



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Um Restaurador Dinâmico de Tensão para Correções de Variações de Tensão de Curta Duração em Redes Elétricas Trifásicas

Darlan Alexandria Fernandes

Tese de Doutorado submetida à Coordenação dos Cursos de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito para obtenção do grau de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Processamento da Energia

Orientador:
Sreeramulu Raghuram Naidu

Campina Grande, Paraíba, Brasil

©Darlan Alexandria Fernandes, novembro de 2008

Dedico este trabalho a minha querida mãe Zélia pela sua pureza de espírito e por quem tenho muito amor

Basta ajuizar bem para bem fazer, e julgar o melhor que
nos seja possível para fazermos também o nosso melhor
DESCARTES

AGRADECIMENTOS

- Ao professor Naidu pela excelente orientação e pela oportunidade de aprender com suas idéias e habilidades.
- A Fabiano Fragoso por prestar-se às inúmeras discussões técnicas, essenciais para o amadurecimento dos conceitos contidos neste trabalho e pelos incentivos e confiança que tem me passado nos últimos anos.
- A minha irmã Denize por ser uma pessoa especial e a quem tenho muito apreço.
- Aos professores do LEIAM Edison Roberto, Cursino, Antônio Marcus, Alexandre, Maurício e Talvanes pelo apoio prestado para realização deste trabalho.
- A Jadsonlee, Euzeli, Alexandre e Antônio pela disponibilidade e sugestões apresentadas.
- Aos técnicos do LEIAM Fabrício e Tâmisa, aos funcionários do LAT Chico, Adriano, Selma e Eduardo e aos funcionários Danilo e Simões.
- Aos amigos e colegas Carlos Jr, Luiz Gonzaga Jr, Montiê, Welflen, Eisenhower, Jadsonlee, Lucas, Tiago, Gilvan, Nady, Aluísio, Jonas, Welington, Artur, Kátia, Jacson e Alfranque pelo companheirismo e principalmente pelos momentos de descontração.
- Aos colegas professores e funcionários do CEFET Rio Grande do Norte - Uned Mossoró que me incentivaram para o término deste trabalho.
- Aos colegas professores do CEFET Pernambuco - Uned Pesqueira com quem tive bons momentos durante o ano que lecionei lá.
- Ao povo brasileiro, que por intermédio da Capes, concedeu-me uma bolsa de estudos e que por intermédio do CNPq, com o Projeto Universal nº 471989/03-7, financiou os meios para montagem do protótipo.
- A Pollyana por ser minha amada e pela paciência prestada durante estes últimos anos.

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia de restauração de tensões trifásicas que alimentam cargas de redes elétricas em que variações de tensão de curta duração desequilibradas podem ser corrigidas. A metodologia faz uso de um restaurador dinâmico de tensão (DVR) de quatro braços em que a seqüência positiva e o oposto da negativa são injetadas através de três braços e o oposto da seqüência zero é injetada pelo quarto braço. As seqüências positivas e negativas são produzidas por uma modulação escalar digital enquanto que a seqüência zero é gerada por outra técnica de modulação. Também como contribuição deste trabalho, apresenta-se um algoritmo para a estimação das componentes de seqüência em tempo real. Uma contribuição colateral surge da utilização destas componentes por um sistema de controle em malha fechada que aperfeiçoa a correção das variações de tensão de curta duração. No intuito de validar a metodologia, um sistema DVR foi montado em laboratório e um processador digital de sinais executou todas as funções de aquisição, controle, geração de sinais PWM e medição das tensões e correntes. Ensaio experimentais com afundamentos e elevações de tensão com diferentes tipos de carga são apresentados e analisados ao fim do trabalho. Os resultados mostraram a efetividade da metodologia.

ABSTRACT

This work proposes a methodology for restoring power system load voltages capable of dealing with unbalanced voltage sags and swells. The method makes use of a four-leg inverter based dynamic voltage restorer (DVR) in which the positive and the opposite of the negative sequences are injected through three legs and the opposite of the zero sequence by the fourth one. The positive and negative sequences are computed by means of a digital scalar modulation whilst the zero one is generated by an alternative modulation technique. Also, it is presented an algorithm for estimating the sequence components in real-time. A collateral contribution arises from the application of these components in a feedback control which improves the short duration voltage variation correction. In order to validate the methodology, a laboratory-scale dynamic voltage restorer was developed and a digital signal processor (DSP) carried out all signal acquisitions, control algorithms, generation of the PWM signals and voltage and current measurements. Experimental tests producing voltage sags and swells were analyzed and the results show the effectiveness of the proposed methodology.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	xi
Lista de Tabelas	xviii
Glossário	xix
Capítulo 1– Introdução	1
1.1 Motivação	3
1.2 Objetivos do Trabalho	6
Capítulo 2– Variações de Tensão de Curta Duração e Alternativas de Mitigação	8
2.1 Variações de Tensão de Longa Duração	8
2.1.1 Sobretensão	9
2.1.2 Subtensão	9
2.1.3 Interrupção Sustentada	9
2.2 Variações de Tensão de Curta Duração	9
2.2.1 Afundamento de Tensão	10
2.2.2 Elevação de Tensão	11
2.2.3 Interrupção	11
2.3 Classificação dos Eventos a VTCD	11
2.3.1 Recomendação Brasileira do ONS - Submódulo 2.2	13
2.3.2 IEEE 1159 - Recomendação Americana	14

2.3.3	EN 50160 - Recomendação Européia	14
2.4	Curvas de Sensibilidade a VTCD	15
2.4.1	CBEMA/ITIC	15
2.4.2	SEMI F47	17
2.5	Causas de Afundamentos de Tensão e Interrupções	18
2.5.1	Efeitos Ocasionalmente por Falhas	19
2.5.1.1	Salto de Ângulo de Fase.	21
2.5.1.2	Origem dos Saltos de Ângulo de Fase.	23
2.5.2	Efeitos Ocasionalmente por Partida de Motores de Indução	23
2.6	Alternativas de Mitigação	25
2.7	Meios de Mitigação	26
2.7.1	Controladores de Tensão Série	27
2.7.2	Controladores de Tensão em Derivação	28
2.7.3	Controladores em Derivação e Série Combinados	30
2.7.4	Controladores de Tensão Conectados em Cascata	31
2.8	Conclusão	33
Capítulo 3– Estratégias de Controle		34
3.1	Modos de operação	35
3.2	Limitações dos DVRs	36
3.3	Estratégia de controle com afundamentos de tensão equilibrados	37
3.4	Estratégia de controle com afundamentos de tensão desequilibrados	46
3.5	Estratégia de controle com diferentes tipos de carga	46
3.6	Tipos de controladores utilizados em DVRs	48
3.7	Controle da tensão do barramento c.c.	50
3.8	Detecção do afundamento de tensão	51
3.9	Sistemas de controle em malha aberta utilizados em DVRs	53
3.10	Sistemas de controle em malha fechada utilizados em DVRs	55

3.11	Conclusão	57
Capítulo 4– Sistemas de controle Aplicados ao DVR		59
4.1	Modelagem do Sistema	60
4.1.1	Sistema de Controle em Malha Aberta	62
4.2	Sistema de Controle em Malha Fechada	63
4.2.1	Decomposição instantânea em componentes de sequência	67
4.2.2	Sistema de controle proposto	78
4.3	Conclusão	89
Capítulo 5– Inversores de Tensão em Restauradores Dinâmicos de Tensão		92
5.1	Topologias para o Inversor de Tensão	94
5.1.1	Inversor em Meia Ponte com Transformador Conectado em Estrela Aberto/Estrela - Topologia I	95
5.1.2	Inversor em Meia Ponte com Transformador Conectado em Estrela Aberto/Delta - Topologia II	95
5.1.3	Inversor em Ponte Completa com Transformador Conectado em Estrela Aberto/ Estrela - Topologia III	96
5.1.4	Inversor de Três Níveis em Meia Ponte com Transformador Conectado em Estrela Aberto/Delta - Topologia IV	96
5.1.5	Comparação entre as Topologias dos Inversores	97
5.2	Inversores trifásicos a três fios	98
5.3	Metodologia proposta	103
5.3.1	Determinação das Tensões Utilizando Três Braços do Inversor	105
5.3.1.1	Modulação escalar digital.	108
5.3.1.2	Análise entre as duas modulações.	110
5.3.2	Produção da Tensão de Seqüência Zero	111
5.3.3	Simulação da Estratégia de Modulação	116
5.4	Aspectos Construtivos e Suprimento de Energia por Meio de Conversor c.a./c.c.	120

5.5	Conclusão	122
Capítulo 6– Plataforma Experimental		123
6.1	Especificações do filtro LC	125
6.2	Circuitos para Condicionamento de Tensão e Corrente	126
6.2.1	Sensoriamento de Corrente	126
6.2.2	Sensoriamento de Tensão	127
6.3	Implementação no DSP	129
6.4	Inversor de Tensão	133
6.5	Rede Trifásica	135
6.6	Conclusão	137
Capítulo 7– Resultados e Análises		138
7.1	Controle em Malha Fechada	147
7.2	Conclusão	154
Capítulo 8– Conclusões e Trabalhos Futuros		155
8.1	Trabalhos Futuros	158
Referências Bibliográficas		160
Apêndice A– Generalização da largura de pulso para o quarto braço do inversor		170
Apêndice B– Diagrama esquemático da Plataforma Experimental		172
Apêndice C– Trabalhos Publicados		173

LISTA DE FIGURAS

1.1	Faltas localizadas na transmissão e distribuição.	4
2.1	Variações de tensão de curta duração.	10
2.2	Afundamento de tensão.	12
2.3	Curva de sensibilidade CBEMA.	16
2.4	Curva de sensibilidade ITIC.	17
2.5	Curva de sensibilidade SEMI F47.	18
2.6	Rede de distribuição com faltas localizadas.	20
2.7	Quatro tipos de afundamento representados por diagramas fasoriais.	21
2.8	Três tipos de afundamento representados por diagramas fasoriais, devido a faltas fase-fase-terra.	21
2.9	Afundamento com magnitude de 70% e salto de ângulo de fase de $+45^\circ$	22
2.10	Afundamento com magnitude de 70% e salto de ângulo de fase de -45°	22
2.11	Modelo divisor de tensão para um afundamento de tensão.	23
2.12	Circuito equivalente para afundamento de tensão devido à partida de um motor de indução.	24
2.13	Possíveis pontos de mitigação de afundamentos.	27
2.14	Curto-circuito levando à falha do equipamento e meios de mitigação.	27
2.15	Controlador de tensão série.	29
2.16	Controlador de tensão em derivação.	29
2.17	Circuito de um controlador de tensão em derivação.	30
2.18	Controlador de tensão conectado em derivação-série.	31
2.19	Configuração típica de uma UPS.	32

3.1	Elementos básicos de um DVR em uma representação monofásica.	35
3.2	Estratégias de controle para um DVR compensando queda de tensão com salto de fase. U_{DVR-1} controle otimizado da qualidade de tensão, U_{DVR-2} controle otimizado da amplitude de tensão e U_{DVR-3} controle otimizado da energia.	38
3.3	Fluxo de potência ativa e reativa com a inserção de um DVR.	40
3.4	Controle otimizado da qualidade de tensão de um DVR para três diferentes fatores de potência.	41
3.5	Controle otimizado da qualidade de tensão de um DVR para três diferentes fatores de potência e $\phi_{af} = -15^\circ$	42
3.6	Controle otimizado da energia de um DVR para três diferentes fatores de potência.	44
3.7	Comparação entre as três estratégias de controle com $FP_{carga} = 0,75$, $\phi_{af} = -15^\circ$	45
3.8	Controle de tensão em um DVR.	49
3.9	Controle em malha fechada modificado sendo utilizadas as tensões do DVR no laço de realimentação.	50
3.10	Deteção de afundamento desequilibrado. a) Rede trifásica com (linha cheia) e sem faltas (linhas tracejadas), b) Método 1: amplitude do vetor espacial, c) Método 2: componentes d e q, d) Método 3: vetor de erro.	52
3.11	Diagramas de bloco do sistema de controle apresentado em (VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002).	54
3.12	Diagrama de bloco do sistema de controle projetado em (ZHAN, 2001b).	55
3.13	Diagrama de blocos do sistema de controle projetado em (HUANG; HUANG; PAI, 2003).	56
4.1	Restaurador dinâmico de tensão.	61
4.2	Representação monofásica de um restaurador dinâmico de tensão.	62
4.3	Controle de tensão em malha aberta para um DVR.	63
4.4	Controle em malha aberta para o DVR.	63
4.5	Controle em malha fechada para o DVR.	64

4.6	Tensão de carga. (a) Decaimento de v_l com entrada i_l em degrau unitário. (b) Decaimento de v_l com entrada v_s em degrau unitário.	66
4.7	Respostas de corrente e tensão. (a) Corrente i_c com entrada i_c^* em degrau unitário. (b) Tensão v_l com entrada v_l^* em degrau unitário.	67
4.8	Componentes de sequência no eixo $\alpha\beta$	68
4.9	Decomposição instantânea em componentes de sequência. (a) Tensões trifásicas equilibradas; (b) Componentes positiva e negativa.	72
4.10	Decomposição instantânea em componentes de sequência. (a) Tensões trifásicas com afundamentos em duas fases; (b) Componentes positiva e negativa.	73
4.11	Componentes estimadas. (a) $v_{s_{p\alpha}}$; (b) $v_{s_{p\beta}}$; (c) $v_{s_{n\alpha}}$; (d) $v_{s_{n\beta}}$	75
4.12	Vetores da rede trifásica no plano $\alpha\beta$. (a) Antes do afundamento. (b) Durante afundamento.	76
4.13	Tensão v_d . (a) abc; (b) cba.	77
4.14	Filtragem da componente d de tensão com frequência de corte de 50 Hz. (a) Filtro de 1ª ordem; (b) Filtro de 2ª ordem.	77
4.15	Filtragem da componente d de tensão com frequência de corte de 100 Hz. (a) Filtro de 1ª ordem; (b) Filtro de 2ª ordem.	78
4.16	Diagrama de blocos de sequência positiva para a planta. (a) eixo d; (b) eixo q.	82
4.17	Diagrama de blocos de sequência negativa para a planta. (a) eixo d; (b) eixo q.	83
4.18	Sistema de controle de sequência positiva.	84
4.19	Sistema de controle de sequência negativa.	85
4.20	Sistema de controle de sequência zero.	86
4.21	Diagramas de Bode. (a) Função de transferência $I_{r_d}/I_{r_d}^*$; (b) Função de transferência $V_{l_d}/V_{l_d}^*$	87
4.22	Variáveis do sistema de controle em malha fechada. (a) Amplitude da tensão no capacitor - eixo d ($v_{c_{pd}}$); (b) Amplitude da tensão na carga - eixo d ($v_{l_{pd}}$); (c) Amplitude da tensão no capacitor - eixo q ($v_{c_{pq}}$); (d) Amplitude da tensão na carga - eixo q ($v_{l_{pq}}$).	88

4.23	Variáveis do sistema de controle em malha fechada. (a) Amplitude da tensão no capacitor - eixo d (vc_{nd}); (b) Amplitude da tensão na carga - eixo d (vl_{nd}); (c) Amplitude da tensão no capacitor - eixo q (vc_{nq}); (d) Amplitude da tensão na carga - eixo q (vl_{nq}).	89
4.24	Variáveis do sistema de controle em malha fechada. (a) Tensão no capacitor - sequência zero (vc_0); (b) Tensão na carga - sequência zero (vl_0).	90
4.25	Resultado de simulação com uma carga resistiva trifásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.	90
5.1	Topologias de inversores - I.	96
5.2	Topologias de inversores - II.	97
5.3	Topologia de inversor com três braços.	99
5.4	Topologia de inversor com três braços e ligação ao ponto central entre os capacitores.	100
5.5	Tensões trifásicas com afundamentos em duas fases.	101
5.6	Decomposição em componentes de sequência. (a) Tensões de fase de sequência positiva; (b) Tensões de fase de sequência positiva vistas separadamente.	102
5.7	Decomposição em componentes de sequência. (a) Tensões de fase de sequência negativa; (b) Tensões de fase de sequência negativa vistas separadamente;	103
5.8	Composição entre as componentes de sequência positiva e negativa ($v_p + v_n$).	104
5.9	Composição entre as componentes de sequência. (a) $v_p^* - v_p$; (b) $(v_p^* - v_p) - v_n$	104
5.10	Restaurador dinâmico de tensão. (a) DVR conectado à rede de distribuição; (b) Inversor de 4 braços.	105
5.11	Plano $\alpha\beta$	106
5.12	Funções de chaveamento para um vetor de referência localizado no primeiro setor. (a) Tensões trifásicas produzidas a partir da modulação vetorial; (b) Tensões trifásicas produzidas a partir da modulação escalar digital.	108
5.13	Variação da tensão de sequência zero durante qualquer período de chaveamento.	113
5.14	Função de chaveamento para S7.	114
5.15	Distorção harmônica total ponderada da tensão.	116

5.16	Carga trifásica alimentada pelo inversor de 4 braços.	116
5.17	Resultados de simulação com tensões de referência adicionado deslocamento constante. (a) Tensões de referência; (b) Correntes de carga trifásicas.	118
5.18	Resultados de simulação com tensões de referência adicionado deslocamento senoidal. (a) Tensões de referência; (b) Correntes de carga trifásicas.	119
6.1	Diagrama esquemático utilizado na plataforma experimental do DVR.	124
6.2	Condicionamento utilizado na plataforma experimental. (a) Condicionamento de corrente. (b) Condicionamento de tensão.	127
6.3	Sinais na saída da placa de condicionamento de tensão. (a) Sinal de <i>offset</i> necessário para entrada do conversor A/D. (b) Sinal da rede (± 150 V) após condicionamento.	128
6.4	DSP TMS320F2812 utilizado como processador do DVR.	130
6.5	Geração do sinal PWM a partir da unidade de comparação.	131
6.6	Inversor de tensão de quatro braços. (a) Conjunto utilizado na plataforma experimental do DVR. (b) Detalhes dos <i>drivers</i> e dos IGBTs.	134
6.7	Partes constituintes do inversor de tensão. (a) Capacitores que formam o barramento c.c. (b) Ponte de diodos trifásica.	135
6.8	Elementos do sistema trifásico. (a) Fonte de tensão programável utilizada como rede trifásica. (b) Banco de resistores.	136
6.9	Outras cargas para o sistema trifásico. (a) Ponte retificadora trifásica a diodo. (b) Motor c.c.	136
7.1	Componentes de sequência de tensões trifásicas com afundamento desequilibrado. (a) Tensões trifásicas. (b) Sequência positiva. (c) Sequência negativa. (d) Sequência zero.	139
7.2	Resultado experimental com mesmas tensões de rede da Fig. 4.25. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas. . .	140
7.3	Resultado experimental com uma carga resistiva trifásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas. . .	141

7.4	Curvas experimentais medidas para um afundamento em duas fases - Parte 1. (a) Tensão da rede de eixo β em função da tensão da rede de eixo α . (b) Componente de sequência zero.	142
7.5	Curvas experimentais medidas para um afundamento em duas fases - Parte 2. (a) Medição na fase c durante afundamento. (b) Medição na fase c enfocando a transição entre o afundamento e o pós-afundamento. (c) Medição na fase c visualizando a tensão na rede sem correção e a tensão na carga após correção. (d) Tensão do barramento c.c.	143
7.6	Desempenho do DVR em relação ao salto de fase. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.	144
7.7	Resultado experimental do retificador com motor c.c. representando uma falta monofásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.	145
7.8	Resultado experimental do retificador com motor c.c. representando uma falta trifásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.	146
7.9	Corrente do retificador para o afundamento trifásico mostrado na Fig.7.8. (a) Representação de uma fase. (b) Estreitamento horizontal da janela para uma melhor visualização da forma de onda.	146
7.10	Resultado experimental com carga resistiva representando uma falta monofásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.	147
7.11	Resultado experimental com carga resistiva. (a) Representação de uma falta bifásica. (b) Representação de uma falta trifásica.	149
7.12	Resultado experimental com carga não-linear representando uma falta monofásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.	150
7.13	Resultado experimental com carga não-linear. (a) Representação de uma falta bifásica. (b) Representação de uma falta trifásica.	151
7.14	Resultado experimental de uma elevação de tensão monofásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas. . .	152

7.15 Resultados experimentais com elevações. (a) Representação bifásica. (b) Representação trifásica.	153
B.1 Alternativa para o diagrama esquemático utilizado na plataforma experimental do DVR.	172

LISTA DE TABELAS

2.1	Classificação das VTCDs, segundo ANEEL e ONS	13
2.2	Classificação das VTCDs, segundo IEEE 1159	14
2.3	Classificação das VTCDs, segundo CENELEC	15
4.1	Parâmetros do sistema	83
5.1	Comparação das topologias de inversores para DVRs (1)	98
5.2	Comparação das topologias de inversores para DVRs (2)	98
5.3	Seqüência de chaveamento para geração dos vetores no plano	107
5.4	Chaves fechadas em cada estado	107
5.5	Tensões de seqüência zero em cada estado	112
6.1	Parâmetros dos transformadores monofásicos	125
6.2	Parâmetros do motor c.c.	137

GLOSSÁRIO

ANEEL	-	Agência Nacional de Energia Elétrica
c.a.	-	Corrente Alternada
CBEMA	-	<i>Computer Business Equipment Manufacturer Association</i>
c.c.	-	Corrente Contínua
CP	-	<i>Custom Power</i>
DHT	-	Distorção Harmônica Total
DSP	-	<i>Digital Signal Processor</i>
DVR	-	<i>Dynamic Voltage Restorer</i>
EVM	-	<i>Event Manager Module</i>
FACT	-	<i>Flexible Alternating Current Transmission System</i>
IEEE	-	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IGBT	-	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IGCT	-	<i>Integrated Gate Commutated Thyristor</i>
ITIC	-	<i>Information Technology Industry Council</i>
ITE	-	<i>Information Technology Equipment</i>
LCK	-	Lei das Correntes de Kirchhoff
MQRP	-	Mínimos Quadrados Recursivo Ponderado
ONS	-	Operador Nacional do Sistema
PAC	-	Ponto de Acoplamento Comum
PLL	-	<i>Phase-Locked Loop</i>

Prodist	-	Procedimento de Distribuição
pu	-	Por Unidade
PWM	-	<i>Pulse Width Modulation</i>
QEE	-	Qualidade de Energia Elétrica
RMS	-	<i>Root Mean Square</i>
SEMI	-	<i>Semiconductor Equipment and Materials Internacional</i>
StatCom	-	<i>Static Compensator</i>
UPS	-	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
VSI	-	<i>Voltage Source Inverter</i>
VTCD	-	Varição de Tensão de Curta Duração
WDHT	-	Distorção Harmônica Total Ponderada

INTRODUÇÃO

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

A QEE tem-se tornado uma preocupação crescente e comum às empresas de energia elétrica e aos consumidores de modo geral. O interesse progressivo pela QEE deve-se, principalmente, à evolução tecnológica dos equipamentos eletro-eletrônicos, hoje amplamente utilizados nos diversos segmentos de atividades industrial, comercial e residencial. Face a estas novas demandas tecnológicas, pode-se dizer que os equipamentos eletro-eletrônicos atuais, ao incorporar mais funções de controle, tendem a tornar-se mais sensíveis a perturbações provenientes do sistema elétrico de potência (STONES; COLLINSON, 2001).

