 a seguir:

Tabela 4.8 – Parâmetros do inversor VSI-PWM

Parâmetro	**Valor**		
	Topologia 1	**Topologia 2**	**Topologia 3**
Freqüência de chaveamento	6 kHz		
Potência nominal	4 MVA	4 MVA	8 MVA
Capacitância do filtro	10 μF		

Tabela 4.9 – Parâmetros do transformador série

Parâmetro	**Valor**		
	Topologia 1	**Topologia 2**	**Topologia 3**
Relação de transformação	1:1		
Potência nominal	8 MVA	8 MVA	16 MVA
Resistência percentual	0,7%		
Reatância percentual	6%		

Tabela 4.10 – Parâmetros do barramento CC

Parâmetro	**Valor**
Tensão no barramento CC	19516 V
Capacitor	75 mF

Tabela 4.11 – Parâmetros do retificador de 6 pulsos

Parâmetro	**Valor**	
	Topologia 2	**Topologia 3**
Potência nominal	4 MVA	8 MVA

Tabela 4.12 – Parâmetros do filtro sintonizado na 5ª harmônica

Parâmetro	**Valor**	
	Topologia 2	**Topologia 3**
Resistência	0,05 Ω	
Indutância	8,77 mH	
Capacitância	32,09 μF	

Os valores da potência do inversor para as topologias 1, 2 e 3 foram calculados a partir das equações (3.18), (3.24) e (3.29), respectivamente, considerando o valor da potência nominal da carga sensível, descrito na tabela 4.5, e um afundamento trifásico para 0,5 pu.

Os parâmetros do transformador série utilizado em cada topologia seguiram os critérios e recomendações descritos no item 3.5.3. A relação de transformação adotada de 1:1 é a mais apropriada e corresponde à relação mais freqüentemente utilizada e referida na literatura técnica. O valor da potência nominal do transformador série de cada topologia foi determinado de forma que seja superior à potência do respectivo inversor. Por isso, tal valor foi equivalente ao dobro da potência nominal do inversor, analogamente ao que ocorre nos projetos de DVRs comercialmente disponíveis [8]. Finalmente, para que haja uma minimização das perdas e das quedas de tensão, foram considerados baixos valores de resistência e reatância percentuais dos transformadores série.

O nível de tensão operacional adotado para o barramento CC nas três topologias corresponde ao valor de pico da tensão de 13,8 kV, equivalente a 19,516 kV, que é aproximadamente o nível de tensão que o retificador de 6 pulsos promove no barramento CC das topologias 2 e 3, em condições normais de operação.

Baseado na tensão CC operacional adotada, o valor da capacitância foi determinado de forma que o nível de tensão no barramento, durante e após a mitigação de um afundamento de tensão, nunca decaia mais do que 50% em qualquer uma das 3 topologias consideradas, ou seja, nunca fique com valor inferior a 9758 V. Abaixo desse nível, não há uma garantia de que o inversor de freqüência conseguirá sintetizar uma tensão complementar satisfatória para a plena mitigação do distúrbio.

O conversor CA-CC utilizado nas topologias 2 e 3 corresponde ao retificador de 6 pulsos não-controlado, que representa uma alternativa com menor custo de aquisição e menor complexidade operacional. Os valores das potências nominais do retificador das topologias 2 e 3 foram obtidos a partir das equações (3.25) e (3.29), respectivamente, considerando o valor da

potência nominal da carga sensível, descrito na tabela 4.5, e um afundamento trifásico para 0,5 pu.

4.4 – DESCRIÇÃO DOS CASOS SIMULADOS

Para comprovar a eficiência do restaurador dinâmico de tensão na compensação das VTCDs e, principalmente, para melhor avaliar o desempenho relativo de cada uma das três topologias, as simulações foram feitas considerando a ocorrência de afundamentos e elevações de tensão de variadas magnitudes e durações.

Para ilustrar o desempenho de cada uma das topologias, serão apresentados a seguir os resultados obtidos na mitigação de um afundamento de tensão equilibrado e uma elevação de tensão equilibrada. As simulações consideraram curtos-circuitos ocorridos no alimentador de 34,5 kV como causas dos afundamentos de tensão. Já as elevações de tensão simularam condições adversas provenientes da fonte de tensão (concessionária de energia) e tais distúrbios foram obtidos através da entrada e posterior saída de uma grande carga capacitiva no sistema de 69 kV.

As características dos três distúrbios elétricos simulados são descritas a seguir:

a) Afundamento de tensão: Proveniente de um curto-circuito trifásico equilibrado ocorrido nos terminais da carga industrial, no sistema de 34,5 kV, provocando um afundamento de tensão para 0,5 pu e com duração de 0,5 segundo nos terminais da carga sensível. Esse afundamento de tensão corresponde ao distúrbio elétrico mais severo que o DVR deverá estar apto a compensar, tendo servido de referência para o dimensionamento dos elementos das três topologias consideradas.

b) Elevação de tensão: Proveniente da entrada e saída de uma carga capacitiva trifásica equilibrada de 60 MVAr, provocando uma elevação de tensão para 1,25 pu e duração de 0,5 segundo.

Com isso, conclui-se que, como são três as topologias consideradas nas simulações e como serão ilustrados os desempenhos das topologias na compensação dos dois distúrbios citados anteriormente, chega-se a um valor de seis casos a serem apresentados nos itens a seguir.

Vale ressaltar que, como o afundamento e a elevação de tensão, considerados nas simulações das três topologias, correspondem a distúrbios elétricos equilibrados, só se fez necessária a apresentação do comportamento de uma das tensões de linha e de uma das correntes de fase do sistema, na compensação de cada um desses distúrbios. Dessa forma, para as três topologias consideradas, só serão apresentados os gráficos referentes às tensões de linha V_{ab} e às correntes da fase "a" do sistema. Ou seja, como nessas situações, os comportamentos das tensões V_{bc} e V_{ca}, a montante e a jusante do transformador série, foram bastante semelhantes às das respectivas tensões V_{ab}, as ilustrações das mesmas se fizeram desnecessárias. A mesma regra é válida para as correntes das fases "b" e "c", que também tiveram um comportamento bastante similar ao das correntes da fase "a".

4.4.1 – DESEMPENHO DA TOPOLOGIA 1 FRENTE AOS AFUNDAMENTOS E ELEVAÇÕES DE TENSÃO

Conforme foi referido anteriormente, a topologia 1 corresponde à configuração de DVR sem suprimento adicional de energia ao barramento CC. Nessa topologia, toda a energia necessária para a mitigação do distúrbio deve ser provida pelo banco capacitor conectado no lado CC do inversor de freqüência, como já foi ilustrado na figura 3.15 desta dissertação.

Os itens a seguir, descrevem o desempenho dessa topologia frente à mitigação de cada um dos distúrbios elétricos já citados.

4.4.1.1 – AFUNDAMENTO DE TENSÃO

A figura 4.5 ilustra o desempenho da topologia 1 na restauração da tensão durante o afundamento equilibrado de tensão, mostrando os níveis de tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada), além de ilustrar a variação da tensão V_{cc} do barramento de corrente contínua.

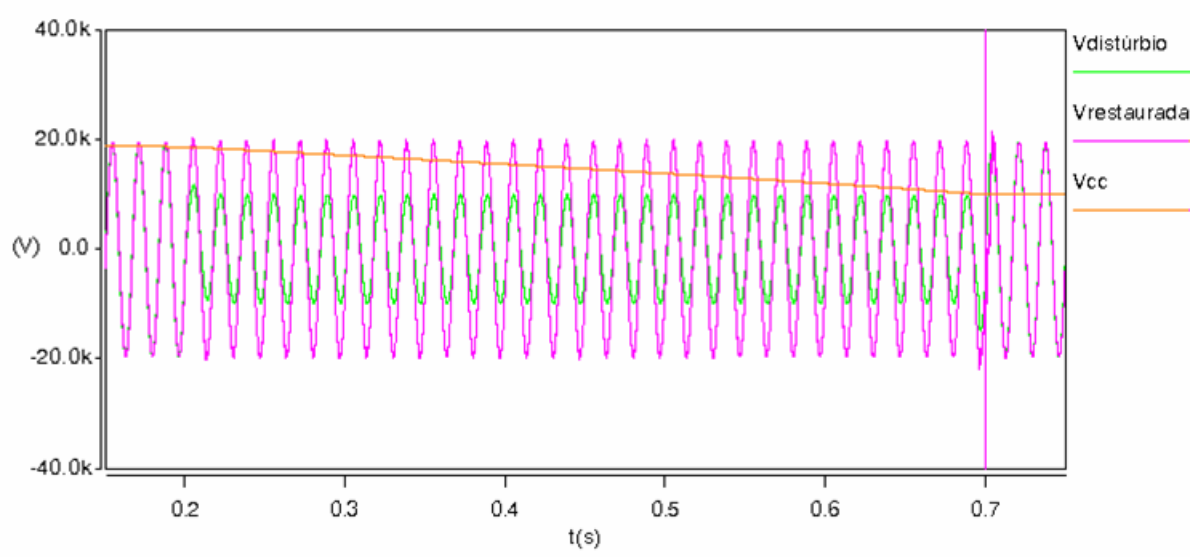

Figura 4.5 – Topologia 1: Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

A figura 4.5 mostra que a tensão é prontamente restaurada para 1 pu na ocorrência do afundamento de tensão, comprovando que a topologia 1 está apta a compensar afundamentos de tensão trifásicos para até 0,5 pu, com durações máximas de 0,5 segundos. No instante de início do distúrbio, equivalente a 0,2 segundo, a tensão do barramento CC é de aproximadamente

18650 V, reduzindo para o nível aproximado de 10000 V no instante de 0,7 segundo, equivalente ao momento de término do distúrbio. A figura 4.6 ilustra com maior destaque a variação de tensão do barramento CC durante a mitigação do distúrbio.

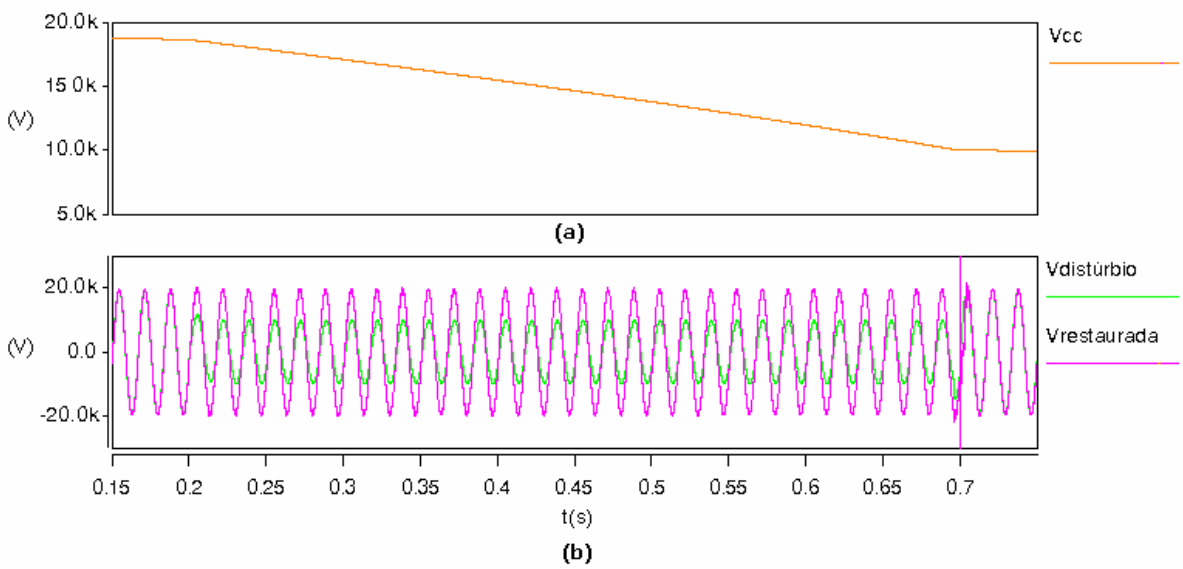

Figura 4.6 – Topologia 1: (a) Tensão no barramento CC e **(b)** Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

Nesta figura, observa-se que como o nível de tensão no barramento CC em nenhum momento reduziu para um valor inferior à tensão mínima necessária para a garantia do pleno funcionamento do inversor, foi possível realizar a plena restauração do distúrbio elétrico.

No instante de término do afundamento de tensão, ocorre uma oscilação transitória no sistema elétrico que é transmitida também para a tensão restaurada, uma vez que o sistema de controle do DVR não foi projetado para a mitigação desse tipo de distúrbio. A ocorrência desse transitório afeta o desempenho do sistema de controle de forma que a tensão restaurada sofre uma queda súbita e a mesma só tem o seu valor eficaz restabelecido cerca de

meio ciclo após o término do distúrbio, como pode ser visto com detalhes na figura 4.7 a seguir.

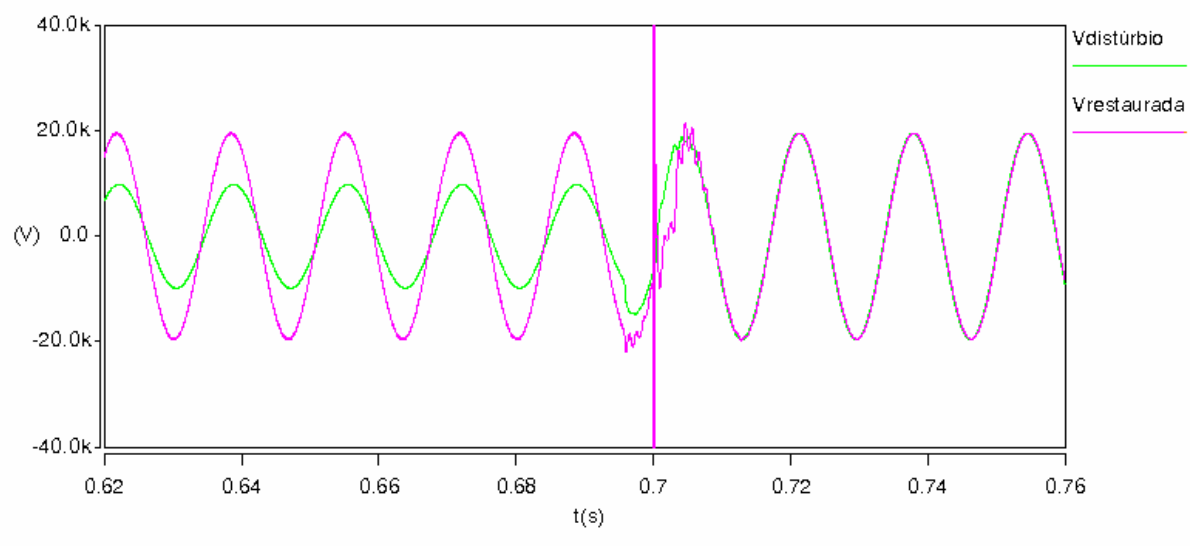

Figura 4.7 – Topologia 1: Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

Essa queda súbita de cerca de meio ciclo de duração que ocorre na tensão restaurada após o término da oscilação transitória não representa nenhuma ameaça ao pleno funcionamento das cargas protegidas. Na verdade, essa variação súbita de tensão não chega nem a se caracterizar como uma VTCD, segundo o Procedimento de Rede elaborado pela ONS [3] e segundo os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Prodist, elaborados pela Aneel [27]. Já segundo a curva ITIC [1], afundamentos de tensão com duração inferior a 20 ms, não afetam o pleno funcionamento de equipamentos e dispositivos de informática.

A figura 4.8 a seguir ilustra a eficiência da topologia 1 na imediata restauração da tensão no instante em que o afundamento de tensão trifásico se inicia.

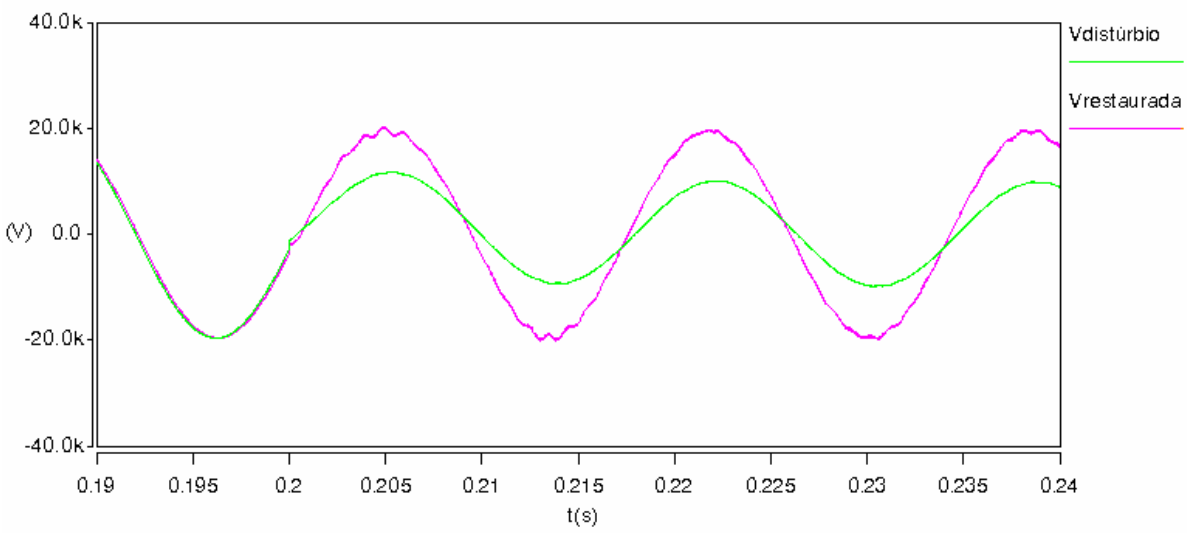

Figura 4.8 – Topologia 1: Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de início de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

Finalmente, as figuras 4.5, 4.6 e 4.7 mostraram que, em condições normais de operação, tanto a tensão à montante quanto à jusante do transformador série possuem formas de onda quase puramente senoidais, mostrando que os valores de freqüência de chaveamento e de capacitância de filtro do inversor VSI-PWM foram corretamente dimensionados, garantindo que esse tipo de topologia não cause distorções harmônicas de tensão na rede elétrica.

4.4.1.2 – ELEVAÇÃO DE TENSÃO

A figura 4.9 ilustra o desempenho da topologia 1 na restauração da tensão durante a elevação equilibrada de tensão, mostrando os níveis de tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada).

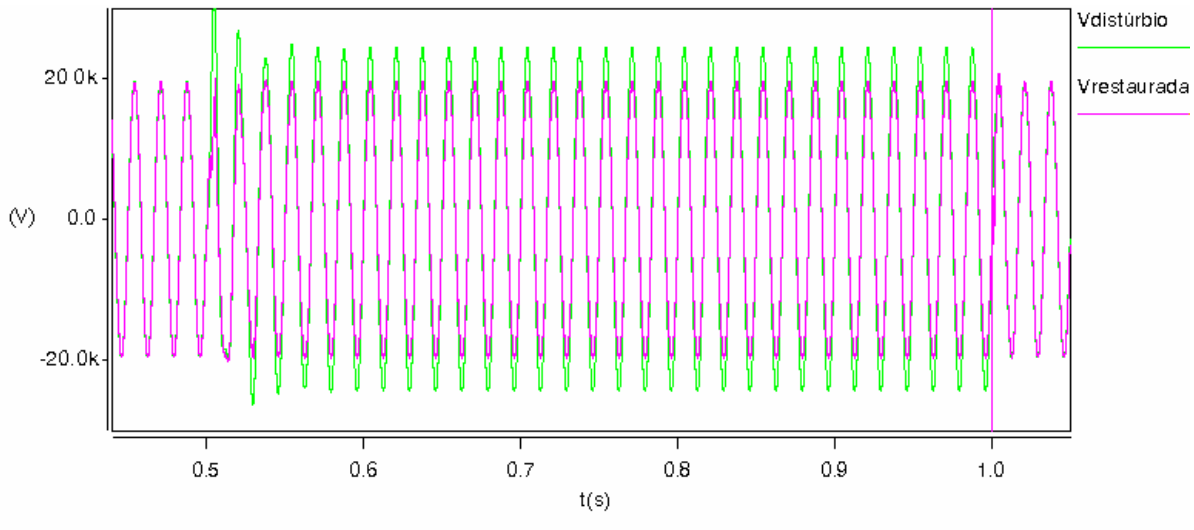

Figura 4.9 – Topologia 1: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.9 mostra que a tensão é prontamente restaurada para 1 pu na ocorrência da elevação de tensão, comprovando que a topologia 1 está apta a compensar elevações de tensão trifásicas para até 1,25 pu, com durações máximas de 0,5 segundo. A figura 4.10 ilustra com mais detalhes as formas de onda das tensões restaurada e sob distúrbio.

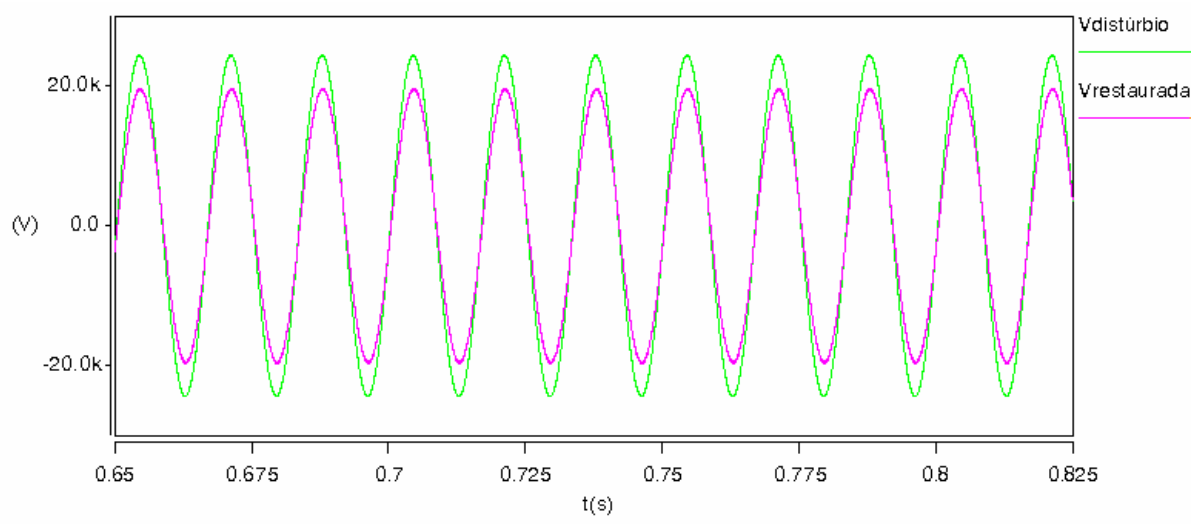

Figura 4.10 – Topologia 1: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.11 ilustra a variação de tensão do barramento CC durante a mitigação do distúrbio.

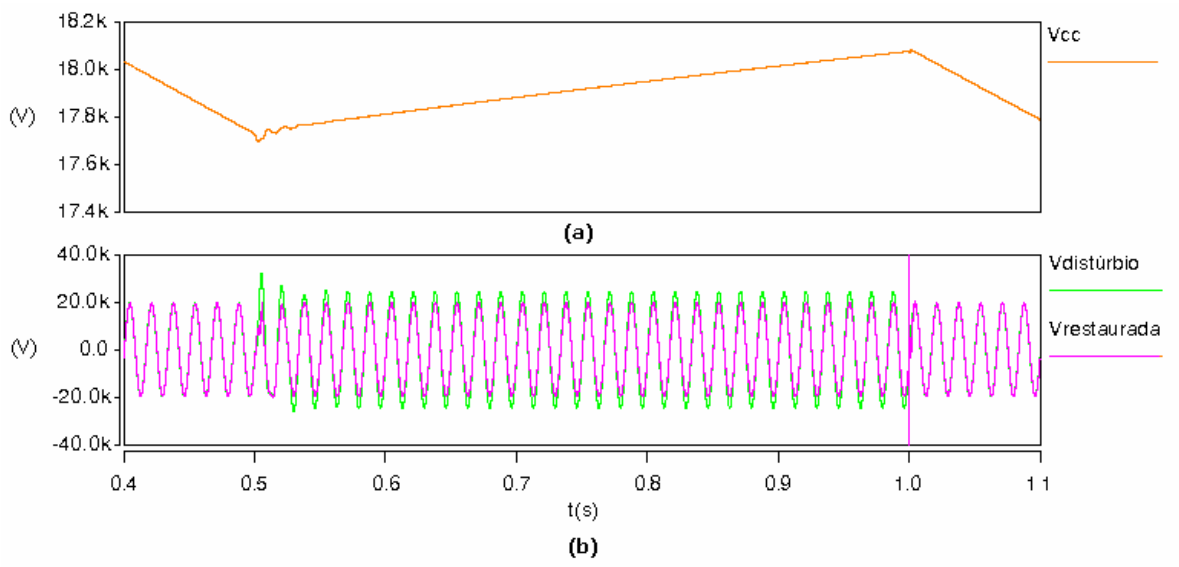

Figura 4.11 – Topologia 1: (a) tensão no barramento CC e **(b)** Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

No instante de início do distúrbio, equivalente a 0,5 segundo, a tensão do barramento CC é de aproximadamente 17700 V, se elevando para o nível de 18075 V no instante de 1 segundo, equivalente ao momento de término do distúrbio.

Análogo ao que acontece com o distúrbio elétrico anteriormente apresentado, no instante de término da elevação de tensão, ocorre uma oscilação transitória no sistema elétrico que é transmitida também para a tensão restaurada. A ocorrência desse transitório mais uma vez afetou o desempenho do sistema de controle de forma que a tensão restaurada sofre uma queda súbita após a ocorrência do transitório e a mesma só tem o seu valor eficaz restabelecido cerca de um quarto de ciclo após o término do distúrbio, como pode ser visto com detalhes na figura 4.12 a seguir. Essa queda súbita não representa nenhuma ameaça ao pleno funcionamento das cargas protegidas.

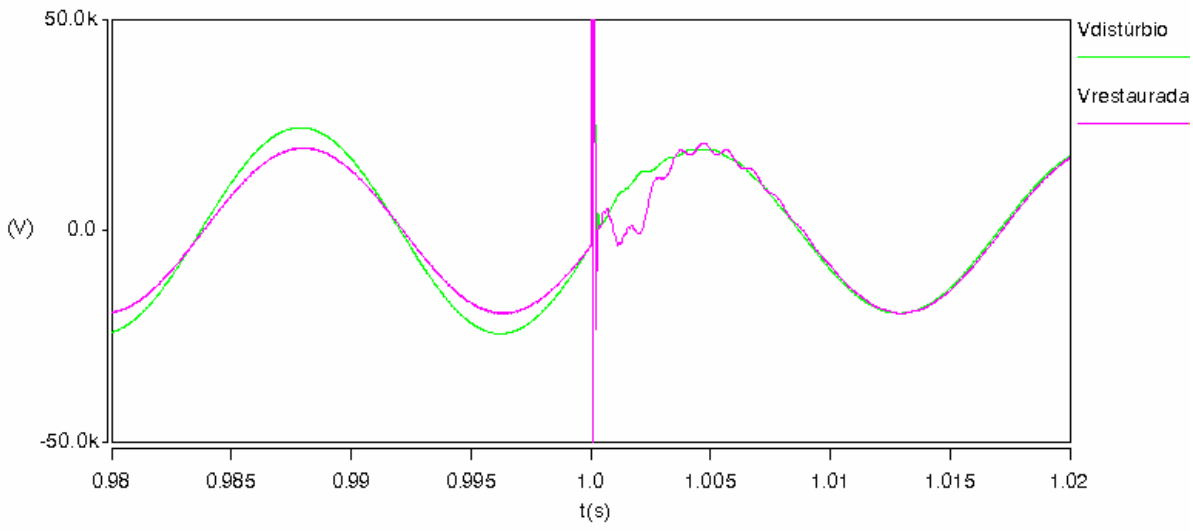

Figura 4.12 – Topologia 1: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de término de uma elevação de tensão trifásica equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.13 ilustra o desempenho da topologia 1 na imediata restauração das tensões no instante em que a elevação de tensão equilibrada se inicia.

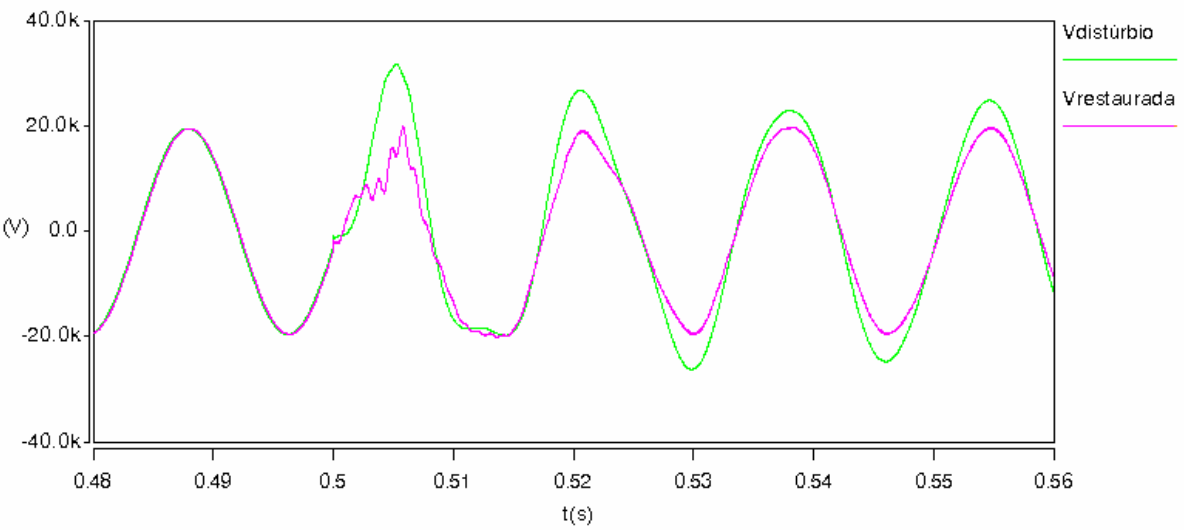

Figura 4.13 – Topologia 1: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de início de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

Comparando a figura 4.13 com a figura 4.8, conclui-se que a restauração da tensão no instante de início da elevação de tensão ocorre de forma mais lenta do que no início do afundamento. A entrada súbita de uma grande carga capacitiva afetou o desempenho imediato do sistema de controle, fazendo com que a restauração plena da tensão ocorresse cerca de um ciclo e meio após o início do distúrbio elétrico.

4.4.2 – DESEMPENHO DA TOPOLOGIA 2 FRENTE AOS AFUNDAMENTOS E ELEVAÇÕES DE TENSÃO

Como já foi descrito anteriormente, a topologia 2 corresponde à configuração de DVR cujo suprimento de energia ao barramento CC advém da própria rede sob distúrbio, através da conexão de um retificador no lado da fonte do sistema (ou à montante do transformador série), como ilustrado na figura 3.16 desta dissertação. Os itens a seguir apresentam os resultados do desempenho dessa topologia na compensação de cada um dos distúrbios elétricos considerados nas simulações.

4.4.2.1 – AFUNDAMENTO DE TENSÃO

A figura 4.14 ilustra o desempenho da topologia 2 na restauração da tensão durante o afundamento equilibrado de tensão, mostrando os níveis de tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), além da variação da tensão V_{cc} do barramento CC.

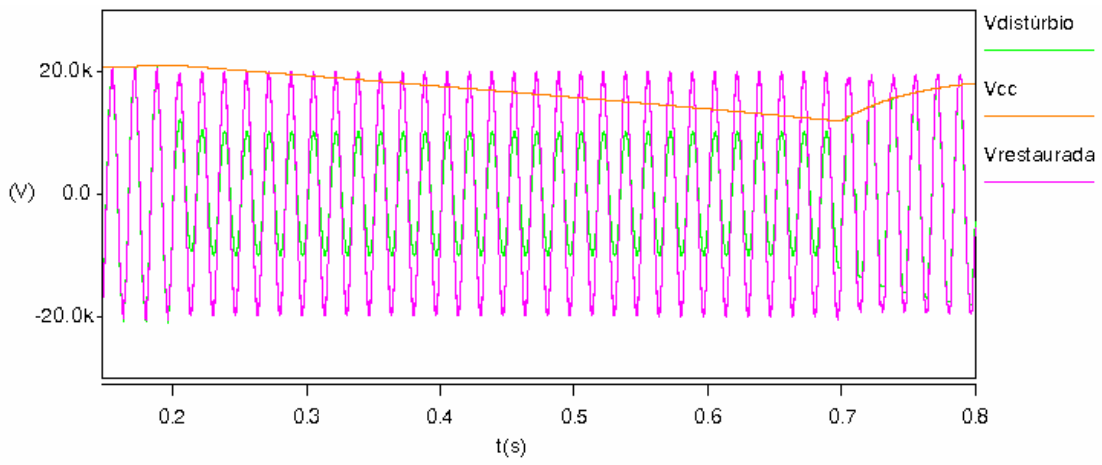

Figura 4.14 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

A figura 4.14 mostra que a tensão é prontamente restaurada para 1 pu na ocorrência do afundamento de tensão, comprovando que a topologia 2 está apta a compensar afundamentos de tensão equilibrados para até 0,5 pu, com durações máximas de 0,5 segundo. No instante 0,2 segundo de início do distúrbio, a tensão do barramento CC é de aproximadamente 20980 V, decaindo para o nível aproximado de 12000 V no instante 0,7 segundo de término do distúrbio. A figura 4.15 ilustra com mais destaque a variação de tensão do barramento CC durante a mitigação do distúrbio.