Os avanços tecnológicos são em grande parte propiciados pelo desenvolvimento nas áreas de eletrônica digital e eletrônica de potência. Por conta desses avanços, os processos industriais tendem a ser altamente automatizados, grande parte do comércio e redes bancárias podem contar com sistemas de gerenciamento e fluxo de caixa informatizado e nas residências é possível encontrar os mais variados dispositivos para facilitar e automatizar os serviços no lar como, por exemplo, controle automático de iluminação, máquinas programáveis de lavar, de cozinhar, fornos de microondas, centrifugas ajustáveis, duchas quentes reguláveis, etc. Estes processos industriais e aparelhos que utilizam controle digital em geral são bas-

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

O termo degradação da qualidade de energia refere-se a qualquer perturbação que possa ocorrer nas formas de onda de corrente e tensão, levando a ocorrência de falhas nos equipamentos do consumidor ou mesmo da concessionária. Na verdade, a qualidade da tensão é que se leva em conta na grande maioria dos casos. No sistema de potência, o controle pode ser feito somente na qualidade da tensão. Não há controle sobre as correntes que surgem devido às cargas. Portanto, os padrões na área de qualidade de energia são desenvolvidos para manter o suprimento de tensão dentro de certos limites.

Os sistemas de potência CA são projetados para operar com uma tensão senoidal a uma dada frequência (tipicamente 50 ou 60 Hz) e magnitude. Qualquer desvio significativo em um destes parâmetros é um potencial problema de qualidade de energia. No entanto, há sempre uma relação entre tensão e corrente em um sistema de potência. Embora a geração forneça uma forma de onda de tensão quase senoidal, o fluxo de corrente na impedância do sistema pode causar perturbações à tensão. Portanto, enquanto o interesse é voltado para a forma de onda de tensão, deve-se levar em conta os fenômenos causados pela corrente para entender as bases de muitos problemas de qualidade de energia (DUGAN, 2003).

As principais categorias de distúrbios eletromagnéticos que degradam a qualidade de energia elétrica são: harmônicas, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, variações de frequência e variações de tensão de longa e curta duração.

As variações de tensão de curta duração (VTCDs) representam atualmente os eventos de maior importância na avaliação da QEE do ponto de vista dos consumidores industriais, comerciais e domésticos (BOLLEN, 2000; GHOSH; LEDWICH, 2002b; COSTA; ALVES, 2003; CHEN, 2005; ZHAN; CHOI; VILATHGAMUWA, 2006; KAGAN; ALMEIDA; SILVA, 2006).

1.1 MOTIVAÇÃO

Entre os diversos distúrbios existentes, o afundamento de tensão tem importância devido aos danos que pode causar. Do ponto de vista do consumidor, podem resultar em parada de processo com prejuízos em termos de produção, perda de material, perda na qualidade do produto, danos aos equipamentos e outras perdas não mensuráveis. Do ponto de vista da empresa fornecedora de energia, o afundamento de tensão pode levar a uma interrupção de curta e/ou longa duração resultando na diminuição de receita na venda de energia, degradação dos índices de confiabilidade estabelecidos pela ANEEL, insatisfação do consumidor, e aumento de disputas legais entre cliente e fornecedor.

Considere um consumidor que é suprido pelo alimentador que contém o disjuntor 1 no diagrama mostrado na Fig. 1.1. Se ocorrer uma falta no mesmo alimentador, o consumidor irá experimentar um afundamento de tensão durante a falta seguido de uma interrupção devido à abertura do disjuntor para a extinção da falta. Se a falta é temporária, uma operação de religamento do disjuntor deve ser bem sucedida. Isto geralmente requer 5 ou 6 ciclos para o disjuntor operar, tempo durante o qual ocorre o afundamento. O disjuntor permanece aberto tipicamente por um mínimo de 12 ciclos até 5 s, dependendo das práticas de religamento da concessionária. Equipamentos sensíveis certamente irão falhar durante esta interrupção.

Um evento mais comum seria a ocorrência de uma falta em um dos alimentadores da subestação, ou seja, uma falta em um alimentador paralelo, ou uma falta em algum lugar no sistema de transmissão. Em qualquer um destes casos, o consumidor também irá experimentar um afundamento de tensão. No caso do surgimento da falta na transmissão, existem duas linhas suprindo a subestação de distribuição e em somente uma ocorre a falta. Portanto, consumidores supridos pela subestação devem sofrer um afundamento e não uma interrupção.

Os afundamentos e elevações de tensão experimentados pelas cargas do sistema são em

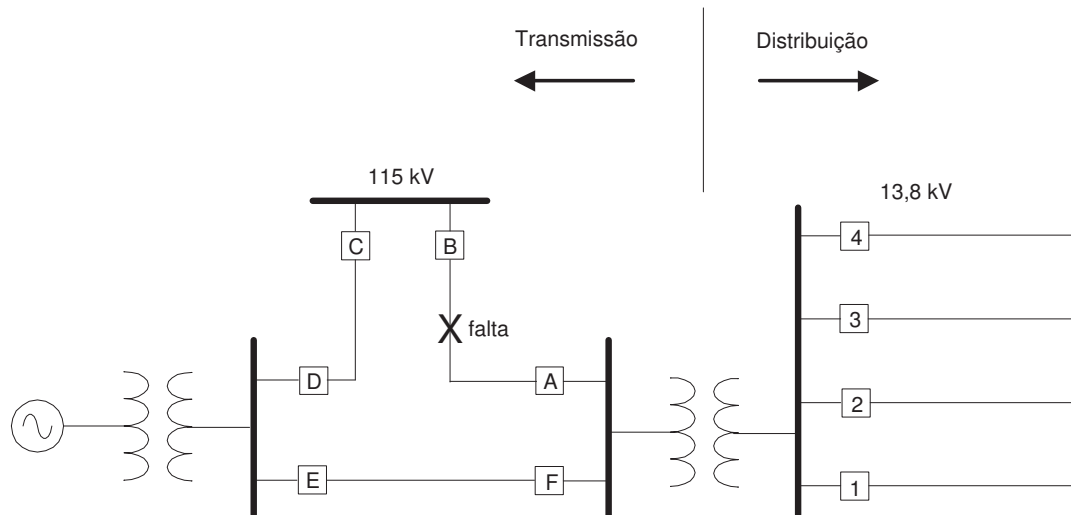


Figura 1.1. Falhas localizadas na transmissão e distribuição.

sua grande maioria causados devido a falhas no sistema e portanto, um problema comum, já que falhas no sistema elétrico são inevitáveis. As alternativas para mitigação do problema por meio de dispositivos que utilizam conversores de potência, tornam-se mais dispendiosas à medida que a correção vai afastando-se da carga a ser protegida, e na direção de níveis de tensão maiores. Assim, recentemente tem surgido o interesse na procura de soluções efetivas que possam tornar as cargas sensíveis, temporariamente imunes a perturbações da rede. Entre alguns dispositivos disponíveis, o restaurador dinâmico de tensão vem se consolidando como uma excelente alternativa para correções de afundamentos de tensão na carga.

Levantamentos estatísticos mostram que a grande maioria dos afundamentos sofridos pelas cargas são desequilibrados. Uma vez que estão associados com o tipo de falha, estes afundamentos são monofásicos ou bifásicos, correspondendo a falhas do tipo fase-terra, fase-fase e fase-fase-terra. Para que um restaurador dinâmico de tensão seja o mais flexível possível, ele deve ser capaz de contemplar a correção de afundamentos desequilibrados. Por um lado, já foram propostas algumas topologias de restauradores de tensão juntamente com métodos que não são capazes de realizar este tipo de restauração, como apresentado em (ZHAN, 2001a, 2001b; VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002; CHUNG, 2002; HUANG; HUANG; PAI, 2003; FITZER, 2002; GHOSH; LEDWICH, 2002a; KIM; SUL, 2005), o que

configura uma grande limitação para este dispositivo. Por outro lado, existem trabalhos que contemplam estes tipos de afundamentos. Para isso acontecer, somente é possível por meio de duas maneiras: (1) Ou realizar a correção individualmente em cada uma das tensões de fase, ou (2) por meio da decomposição em componentes de sequência positiva, negativa e zero para o caso de uma análise trifásica.

Apesar dessa possibilidade de correção, os restauradores dinâmicos de tensão de (1) devem detectar as fases de cada uma das tensões individualmente. Não adianta detectar a fase de uma tensão e defasar de $\pm 120^\circ$, pois geralmente os afundamentos estão associados a saltos de fase (BOLLEN, 2000). Fazer a detecção individualmente pode ser uma escolha onerosa em termos de esforço computacional, uma vez que três algoritmos de detecção serão utilizados, com o cálculo das amplitudes individuais e seguindo ainda as demais etapas de correção. Além disso, a injeção de tensão na rede com estes restauradores somente podem ser efetivadas com inversores convencionais de tensão (a) de três braços com ponto central dos capacitores ligado ao neutro da carga trifásica na saída do inversor, ou (b) de seis braços, dois para cada tensão de fase. Apesar dos inversores em (a) serem a alternativa convencional mais simples, é bem conhecido que somente a metade da tensão de seu barramento c.c. pode ser aproveitada e também existirá um desbalanceamento mais intenso neste mesmo barramento. Os inversores em (b) apesar de efetivarem a correção, necessitam de uma quantidade maior de chaves (o dobro em relação ao de três braços), deixando o dispositivo mais oneroso financeiramente e com a possibilidade de maiores perdas, já que contém um número maior de chaves. Trabalhos apresentados na literatura que fazem a detecção de fase individualmente para cada tensão ou utilizam um inversor de seis braços foram propostos em (NIELSEN; BLAABJERG, 2001; LI, 2007a, 2007c). Existe a possibilidade dos inversores de (a) e (b) serem utilizados em (2), mas com as limitações mencionadas anteriormente.

Os restauradores de tensão do grupo (2) têm seu atrativo por serem uma opção de análise trifásica para desequilíbrios na rede, e ainda, as componentes positiva e negativa são tensões trifásicas equilibradas mesmo durante os afundamentos. Recentemente, alguns trabalhos

apresentados na literatura realizam este procedimento para corrigir afundamentos desequilibrados por meio de restauradores dinâmicos de tensão. Em (WANG; VENKATARAMANANN; ILLINDALA, 2006), as componentes são separadas por meio de um filtro de sequência, mas são utilizados nove transformadores com nove configurações monofásicas de inversores em ponte completa, ou seja, dezoito braços de inversor com 36 chaves de potência. Em (MAREI; EL-SAADANY; SALAMA, 2007), a separação das componentes é feita por uma estimação de parâmetros. O inversor do restaurador de tensão é um de três braços com ligação ao ponto central do capacitor ao neutro dos transformadores de injeção, o qual tem limitações supracitadas.

Sendo assim, o inversor convencional trifásico mais simples diferente de três braços e que contenha três graus de liberdade (condição para contemplar desequilíbrios) seria um de quatro braços. As metodologias apresentadas até agora não fazem uso deste tipo de inversor para realizar correções de afundamentos desequilibrados por meio de um restaurador dinâmico de tensão.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo geral desta tese é estabelecer uma nova metodologia de injeção de tensão na rede elétrica por meio de um restaurador dinâmico de tensão que possui um inversor de quatro braços. Esta nova metodologia consiste em somar as tensões de sequência positiva e o oposto da negativa instantâneas para que sejam geradas com os três primeiros braços, e o quarto seja exclusivamente utilizado para a geração do oposto da sequência zero instantânea, sendo que uma modulação escalar digital é utilizada para gerar as tensões nos três primeiros braços, enquanto que uma modulação diferente é desenvolvida para o quarto braço.

As grandezas utilizadas para o controle são medidas e convertidas para componentes de sequência devido à requisição da metodologia de inserção das tensões na rede. Como consequência, e portanto como uma contribuição secundária, um sistema de controle em

malha fechada é proposto e aplicado em cada uma das componentes de sequência.

Para alcançar os objetivos propostos acima, organizou-se este trabalho de acordo com os seguintes capítulos:

- No capítulo 2 são definidas as variações de curta e longa duração, normas e recomendações que quantificam os níveis de tolerância das variações de curta duração, bem como as alternativas de mitigação para estes problemas.
- No capítulo 3, possibilidades de estratégias de controle utilizadas para os restauradores dinâmicos de tensão são discutidas.
- No capítulo 4 são apresentados os sistemas de controle em malha aberta a partir dos parâmetros estabelecidos para o DVR, bem como o controle em malha fechada proposto a partir das decomposições em componentes de sequência instantâneas e em seguida, a decomposição em componentes d e q .
- No capítulo 5 é feita uma apresentação de algumas possíveis configurações de inversores de tensão utilizados para os restauradores dinâmicos de tensão. Também é mostrado o inversor de quatro braços proposto com as estratégias de modulação para a geração das tensões a serem injetadas.
- No capítulo 6 é mostrada a plataforma experimental, onde ainda são descritas as partes que constituem a mesma.
- No capítulo 7, os resultados são apresentados. As técnicas propostas são testadas na plataforma experimental a partir de condições semelhantes a faltas ocorridas em uma rede elétrica.
- No capítulo 8 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO E ALTERNATIVAS DE MITIGAÇÃO

O objetivo deste capítulo é realizar algumas definições relacionadas às Variações de Tensão de Curta Duração (VTCDs), e como algumas normas e recomendações definem os limites e durações para classificação das mesmas. Após esta etapa, descreve-se brevemente como estes fenômenos são originados até chegar nas cargas e os efeitos que causam. Por fim são mencionadas algumas alternativas para realizar as correções destes problemas na rede elétrica.

Pode-se mencionar inicialmente que as variações no valor RMS de tensão são classificadas pela magnitude e duração da perturbação. Dependendo da duração dos eventos, as variações podem ser chamadas de curta ou de longa duração.

2.1 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO

Uma variação de tensão é considerada de longa duração quando os limites estabelecidos para a forma de onda são ultrapassados por um período de tempo maior que 1 minuto. As variações de longa duração podem ser subdivididas em sobretensões, subtensões e interrupções sustentadas. Sobretensões e subtensões geralmente não são resultantes de faltas no sistema, mas sim causadas por variações de cargas no sistema e operações de chaveamento (SANKARAN, 2002).

2.1.1 Sobretensão

Uma sobretensão é um aumento no valor RMS da tensão CA maior que 110% com tempo de duração maior que 1 minuto. As sobretensões geralmente são resultantes da abertura de chaves para cargas ou energização de banco de capacitores.

2.1.2 Subtensão

Uma subtensão é uma diminuição no valor RMS da tensão CA menor que 90% com tempo de duração maior que 1 minuto. As subtensões são resultantes de chaveamentos que são o oposto dos eventos que causam a sobretensão. O fechamento de chaves ou o desligamento de banco de capacitores causam uma subtensão.

2.1.3 Interrupção Sustentada

Quando o fornecimento de tensão tem valor zero por um período de tempo que excede 1 minuto, a variação de tensão de longa duração é considerada uma interrupção sustentada. Interrupções de tensão com duração maior que um minuto frequentemente são permanentes e requerem a intervenção humana para a restauração do sistema.

2.2 VARIAÇÕES DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO

As VTCDs são definidas como eventos que possuem duração inferior a 1 minuto e magnitude de valor eficaz da tensão superior ou inferior à faixa de tolerância de $\pm 10\%$ do valor eficaz da tensão de referência. São normalmente classificadas em função da magnitude do evento como sendo: elevações, afundamentos ou interrupções e da duração do evento como sendo: instantâneo, momentâneo ou temporário. Estes três fenômenos são mostrados na Figura 2.1.

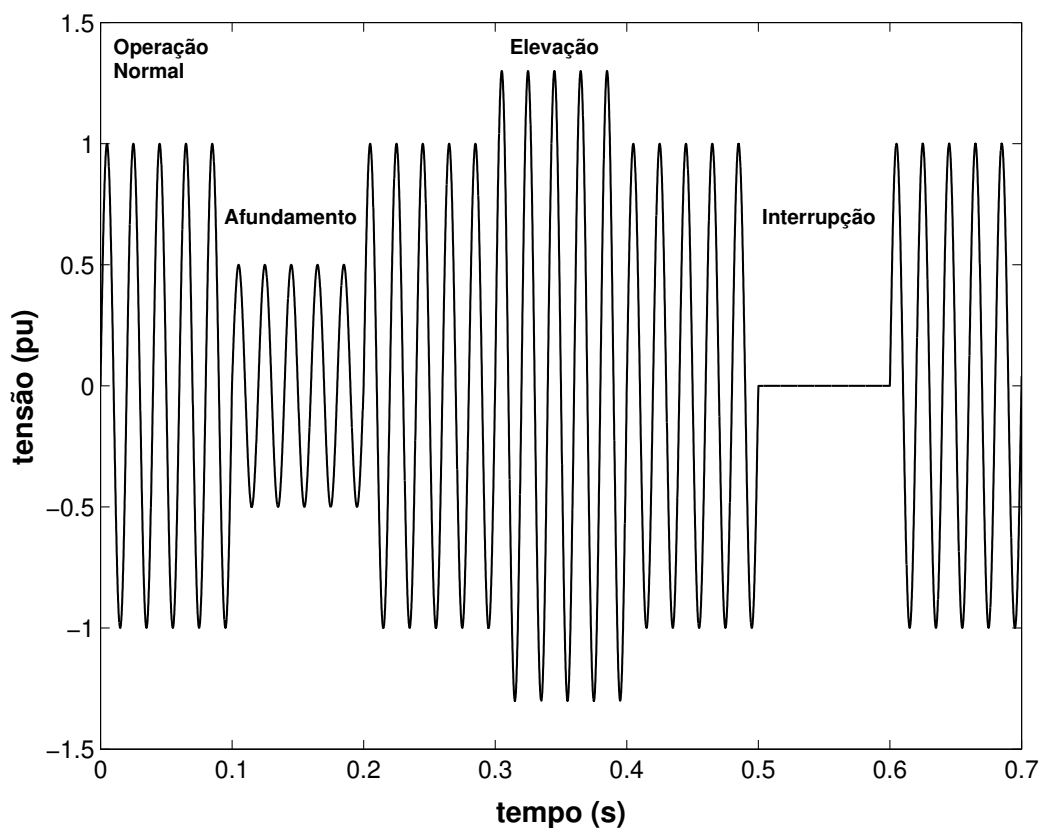


Figura 2.1. Variações de tensão de curta duração.

Em geral, as VTCDs são associadas a faltas no sistema elétrico de potência, falhas em equipamentos de proteção, chaveamentos capacitivos ou indutivos, entrada ou saída temporária de cargas de porte significativo em relação ao nível de curto-circuito local do sistema (GHOSH; LEDWICH, 2002b).

2.2.1 Afundamento de Tensão

Um afundamento de tensão é uma redução na magnitude da tensão de fornecimento seguido de seu restabelecimento depois de um curto período de tempo. Quando afundamentos ocorrem, os equipamentos ligados à rede podem operar de forma inadequada ou mesmo sair de operação. Com a saída de operação, a segurança e a produção do equipamento podem ser afetadas (MELHORN; DAVIS; BEAM, 1998). A Figura 2.2(a) mostra a ocorrência de um afundamento na tensão. A magnitude da forma de onda diminui para aproximadamente 80%

em relação ao valor nominal e a sua duração é de aproximadamente 10 ciclos. Na Figura 2.2(b) é apresentado o cálculo dos valores RMS em janelas de um ciclo para a tensão da Fig. 2.2(a). Calculando os valores RMS desta forma, a observação do afundamento não é imediata, levando um ciclo de duração. Da mesma forma, a recuperação para os valores de pré-afundamento não é imediata.

2.2.2 Elevação de Tensão

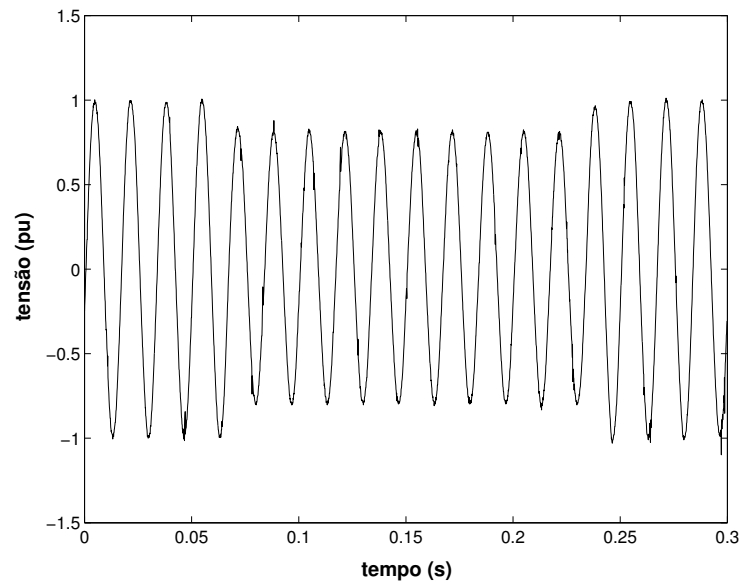
Uma elevação de tensão é definida como sendo o aumento na magnitude da tensão por um curto intervalo de tempo. Elevações de tensão não são tão comuns quanto os afundamentos e uma possível razão para sua ocorrência é devido ao surgimento de uma elevação temporária de tensão em uma das fases que não sofreu diretamente a falta em um curto-circuito monofásico. As consequências de uma elevação experimentada por uma carga depende da proximidade da ocorrência da falta, impedância do sistema e aterramento (AWAD; BLAABJERG, 2004).

2.2.3 Interrupção

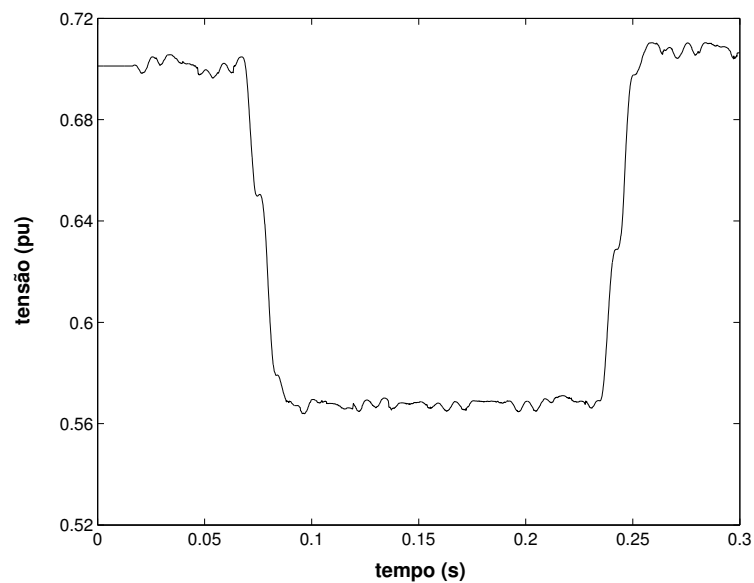
Uma interrupção é um evento que causa a perda completa de tensão no sistema. O mesmo curto-circuito que leva ao afundamento de tensão para alguns consumidores levará a uma interrupção a um pequeno número deles quando a falta acontece em uma parte radial do sistema (ARRILAGA; BOLLEN; WATSON, 2000).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DOS EVENTOS A VTCD

Os projetistas de computadores e controladores microprocessados não são especializados em fenômenos de qualidade de energia em sistemas de potência. Da mesma forma, projetistas de sistemas de potência são limitados no conhecimento de operação da sensibilidade



(a) Forma de onda de tensão



(b) Valores RMS por ciclo

Figura 2.2. Afundamento de tensão.

eletrônica. Este cenário tem levado à necessidade de se estabelecer padrões de qualidade de energia (SANKARAN, 2002). E ainda, estes padrões podem ser utilizados para configurar uma base comum de qualidade para competição entre concessionárias que devem criar níveis mínimos aceitáveis de qualidade de energia (DUGAN, 2003).

A indústria também necessita estabelecer padrões uniformes para quantificar a qualidade da energia elétrica e assim utilizá-los como referências e resolver problemas de disputas entre concessionárias e consumidores. Algumas indústrias, tais como as de semicondutores, já desenvolveram seus próprios padrões (SEMI F47, 2000). Ao lado das iniciativas das indústrias, algumas organizações como IEC e IEEE concentram esforços em pesquisas na intenção de elaborar padrões para determinados eventos que ocorrem no sistema.

2.3.1 Recomendação Brasileira do ONS - Submódulo 2.2

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

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

A denominação de VTCD só é encontrada no Prodist e engloba distúrbios de interrupção, elevação e afundamentos de tensão com duração compreendida entre 1 ciclo de 60 Hz a 1 minuto. A Tabela 2.1 apresenta as denominações para VTCDs e suas respectivas faixas de magnitude e duração (ANEEL, 2007), onde a letra "c" representa a duração em ciclos e a letra "s" representa a duração em segundos.

Tabela 2.1. Classificação das VTCDs, segundo ANEEL e ONS

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

2.3.2 IEEE 1159 - Recomendação Americana

A recomendação IEEE 1159 (1995) classifica os eventos de curta duração quanto à magnitude como sendo: elevação, afundamento ou interrupção; e quanto à duração como sendo: instantâneo, momentâneo ou temporário, conforme ilustra a Tabela 2.2.

Tabela 2.2. Classificação das VTCDs, segundo IEEE 1159

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

As durações das três categorias da recomendação IEEE 1159 estão intencionalmente correlacionadas com o tempo de atuação da proteção e a divisão das durações recomendadas por organismos técnicos internacionais, como a UIE-DWG-2-92-D (1993). O intervalo de tempo de 30 ciclos está relacionado ao tempo de atuação dos religadores para limitar curtos-circuitos não-permanentes. Já o intervalo de tempo compreendido entre 30 ciclos e 3 segundos, está associado tipicamente ao tempo de eliminação do efeito da falta em todos os barramentos (FERREIRA, 2002).

2.3.3 EN 50160 - Recomendação Européia

Em relação às VTCDs, a recomendação CENELEC EN 50160 (1999) faz a classificação para afundamentos e interrupções. As elevações de tensão não são levadas em conta, limitando-se a definir estes eventos como transitórios de sobretensão e sobretensão temporária, não especificando faixas de magnitude e duração. A Tabela 2.3 apresenta a classificação dos eventos.

Tabela 2.3. Classificação das VTCDs, segundo CENELEC

Classificação	Magnitude (m)	Duração (d)
Afundamento	$0,01 \text{ pu} \leq m \leq 0,9 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} \leq d \leq 1 \text{ min}$
Interrupção de Curta Duração	$m < 0,01 \text{ pu}$	$0,5 \text{ c} \leq d \leq 3 \text{ min}$
Interrupção de Longa Duração	$m < 0,01 \text{ pu}$	$d > 3 \text{ min}$
Transitório de Sobretensão	$m > 1,1 \text{ pu}$	Não definido
Sobretensão Temporária	$m > 1,1 \text{ pu}$	Não definido

2.4 CURVAS DE SENSIBILIDADE A VTCD

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

2.4.1 CBEMA/ITIC

A curva mostrada na Figura 2.3 é conhecida como curva CBEMA e pode ser utilizada para avaliar a qualidade da tensão de um sistema de potência com respeito a interrupções, afundamentos ou subtensões e elevações ou sobretensões. Esta curva foi originalmente produzida para descrever a tolerância típica de diferentes computadores a variações de tensão tanto em magnitude quanto em duração do evento. Enquanto os computadores mais modernos possuem uma tolerância maior, a curva tem se tornado referência para projeto de equipamentos mais sensíveis a serem aplicados no sistema de potência e estabelece um formato comum para relatar variações de dados em qualidade de energia (DUGAN, 2003).

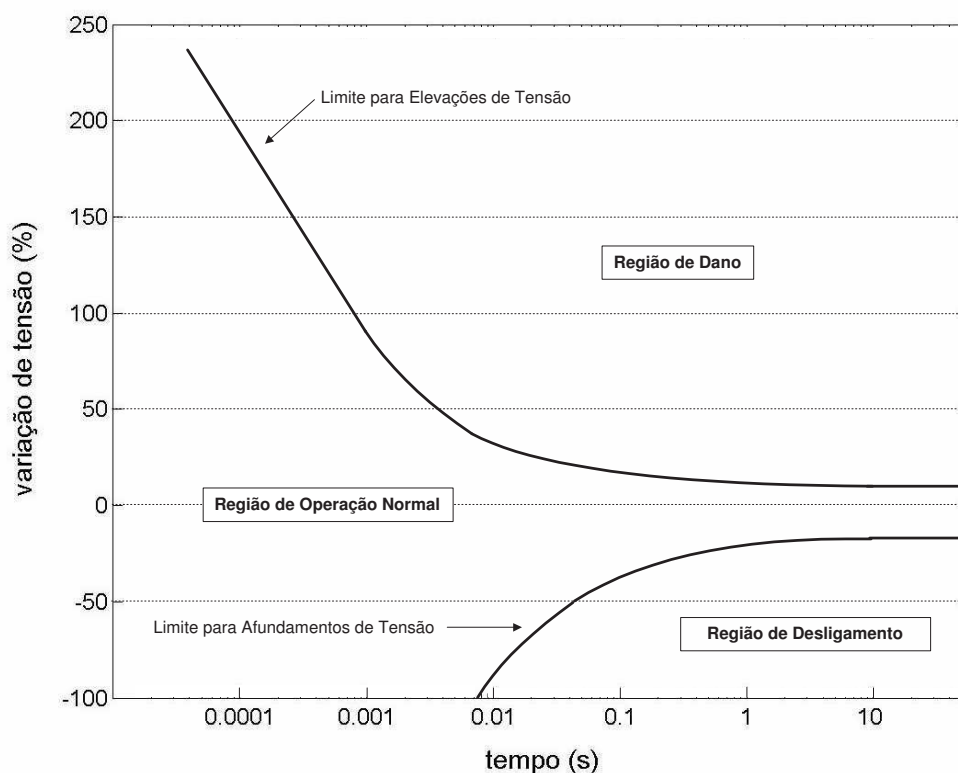


Figura 2.3. Curva de sensibilidade CBEMA.

Dentro dos limites da região de tolerância é esperado que um computador opere de forma segura. Fora da região de tolerância, duas outras regiões são definidas. Na região que não causa danos, as tensões aplicadas são menores do que um limite inferior de regime permanente. Não se espera que os equipamentos eletrônicos funcionem normalmente nesta região, mas nenhum dano deve acontecer ao equipamento. Na outra região, as elevações de tensão excedem o limite da curva. Algum dano é esperado para o equipamento se ele é sujeito a tensões com estas características.

A curva CBEMA foi proposta originalmente em 1974, e já sofreu modificações ao longo do tempo. Atualmente há uma tendência em substituí-la pela curva ITIC, conforme ilustra a Fig. 2.4, que engloba os Equipamentos de Tecnologia de Informação (ITE). Os limites de tolerância são muito similares em ambos os casos. Cabe ressaltar que a curva ITIC não é uma especificação para projeto de equipamentos, mas apenas uma curva-guia que descreve o comportamento típico, da maioria dos equipamentos do tipo ITE, face à tensão de entrada.

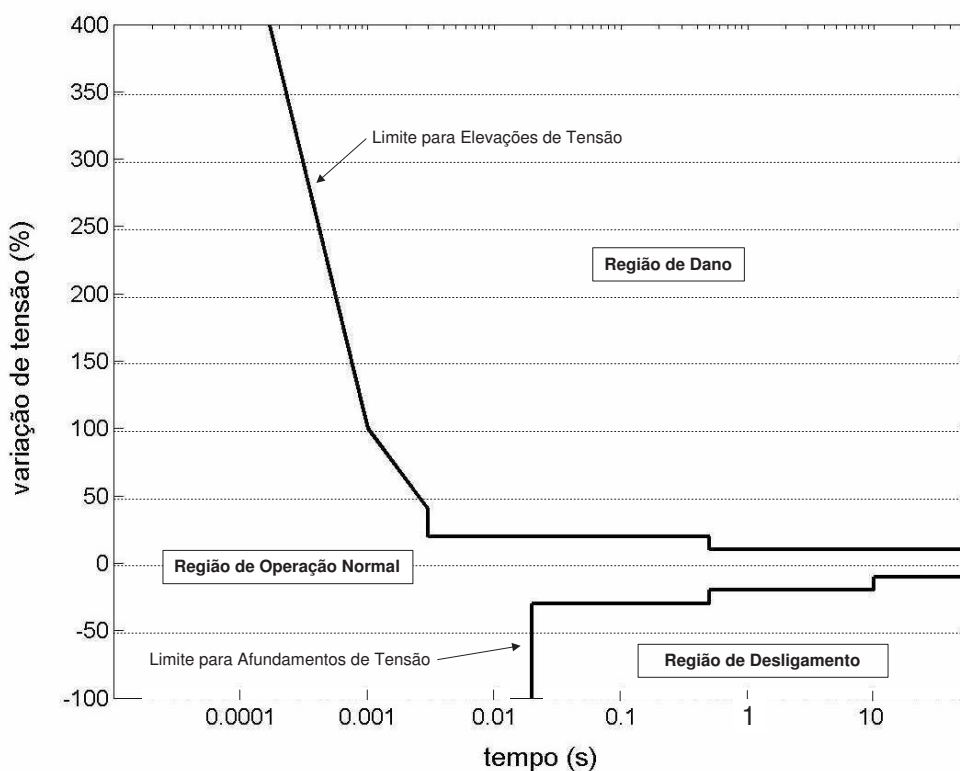


Figura 2.4. Curva de sensibilidade ITIC.

As curvas ITIC e CBEMA podem levar a falsas conclusões sobre o impacto do evento em um determinado equipamento, se forem usadas para avaliar a severidade de eventos em equipamentos que não sejam os de tecnologia de informação e computadores, pois estas curvas não se aplicam a todos os tipos de cargas sensíveis.

Ambas as curvas CBEMA e ITIC foram desenvolvidas para uso em sistemas de 60Hz e 120V. Nenhum estudo foi realizado para saber se elas são adequadas para uso em sistemas de 50 Hz e 240 V (CHEN, 2005).

2.4.2 SEMI F47

O limite de tolerância da SEMI F47 (2000), desenvolvido e apresentado pelo *Semiconductor Equipment and Materials Institute*, abrange apenas os distúrbios de afundamento de tensão, não contemplando as elevações de tensão (Fig. 2.5). Esta norma é aplicada a

equipamentos e processos ligados a fabricantes de semicondutores para verificar imunidade a afundamentos de tensão.

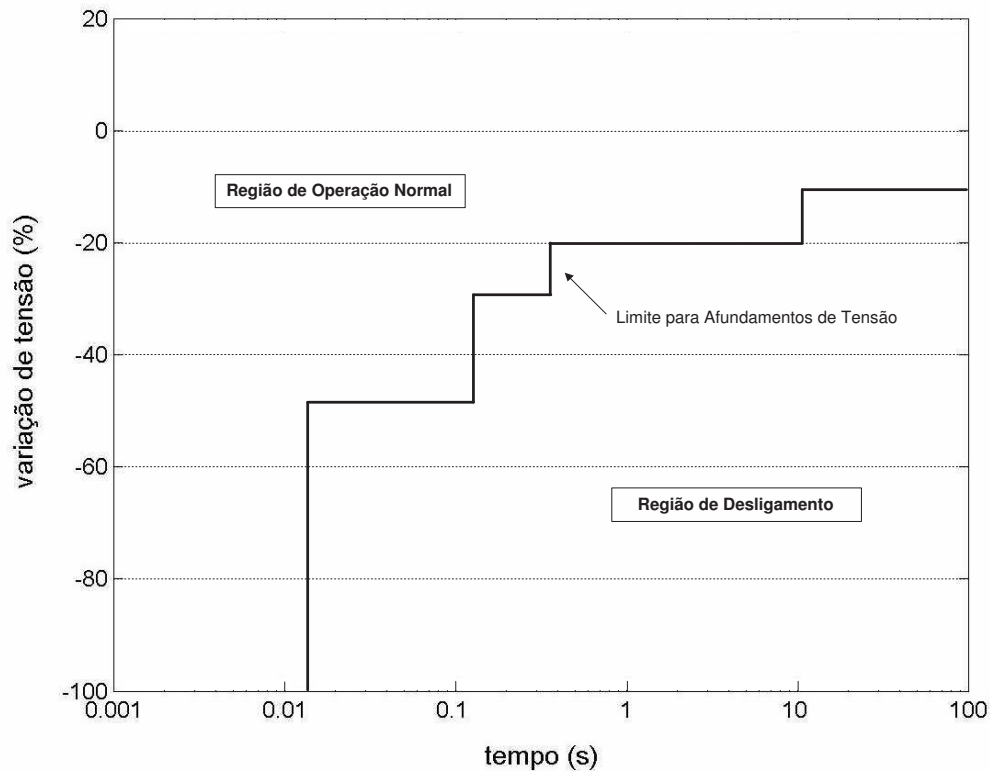


Figura 2.5. Curva de sensibilidade SEMI F47.

Na seção seguinte, comenta-se sobre a propagação dos afundamentos, elevações e interrupções no sistema elétrico, com o intuito de esclarecer o surgimento e os efeitos que estes fenômenos podem causar.

2.5 CAUSAS DE AFUNDAMENTOS DE TENSÃO E INTERRUPTÕES

Interrupções momentâneas causam uma perda completa de tensão e são resultantes de ações tomadas pelas concessionárias para extinguir faltas transitórias no sistema. Interrupções sustentadas são geralmente devido a faltas permanentes.

Um afundamento de tensão não é tão danoso para a indústria como uma interrupção, mas como a ocorrência de afundamentos é mais freqüente do que as interrupções, o dano

total devido aos afundamentos é maior. As interrupções são originadas localmente na rede de distribuição. No entanto, o afundamento nos terminais do equipamento pode ter sido originado devido a faltas ocorridas a centenas de quilômetros de distância no sistema de transmissão. Sendo assim, um afundamento de tensão é um problema mais “global” do que uma interrupção (BOLLEN, 2000).