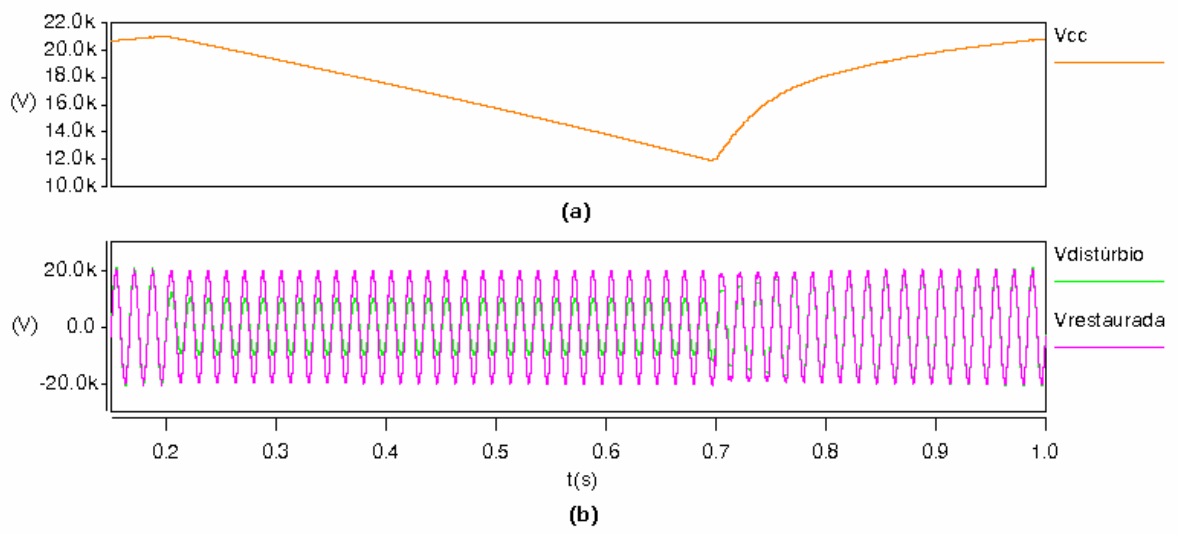

Figura 4.15 – Topologia 2: (a) tensão no barramento CC e **(b)** Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

As figuras 4.14 e 4.15 mostram que a conexão do barramento CC com o sistema sob distúrbio à montante do transformador série não foi suficiente para garantir uma estabilização da tensão CC, ou uma pequena redução do seu nível, durante a mitigação do distúrbio. Essa conexão com o sistema no lado da fonte oportunizou o re-carregamento imediato do barramento CC ao término do distúrbio. No caso específico ilustrado nas duas figuras anteriores, nota-se que após o término do afundamento de tensão, só foram necessários 0,3 segundo para que a tensão do capacitor CC voltasse ao nível anterior ao distúrbio.

Comparando as figuras 4.14 e 4.15 com as figuras 4.5 e 4.6, nota-se que na topologia 2 não houve transitório oscilatório de tensão ao término do afundamento. Tal situação foi proporcionada pela conexão do capacitor do barramento CC ao sistema CA através do retificador, acarretando em um amortecimento desse transitório. Uma vez que não ocorreu a oscilação transitória, verificou-se que o sistema de controle não teve o seu desempenho afetado no instante de término do afundamento de tensão, evitando que

aconteça qualquer variação indesejada da tensão restaurada no instante imediatamente posterior ao término do distúrbio, como descrito na figura 4.7.

A figura 4.16 mostra as correntes da linha "a" do alimentador de 13,8 kV que vem da fonte, à montante do retificador de 6 pulsos, que entra no retificador de 6 pulsos não-controlado e que chega na carga protegida, durante o processo de compensação do afundamento equilibrado de tensão.

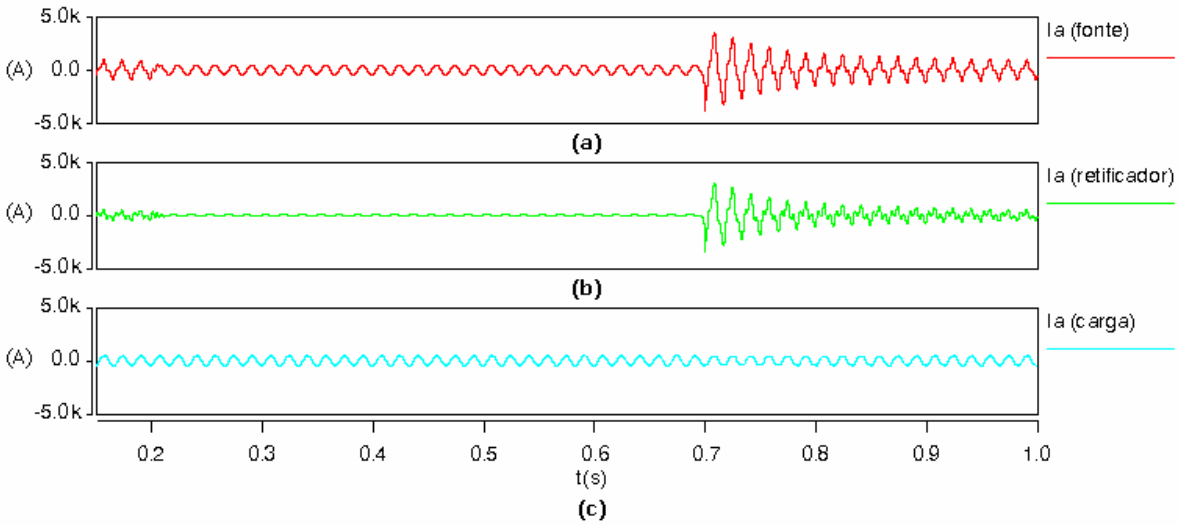

Figura 4.16 – Topologia 2: Correntes da linha "a" que: **(a)** vem da fonte a montante do retificador, **(b)** entra no retificador não-controlado de 6 pulsos e **(c)** que chega na carga , na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

Através da análise do gráfico (b) da figura 4.16, conclui-se que durante toda a ocorrência do afundamento de tensão, compreendido entre os instantes de 0,2 e 0,7 segundos, a corrente de entrada do retificador é praticamente nula. A partir do início do afundamento, a tensão do barramento CC passa a ter um nível inferior à tensão de pico remanescente do sistema (tensão sob distúrbio), fazendo com que os diodos do retificador fiquem inversamente polarizados, bloqueando assim a passagem de corrente através deles e evitando que o barramento CC seja prontamente re-carregado durante a ocorrência do distúrbio. No instante de término do distúrbio, correspondente ao instante em que as tensões de pico do sistema à montante do transformador

série ficam maiores do que a tensão no barramento CC, as correntes na entrada do retificador se elevam significativamente, devido ao re-carregamento do capacitor CC. Com o passar do tempo, as amplitudes das correntes na entrada do retificador se reduzem gradativamente, estabilizando os seus níveis no instante de 1 segundo aproximadamente, correspondente ao momento que o capacitor se carrega completamente.

O gráfico (a) da figura 4.16 ilustra que a corrente proveniente da fonte do sistema, correspondente à soma da corrente que entra no retificador (gráfico (b)) com a corrente da carga (gráfico (c)), sofre alterações significativas na sua forma e na sua magnitude durante todo o processo de compensação do distúrbio. Apesar disso, o gráfico (c) mostra que a corrente da carga praticamente não sofreu oscilações durante a ocorrência do afundamento de tensão, ressaltando assim a eficiência da topologia 2 na compensação do respectivo distúrbio elétrico.

Os gráficos 4.17 e 4.18 detalham melhor as formas de onda das correntes descritas no gráfico 4.16.

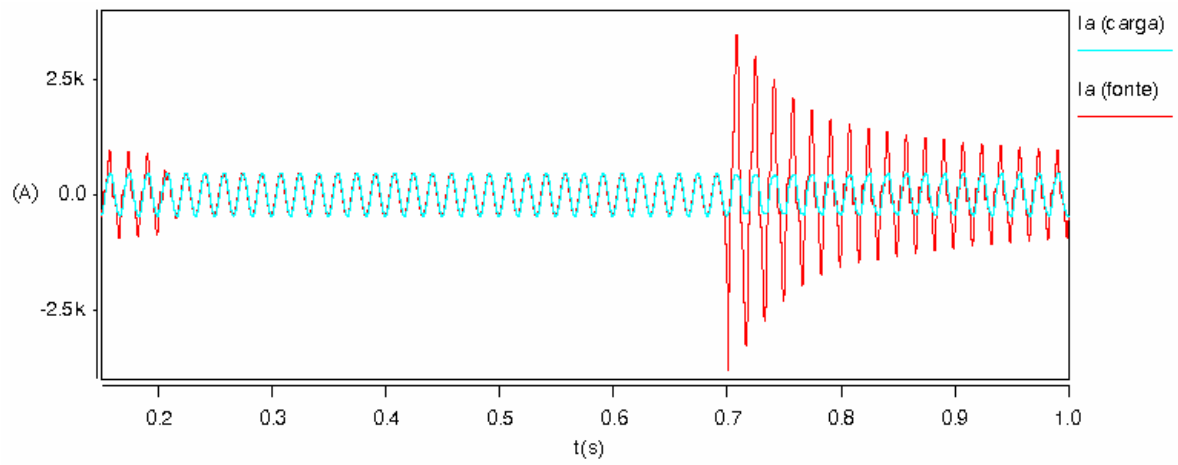

Figura 4.17 – Topologia 2: Correntes da linha "a" que vem da fonte a montante do retificador e que chega na carga , na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

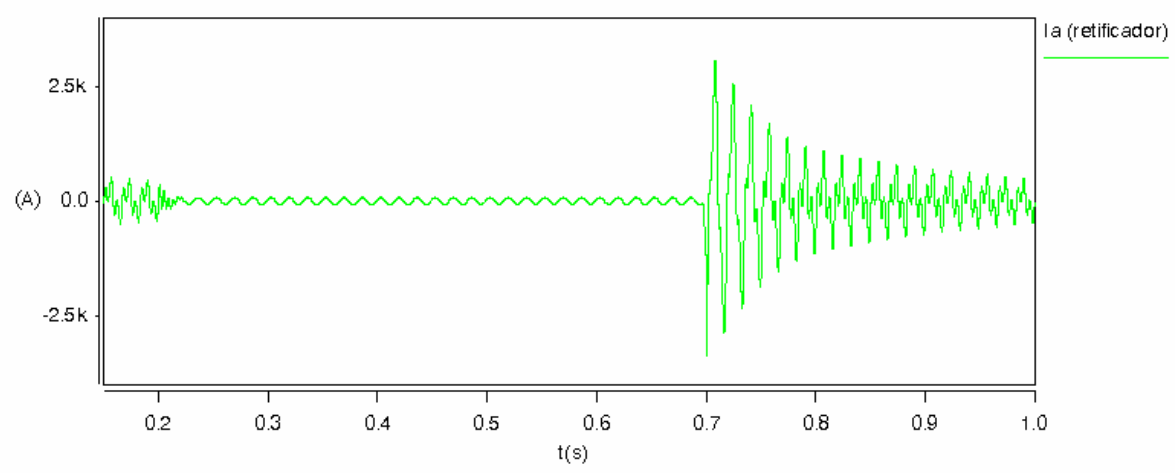

Figura 4.18 – Topologia 2: Corrente da linha "a" que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

Os picos de corrente, ocorridos a partir do instante de 0,7 segundo, correspondente ao momento de término do curto-circuito trifásico, fazem com que a tensão restaurada sofra distorções na sua forma de onda por cerca de 6 ciclos, até que a mesma retoma o seu formato original, como ilustra a figura 4.19 a seguir.

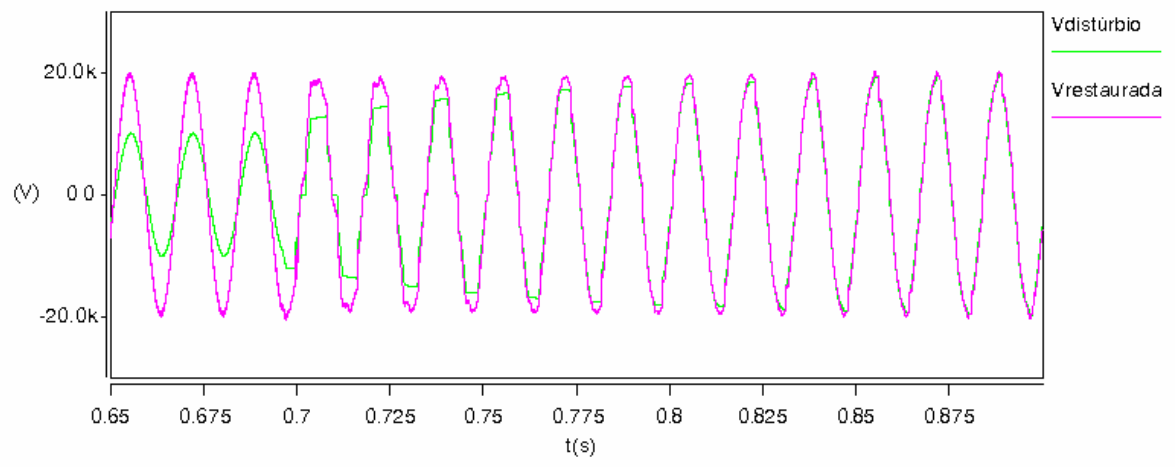

Figura 4.19 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada), nos instantes de término do afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

A figura 4.19 ainda mostra que os picos de corrente ocorridos entre os instantes de término do curto-circuito trifásico e de completo carregamento do

capacitor provocam uma queda no nível da tensão à montante do transformador série, impedindo que essa grandeza se restabeleça completamente no momento de término da falta. A demanda por corrente por parte do retificador ao término da falta provoca um efeito de prolongamento do afundamento de tensão à montante do transformador série. Essa característica é típica da topologia 2 e já foi previamente descrita no capítulo 3 desta dissertação.

A injeção de correntes não-senoidais no sistema, promovida pela conexão do retificador, acarretou em distorções harmônicas de tensão tanto à montante quanto à jusante do transformador série. Em condições normais de operação, a taxa de distorção harmônica da tensão (THD_V) nos terminais da carga sensível foi de 2,5%, no secundário do transformador de 69-13,8 kV foi de 2,6% e no alimentador de 34,5 kV, 0,8%. Todas essas taxas de distorção tiveram níveis inferiores ao limite determinado pelos Procedimentos de Rede do ONS [3] e pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da Aneel [27], correspondente a 6% em níveis de tensão inferiores a 69 kV. Mas, como já foi explicado anteriormente, tais níveis de distorção harmônica só se tornaram possíveis graças à conexão de um filtro sintonizado na freqüência de 5ª harmônica. As figuras 4.20 e 4.21 ilustram as formas de onda das tensões à montante e à jusante do transformador série, em intervalos de tempo respectivamente anterior e posterior à ocorrência do distúrbio elétrico, representando condições normais de operação do sistema.

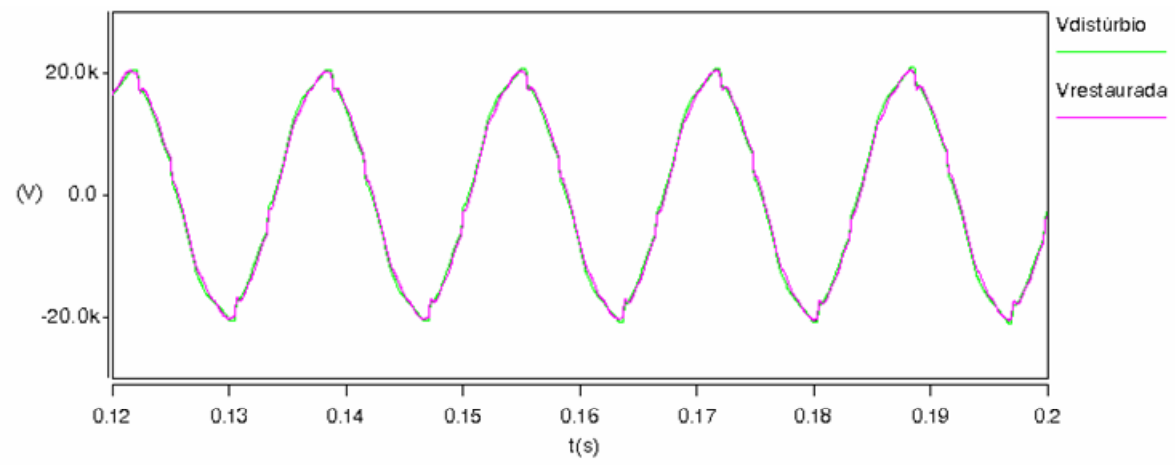

Figura 4.20 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série e à jusante do mesmo, em condições normais de operação, em um intervalo de tempo imediatamente anterior à ocorrência do afundamento equilibrado de tensão.

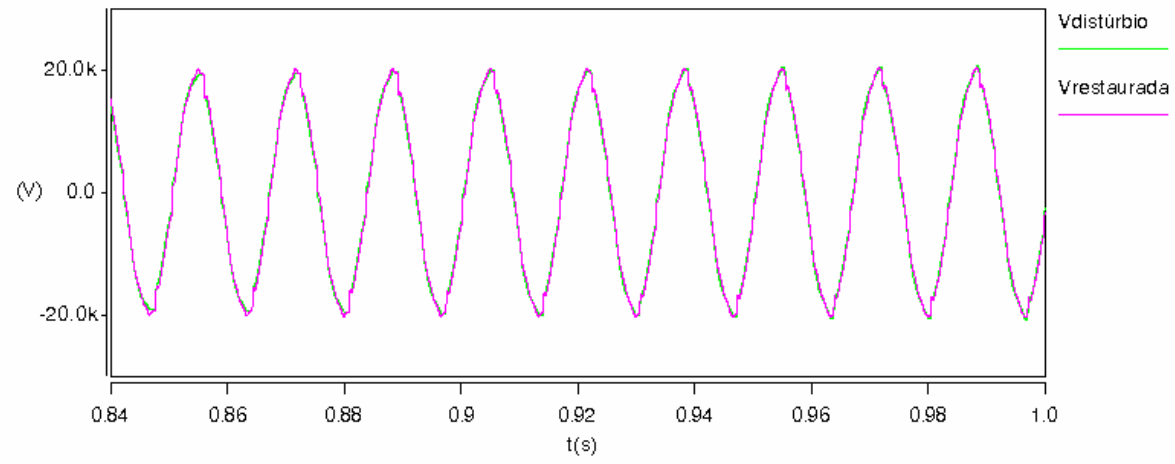

Figura 4.21 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série e à jusante do mesmo, em condições normais de operação, em um intervalo de tempo posterior à ocorrência do afundamento equilibrado de tensão.

4.4.2.2 – ELEVAÇÃO DE TENSÃO

A figura 4.22 ilustra o desempenho da topologia 2 na restauração da tensão durante a elevação equilibrada de tensão, mostrando os níveis de tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada), além de mostrar o nível da tensão no barramento CC.

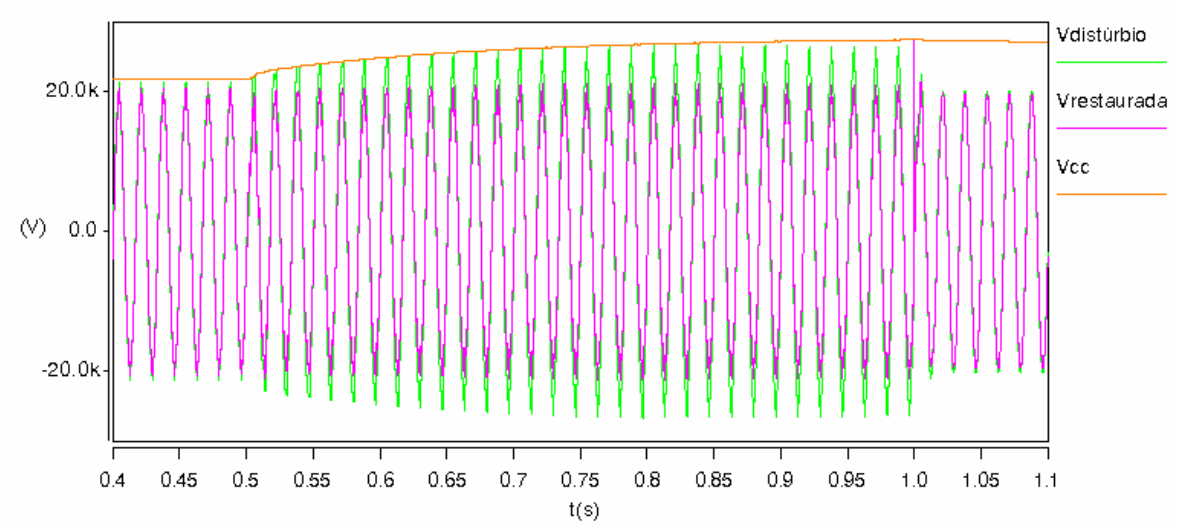

Figura 4.22 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.22 mostra que a tensão é prontamente restaurada para 1 pu na ocorrência da elevação de tensão, comprovando que a topologia 2 está apta a compensar elevações de tensão trifásicas para até 1,25 pu, com durações máximas de 0,5 segundo. A figura 4.22 ainda mostra que durante a ocorrência da elevação de tensão, o nível da tensão do barramento CC acompanha o nível de pico da tensão sob distúrbio. Certo tempo posterior à ocorrência do distúrbio, o nível de tensão operacional do barramento CC é restabelecido. A figura 4.23 ilustra com mais detalhes a variação de tensão no barramento CC durante e após a ocorrência da elevação de tensão.

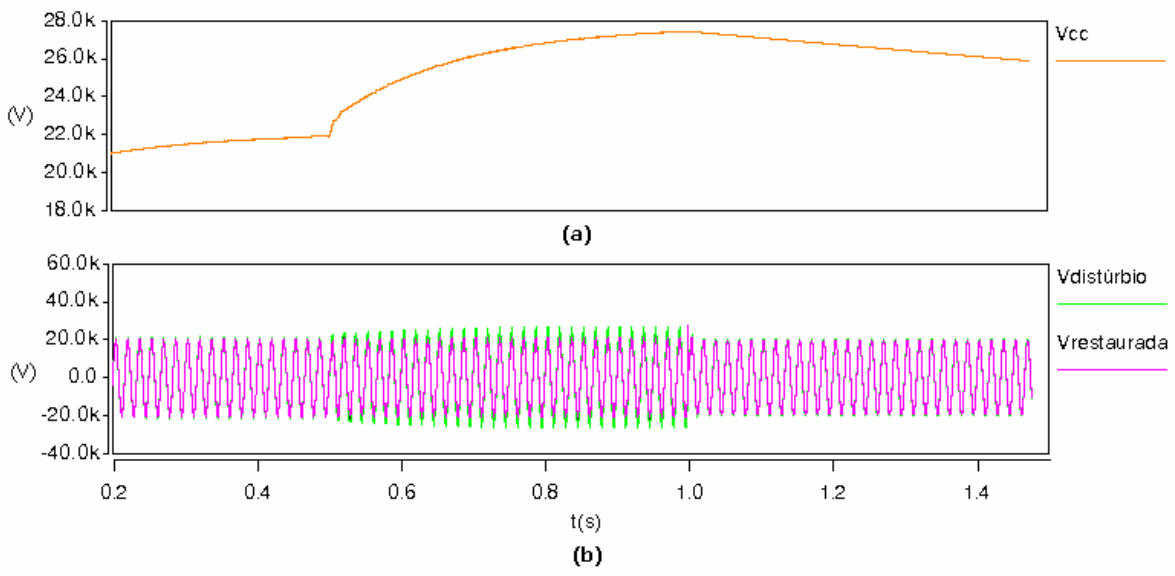

Figura 4.23 – Topologia 2: (a) tensão no barramento CC e **(b)** Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

No instante de início do distúrbio, a tensão do barramento CC é de aproximadamente 21918 V, se elevando para o nível de 27437 V no instante de término do distúrbio.

Análogo ao que aconteceu com a topologia 1, no instante de término da elevação de tensão ocorre uma oscilação transitória no sistema elétrico que é transmitida também para a tensão restaurada. Porém, tal transitório se manifesta com menor intensidade na topologia 2 devido ao amortecimento provocado pela ligação do capacitor do barramento CC ao sistema CA através do retificador. A ocorrência desse transitório afeta o desempenho do sistema de controle de forma quase desprezível, uma vez que a tensão restaurada sofre uma pequena distorção após a ocorrência do transitório, como pode ser visto com detalhes na figura 4.24 a seguir. Essa distorção da tensão não representa nenhuma ameaça ao pleno funcionamento das cargas protegidas.

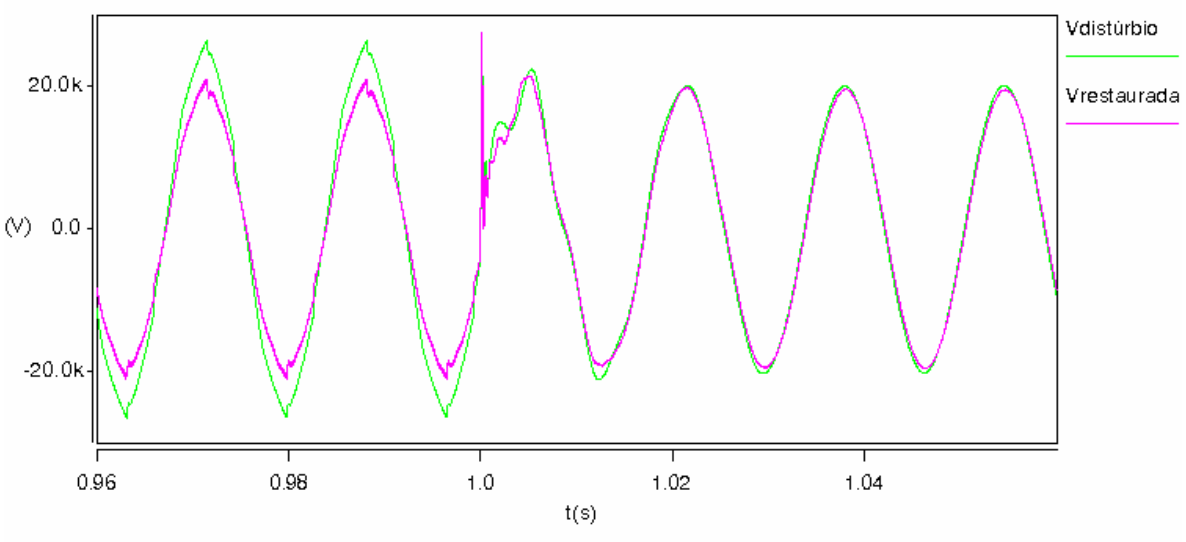

Figura 4.24 – Topologia 2: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de término da elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.24 ilustra o desempenho da topologia 2 na imediata restauração das tensões de linha no instante em que a elevação de tensão equilibrada se inicia.

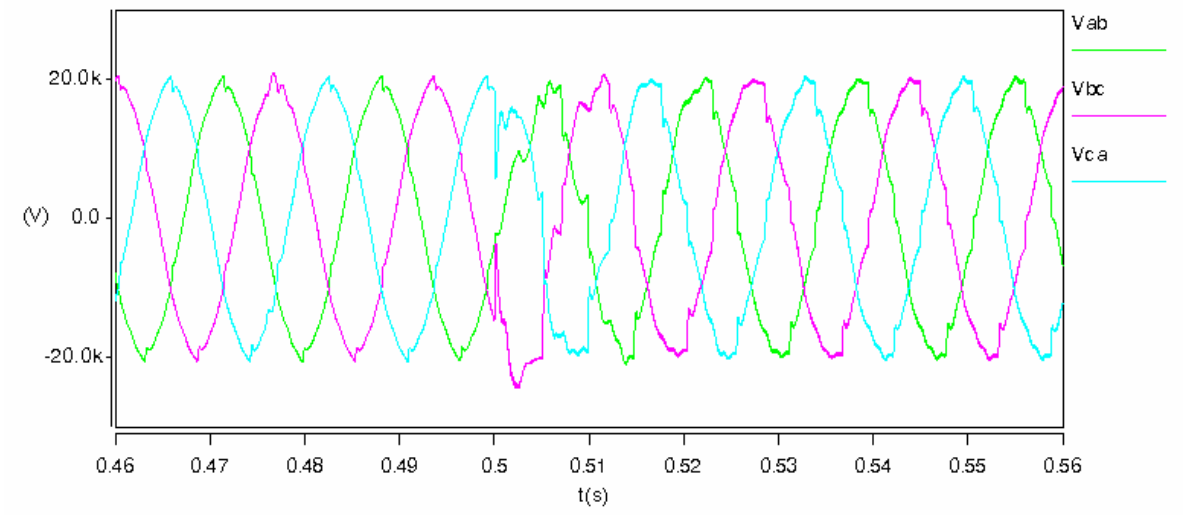

Figura 4.25 – Topologia 2: Tensões de linha à jusante do transformador série (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de início de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

Através da análise da figura 4.25, conclui-se que a entrada súbita de uma grande carga capacitiva afetou o desempenho imediato do sistema de

controle, fazendo com que a restauração plena da tensão ocorresse cerca de um ciclo após o início do distúrbio elétrico.

A figura 4.26 ilustra as correntes da linha "a" do alimentador de 13,8 kV que vem da fonte, à montante do retificador de 6 pulsos, que entra no retificador de 6 pulsos não-controlado e que chega na carga protegida, durante o processo de compensação da elevação equilibrada de tensão.

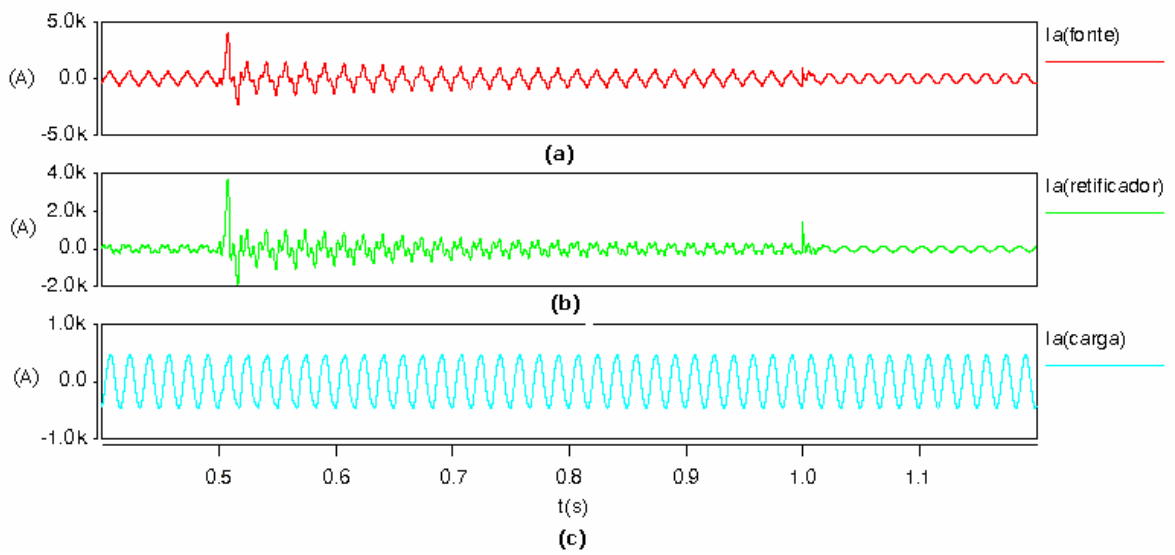

Figura 4.26 – Topologia 2: Correntes da linha "a" que: **(a)** vem da fonte a montante do retificador, **(b)** entra no retificador não-controlado de 6 pulsos e **(c)** que chega na carga , na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

Através da análise do gráfico (b) da figura 4.26, conclui-se que em condições normais de operação, a corrente que flui através do retificador possui uma baixa magnitude relativa e sua função é apenas manter estável o nível de tensão no barramento CC uma vez que, nessa situação, o DVR injeta apenas uma pequena tensão para compensar a reatância série do transformador e as perdas do equipamento. No instante em que o distúrbio elétrico se inicia, as correntes de entrada do retificador se elevam significativamente, uma vez que a tensão do barramento CC passa a ficar menor do que o valor de pico das tensões de linha à montante do transformador série. À medida que o capacitor se carrega, essas correntes vão

reduzindo a sua magnitude, até voltarem subitamente ao nível pré-distúrbio no instante de 1 segundo, correspondente ao momento de término da elevação de tensão.

O gráfico (a) da figura 4.26 ilustra que a corrente proveniente da fonte do sistema, correspondente à soma da corrente que entra no retificador com a corrente da carga, sofre alterações significativas na sua forma e na sua magnitude durante todo o processo de compensação do distúrbio. Apesar disso, o gráfico (c) mostra que a corrente da carga praticamente não sofreu oscilações durante a ocorrência da elevação de tensão, ressaltando assim a eficiência da topologia 2 na compensação do respectivo distúrbio elétrico.

Os gráficos 4.27 e 4.28 detalham melhor as formas de onda das correntes descritas no gráfico 4.26.

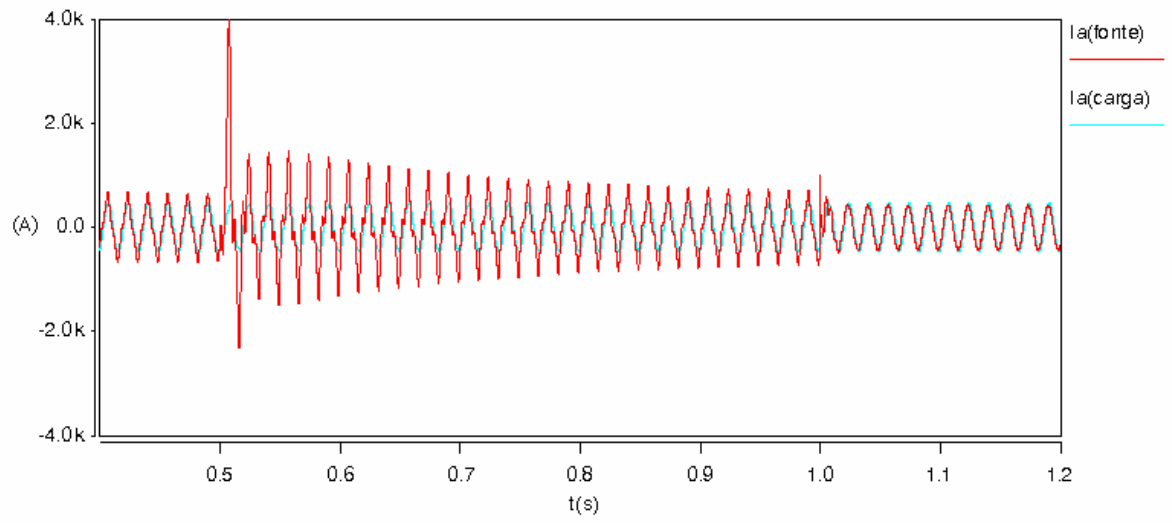

Figura 4.27 – Topologia 2: Correntes da linha "a"que: vem da fonte a montante do retificador e que chega na carga , na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

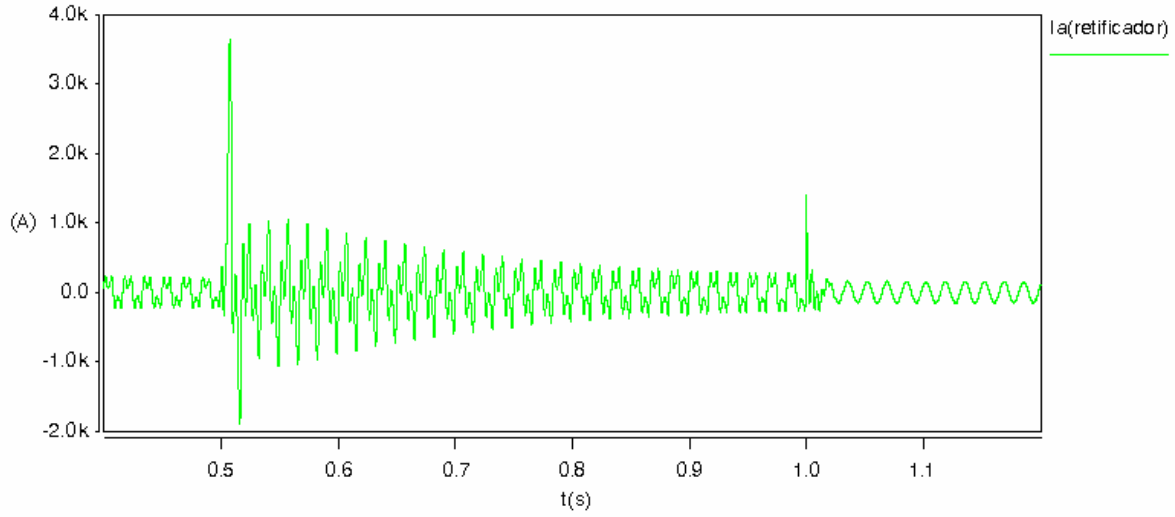

Figura 4.28 – Topologia 2: Corrente da linha "a"que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.28 mostra que nos instantes de início e término do distúrbio ocorrem picos na corrente do retificador, como uma conseqüência da variação súbita no nível da tensão à montante do transformador série.