2.5.1 Efeitos Ocasionados por Faltas

Em um sistema radial como mostrado na Fig. 2.6, os números de 1 a 5 indicam as localizações de faltas em um dado sistema de potência. As letras de A a D representam as cargas. A ocorrência de uma falta no sistema de transmissão (localização 1) irá causar um afundamento crítico para ambas subestações interconectadas pela linha. Este afundamento é então transferido a todos os consumidores abaixo destas duas subestações. Como normalmente não há geração conectada a níveis mais baixos de tensão, um afundamento mais intenso é experimentado por todos os consumidores A, B, C e D. O afundamento experimentado por A é provavelmente o menos intenso pois os geradores conectados a aquela subestação irão manter a tensão em um nível mais elevado. A ocorrência de uma falta em 2 não implicará em uma grande atenuação da tensão para o consumidor A. As impedâncias dos transformadores entre os sistemas de transmissão e subtransmissão são grandes o suficiente para limitar a queda de tensão no lado de alta do transformador (BOLLEN, 2000). No entanto, uma falta em 2 irá causar um afundamento mais intenso para ambas subestações de subtransmissão e assim para todos os consumidores alimentados a partir delas (B, C e D).

A ocorrência de uma falta em 3 irá ocasionar um afundamento de tensão intenso para o consumidor D, seguido de uma interrupção de curta ou longa duração quando a proteção extingue a falta. O consumidor C irá experimentar também uma grande atenuação na tensão. O consumidor B irá experimentar um afundamento suave devido novamente às impedâncias do transformador. O consumidor A provavelmente não irá perceber esta falta. Uma falta

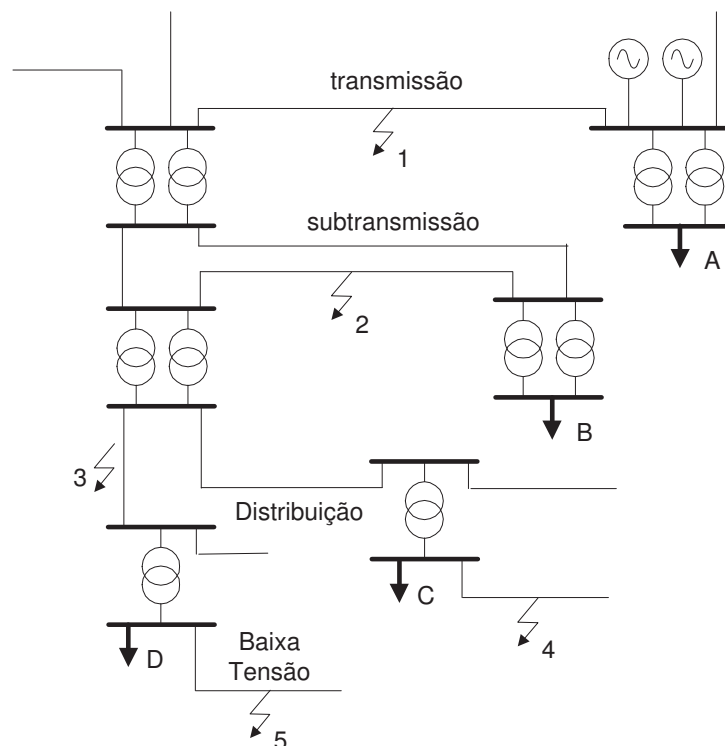


Figura 2.6. Rede de distribuição com falhas localizadas.

localizada em 4 irá provocar um afundamento intenso para o consumidor C e um mais suave para o consumidor D. Finalmente, uma falta em 5 resultará em um afundamento intenso para o consumidor D e um suave para o consumidor C. Os consumidores A e B não serão influenciados pelas faltas em 4 e 5.

A maioria dos curto-circuitos em sistemas de potência é monofásico ou bifásico, ou seja, são faltas desequilibradas. Mais especificamente, as faltas desequilibradas podem ser monofásicas, fase-fase e fase-fase-terra. Dependendo do ponto de ocorrência da falta e da configuração do sistema elétrico, as cargas podem sofrer seis tipos de afundamentos diferentes (YALÇINKAYA; BOLLEN; CROSSLEY, 1998; BOLLEN, 2000; MARTINEZ; ARNEDO, 2006), somando sete quando considerando a falta trifásica. Os quatro primeiros tipos estão mostrados na Fig 2.7. Dependendo do tipo de ligação dos transformadores de distribuição, ainda podem ser representadas mais três configurações que totalizam as sete, como mostrado na Fig. 2.8.

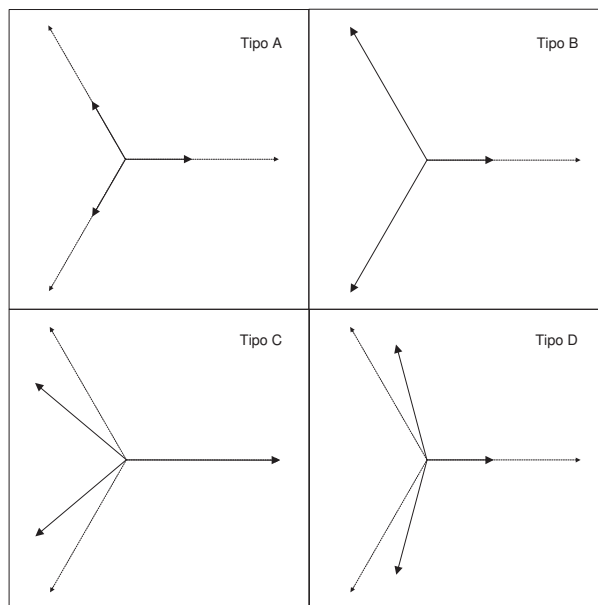


Figura 2.7. Quatro tipos de afundamento representados por diagramas fasoriais.

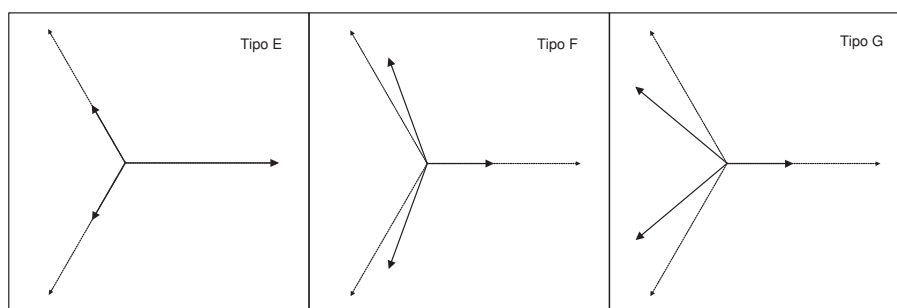


Figura 2.8. Três tipos de afundamento representados por diagramas fasoriais, devido a faltas fase-fase-terra.

2.5.1.1 Saltos de Ângulo de Fase. Uma falta no sistema como um curto-circuito causa uma mudança na tensão. Esta mudança não está limitada à amplitude do fasor, mas também a uma mudança no ângulo de fase. Esta última modificação é denominada de salto de ângulo de fase e manifesta-se como um deslocamento no cruzamento por zero da tensão instantânea. Os saltos de fase não afetam a maioria dos equipamentos mas, por exemplo, conversores eletrônicos de potência que usam a informação do ângulo de fase para os instantes de comutação podem ser afetados.

A Figura 2.9 mostra um afundamento de tensão com um salto de ângulo de fase de $+45^\circ$. Um afundamento com um salto de ângulo de fase de -45° é mostrado na Fig. 2.10. Ambos

os afundamentos têm uma magnitude de 70% e pode-se observar que a tensão pré-falta continuaria como mostrado pelas linhas pontilhadas.

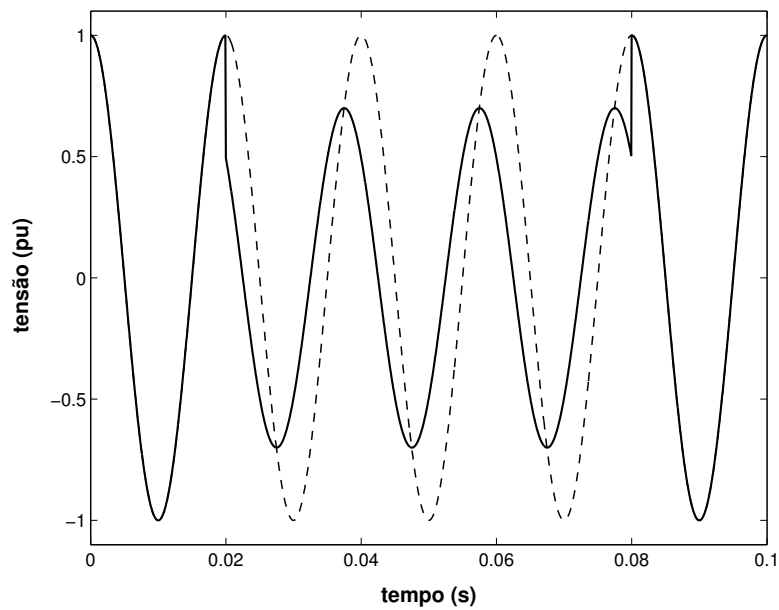


Figura 2.9. Afundamento com magnitude de 70% e salto de ângulo de fase de $+45^\circ$.

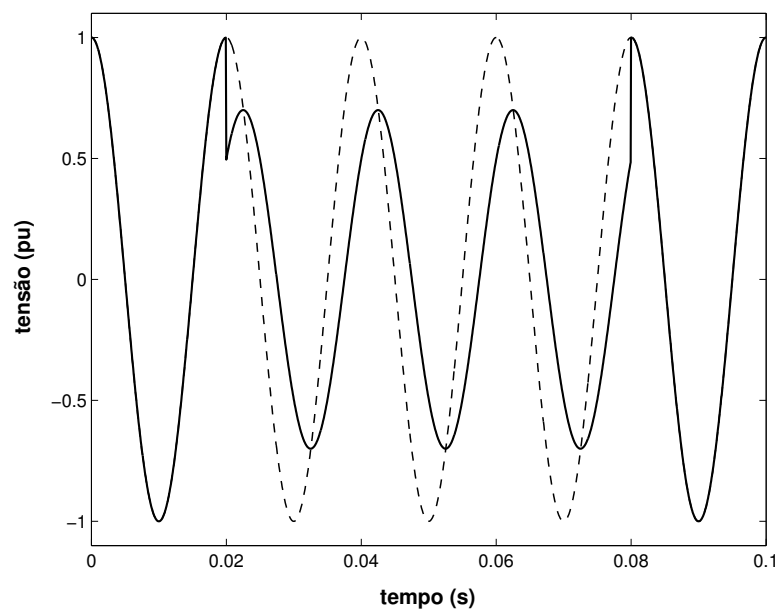


Figura 2.10. Afundamento com magnitude de 70% e salto de ângulo de fase de -45° .

Saltos de fase durante faltas trifásicas são devido a diferenças na razão X/R da fonte e do alimentador, sendo X a reatância e R a resistência. Uma segunda causa de saltos de fase é a propagação de afundamentos para níveis de tensão mais baixos (ANDERSON, 1995).

2.5.1.2 Origem dos Saltos de Ângulo de Fase. Para entender a origem dos saltos de fase associados com afundamentos de tensão, o modelo divisor de tensão monofásico de um sistema radial mostrado na Fig. 2.11 pode ser utilizado, mas com a diferença de que Z_S e Z_F são quantidades complexas denotadas por \bar{Z}_S e \bar{Z}_F . Este modelo divisor de tensão pode ser utilizado para quantificar a magnitude do afundamento em sistemas radiais. Ele é um modelo simplificado principalmente para sistemas de transmissão, mas é bastante útil para mostrar algumas das propriedades dos afundamentos.

Assumindo o valor de $V_s = 1$, tem-se a seguinte tensão no PAC:

$$\bar{V}_{af} = \frac{\bar{Z}_F}{\bar{Z}_S + \bar{Z}_F}, \quad (2.1)$$

sendo $\bar{Z}_S = R_S + jX_S$ e $\bar{Z}_F = R_F + jX_F$. O argumento de \bar{V}_{af} , ou seja, o salto de ângulo de fase é dado pela seguinte expressão:

$$\Delta\phi = \arg(\bar{V}_{af}) = \arctan\left(\frac{X_F}{R_F}\right) - \arctan\left(\frac{X_S + X_F}{R_S + R_F}\right), \quad (2.2)$$

Se $\frac{X_S}{R_S} = \frac{X_F}{R_F}$, a expressão (2.2) é zero e não existirá salto de fase. Sendo assim, o salto de fase estará presente se a razão X/R da fonte e do alimentador forem diferentes.

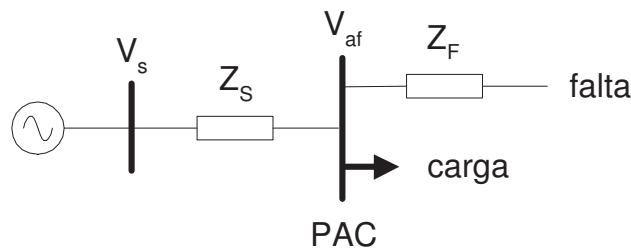


Figura 2.11. Modelo divisor de tensão para um afundamento de tensão.

2.5.2 Efeitos Ocasionados por Partida de Motores de Indução

Nas subseções anteriores foram apresentadas, as origens de afundamentos de tensão devido a faltas. Estes afundamentos são a principal causa de falhas e mau funcionamento dos equipamentos. Uma outra importante causa de afundamentos, a qual é de maior interesse

para projetistas de sistemas de potência industrial, é a partida de grandes motores de indução. O chaveamento de outras cargas ou o desligamento de bancos de capacitores também irão causar um afundamento de tensão, mas no primeiro caso, a queda de tensão é pequena e a tensão somente diminui mas não é restaurada. Neste caso, o termo “degrau de magnitude de tensão” seria mais apropriado.

Durante a partida, um motor de indução demanda uma corrente maior que a nominal, tipicamente de cinco a seis vezes maior. Esta corrente permanece elevada até o motor alcançar sua velocidade nominal, tipicamente de alguns segundos a um minuto. A queda na tensão depende fortemente dos parâmetros do sistema. Considere o sistema mostrado na Fig. 2.12, sendo Z_S a impedância da fonte e Z_M a impedância do motor durante a partida.

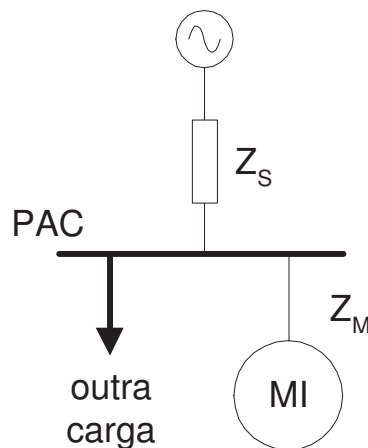


Figura 2.12. Circuito equivalente para afundamento de tensão devido à partida de um motor de indução.

A tensão na carga é recebida do mesmo barramento do motor e é quantificada usando a equação de divisão de tensão:

$$V_{af} = \frac{Z_M}{Z_S + Z_M} \cdot V_n \quad (2.3)$$

Como nos demais casos, a fonte de tensão foi considerada com valor unitário. Quando um motor de potência S_{motor} é alimentado por uma fonte de potência de curto-circuito S_{fonte} , pode-se escrever para a impedância da fonte:

$$Z_S = \frac{V_n^2}{S_{fonte}}, \quad (2.4)$$

e para a impedância do motor durante a partida:

$$Z_M = \frac{V_n^2}{\beta S_{motor}}, \quad (2.5)$$

sendo β a razão entre a corrente de partida e a corrente nominal. Assim, a equação (2.3) pode ser escrita como:

$$V_{af} = \frac{S_{fonte}}{S_{fonte} + \beta S_{motor}}. \quad (2.6)$$

Este valor pode ser utilizado para estimar o afundamento devido a partida do motor, mas para um resultado mais preciso ou mesmo a observação de resultados de outros motores durante a partida, é necessário o uso de programas de análise de sistemas de potência.

2.6 ALTERNATIVAS DE MITIGAÇÃO

Existem muitas evidências que a qualidade da energia pode ter uma importância significativa, particularmente para consumidores industriais. O custo da indústria americana para quedas de tensão é estimado em US\$ 10 bilhões por ano. O custo de uma queda de tensão intensa para um fabricante de semicondutores em Singapura é estimado em US\$ 1 milhão por evento (GHOSH; LEDWICH, 2002a). Portanto, os aspectos econômicos envolvidos para resolver os problemas de qualidade de energia devem ser incluídos nas análises. Nem sempre é econômico eliminar variações de qualidade de energia no lado da concessionária. Em muitos casos, a solução ótima para um problema é tornar o equipamento menos sensível a aquelas variações. O nível da qualidade de energia requerido é o nível ao qual resultará na operação adequada do equipamento. As diferentes tecnologias disponíveis devem ser avaliadas e baseadas em uma necessidade específica do processo para determinar a solução ótima com o objetivo de melhorar o desempenho da carga frente ao distúrbio.

Para amenizar os distúrbios, por um lado busca-se desenvolver dispositivos eletrônicos digitais menos sensíveis às variações de tensão da rede, e por outro, vem se consolidando a classe de equipamentos de potência do tipo FACTS (do inglês *Flexible Alternating Current Transmission Systems*) e principalmente os dispositivos do tipo CP (do inglês *Custom*

Power) (GHOSH; LEDWICH, 2002b), que utilizam dispositivos eletrônicos de potência para suprimir, filtrar ou atenuar a propagação dos distúrbios através do sistema elétrico de potência.

Nas seções seguintes, serão abordados sucintamente alguns dispositivos que têm o propósito de corrigir o distúrbio na interface entre o sistema e a carga. O DVR encontra-se nesta classificação e no capítulo 5 serão discutidas algumas de suas possíveis configurações.

2.7 MEIOS DE MITIGAÇÃO

A Figura 2.13 ilustra pontos alternativos para correção de afundamentos de tensão. A figura indica que é menos dispendioso resolver o problema no nível menor (DUGAN, 2003). De uma forma mais geral, o diagrama mostrado na Fig. 2.14 ilustra a ocorrência de uma falha do equipamento partindo-se de um curto-circuito. Esta falha é que faz do evento um problema; se não existisse falha no equipamento, não existiria qualquer problema na qualidade da tensão (ARRILAGA; BOLLEN; WATSON, 2000).

A Figura 2.14 ainda possibilita observar alguns métodos de mitigação:

- Reduzir o número de curto-circuitos.
- Reduzir o tempo de extinção da falta.
- Modificar o sistema tal que o curto-circuito resulte em eventos menos intensos nos terminais do equipamento.
- Conectar equipamento de mitigação entre o equipamento sensível e a rede de fornecimento.
- Melhorar a imunidade do equipamento.

Engenheiros de potência sempre utilizaram uma combinação destes métodos de mitigação para assegurar a confiabilidade de operação do equipamento. Classicamente, a dedicação era

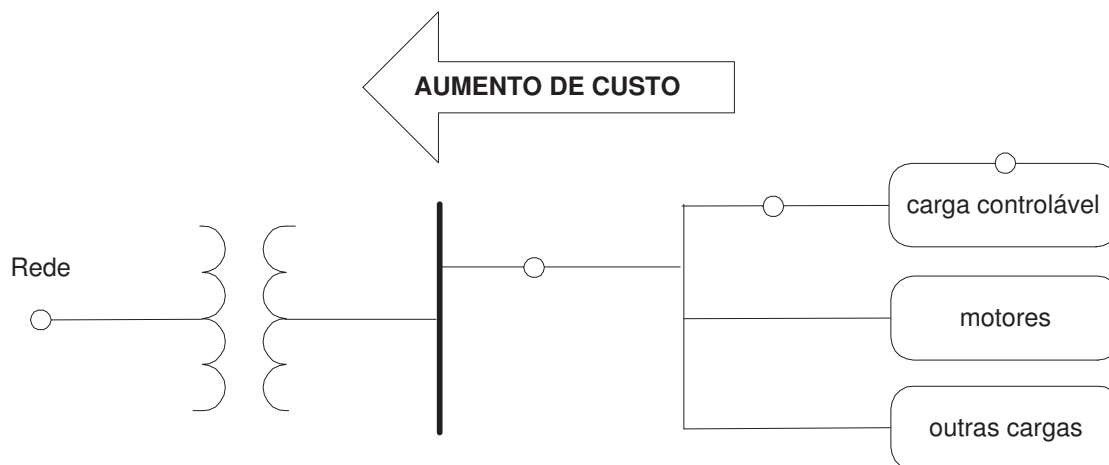


Figura 2.13. Possíveis pontos de mitigação de afundamentos.

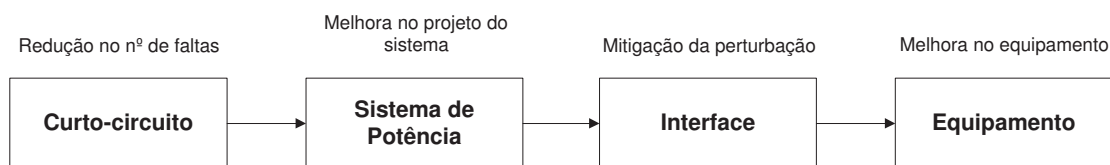


Figura 2.14. Curto-circuito levando à falha do equipamento e meios de mitigação.

voltada mais para a redução do número de interrupções enquanto que recentemente tem-se realizado a mitigação de afundamentos de tensão (BOLLEN, 2000).

A interface entre o sistema e o equipamento é o lugar mais comum para correção de afundamentos e interrupções (MELHORN; DAVIS; BEAM, 1998). Todas as técnicas modernas são baseadas em dispositivos eletrônicos de potência sendo o conversor fonte de tensão a parte mais importante. A seguir serão discutidas algumas tecnologias existentes.

2.7.1 Controladores de Tensão Série

O princípio básico da compensação série é simples: inserir uma tensão de amplitude e frequência solicitada. Assim, o compensador série pode restaurar a tensão do lado da carga para uma amplitude e forma de onda desejada mesmo quando a fonte de tensão é desequilibrada ou distorcida.

Um dispositivo eletrônico de potência como base de um compensador série e que pode proteger cargas sensíveis a perturbações é mostrado na Fig. 2.15. Este dispositivo faz uso de chaves de potência, como por exemplo, IGBTs e é capaz de injetar um conjunto de três tensões de saída c.a. em série e sincronizadas com as tensões do alimentador de distribuição. A amplitude e o ângulo de fase das tensões injetadas são variáveis permitindo o controle das potências ativa e reativa transferidas entre o compensador e o sistema de distribuição. Já o terminal de entrada c.c. deste compensador é conectado a uma fonte de energia e a potência transferida entre o mesmo e o sistema de distribuição é internamente produzida pelo compensador.

Em agosto de 1996, a *Westinghouse Electric Corporation* instalou o primeiro DVR no mundo, na subestação de 12,47 kV *Duke Power Company* em Anderson, Carolina do Norte, Estados Unidos (WOODLEY; MORGAN; SUNDARAM, 1999; WOODLEY, 2000). O comissionamento seguinte de um DVR foi feito pela *Westinghouse* em fevereiro de 1997 no sistema de distribuição da Powercor em Stanhope, Victoria, Austrália. O mesmo foi feito para proteger uma planta de processamento de leite. A economia resultante da instalação deste DVR é estimada em mais de US\$ 100.000 por ano (GHOSH; LEDWICH, 2002b). A *Asea Brown Boveri* (ABB) tem vários DVRs instalados pelo mundo a partir de inversores com chaves de potência do tipo IGCT. No Brasil, um DVR foi instalado em um sistema de média tensão (13,8 kV) em São José dos Pinhais, região metropolitana de Curitiba (BIANCHIN, 2008).

2.7.2 Controladores de Tensão em Derivação

Um controlador de tensão conectado em derivação normalmente não é utilizado para mitigação de afundamentos de tensão, mas para limitar flutuações de potência reativa ou correntes harmônicas na carga. Tal controlador é comumente denominado de “Compensador Estático” ou “StatCom” (do inglês *Static Compensator*). O StatCom faz uso de um VSI (Inversor Fonte de Tensão, do inglês *Voltage Source Inverter*), ou simplesmente denominado

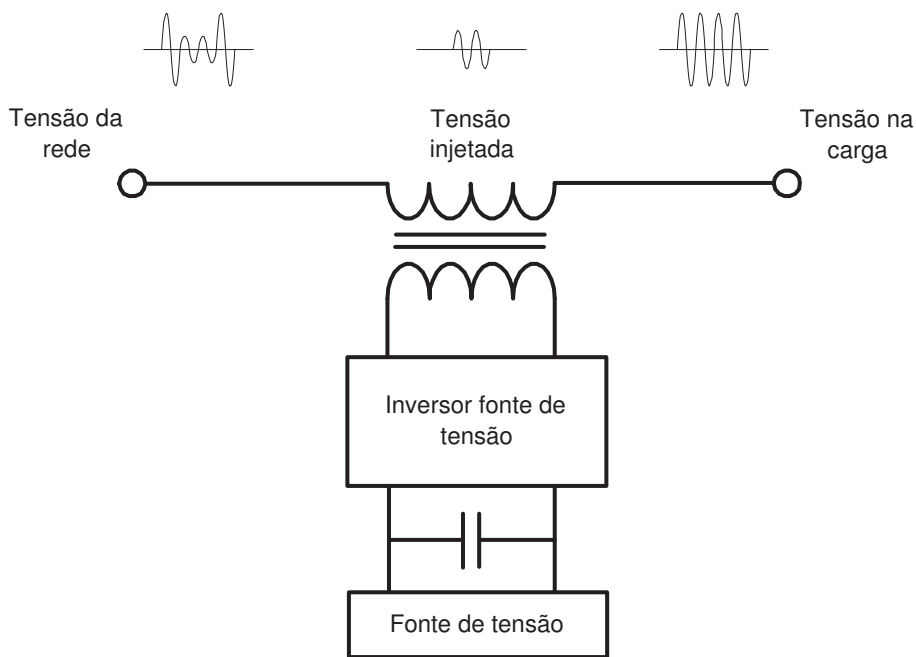


Figura 2.15. Controlador de tensão série.

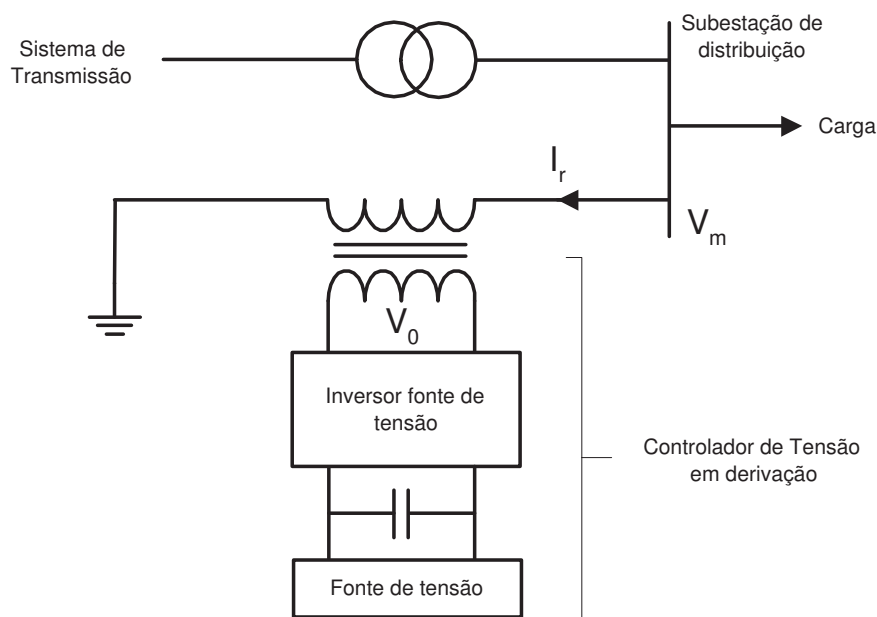


Figura 2.16. Controlador de tensão em derivação.

inversor de tensão, o qual é suprido por um capacitor c.c., como mostra a Fig. 2.16.

A saída do inversor é conectada ao sistema c.a. através de um transformador de acoplamento. As combinações de chaveamento do inversor produzem uma forma de onda de tensão

aproximadamente senoidal, V_0 e que está em fase com a tensão do barramento, V_m . Nesta situação, duas tensões c.a. que estão em fase são conectadas juntas por meio de um reator, o qual corresponde à reatância de dispersão do transformador. Portanto, a corrente I_r é reativa. Se a amplitude da tensão V_m é maior do que V_0 , a corrente reativa I_r flui do barramento ao inversor. Por outro lado, se V_0 é maior do que V_m , então a corrente flui do inversor ao barramento. Portanto, com este arranjo o StatCom pode gerar ou absorver potência reativa.

A compensação de uma queda de tensão pode ainda ser representada por um circuito como ilustrado pela Fig. 2.17. Considerando um caso com tensão da fonte 1 pu e sua impedância 0,1 pu indutivo, uma queda de tensão de 0,5 pu demandaria uma corrente reativa de 5 pu para estabilizar a tensão da carga.

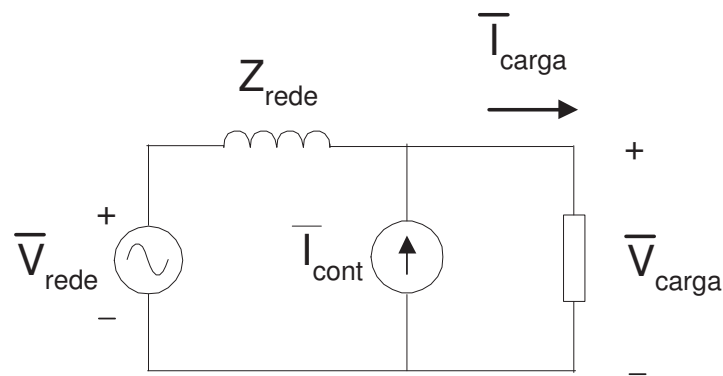


Figura 2.17. Circuito de um controlador de tensão em derivação.

2.7.3 Controladores em Derivação e Série Combinados

Como já mencionado, o controlador série utiliza uma fonte de energia para suprir a carga durante o afundamento de tensão. Existe então uma tensão remanescente no sistema de potência que pode ser utilizada como energia necessária ao sistema. Um conversor conectado em série injeta a tensão que está faltando e um outro conectado em derivação recebe corrente da rede. A potência retirada do controlador em derivação deve ser igual a potência injetada pelo controlador série. O princípio é mostrado na Fig. 2.18. Pode-se observar que estes

conversores têm um barramento c.c. em comum e a mudança na energia armazenada nos capacitores é determinada pela diferença entre a potência injetada pelo conversor série e a potência recebida da rede pelo conversor em derivação.

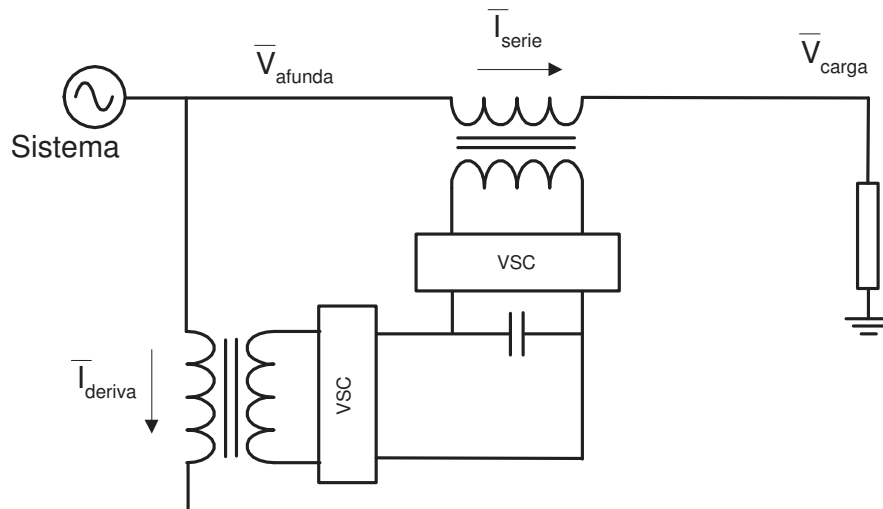


Figura 2.18. Controlador de tensão conectado em derivação-série.

A vantagem de um controlador derivação-série é que ele não requer uma fonte de energia, e isto pode resultar em um dispositivo de custo menor. O conversor em derivação de um controlador derivação-série pode também ser utilizado para corrigir problemas na corrente, como mencionado na discussão de controladores em derivação. No entanto, existe uma grande desvantagem de um controlador derivação-série que é o elevado valor de corrente requisitado para corrigir afundamentos intensos, e que na maioria dos casos não corrige adequadamente.

2.7.4 Controladores de Tensão Conectados em Cascata

Um outro dispositivo para correção de afundamentos de tensão e interrupções é a UPS (do inglês - *Uninterruptible Power Supply*).

Uma UPS não é um dispositivo nem em derivação nem série, podendo ser descrito como um controlador conectado em cascata. A configuração básica de uma UPS típica é mostrada na Fig. 2.19. Pode-se observar que a UPS é composta de um estágio de retificação seguido

de uma inversão. A fonte de tensão é conectada entre os dois estágios, correspondendo ao barramento c.c.

Durante a operação normal, a UPS recebe energia da rede, retifica a tensão c.a. para c.c. e inverte-a novamente para c.a. com a mesma frequência e valor RMS. O único objetivo do banco de baterias numa operação normal é manter o barramento c.c. a tensão constante. A carga recebe energia por meio do inversor o qual gera uma tensão senoidal tipicamente usando modulação por largura de pulso. Para prevenir interrupções na carga devido a falhas no inversor, uma chave é utilizada. No caso da tensão na saída do inversor diminuir abaixo de um certo valor limite, a carga é conectada diretamente à rede.

A vantagem de uma UPS é sua simplicidade de operação e controle. Os custos de uma UPS não superam os custos de um computador pessoal, mas provavelmente não vale a pena instalar uma para cada computador de um escritório, por exemplo. No entanto, quando um computador é uma parte essencial de um processo de produção, os custos de uma UPS são desprezíveis.

As principais desvantagens de uma UPS são as perdas devido à adição de duas conversões e o uso de baterias. As baterias necessitam de manutenção e devem ser periodicamente testadas para garantir a operação em caso de interrupção. Não devem também ser expostas a altas ou baixas temperaturas e portanto, um resfriamento adequado deve ser instalado para evitar sobreaquecimentos.

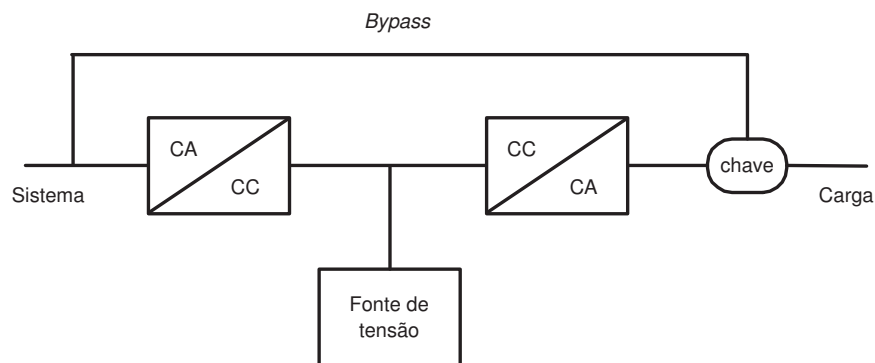


Figura 2.19. Configuração típica de uma UPS.

2.8 CONCLUSÃO

Neste capítulo, foram definidos os distúrbios de tensão ocorridos numa rede elétrica, todos referentes à mudança de amplitude e respectiva duração. Em seguida, foi mostrado o que algumas normas e recomendações descrevem e quantificam em relação aos níveis de tolerância das variações de curta duração. Mesmo assim, estudos do impacto de VTCDs já eram realizados muito antes de surgirem as atuais definições no contexto da qualidade de energia. Sua importância tornou-se crescente também devido à necessidade dos consumidores e concessionárias de energia identificarem se os danos ocorridos eram causados por procedimentos e operações dos consumidores ou se eram advindos da rede elétrica das concessionárias, com a finalidade de atribuir responsabilidades.

A definição de magnitude de afundamento foi generalizada para afundamentos trifásicos desequilibrados levando à classificação de um conjunto de sete tipos, dos quais C e D cobrem a maioria dos afundamentos. A magnitude e o salto de fase são o valor absoluto e o argumento, respectivamente, da tensão complexa.

Entre as correções de afundamentos de tensão e interrupções, pode-se destacar as que são baseadas no condicionamento da energia, uma vez que promovem uma solução local e imediata para a perturbação. Entre as alternativas, o restaurador dinâmico de tensão vem se configurando como uma opção viável para afundamentos de tensão. A escolha de uma topologia para correção de afundamentos é feita baseando-se em uma resposta dinâmica adequada que o dispositivo possa oferecer frente ao distúrbio.

ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Apesar dos restauradores dinâmicos de tensão (DVRs) vistos na literatura apresentarem uma diversidade de topologias, estes seguem uma estrutura base que pode ser dividida em fonte de energia, barramento c.c., inversor fonte de tensão, circuito de filtro, transformadores, como mostrado na Fig. 3.1. De uma forma geral, estas partes são necessárias para proceder a inserção de tensão para correção de afundamentos na rede. Ademais, cada uma destas partes pode ser realizada aplicando-se uma determinada topologia e estratégia diferentes, as quais irão depender da potência nominal disponível do DVR, assim como diferentes condições de carga, problemas de qualidade da tensão como elevação ou distorção, ou mesmo tipos diferentes de afundamentos (NIELSEN; BLAABJERG; MOHAN, 2001).

Em um DVR, a geração dos sinais PWM com posterior filtragem e inserção das tensões de correção, sem realimentação de tensão e/ou corrente, classifica o sistema de controle como sendo em malha aberta. Com este tipo de controle, a tensão do lado da rede é comparada com uma tensão de referência e a tensão de erro resultante é utilizada novamente na geração do sinal PWM. Algumas vantagens são apontadas, principalmente devido a maior simplicidade de implementação em um microprocessador, sendo ainda possível apresentar bons resultados em relação ao objetivo de controle, como será observado nos resultados experimentais do capítulo 7. No controle em malha fechada, grandezas como tensões e correntes são medidas e utilizadas no laço da realimentação. Este controle tem potencial para obter uma resposta rápida e correta.

Antes de comentar à respeito das diferentes estratégias de controle, é importante mencionar sobre os modos de operação e as limitações de um DVR, os quais estão intimamente

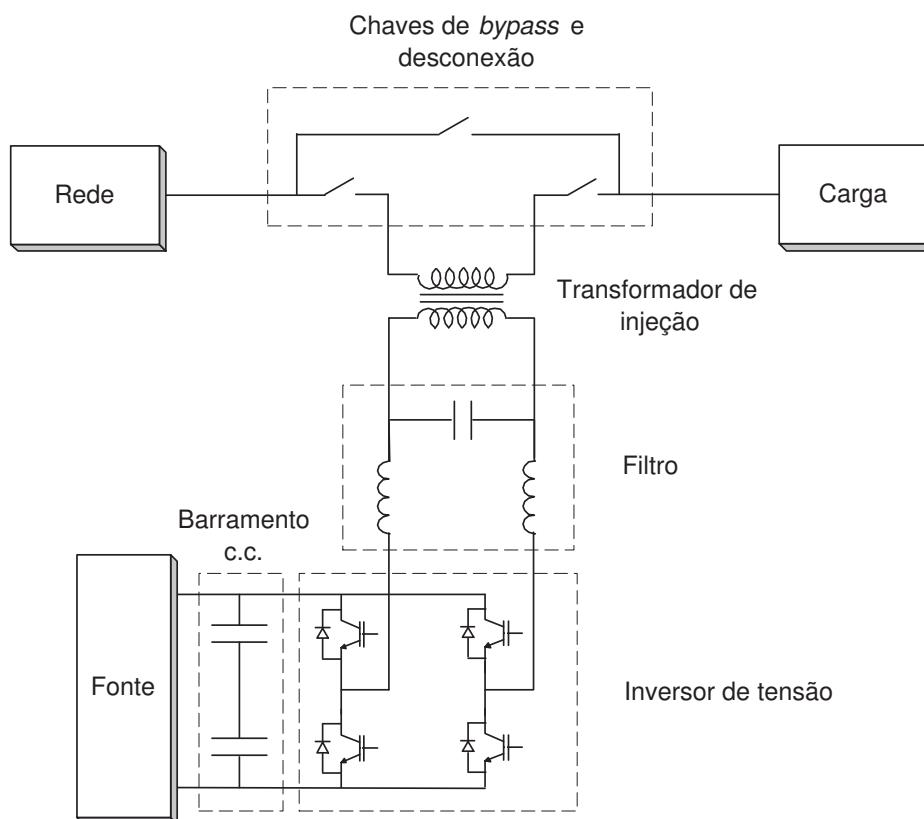


Figura 3.1. Elementos básicos de um DVR em uma representação monofásica.

relacionados às estratégias de controle.