4.4.3 – DESEMPENHO DA TOPOLOGIA 3 FRENTE AOS AFUNDAMENTOS E ELEVAÇÕES DE TENSÃO

Como já descrito anteriormente no capítulo 3 dessa dissertação, a topologia 3 corresponde à configuração de DVR cujo suprimento de energia ao barramento CC é feito através da própria rede sob distúrbio, promovida pela conexão de um retificador no lado da carga (ou à jusante do transformador série), como ilustrado na figura 3.17. Os itens a seguir apresentam os resultados do desempenho dessa topologia na compensação dos distúrbios elétricos considerados nas simulações.

4.4.3.1 – AFUNDAMENTO DE TENSÃO

A figura 4.29 ilustra o desempenho da topologia 3 na restauração da tensão durante o afundamento equilibrado de tensão, mostrando os níveis de tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), além da variação da tensão V_{cc} do barramento CC.

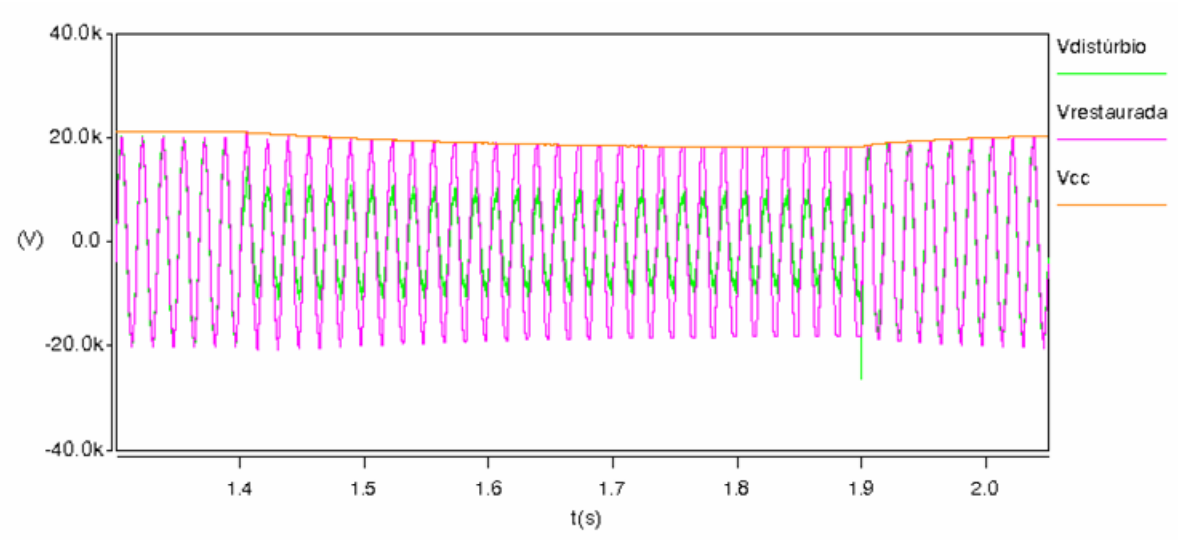

Figura 4.29 – Topologia 3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

A figura 4.29 mostra que a tensão é prontamente restaurada para aproximadamente 1 pu na ocorrência do afundamento de tensão, comprovando que a topologia 3 está apta a compensar afundamentos de tensão equilibrados para até 0,5 pu, com durações máximas de 0,5 segundo. No instante 1,4 segundos de início do distúrbio, a tensão do barramento CC é de aproximadamente 20950V, decaindo para o nível aproximado de 18650V no instante 1,9 segundos de término do distúrbio. O nível de tensão CC acompanhou o valor de pico da tensão restaurada durante toda a compensação do distúrbio. Durante a ocorrência do afundamento de tensão, o nível da

tensão restaurada decaiu ligeiramente, mas permaneceu com valores superiores 0,98 pu no decorrer de toda a compensação. A figura 4.30 ilustra com mais destaque a variação de tensão do barramento CC durante a mitigação do distúrbio.

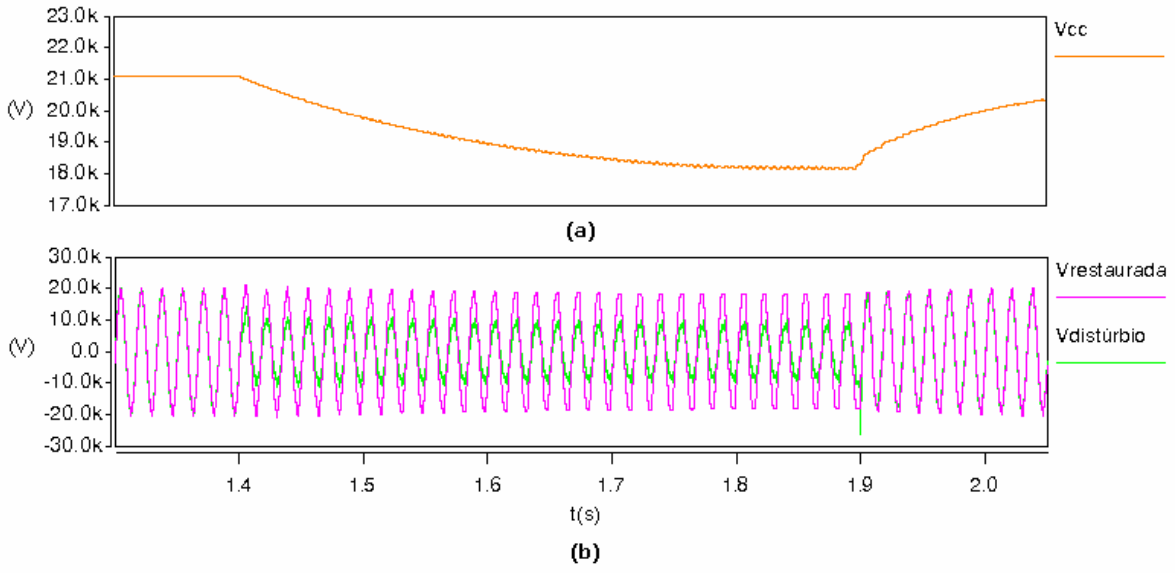

Figura 4.30 – Topologia 3: (a) tensão no barramento CC e **(b)** Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de um afundamento de tensão trifásico equilibrado para 0,5 pu.

As figuras 4.29 e 4.30 mostram que apesar do barramento CC estar conectado ao sistema sob distúrbio à jusante do transformador série, essa condição não foi suficiente para garantir uma completa estabilização da tensão CC, já que houve uma redução do seu nível durante a mitigação do distúrbio. Entretanto, a variação de tensão no barramento CC foi significativamente inferior às variações apresentadas pelas topologias 1 e 2 na compensação desse mesmo distúrbio elétrico. Análogo à topologia 2, a conexão do barramento CC ao sistema, pelo lado da carga, oportunizou o re-carregamento imediato do capacitor CC ao término do distúrbio. No caso específico da topologia 3, nota-se que após 0,36 segundo de término do

afundamento de tensão, a tensão do capacitor CC volta ao nível imediatamente anterior ao distúrbio.

Analisando as figuras 4.29 e 4.30, nota-se que apesar de ocorrer um pequeno transitório na tensão à montante do transformador série ao término do afundamento de tensão, o mesmo não foi transferido para a tensão restaurada, à jusante do transformador série. Análogo à topologia 2, pode-se dizer que tal situação foi proporcionada pela conexão do capacitor do barramento CC ao sistema CA através do retificador, acarretando em um amortecimento da oscilação transitória da tensão ao término do distúrbio. Como a oscilação transitória não foi completamente transferida para a tensão restaurada, verificou-se que o sistema de controle não teve o seu desempenho afetado no instante de término do afundamento de tensão. Tal situação evitou a ocorrência de qualquer variação indesejada da tensão restaurada no instante imediatamente posterior ao término do distúrbio.

A figura 4.31 mostra as correntes da fase “a”, da linha de 13,8 kV, que vem da fonte, à montante do retificador de 6 pulsos, que entra no retificador de 6 pulsos não-controlado e que chega na carga protegida, durante o processo de compensação do afundamento equilibrado de tensão.

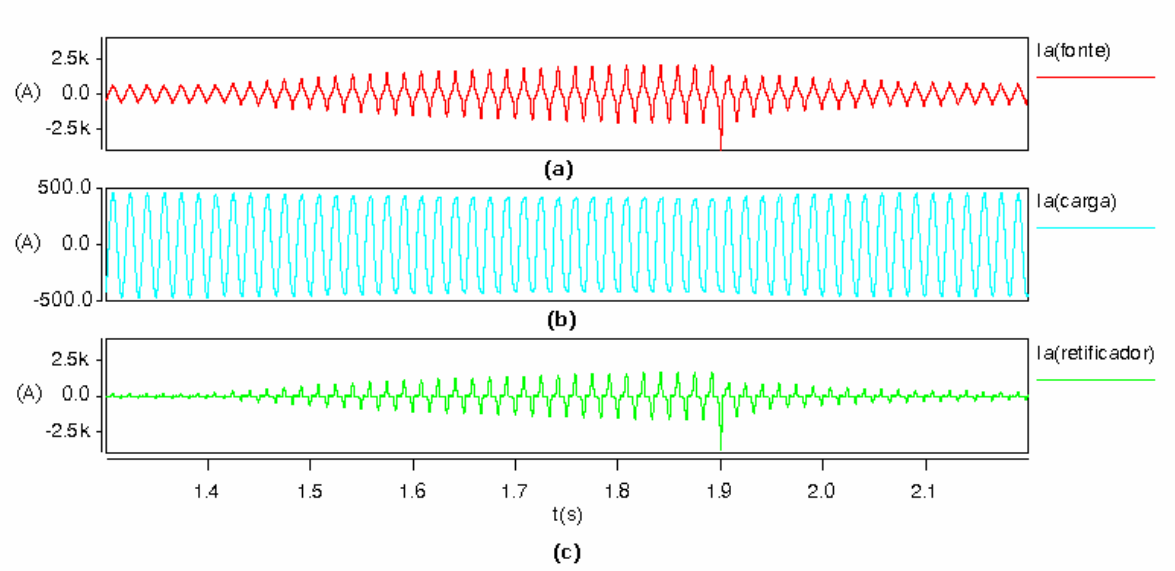

Figura 4.31 – Topologia 3: Correntes da linha "a" que: **(a)** vem da fonte a montante do retificador, **(b)** que chega na carga e **(c)** que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

Através da análise do gráfico (c) da figura 4.31, conclui-se que a corrente de entrada do retificador se eleva gradativamente durante toda a ocorrência do afundamento de tensão, compreendido entre os instantes de 1,4 e 1,9 segundos. A partir do início do afundamento de tensão, o barramento CC passa a demandar maiores níveis de correntes na rede, necessários ao suprimento de energia ao inversor de freqüência para que haja a sintetização e injeção das tensões complementares da restauração. Como o nível da tensão de pico remanescente do sistema (tensão sob distúrbio) é sempre inferior ao nível de tensão CC, o suprimento de energia ao capacitor é sempre contínuo e crescente durante a compensação do distúrbio. Nos instantes anteriores e posteriores à ocorrência do distúrbio elétrico, a corrente que flui através do retificador possui pequena magnitude e serve apenas para manter constante o nível de tensão no barramento CC e para compensar as perdas internas do DVR.

O gráfico (a) da figura 4.31 ilustra que a corrente proveniente da fonte do sistema, correspondente à soma da corrente que entra no retificador com a

corrente da carga, sofre alterações significativas na sua forma e na sua magnitude durante todo o processo de compensação do distúrbio. Apesar disso, o gráfico (b) mostra que a corrente da carga praticamente não sofreu oscilações durante a ocorrência do afundamento de tensão, ressaltando assim a eficiência da topologia 3 na compensação do respectivo distúrbio elétrico.

As figuras 4.32 e 4.33 detalham melhor as formas de onda das correntes descritas no gráfico 4.31.

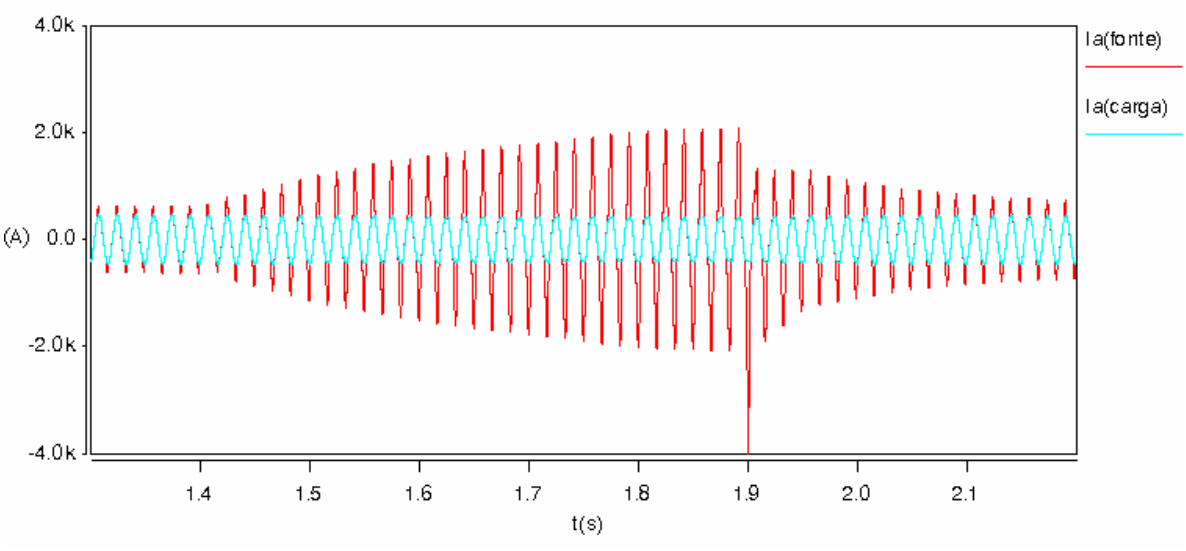

Figura 4.32 – Topologia 3: Correntes da linha "a"que: vem da fonte a montante do retificador e que chega na carga , na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

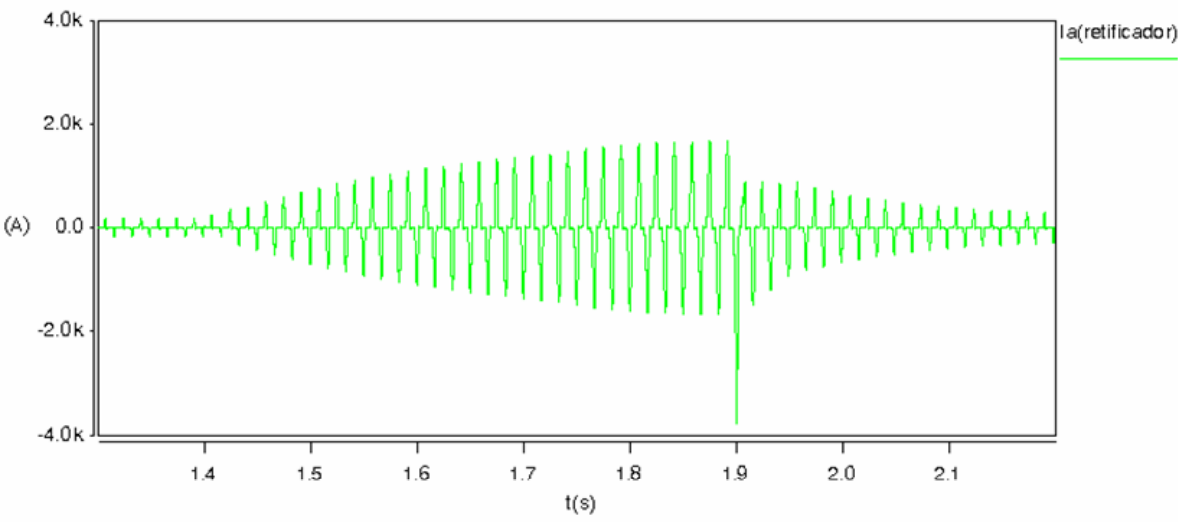

Figura 4.33 – Topologia 3: Corrente da linha "a" que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de um afundamento de tensão equilibrado para 0,5 pu.