3.1 MODOS DE OPERAÇÃO

O DVR basicamente pode funcionar em três diferentes modos de operação, que são apresentados como:

- Modo *bypass*. O DVR é transpassado eletricamente durante correntes elevadas e curto-circuitos a montante. Neste modo, o equipamento fica impossibilitado de melhorar a qualidade da tensão.
- Modo *standby*. As tensões da rede estão no nível nominal e o DVR está pronto para compensar uma queda de tensão. Durante o modo *standby*, o equipamento pode ter funções secundárias e modos de operação (BOLLEN, 2000), como por exemplo, o modo

de pequenas perdas.

- Modo *ativo*. A queda de tensão é detectada e o DVR injeta a tensão necessária para restabelecer a tensão nominal.

No modo de pequenas perdas, ou seja, onde não há chaveamento até um determinado nível de tensão e as perdas são minimizadas, pode ser realizado em locais onde existe tolerância de tensão sobre a carga. Em locais com baixa qualidade de tensão, as perdas no DVR pode ter uma prioridade secundária, sendo mais adequado operar no modo ativo para melhorar a qualidade de tensão da carga.

3.2 LIMITAÇÕES DOS DVRs

As limitações dos DVRs estão intimamente relacionadas com as estratégias de controle. Pode acontecer o caso em que a queda de tensão seja maior que a capacidade do dispositivo restaurar completamente a tensão afundada. Quatro importantes limitações a serem observadas para um DVR são (NIELSEN; BLAABJERG; MOHAN, 2001):

- Limite de tensão: O projeto do DVR é limitado pela capacidade de injeção de tensão, e conseqüente queda de tensão sobre o dispositivo.
- Limite de corrente. Uma menor demanda do nível de corrente pode baixar o custo do equipamento.
- Limite de potência. A potência é fornecida pelo barramento c.c. A potência demandada é convertida da própria rede ou de uma fonte c.c. Normalmente um conversor adicional é utilizado para manter a tensão do barramento c.c. constante e o suprimento deste conversor pode introduzir um limite de potência ao DVR.
- Limite de energia. A energia é utilizada para manter a tensão de carga constante e a injeção normalmente é dimensionada tão baixa quanto possível com o objetivo

de reduzir custos. Alguns afundamentos consomem rapidamente esta energia e um controle adequado pode reduzir o risco de colapso causado pela falta da energia.

Outros fatores são importantes para a estratégia de controle e incluem ainda outras restrições de ordens físicas:

- Saturação. A injeção de tensões elevadas pode levar os transformadores à saturação, o que degrada completamente as tensões da carga e faz elevar os níveis de corrente (MIDDLEKAUFF; COLLINS, 1998)
- *In-rush*. No início da compensação, o fluxo de injeção no transformador pode causar correntes de *in-rush* elevadas.
- Banda de passagem. Uma determinada banda de passagem tem influência na velocidade da resposta do sistema. Uma largura inadequada pode comprometer a compensação.
- Impedância do filtro. O filtro passa-baixas se faz necessário, mas ele pode causar quedas de tensão indesejáveis sobre o DVR e gerar oscilações de corrente nos componentes do filtro.

As limitações são bastante relevantes e devem ser levadas em consideração quando as estratégias de controle são desenvolvidas e avaliadas.

3.3 ESTRATÉGIA DE CONTROLE COM AFUNDAMENTOS DE TENSÃO EQUILIBRADOS

A capacidade de compensação do DVR está relacionada, entre outras características, à sua topologia, ou seja, sua maneira de injetar potência ativa e reativa bem como as tensões de sequência zero. Sendo assim, a estratégia de controle empregada deve ser avaliada com bastante critério, uma vez que ela define a eficácia de operação, principalmente no que

concerne à sua resposta dinâmica. Nesta seção serão mostradas de uma forma geral, as principais etapas relativas ao controle que deve ser utilizado na compensação de afundamentos de tensão por meio de um DVR.

A estratégia de controle mais comumente utilizada é a que dispõe a tensão do DVR em fase com a tensão da rede sem considerar o ângulo de fase da corrente de carga (CHAN; CHUNG; HUI, 2006). No entanto, este método pode levar a um consumo mais rápido da energia armazenada. Quando o controle otimizado de energia é utilizado, existe um equilíbrio entre o consumo e o armazenamento da mesma.

Afundamentos de tensão equilibrados são caracterizados pela duração do afundamento, redução da amplitude e salto de fase. Assumindo que o DVR está ativo durante o afundamento de tensão, três métodos de controle podem ser avaliados e estão ilustrados na Fig. 3.2:

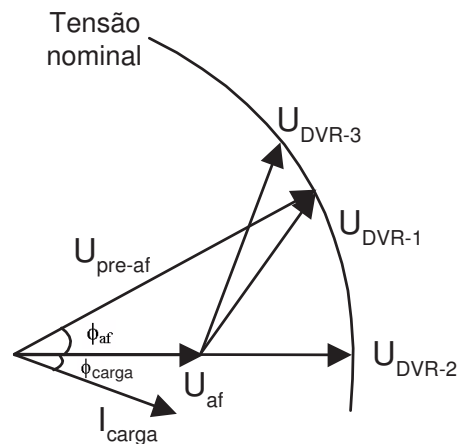


Figura 3.2. Estratégias de controle para um DVR compensando queda de tensão com salto de fase. U_{DVR-1} controle otimizado da qualidade de tensão, U_{DVR-2} controle otimizado da amplitude de tensão e U_{DVR-3} controle otimizado da energia.

1. Controle otimizado da qualidade de tensão. As tensões são sempre compensadas para o nível de pré-afundamento, sem considerar que este pode ser um ponto de operação com elevado nível de injeção de tensão e com desperdício de energia.

2. Controle otimizado da amplitude de tensão. As tensões injetadas são controladas de uma forma que minimiza a necessidade de injetá-las.

3. Controle otimizado da energia. Para utilizar de forma eficiente a energia armazenada,

os tipos de carga devem ser considerados.

O que é comum a estes três métodos é que as tensões de carga são compensadas para os seus valores nominais:

$$|U_{carga}| = constante, \quad (3.1)$$

e as correntes e potências em regime permanente absorvidas pela carga são inalteradas:

$$|I_{carga}| = constante, |P_{carga}| = constante, |Q_{carga}| = constante. \quad (3.2)$$

A fase das tensões de carga podem ser modificadas pelo DVR, mas logo em seguida a fase das correntes de carga modificarão até a mesma potência ativa e reativa serem demandadas pela carga, ou seja, na condição de regime permanente a carga demandará a mesma quantidade de potência antes e durante o afundamento, desde que as tensões afundadas sejam completamente compensadas.

Observando ainda os três métodos, a diferença entre os mesmos consiste na quantidade de potência e tensão que o DVR deve injetar no sistema. A intensidade do afundamento, $|U_{af}|$, e o salto de fase, ϕ_{af} , são fatores que influenciam os diferentes métodos. Estes parâmetros estão relacionados por:

$$U_{af} = |U_{af}| \angle \phi_{af}. \quad (3.3)$$

E ainda, a condição da carga pode ser expressa pela potência aparente demandada, S_{carga} , e a corrente de carga, I_{carga} :

$$S_{carga} = P_{carga} + jQ_{carga}, \quad (3.4)$$

$$I_{carga} = |I_{carga}| \angle \phi_{carga}. \quad (3.5)$$

A Figura 3.3 ilustra o fluxo de potência ativa e reativa no sistema. A estratégia de controle pode depender do tipo de carga conectada e o desempenho da mesma em relação à mudança de fase da tensão. Algumas cargas são bastante sensíveis a um salto de fase e sendo assim, deve ser evitado. Outros tipos de carga são mais tolerantes e o critério mais adequado é o que assegura a tensão nominal nas três fases.

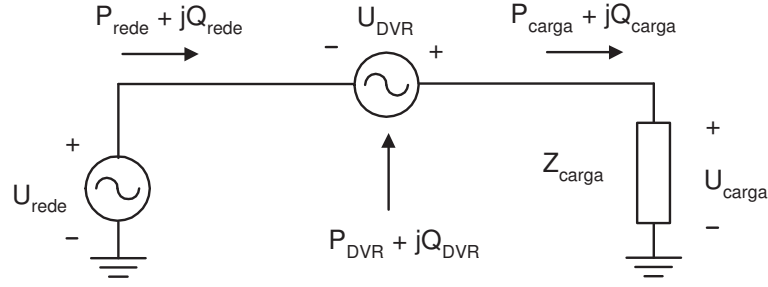


Figura 3.3. Fluxo de potência ativa e reativa com a inserção de um DVR.

Controle Otimizado da Qualidade de Tensão

Nesta estratégia de controle, as tensões de carga são sempre compensadas à amplitude da tensão de pré-afundamento, ou seja, a tensão imediatamente antes da ocorrência do defeito. O salto de fase tem um impacto considerável na potência e tensão, os quais devem ser injetados pelo DVR. A potência e a tensão podem ser calculadas como:

$$U_{DVR} = 1 - U_{af} = 1 - |U_{af}| \angle \phi_{af}, \quad (3.6)$$

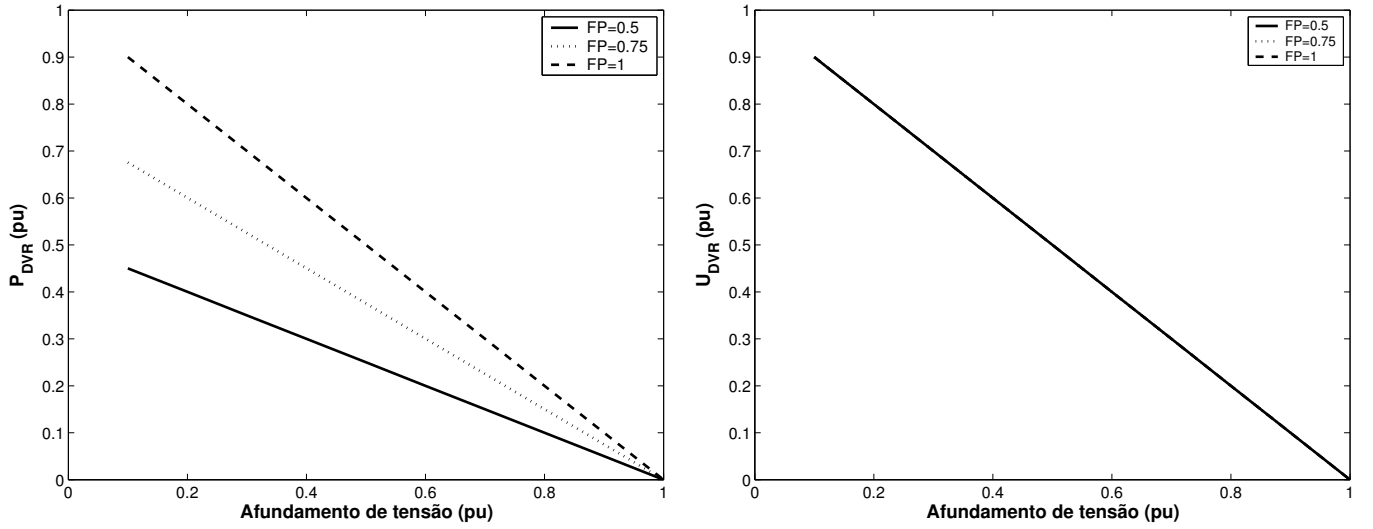
$$|U_{DVR}| = \sqrt{[1 - U_{af} \cos(\phi_{af})]^2 + [U_{af} \sin(\phi_{af})]^2}, \quad (3.7)$$

$$\phi_{DVR} = \tan^{-1} \frac{-U_{af} \sin(\phi_{af})}{1 - U_{af} \cos(\phi_{af})}, \quad (3.8)$$

$$P_{DVR} = \sqrt{3} |U_{DVR}| |I_{carga}| \cos(\phi_{carga} + \phi_{DVR}). \quad (3.9)$$

Um salto de fase aumenta a amplitude da tensão a ser injetada. O controle otimizado da qualidade de tensão é mostrado na Fig. 3.4 sem salto de fase ($\phi_{af} = 0$) para três tipos de carga ($FP_{carga} = 0,5; 0,75; 1,0$).

O valor da potência injetada depende tanto do fator de potência como do salto de fase. A Figura 3.5 ilustra a potência e as tensões injetadas pelo DVR com 15° de salto de fase. A tensão injetada não é influenciada pelo fator de potência, mas o salto de fase aumenta a necessidade de injeção, como observado na Fig. 3.5(b). Para um afundamento de 0,9 pu, o DVR necessita injetar 0,27 pu para ter uma compensação completa. O DVR deve absorver potência em uma determinada faixa de afundamento se o fator de potência da carga é 0,5



(a) Potência injetada pelo DVR como função do afundamento

(b) Tensão injetada pelo DVR como função do afundamento

Figura 3.4. Controle otimizado da qualidade de tensão de um DVR para três diferentes fatores de potência.

ou 0,75, mas quando é 1, o DVR necessita somente fornecer potência à carga. Os saltos de fase tendem a aumentar a necessidade de tensão se a otimização da qualidade de tensão é utilizada.

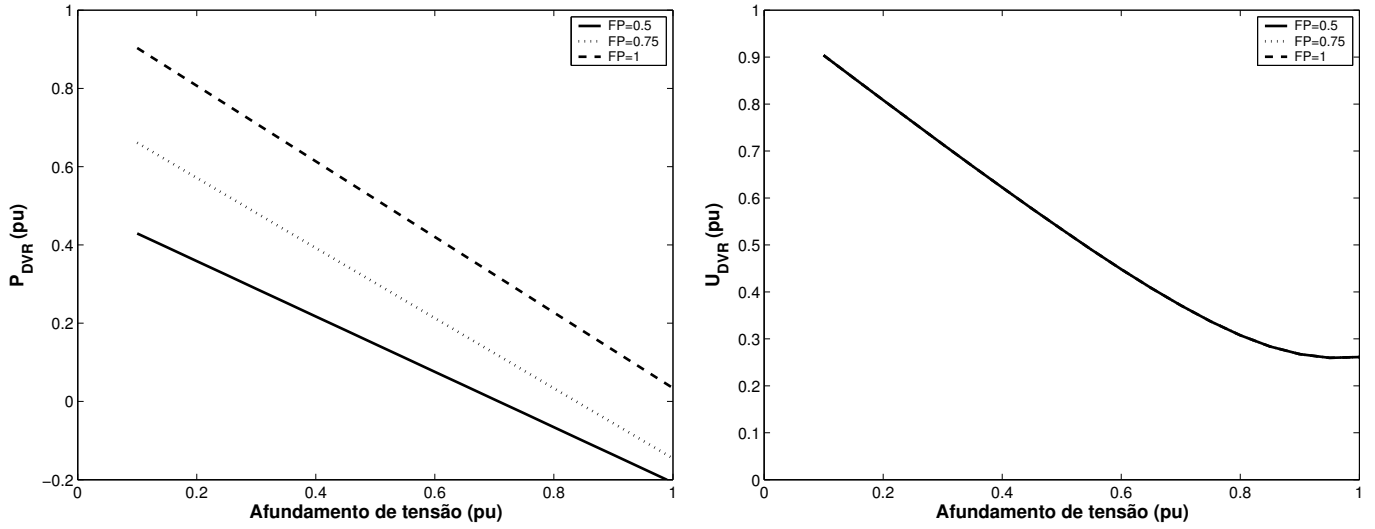
Controle Otimizado da Amplitude de Tensão

O controle otimizado da amplitude de tensão é uma estratégia que possibilita utilizar adequadamente a tensão do DVR durante afundamentos intensos com saltos de fase. As tensões do DVR são injetadas em fase com a tensão da rede (U_{af}). Neste controle, a contribuição de tensão e potência podem ser calculadas como:

$$U_{DVR} = (1 - |U_{af}|) \angle \phi_{af}. \quad (3.10)$$

$$P_{DVR} = \sqrt{3} |U_{DVR}| |I_{carga}| \cos(\phi_{carga}). \quad (3.11)$$

$$P_{rede} = \sqrt{3} |U_{af}| |I_{carga}| \cos(\phi_{carga}). \quad (3.12)$$



(a) Potência injetada pelo DVR como função do afundamento

(b) Tensão injetada pelo DVR como função do afundamento

Figura 3.5. Controle otimizado da qualidade de tensão de um DVR para três diferentes fatores de potência e $\phi_{af} = -15^\circ$.

A potência utilizada pelo DVR aumenta com a intensidade do afundamento e a contribuição de potência da rede diminui proporcionalmente à queda de tensão.

Controle Otimizado da Energia

O controle otimizado da energia é realizado com uma pequena diminuição da energia armazenada. De um modo geral, as potências calculadas na rede e na carga são determinadas, respectivamente, por:

$$P_{carga} = |U_{carga}| |I_{carga}| \cos(\phi_{carga}), \quad (3.13)$$

$$P_{rede} = |U_{rede}| |I_{carga}| \cos(\phi_{rede}), \quad (3.14)$$

sendo ϕ_{rede} o ângulo entre U_{rede} e I_{carga} . Sendo assim, a potência injetada pelo DVR é dada por:

$$P_{DVR} = P_{carga} - P_{rede},$$

$$P_{DVR} = |U_{carga}| |I_{carga}| \left[\cos(\phi_{carga}) - \frac{|U_{rede}|}{|U_{carga}|} \cos(\phi_{rede}) \right]. \quad (3.15)$$

Considerando U_{carga} e a potência aparente da carga ($U_{carga} \cdot I_{carga}$) como as quantidades de base, então a tensão injetada pelo DVR torna-se:

$$P_{DVR} = FP_{carga} - |U_{rede}| \cos(\phi_{rede}), \quad (3.16)$$

sendo $FP_{carga} = \cos(\phi_{carga})$, que é o fator de potência da carga. Conhecidos os valores do fator de potência e tensão da rede, a potência mínima injetada pela rede é dada quando:

$$\cos(\phi_{rede}) = 1, \quad (3.17)$$

ou seja, quando $\phi_{rede} = 0$ ou U_{rede} e I_{carga} estão em fase.

O objetivo principal do DVR é manter a tensão na carga em 1 pu. Neste caso, a amplitude da tensão da rede em pu pode ser escrita como:

$$|U_{rede}| = (1 - |U_d|), \quad (3.18)$$

sendo $|U_d|$ o nível de tensão afundado. Utilizando (3.16), (3.17) e (3.18), a potência mínima injetada pelo DVR pode ser escrita como:

$$P_{DVR}^{min} = |U_d| - (1 - FP_{carga}). \quad (3.19)$$

A equação (3.19) indica que, quando $|U_d| < (1 - FP_{carga})$, P_{DVR}^{min} torna-se negativa e assim o fluxo de potência flui na direção reversa (do sistema para o DVR). No entanto, o DVR pode não suportar o fluxo de potência reverso. Esta situação pode ser evitada ajustando o valor de ϕ_{rede} (ao invés de zero) para que o fluxo de potência torne-se zero. O valor de ϕ_{rede} para fluxo de potência zero pode ser obtido de (3.16) e é dado por:

$$\phi_{rede} = \cos^{-1} \left(\frac{FP_{carga}}{1 - |U_d|} \right). \quad (3.20)$$

Resumindo do que foi exposto:

Se $|U_d| > (1 - fp_{carga}) \Rightarrow \phi_{rede} = 0$.

Se $|U_d| \leq (1 - fp_{carga}) \Rightarrow \phi_{rede} = \cos^{-1} \left(\frac{fp_{carga}}{1 - |U_d|} \right)$.

Para determinar U_{DVR} , U_{carga} deve ter um ângulo de $(\theta_{carga} - \theta_{rede})$ para evitar o fluxo de potência reverso. Assim, na forma polar, a igualdade

$$U_{DVR} = U_{carga} - U_{rede}, \quad (3.21)$$

pode ser reescrita como:

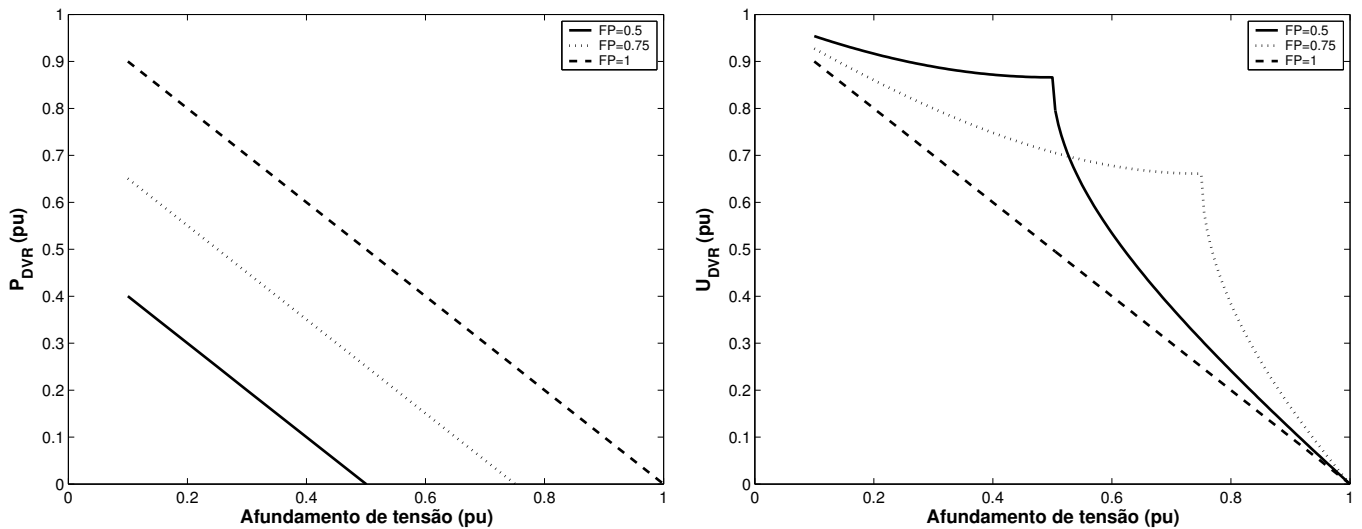
$$|U_{DVR}| \angle \beta = 1 \angle (\theta_{carga} - \theta_{rede}) - (1 - |U_d|) \angle 0^\circ, \quad (3.22)$$

sendo β o ângulo da tensão injetada e a tensão da rede tomada como referência. Após algumas manipulações, $|U_{DVR}|$ e β podem ser expressas como:

$$|U_{DVR}| = \sqrt{|U_d|^2 + 2(1 - |U_d|)[1 - \cos(\theta_{carga} - \theta_{rede})]}, \quad (3.23)$$

$$\beta = \tan^{-1} \left[\frac{\text{sen}(\theta_{carga} - \theta_{rede})}{\text{cos}(\theta_{carga} - \theta_{rede}) - (1 - |U_d|)} \right]. \quad (3.24)$$

A Figura 3.6(a) ilustra a potência ativa que o DVR deve injetar para três diferentes fatores de potência utilizando esta estratégia. Pode ser observado da Fig. 3.6(b) que durante



(a) Potência injetada pelo DVR como função do afundamento

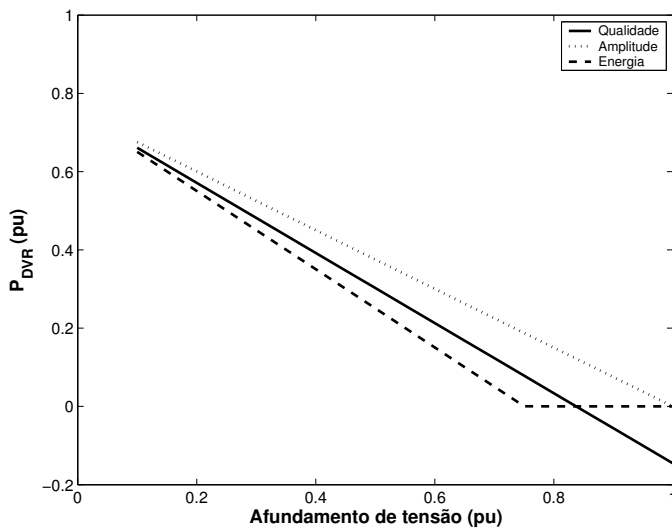
(b) Tensão injetada pelo DVR como função do afundamento

Figura 3.6. Controle otimizado da energia de um DVR para três diferentes fatores de potência.

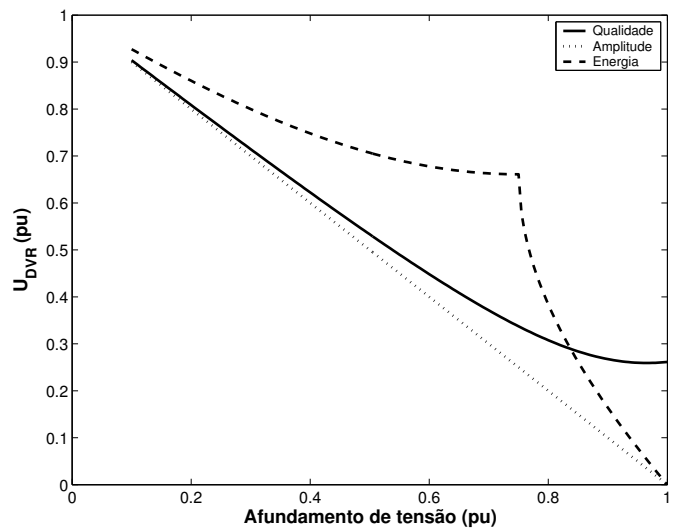
0,5 pu de afundamento de tensão é necessário injetar 0,5 pu de tensão para um $FP_{carga} = 1$,

injetar 0,71 pu de tensão para um $FP_{carga} = 0,75$ e injetar 0,87 pu de tensão para um $FP_{carga} = 0,5$. Para este mesmo afundamento de tensão, a potência necessária é 0,5 pu, 0,25 pu e 0 pu, respectivamente. Sendo assim, a utilização do controle otimizado de energia é interessante principalmente para cargas de baixo fator de potência e que são insensíveis a deslocamentos de fase (HAQUE, 2001; VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2003).

A Figura 3.7 ilustra uma comparação do DVR compensando afundamentos de tensões com salto de fase de 15° e carga com $FP_{carga} = 0,75$, extraídos das situações anteriormente mostradas. Pode ser observado que para este tipo de carga, o controle da amplitude de tensão requer uma maior quantidade de potência ativa, mas por outro lado, requer a menor tensão injetada. Para afundamentos mais intensos, o controle otimizado da energia requer a maior capacidade de injeção de tensão.



(a) Potência injetada pelo DVR como função do afundamento



(b) Tensão injetada pelo DVR como função do afundamento

Figura 3.7. Comparação entre as três estratégias de controle com $FP_{carga} = 0,75$, $\phi_{af} = -15^\circ$.

3.4 ESTRATÉGIA DE CONTROLE COM AFUNDAMENTOS DE TENSÃO DESEQUILIBRADOS

Uma grande quantidade de afundamentos de tensão reportado numa pesquisa feita pela EPRI (SABIN, 1999) apresentaram-se como desequilibrados. Uma quantidade de 68% foram resultantes de faltas monofásicas, 19% de faltas bifásicas e apenas 13% de faltas trifásicas. Assim, aproximadamente 87% dos afundamentos de tensão foram desequilibrados.

A componente de sequência zero gerada a partir do desequilíbrio deve ser medida para que o controle possa tratar esta componente e possibilitar que o DVR produza a mesma. Como será visto posteriormente, o foco deste trabalho é concentrado também nos esquemas de controle para compensação das componentes de tensão positiva e negativa.

Os desequilíbrios devem ser compensados para evitar o colapso de tensões monofásicas, bifásicas ou trifásicas na carga. Portanto, o DVR deve compensar a componente de sequência positiva da tensão da carga e eliminar as componentes de sequência negativa e zero da tensão da rede.

3.5 ESTRATÉGIA DE CONTROLE COM DIFERENTES TIPOS DE CARGA

A estratégia de controle pode ser adaptada para a carga e ter uma melhor utilização do equipamento, pois o mesmo pode introduzir efeitos indesejados tais como transitórios, harmônicos e deslocamentos de fase. A qualidade da tensão da carga é possível de ser controlada mas geralmente é uma relação de compromisso entre diferentes parâmetros, os quais podem determinar a escolha mais adequada de uma determinada estratégia de controle. Os parâmetros possíveis de serem controlados são:

- Deslocamento de fase. O DVR pode compensar afundamentos com saltos de fase, mas algumas desvantagens surgem como a necessidade de injetar tensões e potência elevadas. No entanto, existem cargas que são robustas a estes problemas.

- Nível de restauração de tensão. As tensões de carga não necessariamente devem ser restauradas para o valor nominal. Por exemplo, se o colapso de tensão da carga é 0,7 pu, a tensão da carga pode ser restaurada para 0,75 pu.
- Harmônicos. Os harmônicos injetados pelo DVR podem ser controlados e filtrados, mas geralmente com maior custo.
- Afundamento/elevação. Uma resposta rápida é necessária para algumas cargas mas às vezes com a desvantagem de gerar transitórios.
- Transitórios. O DVR pode levar a transitórios nas tensões de carga, especialmente nas transições de fase no começo e no fim do afundamento. Como já mencionado, algumas cargas podem ser sensíveis a transitórios e o controle deve minimizar a geração destes eventos.

Os diferentes tipos de carga devem ser tratados pelo DVR e é importante que apresente bom desempenho. Se a carga possui corrente ou impedância constante pode ser conveniente restaurar as tensões de carga para o menor valor necessário. Sendo assim, a carga absorve menos potência e a queda de energia pode ser minimizada. Com a carga a potência constante, qualquer estratégia de controle não traz benefícios. Nesta situação, a corrente demandada pela carga será maior e existe o risco de sobrecorrente.

Algumas cargas que podem ser protegidas pelo DVR são agrupadas abaixo e potenciais problemas são mencionados:

- Cargas não-lineares. Um grande grupo de cargas não-lineares consiste de pontes retificadoras a diodo monofásicas e trifásicas. As cargas não-lineares podem levar a distorções de tensão elevadas na carga.
- Cargas desequilibradas. Levam as tensões das cargas ao desequilíbrio.
- Máquinas elétricas. Podem ser sensíveis a desequilíbrios e deslocamentos de fase. Com

um dispositivo eletrônico de potência na interface com a rede, podem apresentar características diferentes.

- Cargas indutivas. Opõem-se a mudanças rápidas na corrente de carga.
- Cargas resistivas. Tensão e corrente da rede são sincronizadas, tornando o fator de potência unitário.
- Cargas eletrônicas de potência. Conversores a tiristores têm um sistema de controle que é sincronizado com a rede. Estas cargas são sensíveis a deslocamentos de fase e a afundamentos de tensão.

3.6 TIPOS DE CONTROLADORES UTILIZADOS EM DVRs

Para assegurar tensões de cargas aceitáveis, dentre outras características, o controle deve apresentar-se robusto para diferentes perturbações advindas tanto do lado da rede como do lado da carga. Alguns controladores de tensão para DVRs foram propostos na literatura, mas os três principais tipos de controladores propostos podem ser classificados como:

- Controlador de tensão em malha aberta.
- Controlador de tensão em malha fechada.
- Controlador multivariável.

O princípio de operação do controlador de tensão em malha aberta é ilustrado na Fig. 3.8(a). A partir das medições das tensões da rede juntamente com as tensões de referência, as tensões a serem injetadas podem ser calculadas. A corrente do conversor pode servir de informação para a determinação da queda de tensão provocada pelo filtro. No controle em malha aberta, o parâmetro de referência é a tensão na carga desejada, $u_{carga,ref}$. A tensão de erro, $u_{rede,erro}$, deve ser injetada pelo DVR:

$$u_{rede,erro} = u_{carga,ref} - u_{rede}. \quad (3.25)$$

Uma queda de tensão no filtro e no transformador, u_{queda} , pode ser determinada e utilizada para compensar com o controle em malha aberta, ou seja:

$$u_{conv,ref} = u_{rede,erro} + u_{queda}. \quad (3.26)$$

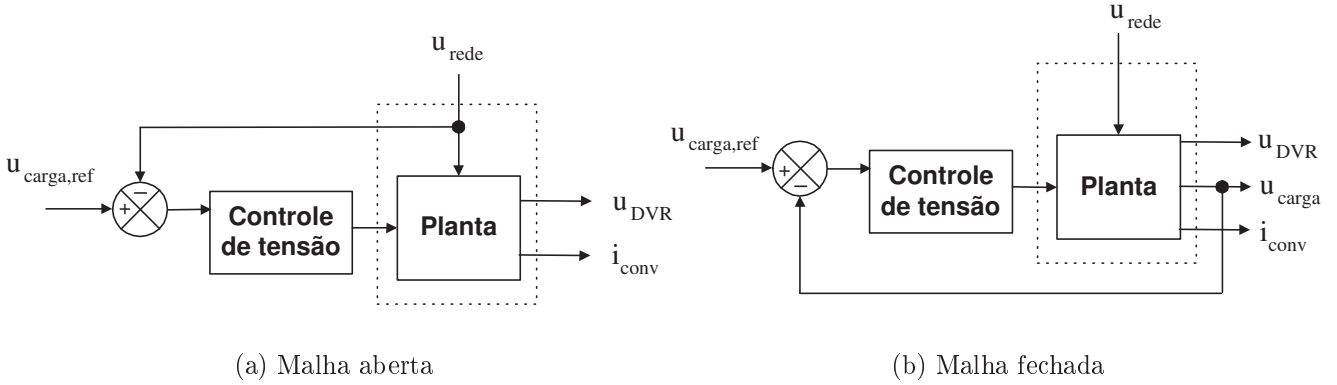


Figura 3.8. Controle de tensão em um DVR.

No controle em malha fechada, as tensões de carga ou as tensões do DVR são medidas e utilizadas no laço da realimentação. Este controle tem o potencial de obter uma resposta mais rápida e correta, mas por outro lado o projeto dos controladores é mais complexo. A Fig. 3.8(b) ilustra o princípio do controle em malha fechada com a tensão de carga utilizada no laço de realimentação. As tensões da rede são medidas para detectar a queda de tensão e realizar a sincronização. Alternativamente, este tipo de controle pode ser utilizado tomando-se como referência a tensão de carga, $u_{carga,ref}$, determina-se a tensão do DVR a ser injetada e a diferença com a sua respectiva tensão de referência, $u_{DVR,ref}$, é corrigida pelo DVR. O procedimento é mostrado na Fig. 3.9. Sendo assim, a tensão a ser gerada pelo conversor utiliza as tensões citadas anteriormente:

$$u_{DVR,ref} = u_{carga,ref} - u_{rede}, \quad (3.27)$$

$$u_{DVR,erro} = u_{DVR,ref} - u_{DVR}, \quad (3.28)$$

$$u_{conv,ref} = u_{DVR,erro} \cdot G_{contr}. \quad (3.29)$$

O método possibilita mensurar quanto o DVR injeta e definir os limites dessa injeção, de acordo com a estrutura do DVR que se tem disponível. Um controle rápido pode ser obtido a partir do controle em malha fechada, mas o controlador deve ser bem projetado com a intenção de se obter um sistema estável.

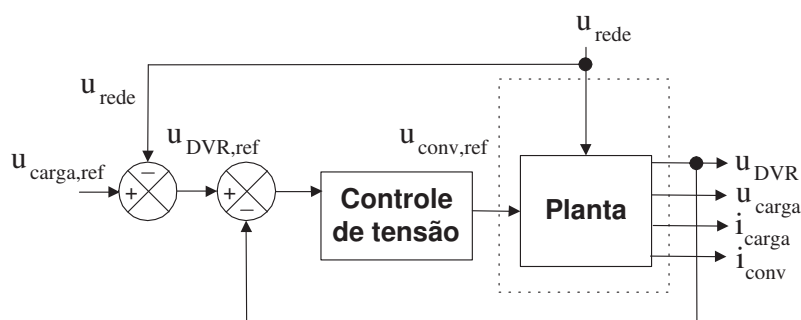


Figura 3.9. Controle em malha fechada modificado sendo utilizadas as tensões do DVR no laço de realimentação.

O controle multivariável é utilizado com um laço de corrente interno para o controle da corrente nos capacitores do filtro e um laço externo para o controle de tensão. Este modelo para o controlador será descrito com mais detalhes no capítulo 4.

3.7 CONTROLE DA TENSÃO DO BARRAMENTO C.C.

A tensão do barramento c.c. pode ser controlada pelo sistema DVR. Em (ZHAN, 2001b), o próprio sistema DVR carrega as baterias anexas ao barramento c.c. Existem também topologias que não fazem o controle da tensão do barramento c.c. Uma vez constante esta tensão, a tensão produzida pelo DVR será máxima. Quanto às perdas, será menor com uma pequena tensão do barramento c.c., mas durante o afundamento o carregador pode apresentar limitações na capacidade de manter a tensão constante.

As duas principais topologias que são capazes de manter a tensão c.c. constante são um DVR com um conversor c.a./c.c. ou uma topologia com uma fonte c.c. Uma outra forma mais simples de carregar é fazendo uso de uma ponte retificadora a diodo conectada no lado

da rede, onde a queda de tensão do barramento deve ser compensada retirando-se energia da rede para carregá-lo.

3.8 DETECÇÃO DO AFUNDAMENTO DE TENSÃO

Um afundamento de tensão deve ser detectado rapidamente e corrigido com um mínimo de erros. São características da detecção:

- Funcionamento robusto na presença de problemas de qualidade de tensão.
- Detecção rápida do afundamento para minimizar o tempo de subtensões nas cargas.
- Detecção da tensão da rede restaurada e transição do modo ativo para o *standby* (se este for o modo de operação) e consequente minimização de tempo com operação de sobretensão.

Os métodos para uma detecção rápida são os que utilizam medição instantânea ao invés do cálculo dos valores RMS. As medições das tensões da rede fornecem tensões instantâneas e as transformações para eixos girantes ou estacionários em alguns casos são vantajosos. No capítulo 4, estas transformações serão avaliadas com mais detalhes. Três métodos de detecção de afundamento são aqui apresentados:

1. Magnitude do vetor no eixo de referência $\alpha\beta$.

$$|u_{rede,\alpha\beta}| = \sqrt{u_{rede,\alpha}^2 + u_{rede,\beta}^2} \quad (3.30)$$

$$|u_{rede,\alpha\beta}| < u_{limite} \quad (3.31)$$

2. Magnitude das componentes d e q, cada uma comparada com os valores limites.

$$|u_{rede,d}| < u_{limite} \quad (3.32)$$

$$|u_{rede,q}| > u_{limite} \quad (3.33)$$

3. Magnitude do vetor erro comparado com o valor limite.

$$|u_{erro,dq}| = \sqrt{(u_{ref,d} - u_{rede,d})^2 + (u_{ref,q} - u_{rede,q})^2} \quad (3.34)$$

$$|u_{erro,dq}| > u_{limite}. \quad (3.35)$$

Todos os três métodos são capazes de detectar um afundamento intenso de tensão equilibrado sem salto de fase. Por outro lado, um afundamento desequilibrado pode apresentar alguns problemas na detecção. A Figura 3.10(a) ilustra uma falta monofásica típica. As linhas trace-

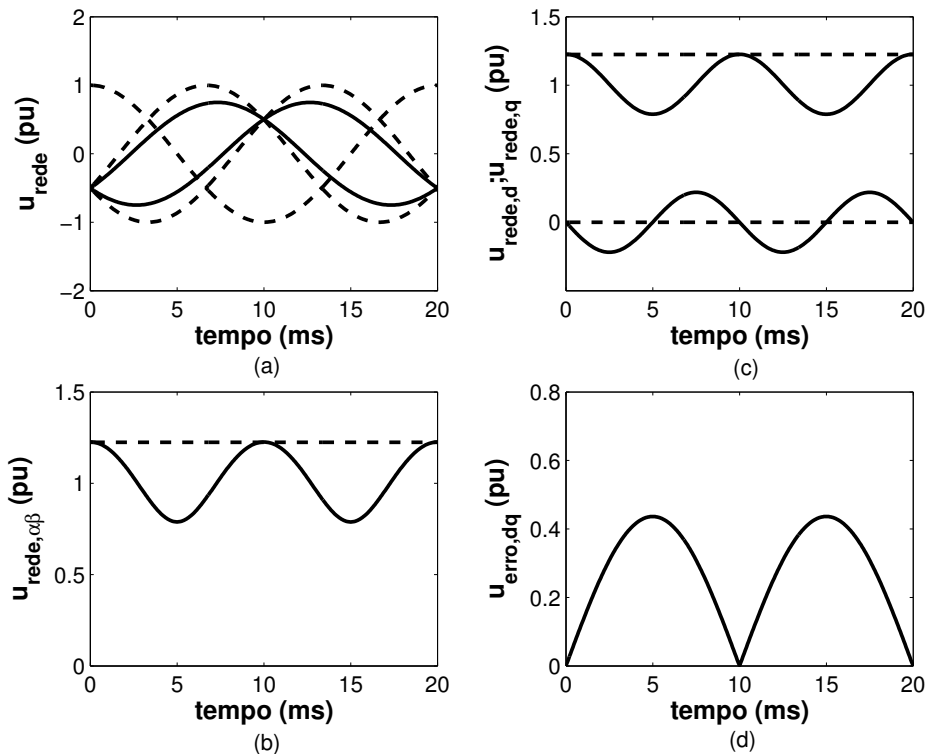


Figura 3.10. Detecção de afundamento desequilibrado. a) Rede trifásica com (linha cheia) e sem faltas (linhas tracejadas), b) Método 1: amplitude do vetor espacial, c) Método 2: componentes d e q, d) Método 3: vetor de erro.

jadas indicam um sistema 3ϕ no qual não há nenhuma falta. As linhas contínuas mostram duas fases que sofreram consequências da falta. No instante de 10 ms, os valores instantâneos são iguais nos casos com e sem falta, mesmo a falta persistindo. As Figuras 3.10(b-d) ilustram como os três diferentes métodos detectam este tipo de falta. Os casos ilustram que a detecção de um pequeno afundamento desequilibrado pode ser atrasado. Quando a tensão é detectada abaixo de um certo valor limite, o DVR deve continuar no estado ativo.