Os picos de corrente ocorridos no instante de 1,9 segundos são uma conseqüência da variação súbita no nível da tensão à montante do transformador série.

As elevações nas correntes de entrada do retificador durante a ocorrência do afundamento de tensão acarretaram em distorções na forma de onda da tensão restaurada. Na medida em que as correntes aumentaram as suas magnitudes, elevou-se na mesma proporção a distorção na tensão restaurada, até que nos instantes de término do distúrbio, a forma de onda da tensão V_{ab} restaurada ficou como descrito na figura a seguir:

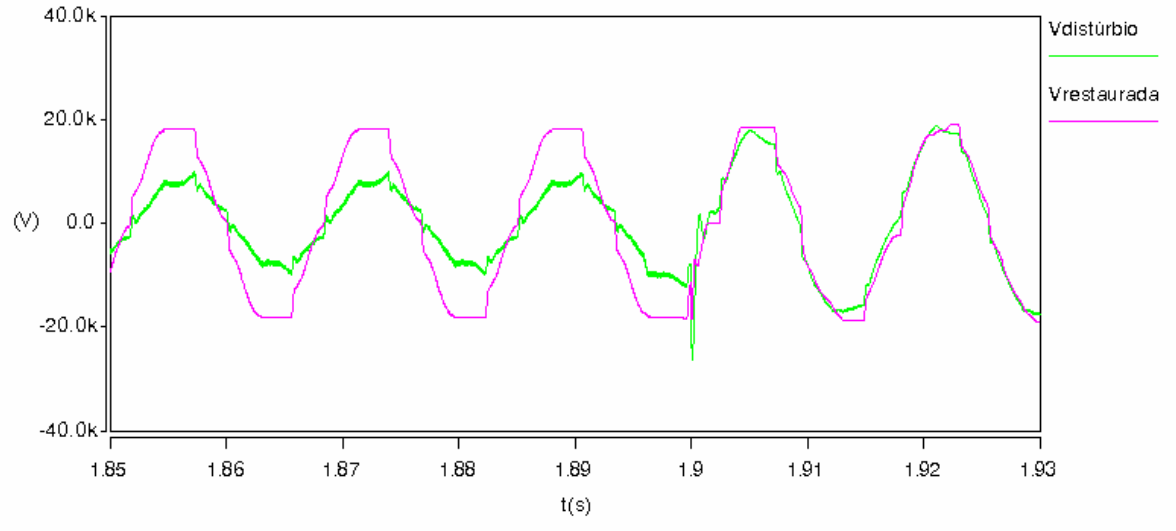

Figura 4.34 – Topologia 3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada), nos instantes de término do afundamento equilibrado de tensão.

Apesar do nível de distorção harmônica da tensão restaurada nos instantes imediatamente anteriores e posteriores ao término do distúrbio ser bastante elevado, tal grau de distorção só perdura por alguns décimos de segundos. Ao término do distúrbio, o nível de distorção das tensões restauradas vai se reduzindo na mesma proporção em que diminuem as correntes que fluem através do retificador. Em condições normais de operação, ou seja, nos intervalos de tempo em que não há ocorrências de distúrbios elétricos e que o capacitor do barramento CC está completamente carregado, acarretando em uma injeção mínima de corrente não-senoidais por parte do retificador, as formas de onda das tensões à montante e à jusante do transformador série são como descritas na figura 4.35 a seguir.

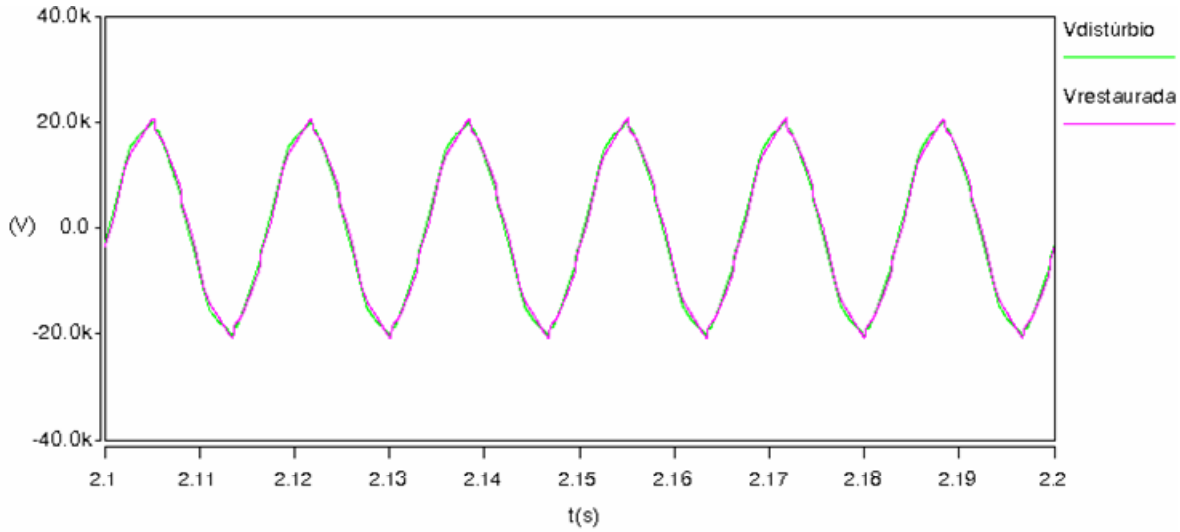

Figura 4.35 – Topologia 3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série e à jusante do mesmo, em condições normais de operação, em um intervalo de tempo posterior à ocorrência do afundamento trifásico equilibrado de tensão.

A figura 4.35 mostra que, mesmo em condições normais de operação, a conexão do retificador acarretou em distorções na forma de onda da tensão tanto à montante quanto à jusante do transformador série. Nessas condições, a taxa de distorção harmônica da tensão (THD_V) nos terminais da carga sensível foi de 2,9%, no secundário do transformador de 69-13,8 kV foi de 2,1% e no alimentador de 34,5 kV, 0,7%. Análogo à topologia 2, todas essas taxas de distorção tiveram níveis inferiores ao limite determinado pelos Procedimentos de Rede do ONS [3] e pelos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica da Aneel [27]. Porém, como já citado anteriormente, tais níveis de distorção harmônica só se tornaram possíveis graças à conexão de um filtro sintonizado na freqüência de 5ª harmônica.

Comparando os níveis de distorção harmônica gerados pelas topologias 2 e 3 nota-se que, em condições normais de operação, esses valores se aproximam bastante. O mesmo não pode ser dito durante a compensação do distúrbio elétrico, já que a topologia 3 gera uma taxa de distorção harmônica consideravelmente maior durante a mitigação do afundamento de tensão, como descrito na figura 4.34. Mas como essa alta taxa de distorção harmônica

só dura um pequeno intervalo de tempo, equivalente ao tempo em que o distúrbio se cessa e o capacitor do barramento CC se recarrega completamente, o desempenho dos equipamentos sensíveis não chegam a se comprometer durante esse período.

4.4.3.2 – ELEVAÇÃO DE TENSÃO

A figura 4.36 ilustra o desempenho da topologia 3 na restauração da tensão durante a elevação equilibrada de tensão, mostrando os níveis de tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série e à jusante do mesmo, além de mostrar o nível da tensão no barramento CC.

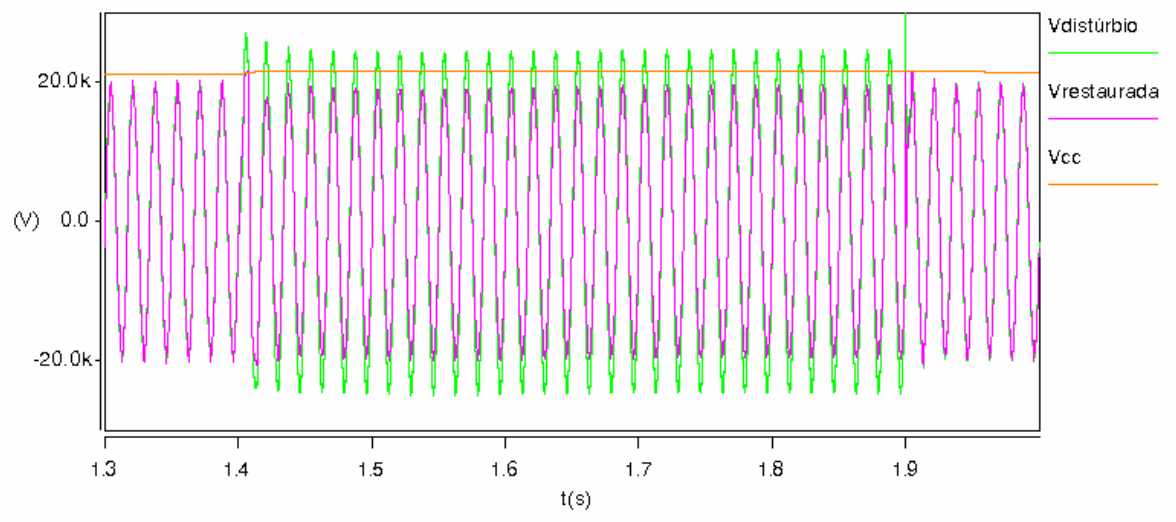

Figura 4.36 – Topologia 3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), e tensão no barramento CC, na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.36 mostra que a tensão é prontamente restaurada para 1 pu na ocorrência da elevação de tensão, comprovando que a topologia 3 está apta a compensar elevações de tensão equilibradas para até 1,25 pu, com durações máximas de 0,5 segundo. A figura 4.36 ainda mostra que durante a compensação da elevação de tensão, o nível da tensão do barramento CC não

sofre variação significativa. A figura 4.37 ilustra com mais detalhes a tensão no barramento CC durante a ocorrência da elevação de tensão.

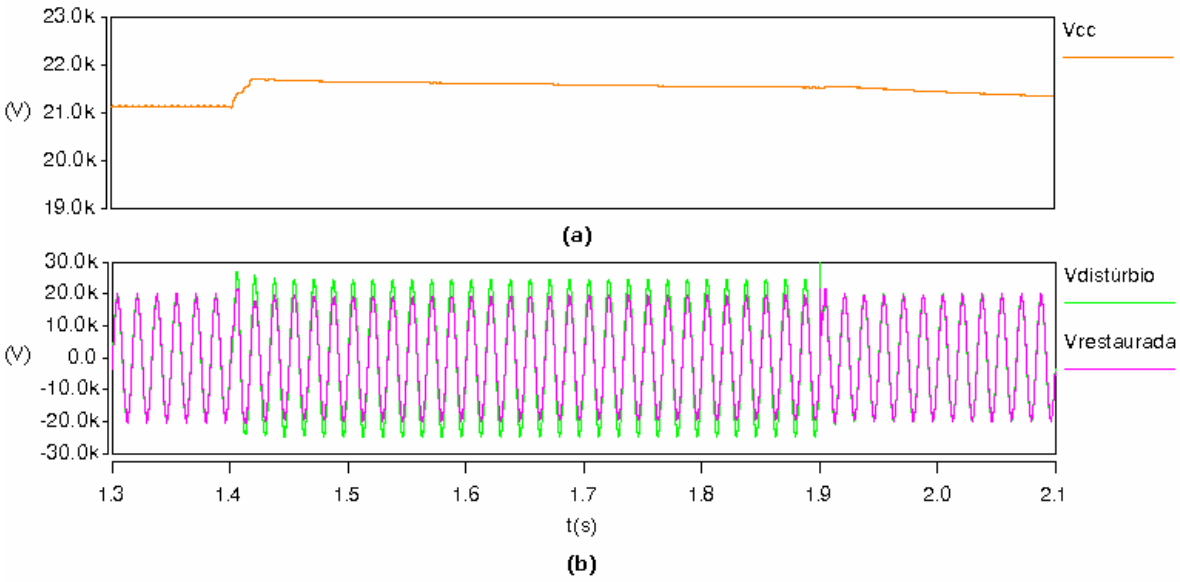

Figura 4.37 – Topologia 3: (a) tensão no barramento CC e **(b)** Tensões de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

No instante de início do distúrbio, a tensão do barramento CC é de aproximadamente 21130 V, se elevando apenas para o nível de 21624 V no instante de término do distúrbio.

Análogo ao que aconteceu com as topologias 1 e 2, no instante de término da elevação de tensão ocorre uma oscilação transitória no sistema elétrico que é transmitida também para a tensão restaurada. Porém, tal transitório se manifesta com menor intensidade na tensão restaurada pela topologia 3, devido ao amortecimento provocado pela ligação do capacitor do barramento CC ao sistema CA através do retificador. Contudo, a ocorrência desse transitório não chega a afetar o desempenho do sistema de controle, como pode ser visto com detalhes na figura 4.38 a seguir.

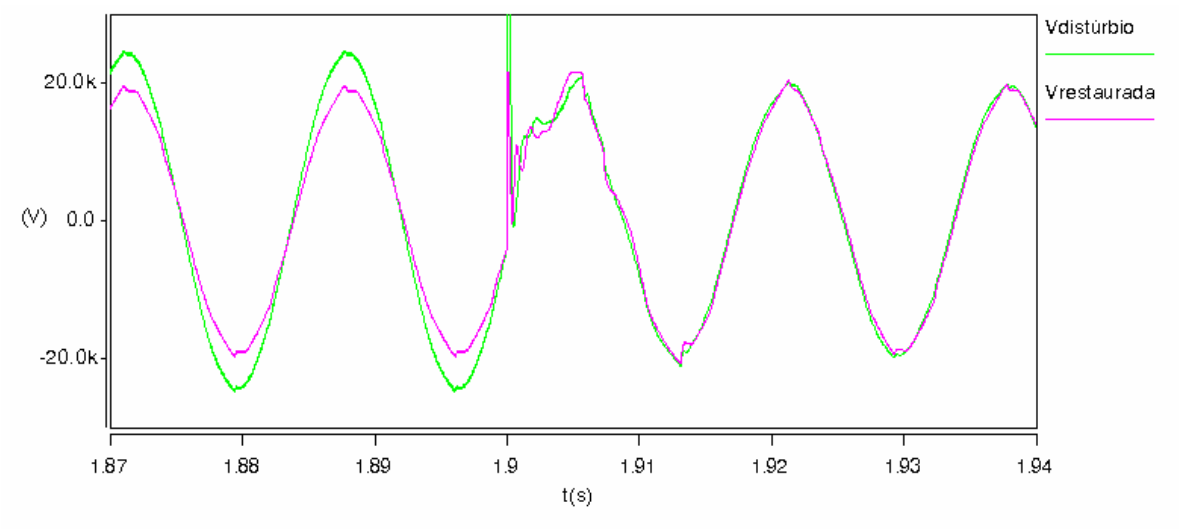

Figura 4.38 – Topologia3: Tensão de linha V_{ab} à montante do transformador série (tensão sob distúrbio) e à jusante do mesmo (tensão restaurada pelo DVR), nos instantes de término da elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.39 ilustra as correntes da fase "a" do alimentador de 13,8 kV que vem da fonte à montante do transformador série, que entra no retificador de 6 pulsos não-controlado e que chega na carga protegida, durante o processo de compensação da elevação equilibrada de tensão.

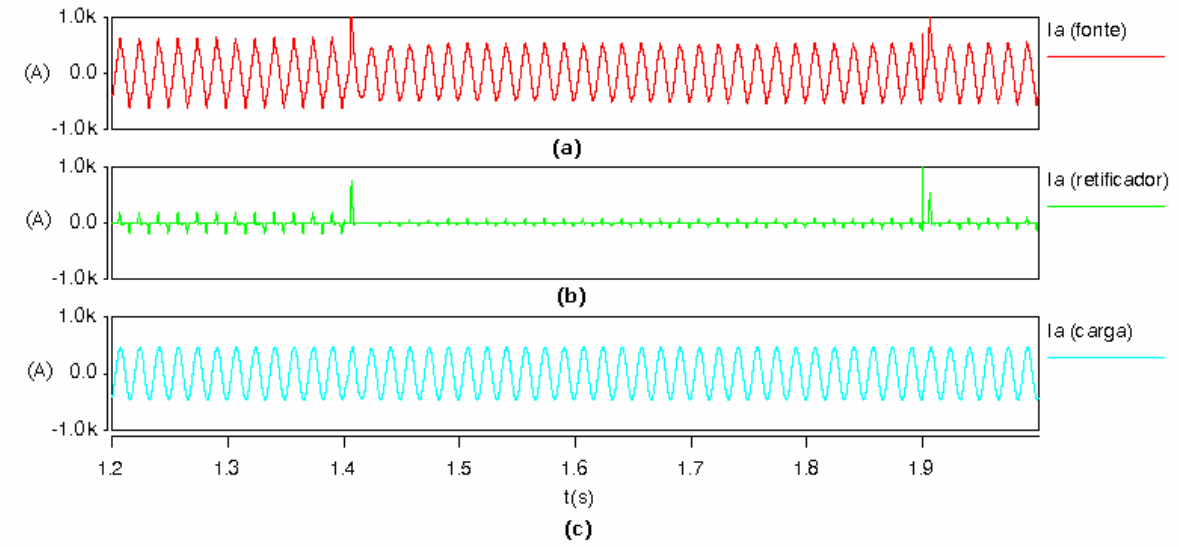

Figura 4.39 – Topologia 3: Correntes da linha "a" que: **(a)** vem da fonte a montante do retificador, **(b)** entra no retificador não-controlado de 6 pulsos e **(c)** que chega na carga , na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

Através da análise do gráfico (b) da figura 4.39, conclui-se que no instante em que o distúrbio elétrico se inicia, as correntes de entrada do retificador se reduzem significativamente, uma vez que a tensão do barramento CC passa a ficar maior do que o valor de pico das tensões restauradas, à jusante do transformador série.

O gráfico (a) da figura 4.39 ilustra que a corrente proveniente da fonte do sistema, correspondente à soma da corrente que entra no retificador com a corrente da carga, sofre alterações significativas na sua forma e na sua magnitude durante todo o processo de compensação do distúrbio. Apesar disso, o gráfico (c) mostra que a corrente da carga praticamente não sofreu oscilações durante a ocorrência da elevação de tensão, ressaltando assim a eficiência da topologia 3 na compensação do respectivo distúrbio elétrico.

Os gráficos 4.40 e 4.41 ilustram com mais detalhes as formas de onda das correntes descritas no gráfico 4.39.

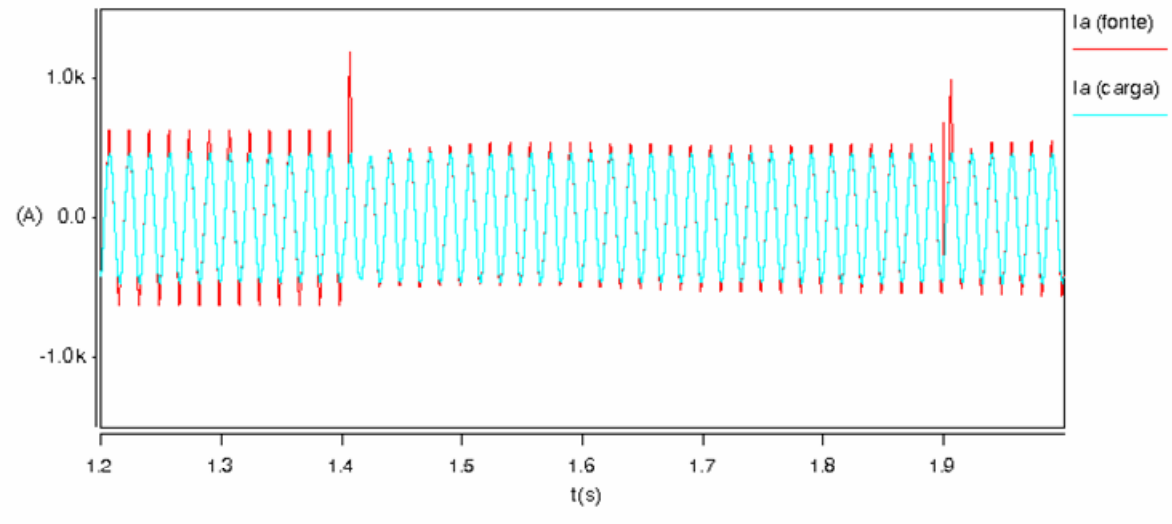

Figura 4.40 – Topologia 3: Correntes da linha "a"que: vem da fonte a montante do transformador série e que chega na carga , na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

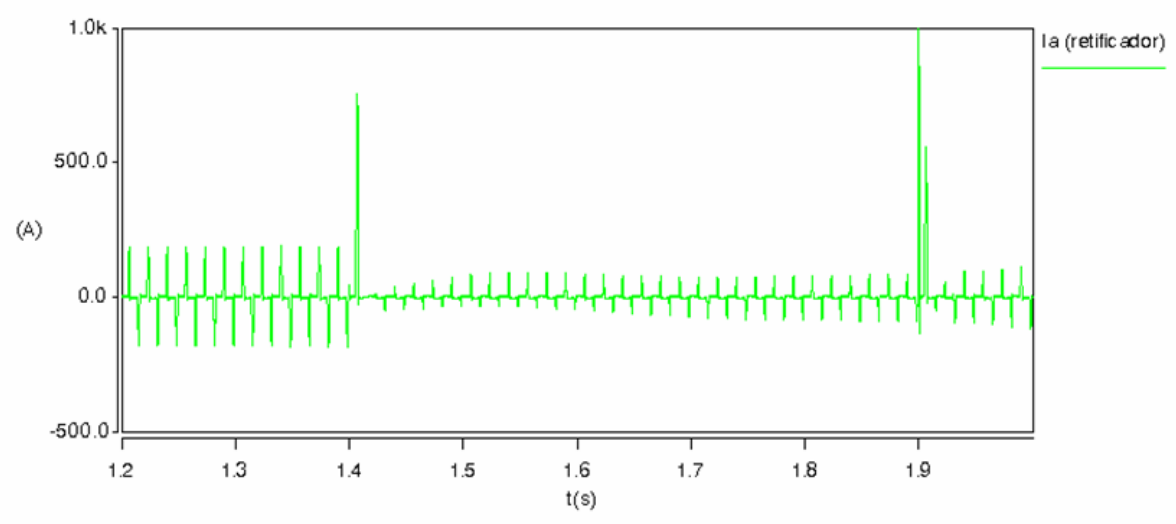

Figura 4.41 – Topologia 3: Corrente da linha "a" que entra no retificador não-controlado de 6 pulsos, na ocorrência de uma elevação de tensão equilibrada para 1,25 pu.

A figura 4.41 mostra que nos instante de início e término do distúrbio ocorreram picos nas correntes de entrada do retificador, como uma conseqüência da variação súbita no nível da tensão a ser sintetizada e injetada pelo DVR para a compensação da elevação de tensão.

4.5 – COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO E APLICAÇÃO DAS TOPOLOGIAS DE DVR

Através da análise do desempenho de cada uma das três topologias consideradas nas simulações, na compensação dos distúrbios elétricos apresentados e de outros afundamentos e elevações de tensão com variados níveis de severidade e duração, é possível se fazer uma comparação entre as mesmas, avaliando diferentes características e parâmetros operativos do DVR. A análise comparativa dos principais parâmetros é resumida na tabela 4.13, onde o número ordinal 1º está associado à topologia com o melhor desempenho relativo em determinado item, e o número ordinal 3º, à topologia com desempenho inferior. Os parâmetros considerados abordam desde o

desempenho das topologias na compensação dos distúrbios elétricos, até as suas características construtivas, como se segue:

Tabela 4.13 – Comparação do desempenho das topologias de DVR: (1º) melhor desempenho, (2º) desempenho intermediário e (3º) desempenho inferior.

Parâmetro	Topologia 1	Topologia 2	Topologia 3
Afundamentos de tensão duradouros	3º	2º	1º
Afundamentos de tensão severos	3º	2º	1º
Elevações de tensão	3º	2º	1º
Variação de tensão no barramento CC	3º	2º	1º
Geração de distorção harmônica de tensão	1º	2º	3º
Oscilação transitória na tensão restaurada	3º	2º	1º
Picos de correntes no retificador	NA*	2º	1º
Potências nominais do inversor e do transformador série	1º	1º	3º
Potência nominal do retificador	NA*	1º	2º

* Não se aplica a essa topologia de DVR

Através da análise da tabela 4.13, observa-se que, apesar da melhor topologia não poder ser completamente determinada, muitas diferenças podem ser notadas entre as três configurações de DVR consideradas na análise.

Em termos de desempenho das topologias na compensação dos afundamentos de tensão, é notória a superioridade da topologia 3. O fato do barramento CC apresentar uma menor variação de tensão garantindo um contínuo suprimento de energia pelo retificador durante a ocorrência do distúrbio foi fundamental para a alta eficiência dessa topologia na compensação de afundamentos severos e duradouros.

Para a topologia 2, sabe-se que, na ocorrência do afundamento de tensão, não há inicialmente um suprimento de energia ao barramento CC, uma vez que os diodos do retificador de 6 pulsos ficam inversamente polarizados

devido à diferença de níveis existentes entre a tensão da rede sob distúrbio e a tensão do barramento CC. Porém, se o afundamento de tensão tiver uma severidade ou uma duração suficiente para que a tensão CC fique abaixo do nível da tensão de pico sob distúrbio, os retificadores passam a conduzir correntes de suprimento ao barramento CC, auxiliando a topologia na compensação do distúrbio. Por esse motivo, a topologia 2 apresentou um melhor desempenho do que a topologia 1 na compensação de afundamentos de tensão mais severos ou de maiores durações.

O desempenho geral das topologias na compensação das elevações de tensão foi bastante elevado. Como durante a ocorrência da elevação de tensão há o carregamento do barramento CC, independente do tipo de topologia, a compensação desse tipo de distúrbio não chega a ser crítica para o restaurador dinâmico de tensão. Mas o desempenho da topologia 3 foi ligeiramente superior ao da topologia 2, que por sua vez foi ligeiramente superior ao da topologia 1.

Para a avaliação do desempenho geral das topologias de DVR, a análise exclusiva da capacidade de compensação dos distúrbios não é suficiente. É preciso que se avalie também a intensidade e o impacto da injeção na rede de outros distúrbios elétricos, tais como as oscilações transitórias de tensão, que surgem como uma conseqüência da compensação do afundamento ou da elevação de tensão, ou as distorções harmônicas de tensão, que podem ser conseqüência da qualidade das tensões injetadas na rede ou da conexão de um retificador em derivação com o sistema.

No caso específico da geração de distorção harmônica de tensão, pode-se dizer que a topologia 1 praticamente não é causadora desse tipo de distúrbio, uma vez que injeta tensões quase que puramente senoidais, promovidas pela alta freqüência de chaveamento do inversor, além de não possuir conexão com outras cargas não-lineares. Já as topologias 2 e 3, como

estão conectadas com o sistema através de retificador de 6 pulsos, são causadoras de distorções harmônicas, se fazendo necessário o uso de um filtro sintonizado na freqüência de 5ª harmônica nas simulações computacionais para amenizar a taxa de distorção harmônica de tensão.

De maneira geral, nota-se que as correntes não-senoidais do retificador da topologia 3 são causadoras de índices de distorção harmônica mais elevados do que as da topologia 2. Em condições normais de operação, a diferença entre as taxas de distorção harmônica de tensão geradas pelas duas topologias é mínima. Mas essa diferença aumenta significativamente durante a compensação de um afundamento de tensão de maior duração.

Como o sistema de controle de DVR considerado nos estudos não está apto a mitigar oscilações transitórias de tensão, é preciso que se avalie o impacto da ocorrência desse distúrbio sobre a qualidade da tensão do sistema, principalmente a tensão restaurada pelo DVR, durante o processo de compensação de afundamentos e elevações de tensão. No caso específico da topologia 1, correspondente à configuração de DVR onde se observaram os maiores picos de tensões transitórias ao término do afundamento de tensão, a ocorrência da oscilação transitória afetou diretamente o desempenho do sistema de controle que acarretou em falhas instantâneas na sintetização das tensões injetadas no sistema.

Tais falhas na sintetização das tensões injetadas não foram notadas nas topologias 2 e 3, uma vez que as oscilações transitórias de tensão tiveram menores magnitudes, como uma conseqüência da conexão do capacitor CC em derivação com o sistema, promovida pelo retificador, acarretando no amortecimento desses distúrbios. Como o DVR não está apto a compensar oscilações transitórias de tensão, a ocorrência desse distúrbio no sistema, mesmo que em menor magnitude, é parcialmente transferida para a tensão

restaurada das topologias 2 e 3. Porém, tal transitório se manifesta com menor intensidade na tensão restaurada da topologia 3 do que na da topologia 2.

A correta análise comparativa da aplicabilidade das topologias de DVR deve ser feita levando em consideração não somente a habilidade de cada configuração na compensação de afundamentos e elevações de tensão, mas também suas características operativas, tais como a taxa de distorção harmônica gerada na rede, e seus custos de aquisição e manutenção. Os impactos financeiros positivos e negativos dos parâmetros de cada topologia devem ser analisados economicamente de forma que a configuração de DVR a ser adotada corresponderá à que apresentar a menor relação custo/benefício. A grande dificuldade existente nessa análise é que nem todos os benefícios e prejuízos provocados por tais parâmetros podem ser facilmente mensurados.

Dessa forma, apesar da topologia 3 gerar impactos financeiros negativos referentes à geração de distorção harmônica e à aquisição de elementos de maiores custos, tais como o inversor e o transformador série que possuem potências relativamente mais altas, tal configuração de DVR apresenta os melhores desempenhos relativos na compensação de afundamentos e elevações de tensão. A correta avaliação da aplicação das topologias de restaurador dinâmico de tensão indicará se essa configuração representa a opção de menor relação custo/benefício para uma determinada rede elétrica.

Quanto ao custo de aquisição de cada uma das topologias, pode-se dizer que, apesar da topologia 1 ser a configuração de DVR com menos elementos associados, já que não utiliza conversor CA-CC e não necessita da adoção de filtro harmônico, ela nem sempre representa a opção menos onerosa. Segundo as referências [6, 8], como a topologia 1 pode requerer níveis de tensão e capacitância CC relativamente altos, em comparação com as outras

topologias, tal característica pode representar maiores custos de aquisição, uma vez que traz um impacto no custo dos dispositivos de potência do DVR.

4.6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo foi dedicado às análises computacionais de desempenho de três diferentes topologias de DVR: sem suprimento de energia ao barramento CC, com suprimento através da própria rede sob distúrbio à montante do transformador série (ou do lado da fonte do sistema) e com suprimento através da própria rede sob distúrbio à jusante do transformador série (ou do lado da carga do sistema).

Para tanto, fez-se uma descrição completa do sistema elétrico considerado nas simulações computacionais, dos critérios de dimensionamento dos componentes de cada uma das topologias, seguida da apresentação dos resultados de desempenho das configurações de DVR na compensação de um afundamento de tensão e uma elevação de tensão, com intensidades definidas e tempos de duração de 0,5 segundo. Finalmente, fez-se uma análise comparativa do desempenho dessas topologias na compensação dos distúrbios elétricos apresentados e de outros afundamentos e elevações de tensão com variados graus de severidade e duração, seguida de uma análise de desempenho das topologias.

De maneira geral, as seguintes conclusões podem ser tiradas a respeito de cada uma das topologias:

- **Topologia 3:** Das três topologias consideradas nas simulações, é a que apresentou o melhor desempenho geral na compensação de afundamentos e elevações de tensão. Porém, a sua aplicabilidade envolve custos elevados relacionados à sua aquisição,

principalmente se houver a necessidade de inserção de filtro harmônico no sistema, como uma conseqüência da distorção harmônica provocada pelas correntes não-senoidais do seu retificador.

- **Topologia 2:** Apesar de possuir conexão do barramento CC com o sistema sob distúrbio, na ocorrência da maioria dos afundamentos de tensão essa conexão só servirá para que haja o imediato re-carregamento do capacitor CC ao término do distúrbio, não auxiliando portanto no aprimoramento da capacidade da topologia na compensação. A exceção ocorre quando o afundamento de tensão é severo ou duradouro o suficiente para que o nível CC do barramento coincida com o valor de pico da tensão sob distúrbio. São nessas situações específicas que a compensação promovida pela topologia 2 supera a da topologia 1. Porém, assim como a topologia 3, também é causadora de distorções harmônicas no sistema.
- **Topologia 1:** Como não possui qualquer suprimento adicional de energia ao barramento CC, apresentou baixa eficiência na compensação de afundamentos de tensão severos ou duradouros. É a topologia que apresenta o menor custo de manutenção e menor complexidade operacional. Por isso, pode ser a opção de topologia mais viável para aplicações em sistemas elétricos com incidência de afundamentos menos severos e duradouros. A aplicação dessa topologia na mitigação de afundamentos severos ou duradouros acarretará em aumento do custo dos seus dispositivos de potência, uma vez que necessitará de níveis de tensão e capacitância CC relativamente altos. A aplicação de alta freqüência de chaveamento do inversor VSI-PWM é a garantia

de que essa configuração de DVR não gerará distorções harmônicas nas redes elétricas.

Baseado nas características de desempenho das topologias descritas anteriormente é fácil concluir que a decisão pela melhor aplicação em um determinado sistema deve ser feita não só em função do seu desempenho, mas também das características da rede elétrica, das características dos distúrbios ocorridos no mesmo, dos impactos que tais distúrbios causam em equipamentos e processos e dos custos de aquisição e manutenção de cada configuração de DVR.

Vale ressaltar, porém, que o desempenho geral das topologias pode ser aprimorado através de um estudo aprofundado do sistema de controle. Tal estudo pode ser focado na otimização das malhas de controle, para aprimoramento do tempo de resposta em estudos dinâmicos [4], por exemplo, na adoção de outras filosofias de detecção e compensação dos distúrbios elétricos, ou no aprimoramento da tecnologia de suprimento de energia ao barramento CC do DVR.

Como exemplo de estudo de melhoria do suprimento de energia ao barramento CC pode-se citar a adoção de retificador controlado na topologia 2, com o intuito de controlar a tensão do capacitor CC durante a ocorrência do afundamento de tensão. Com essa implementação, a topologia 2 terá o seu desempenho como compensador de distúrbios aprimorado [6], podendo se equiparar ao da topologia 3, sem necessitar, porém, de elementos com níveis de potência mais elevados.

O sistema de controle utilizado nas simulações originalmente não foi concebido para a compensação de distúrbios elétricos desequilibrados, tais como afundamentos desequilibrados de tensão e desequilíbrios de tensão [4].

Por isso, devido a essas limitações, os afundamentos de tensão desequilibrados não foram considerados nesses estudos.

Finalmente, a observação feita sobre a viabilidade econômica da aplicação de cada topologia de DVR tratou a questão da relação custo/benefício de forma genérica, sem contextualizar com a realidade econômica e tecnológica de um país específico. Caso tais análises fossem feitas no contexto nacional, é claro que, para a maioria das empresas, a aplicação de tal tecnologia, na média ou até na baixa tensão, seria inviável economicamente. Tal situação é justificada pelo fato do DVR ainda ser uma tecnologia em desenvolvimento nas potências econômicas, cujos primeiros modelos estão disponibilizados no mercado há pouco tempo, resultando em um equipamento com custo de aquisição elevado para os padrões brasileiros, aliada ao fato de ser uma tecnologia ainda pouco difundida nacionalmente, apesar de haverem alguns protótipos de baixa tensão concluídos ou em desenvolvimento em institutos de pesquisa e instituições acadêmicas nacionais.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES GERAIS

Apesar de uma série de comentários conclusivos já terem sido realizados nas considerações finais de cada capítulo, uma abordagem global enfocando as principais contribuições efetuadas por este trabalho se faz necessária. Neste sentido, este capítulo tem como objetivo a apresentação das principais constatações obtidas nessa dissertação, enfatizando seus pontos de maior destaque e sugerindo temas para futuros trabalhos de continuação.

O Capítulo 1 abordou de uma maneira geral, os motivos da utilização da tecnologia *Custom Power* e sua relação com o tema Qualidade da Energia Elétrica, justificando a necessidade de aprofundamento no estudo dos restauradores dinâmicos de tensão (DVR) aplicados à compensação de distúrbios elétricos. Adicionalmente, procedeu-se a uma revisão bibliográfica sobre o estado da arte desse dispositivo, seguida pelo estabelecimento dos objetivos gerais e da estrutura deste trabalho.

O Capítulo 2 objetivou fazer uma revisão geral sobre as principais causas, conseqüências e prejuízos associados às VTCDs (Variações de Tensão de Curta Duração), além de apresentar a classificação desses distúrbios segundo procedimentos nacionais e internacionais, e ainda descrever sucintamente alguns dos principais métodos e dispositivos utilizados na prevenção da ocorrência desses distúrbios ou na atenuação dos seus efeitos.

O Capítulo 3 tratou especificamente do restaurador dinâmico de tensão (DVR), onde foi abordado inicialmente o princípio de operação desse dispositivo, enfocando suas características como compensador estático série

avançado e descrevendo o funcionamento do seu sistema de controle. Tendo em vista que o funcionamento do DVR está alicerçado na teoria do controle vetorial, este assunto foi explorado previamente à descrição de seu sistema de controle. Na seqüência, foram descritos os tipos de topologia de DVR existentes e suas características construtivas e operativas, as filosofias de compensação existentes, além das técnicas de dimensionamento de cada um dos elementos básicos que compõem o restaurador dinâmico de tensão. Finalmente, foram apresentados os principais esquemas de proteção do DVR contra avarias provocadas principalmente pela ocorrência de curto-circuitos à jusante do mesmo e sobretensões transitórias devido a descargas atmosféricas.

O Capítulo 4 teve como enfoque principal a análise computacional do desempenho de algumas topologias de DVR na compensação de afundamentos e elevações de tensão. As configurações de restaurador dinâmico de tensão enfocadas nas simulações computacionais foram as 3 topologias consideradas de maiores aplicabilidades e menores custos de aquisição. Para tanto, primeiramente detalhou-se o sistema elétrico considerado nas simulações, seguido da descrição dos parâmetros de cada topologia e da apresentação do desempenho das configurações de DVR na compensação de distúrbios elétricos específicos. As VTCDs consideradas nas simulações apresentadas foram um afundamento de tensão e uma elevação de tensão, cujas magnitudes e durações foram previamente definidas. Finalmente, foram feitas análises comparativas do desempenho das topologias, levando-se em consideração as simulações apresentadas e outras feitas para afundamentos e elevações de tensão de diferentes magnitudes e durações, além de diversas considerações a cerca da viabilidade econômica da aplicação de cada configuração.

O sistema de controle utilizado nas simulações computacionais das 3 configurações de DVR foi originalmente concebido para um compensador

estático série avançado (ASC), equipamento esse que é integrante da família de dispositivos FACTS, e aplicado em estudos de um sistema de transmissão em anel, no nível de tensão de 69 kV [4]. Esse sistema de controle foi ajustado para ser integrado ao DVR, que é um equipamento da família de dispositivos "Custom power", e aplicado em uma rede de distribuição radial de 13,8 kV.

Apesar das topologias terem apresentado desempenhos diferenciados na compensação dos distúrbios elétricos, além de existirem diferenças em outros parâmetros operacionais, pode-se dizer que o sistema de controle teve uma boa atuação nas três configurações de DVR. Essa afirmativa confirma a eficiência da modelagem desse tipo de sistema de controle e valida a sua aplicação em restauradores dinâmicos de tensão, que também são compensadores estáticos série avançados, associados a configurações de rede diferenciadas em relação à utilizada na referência [4].

Com isso, as principais contribuições técnicas e didáticas desta dissertação podem ser resumidas da seguinte forma:

- Estado da arte e revisão bibliográfica do restaurador dinâmico de tensão (DVR), tecnologia essa ainda pouco difundida dentro e principalmente fora dos meios acadêmicos nacionais, explorando desde a sua operação como compensador estático série avançado, seus tipos de topologia, filosofias de compensação existentes, métodos de especificação de seus elementos básicos, indo até a descrição sucinta dos esquemas existentes de proteção contra avarias;
- Desenvolvimento de modelos computacionais que simulam a operação de restauradores dinâmicos de tensão com diferentes topologias, em plataforma dotada de amplos recursos gráficos;

- Demonstração da eficiência do restaurador dinâmico de tensão como dispositivo compensador de afundamentos e elevações de tensão de diferentes magnitudes e durações, reafirmando a certeza de que o mesmo constitui-se a mais moderna e destacada solução dos problemas causados por tais distúrbios elétricos;
- Simulações computacionais de três diferentes topologias de DVR, evidenciando e elucidando as vantagens e desvantagens relativas da aplicação de cada uma dessas configurações, representando um enfoque muito pouco explorado na literatura técnica.

Finalmente, pode-se considerar que, além de possibilitar as diversas análises efetuadas ao longo desta dissertação, os modelos computacionais disponibilizados servirão de base para futuras investigações do tipo:

- Simulação das topologias de DVR não consideradas nesse trabalho, correspondentes às de suprimento de energia ao barramento CC através de fonte alternativa de energia e através de sistema elétrico independente;

- Construção de um protótipo de DVR com funcionamento baseado nos modelos computacionais aqui abordados;

- Investigação aprofundada da relação custo/benefício associada à aplicação de cada uma das topologias de DVR, comparando-as com outras tecnologias de compensação dos distúrbios elétricos.

- Análise do desempenho das topologias 2 e 3 na adoção de retificadores de outros tipos, tais como o não-controlado de 12 pulsos e o controlado de 6 e 12 pulsos;

- Ajustes e modificações no sistema de controle de modo a possibilitar, quando possível, a adoção por parte das topologias de DVR de diferentes filosofias de compensação;

- Possibilidade de controle monofásico das tensões injetadas para a compensação de distúrbios desequilibrados;

- Suporte e ponto inicial para implementação de modelo computacional de restaurador dinâmico de tensão com função de filtro harmônico ativo;

- Implementação do modelo utilizado nessa dissertação em outras plataformas computacionais;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] DUGAN, R. C., Mc GRANAGHAN, M. F., Electrical Power System Quality, segunda edição. Editora Mc Graw-Hill**,** Estados Unidos da América – 2002.

[2] IEEE Standard 1159-1995, Recommended Practice on Monitoring Electric Power.

[3] ONS - Operador Nacional do Sistema, Procedimento de Rede, Submódulo 2.2, Padrões de Desempenho da Rede Básica. 24/12/2002.

[4] Martins, W. K. A. G., "Modelagem e Análise de Desempenho de Compensadores Estáticos Avançados no Contexto da Qualidade da Energia Elétrica", Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Julho, 2002.

[5] Hingorani, Narain G., "Introducing Custom Power", IEEE SPECTRUM, June 1995.

[6] Nielsen, J. G., Blaabjerg, F., "A Detailed Comparison of System Topologies for Dynamic Voltage Restorers", IEEE Transaction of Industry Applications, September/October 2005

[7] Etxeberria-Otadui, I., Viscarret, U., Bacha, S., Caballero, M., Reyero, R., "Evaluation of Different Strategies for Series Voltage Sag Compensation", IEEE PRESS, 2002.

[8] Silva, S. M., "Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais, 1999.

[9] Newman, M. J., Holmes, D. G., Nielsen, J. G., Blaabjerg, F., "A Dynamic Voltage Restorer (DVR) with Selective Harmonic Compensation at Medium Voltage Level", IEEE PRESS, 2003.

[10] Fitzer, C., Barnes, M., Green, P., "Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer", IEEE PRESS, 2002.

[11] Ghosh, A., Joshi, A., "A New Algorithm for Generation of Reference Voltages of a DVR Using the Method of Instantaneous Symmetrical Components", IEEE Power Engineering Review, January 2002.

[12] Jurado, F., Hidalgo, F. P., "Neural Network Control for Dynamic Voltage Restorer", IEEE PRESS, 2002.

[13] Ramachandaramurthy, V. K., Fitzer, C., Arulampalam, A., Zhan, C., Barnes, M., Jenkins, N., "Control of a Battery Supported Dynamic Voltage Restorer", IEE Proc. Gener. Transm. Distrib., Vol. 149, Nº 5, September 2002.

[14] Wang, K., Zhuo, F., Li, Y., Yang, X., Wang, Z., "Three-phase Four-wire Dynamic Voltage Restorer Based on a new SVPWM Algorithm", 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.

[15] ZHANG, Y. H., Vilathgamuwa, D. M., Choi, S. S., "An Experimental Investigation of Dynamic Voltage Restorer", IEEE PRESS, 2000.

[16] Sree, H., Mohan, N., "High-Frequency-Link Cycloconverter-based DVR for Voltage Sag Mitigation", IEEE PRESS, 2000

[17] Nielsen, J. G., Blaabjerg, F., "Control Strategies for Dynamic Voltage Restorer Compensating Voltage Sags with Phase Jump", IEEE PRESS, 2001

[18] Wijekoon, H. M., Vilathgamuwa, D. M., Choi, S. S., "Interline dynamic voltage restorer: an economical way to improve interline power quality", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol 150, No 5, Sptember 2003.

[19] Woodley, N. H., "Field Experience With Dynamic Voltage Restorer (DVR™ MV) Systems", IEEE PRESS, 2000.

[20] Haque, M. H., "Compensation of Distribution System Voltage Sags by DVR and D-StatCom", IEEE PRESS, Singapore, 2001.

[21] Nielsen, J. G., Newman, M., Nielsen, H., Blaabjerg, F., “Control and Testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at Medium Voltage Level”, IEEE PRESS, 2003.

[22] Zhan, C., Ramachandaramurthy, V. K., Arulampalam, A., Fitzer, C., Kromlidis, S., Barnes, M., Jenkins, N., “Dynamic Voltage Restorer Based on Voltage-Space-Vector PWM Control”, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November/December 2001.

[23] Nielsen, J. G., Nielsen, H., Blaabjerg, F., “Control and Testing of a Dynamic Voltage Restorer on the Medium Voltage Grid”, IEEE, 2003

[24] Ahn, S. U., Jardini, J. A., Masuda, M., Silva, F. A. T., Copeliovitch, S., Matakas, L., Komatsu, W., Galassi, M., Ortiz, F., Camargo, J., Zanetti, E. R., “Mini-DVR – Dynamic Voltage Restorer with Active Harmonic Filter (Test of Prototype)”, 11th International Conference on Harmonics and Quality of Power, IEEE PRESS, 2004.

[25] Ahn, S. U., Jardini, J. A., Masuda, M., Silva, F. A. T., Copeliovitch, S., Matakas, L., Komatsu, W., Galassi, M., Camargo, J., Zanetti, E. R., Martinz, F. O., Oliveira, M. A., Lima, E. G., “Implementação e Testes α da Geração de Referência e Controle em um Protótipo de Restaurador Dinâmico de Tensão”, VI SBQEEE, agosto de 2005.

[26] Bollen, M. H. J., "Voltage Sags in Three-Phase Systems". IEEE Power Engineering Review, September 2001, pp. 8-11.

[27] Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Prodist – 2005.

[28] Leão, P. C. A., “Desempenho de Conversores de Freqüência VSI-PWM Submetidos a Afundamentos Momentâneos de Tensão”, Tese de Doutorado – UFU – Uberlândia, MG, Fevereiro de 2002.

[29] Bollen, M. H. J., "Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions", IEEE PRESS, New York, 2000.

[30] Ribeiro, C. F., Marambio, J. E. S., Amaral, F. A. S., Costa, C. A., "Metodologia e Software para Análise do Impacto de Condutores Abertos no Sistema de Distribuição", Companhia de Energia de Alagoas - CEAL e Norsul Engenharia e Consultoria, março de 2004.

[31] Site da Agência Nacional de Energia Elétrica, Aneel, http://www.aneel.gov.br, acessado em dezembro de 2005

[32] Agência Nacional de Energia Elétrica – Aneel – Resolução Nº 456 de 29 de novembro de 2000.

[33] Sarmiento, H. G., Estrada, E., "A Voltage Sag:Study in an Industry with Adjustable Speed Drives", IEEE Industry Aplications Magazine, January/February 1996, pp. 16-19.

[34] Brooks, D. L., Dugan, R. C., Waclawiak, M., et al, "Indices for assessing utility distribution RMS variation performance." IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, pp254-259, Jan 1998.

[35] Belchior, F. N., "Análise Comparativa e Melhorias de Desempenho de Conversores de Freqüência Frente a Afundamentos de Tensão", Dissertação de Mestrado – UFU – Uberlândia, MG, 2003.

[36] Gomes, F. C. P., "Análise do desempenho dinâmico do D-StatCom Frente às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) nos Sistemas de Distribuição, através do Simulador ´Saber`", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2005.

[37] IEEE Std 1346-1998, IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment.

[38] Martins, A. A., Panizza, A. C., "Desenvolvimento de Metodologia para Análise das Áreas Sensíveis às Variações Momentâneas de Tensão", Anais do

CITENEL - II Congresso Nacional de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, páginas 865 a 871, Aneel, 2003.

[39] McGranaghan, M., Gunther, E., "The Economics Custom Power", CIRED 2001 Round Table on Cost Aspects of Power Quality, Tuesday 19 June 2001.

[40] Newman, J. M., Holmes, D. G., "A Universal Custom Power Conditioner (UCPC) with Selective Harmonic Compensation", IEEE PRESS, Monash, Australia, 2002.

[41] Zhan, C., Fitzer, C., Ramachandaramurthy, V. K., Arulampalam, A., Barnes, M., Jenkins, N., "Software Phase-Locked Loop applied to Dynamic Voltage Restorer (DVR)", IEEE PRESS, 2001.

[42] Chung, I., Park, S., Moon, S., Hur, S., "The Control and Analyses of Zero Sequence Components in DVR System", IEEE PRESS, 2001.

[43] Haque, M. H., "Voltage Sag Correction by Dynamic Voltage Restorer with Minimum Power Injection", IEEE Power Engineering Review, May 2001.

[44] Li, B. H., Choi, S. S., Vilathgamuwa, D. M., "On The Injection Transformer Used in the Dynamic Voltage Restorer", IEEE PRESS 2000.

[45] Ghosh, A., LedWich, G., "Structures and Control of a Dynamic Voltage Regulator (DVR)", IEEE PRESS, 2001.

[46] Choi, S. S., Li, B. H., Vilathgamuwa, D. M., "A Comparative Study of Inverter and Line-Side Filtering Schemes in the Dynamic Voltage Restorer", IEEE PRESS, 2000.

[47] Fitzer, C., Arulampalam, A., Barnes, M., Zurowski, R., "Mitigation of Saturation in Dynamic Voltage Restorer Connection Transformers", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 17, No. 6, November 2002.

[48] Choi, S. S., Li, B. H., Vilathgamuwa, D. M., “Design and Analysis of the Inverter-Side Filter Used in the Dynamic Voltage Restorer”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 17, No. 3, July 2002.

[49] Silva, S. M., Eleutério, F. A., Reis, A. S., Cardoso Filho, B. J., “Protection Schemes for a Dynamic Voltage Restorer”, IEEE PRESS, 2004.