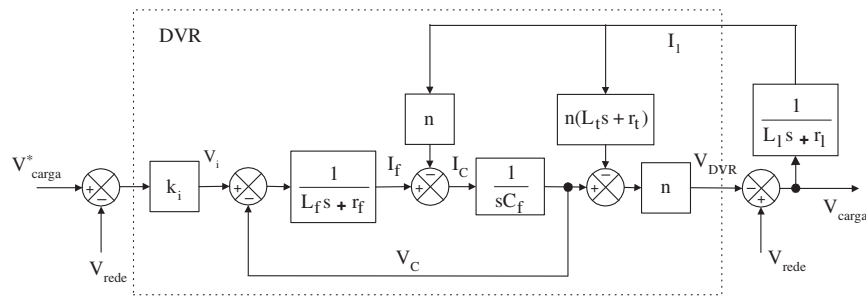
3.9 SISTEMAS DE CONTROLE EM MALHA ABERTA UTILIZADOS EM DVRs

Alguns dos trabalhos relativos ao controle em malha aberta utilizados em DVRs e apresentados na literatura são mencionados e comentados a seguir.

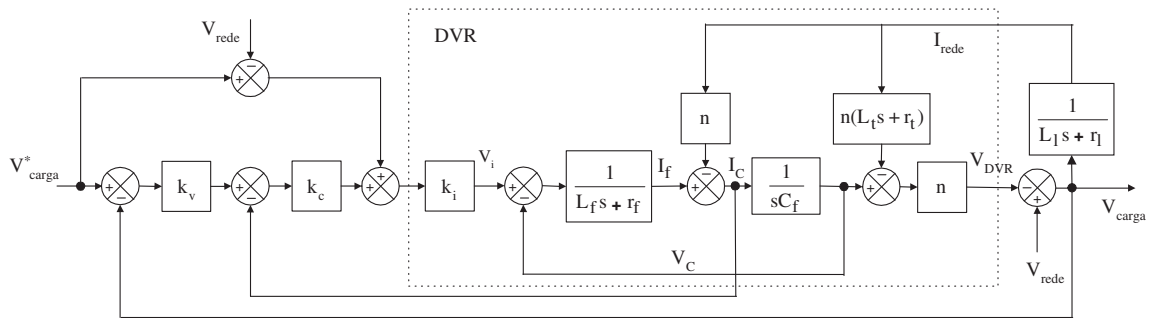
Em (VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002) são apresentados dois sistemas de controle para um DVR: um em malha aberta e outro em malha fechada, como mostrado na Fig. 3.11. A intenção de apresentar os dois sistemas é mostrar que o de malha fechada apresenta um desempenho superior em relação ao de malha aberta, justificando-se algebricamente que o fator de amortecimento é inadequado no controle de malha aberta. Neste último, o fator de amortecimento apresenta um valor pequeno, suficiente para provocar oscilações na tensão de correção com duração relativamente grande. Esta constatação é observada para cargas com fatores de potência menores que um, e o controle em malha fechada é projetado inclusive para superar esta limitação. Resultados de simulação e experimental são apresentados para comparação entre os diferentes sistemas, somente para casos com afundamentos equilibrados. E ainda, não foi afirmado nem demonstrado que esta limitação de um determinado parâmetro é de caráter geral, confirmando a limitação apenas para a configuração do DVR e sistema de controle apresentados. Esta mesma estratégia de controle é utilizada em (VILATHGAMUWA; WIJEKOON; CHOI, 2006).

No trabalho de (ZHAN, 2001b) um sistema de controle em malha aberta é projetado para atuar no DVR (Fig. 3.12). O algoritmo de PLL utilizado foi o mesmo que os autores apresentaram em (ZHAN, 2001a) e a modulação utilizada foi a vetorial de dois níveis. O inversor de tensão contém três braços e o lado de baixa dos transformadores de injeção é ligado em delta. Isto significa que os únicos afundamentos que podem ser contemplados são os equilibrados. A única novidade destacada é a apresentação de um esquema para o carregamento do banco de baterias que alimenta o barramento c.c. durante a ocorrência do afundamento de tensão.

Em (NIELSEN; BLAABJERG; MOHAN, 2001) um restaurador dinâmico de tensão é pro-



(a) Malha aberta



(b) Malha fechada

Figura 3.11. Diagramas de bloco do sistema de controle apresentado em (VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002).

jetado com um controle em malha aberta que contempla dois aspectos de correção: no primeiro, a tensão sobre a carga é compensada para a condição de pré-afundamento e no segundo, a compensação é feita em fase com a tensão afundada. O sistema de controle é o mesmo utilizado em (VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002). No entanto, o sistema de detecção de fases é similar aos descritos em (KAURA; BLASKO, 1997) e (ZHAN, 2001a), e portanto, apresenta limitações para rastrear fases de tensões desequilibradas. O desempenho do DVR por meio de simulações e experimentos são avaliados somente com afundamentos equilibrados. Uma estratégia muito semelhante a esta foi apresentada em (QUIRL; JOHNSON; HESS, 2006).

No trabalho apresentado em (MAREI; EL-SAADANY; SALAMA, 2007) são realizadas decomposições em componentes de sequência para correção dos afundamentos de tensão e

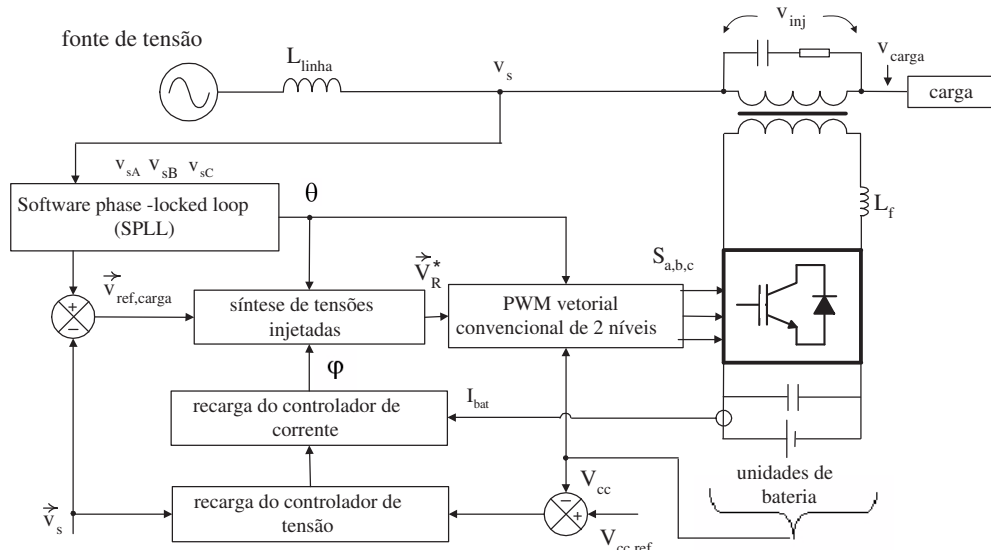


Figura 3.12. Diagrama de bloco do sistema de controle projetado em (ZHAN, 2001b).

aplicados por meio de uma estratégia de controle em malha aberta. A justificativa é para evitar as instabilidades do controle em malha fechada, decorrentes de ajustes inadequados nos ganhos. O inversor de tensão apresentado para o DVR é um de três braços com ligação no ponto central dos capacitores do barramento c.c.

3.10 SISTEMAS DE CONTROLE EM MALHA FECHADA UTILIZADOS EM DVRs

Da mesma forma do que foi feito para a malha aberta, alguns trabalhos relativos à malha fechada são destacados a seguir.

Para o projeto do controle do DVR em (HUANG; HUANG; PAI, 2003) foram levadas em conta ainda outras perturbações além do afundamento, visando um aperfeiçoamento na característica de filtragem do equipamento. Sendo assim, capacitores foram instalados em paralelo tanto no lado da rede, para prevenir os efeitos das distorções, como no lado da carga, para prevenir os harmônicos oriundos do chaveamento do inversor. Baseado neste e nos demais parâmetros do sistema, o diagrama de blocos que representa o sistema de controle é o mostrado na Fig. 3.13. Esta configuração mostra a realimentação de duas variáveis, a tensão da carga e a corrente do transformador. Alguns eventos foram testados em simulações

e outros diferentes foram testados experimentalmente, sendo que um mesmo evento não foi testado nas duas situações simultaneamente.

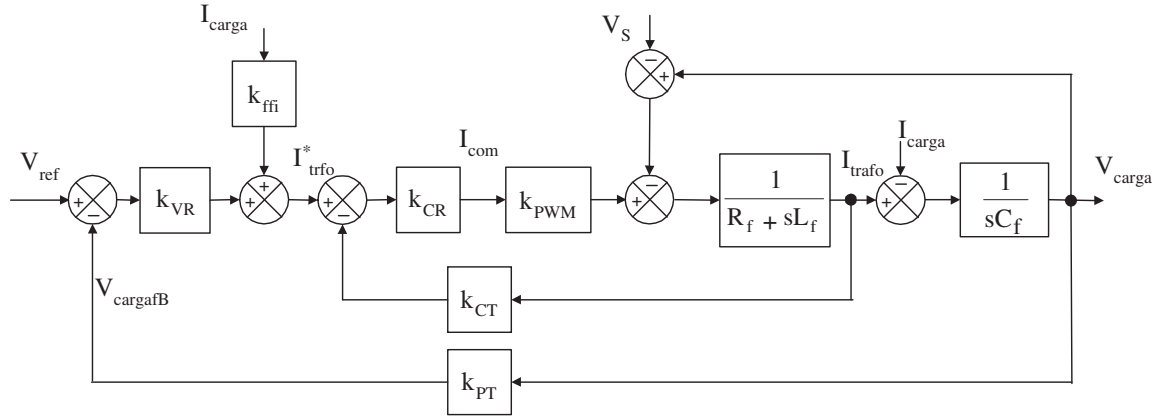


Figura 3.13. Diagrama de blocos do sistema de controle projetado em (HUANG; HUANG; PAI, 2003).

O projeto de um DVR foi descrito em (KIM; SUL, 2005). Por meio da discussão que é feita para o objetivo de controle, propõe-se um cuja banda de passagem do controlador correspondente é aumentada até aproximadamente a frequência de corte do filtro. Os resultados com afundamentos não são claramente comparados com as tensões na carga, mostrados separadamente e de forma monofásica.

Um controle em malha fechada foi mostrado em (WANG; VENKATARAMANANN; ILLINDALA, 2006). A tensão do capacitor, que é a tensão a ser injetada pelo DVR, é utilizada como laço mais externo entre as duas realimentações existentes. Esta tensão é comparada com sua referência e o erro é controlado por um PI. Com este tipo de controlador, o valor atribuído para a referência deve ser constante. No entanto, a tensão a ser injetada não possui um valor fixo, uma vez que a intensidade do afundamento pode variar entre 10 e 90% da amplitude da tensão nominal. Portanto, um valor correto na referência certamente não é atribuído, e como o procedimento é realizado, não fica esclarecido no trabalho. Mesmo depois de todo o projeto, apenas um afundamento trifásico (afundamento equilibrado) é utilizado como base experimental para a correção, não sendo contemplados os afundamentos desequilibrados, os quais são os mais comumente constatados na rede elétrica e mais problemáticos para realizar

correção, como já mencionado.

Em (LI, 2007a) é realizada uma comparação entre dois sistemas de controle. O esquema geral é similar ao apresentado em (VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002), sendo que ao invés da corrente do capacitor, a corrente do indutor é utilizada como realimentação mais interna. Resultados em um sistema de média tensão são mostrados e comparados entre os controladores, e um afundamento desequilibrado é contemplado mas com intensidade muito pequena, em torno de 15% de diminuição.

3.11 CONCLUSÃO

O projeto do sistema de controle pode contemplar alguns parâmetros que são necessários para tornar o DVR eficaz em relação ao objetivo de controle. A escolha destes parâmetros é baseada no conhecimento prévio do comportamento da rede elétrica sob análise, especificamente os tipos e intensidades dos afundamentos reportados, duração, saltos de fase, presença de transitórios e harmônicos, bem como da carga a ser protegida, ou mesmo a potência e tensão da fonte disponível.

Dentre as três possibilidades de correção da tensão apresentadas, a inserção pela qualidade da tensão pode ser utilizada em afundamentos mais suaves, enquanto que o controle otimizado da amplitude em afundamentos mais severos com saltos de fase. Uma desvantagem do controle pela otimização da energia é que o mesmo requer um nível de tensão mais elevado do DVR, quando comparado com as outras possibilidades.

Em relação ao tipo de controle, o de malha aberta apresenta uma vantagem pela simplicidade de implementação em um processador. A consequência direta disto é a quantidade reduzida de operações realizadas no processamento que além de tratar com menos variáveis e comandos no DSP, diminui as chances de surgimento de erros computacionais. Este controle pode fornecer bons resultados mas apresenta desvantagens como não eliminar influências de perturbações e não compensar quedas de tensão nos transformadores ou mesmo apresen-

tar pouca sensibilidade em relação aos tipos de carga. Sendo assim, o controle em malha fechada deve ser realizado para suprir estas deficiências. Soma-se ainda a este último tipo de controle, a possibilidade de se obter uma resposta rápida e correta.

SISTEMAS DE CONTROLE APLICADOS AO DVR

Os processos industriais vem sendo automatizados para melhorar a eficiência da produção e aumentar a competitividade no mercado globalizado. As consequências desta tendência podem ser analisadas de duas formas. Primeiramente, os consumidores industriais de energia elétrica apresentam cargas não-lineares e desequilibradas ao sistema de distribuição. Em seguida, tornam-se vulneráveis a desvios momentâneos presentes nas tensões do sistema de distribuição. Assim, tem se tornado comum fazer um levantamento probabilístico de parâmetros indicadores de qualidade de energia, inclusive afundamentos de tensão, que podem ocorrer em uma determinada área onde uma carga industrial esteja localizada. Se a probabilidade de interrupção de fornecimento para a carga devido a afundamentos de tensão é inaceitável, então algumas medidas de prevenção devem ser consideradas. O restaurador dinâmico de tensão é um dispositivo de potência conectado em série com o sistema de distribuição, cuja função é proteger a carga industrial sensível contra elevações e principalmente afundamentos de tensão. A função principal de um DVR é gerar tensões trifásicas e injetá-las corretamente, sincronizadas com as tensões de distribuição. Assim, o afundamento de tensão é corrigido e as tensões na carga são mantidas em seus valores nominais.

O DVR foi estudado ao longo da última década e alguns trabalhos na literatura em relação às topologias e métodos de controle estão disponíveis (STRZELECKI; BENYSEK, 2008; LI, 2007a, 2007b; MAREI; EL-SAADANY; SALAMA, 2007; LOPES, 2006; WANG; VENKATARAMANANN; ILLINDALA, 2006; KIM; SUL, 2005; HUANG; HUANG; PAI, 2003; VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002; ZHAN, 2001b; NIELSEN; BLAABJERG; MOHAN, 2001). No entanto, alguns temas não foram claramente tratados. Entre eles, um que necessita ser considerado é a separação de variáveis trifásicas em componentes de sequência positiva,

negativa e zero instantaneamente. Afundamentos de tensão geralmente são desequilibrados, e portanto, fica claro que o controle aplicado ao DVR deve consistir de três controles separados para cada componente de sequência. No entanto, há pouca menção acerca da separação de tensões e correntes trifásicas medidas em componentes de sequência.

Um outro aspecto a ser considerado é em relação ao sistema de controle em malha fechada para o DVR. É conhecido que deve consistir de um laço interno de corrente e um laço externo de tensão, mas no entanto, é necessário identificar claramente as variáveis de controle e as variáveis de perturbação. O sistema de controle deve possuir boas propriedades de rastreamento e deve também rejeitar as variáveis de perturbação. Como será visto, o sistema de controle proposto rastreia o vetor de tensão de carga enquanto considera a corrente de carga e as tensões da rede como variáveis de perturbação.

De maneira geral, este capítulo trata de características dos sistemas de controle, inclusive o de malha fechada que é proposto e projetado para o DVR laboratorial.

4.1 MODELAGEM DO SISTEMA

O DVR é um dispositivo conectado em série com o sistema de distribuição. O principal componente de um DVR é o conversor fonte de tensão, o qual gera tensões trifásicas e fornece a tensão necessária a uma carga sensível durante a ocorrência de afundamentos de tensão. Estas tensões produzidas devem ser injetadas de forma sincronizada com as tensões do sistema de distribuição.

Como já mencionado, o DVR deve contemplar a possibilidade de gerar e injetar tensões trifásicas desequilibradas. Estas tensões podem ser geradas por inversores de 3 braços (ZHAN; ARULAMPALAM; JENKINS, 2003), inversores em ponte completa (*H-bridge*) (WANG; VENKATARAMANANN; ILLINDALA, 2006) ou por inversores de 4 braços (KIM; SUL, 2004).

Para uma melhor representação dos componentes do sistema DVR, a Fig. 4.1 pode ser apresentada em uma forma monofásica como na Fig. 4.2. Baseado nesta figura, a tensão na

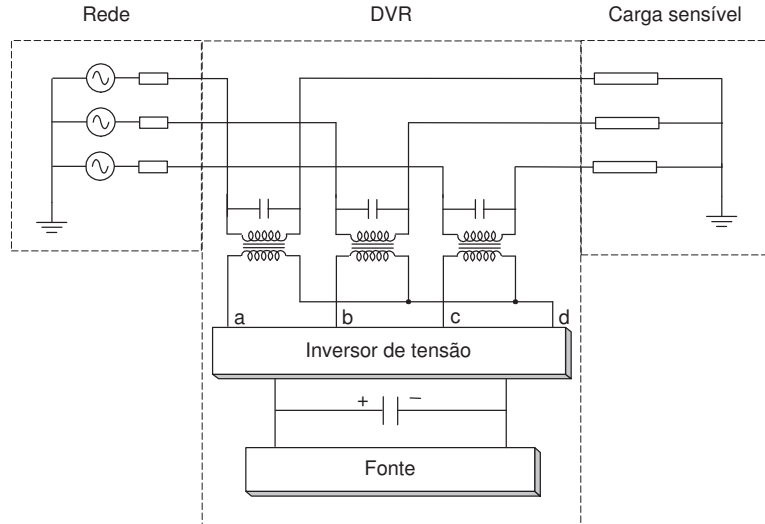


Figura 4.1. Restaurador dinâmico de tensão.

carga é regulada pelo DVR com injeção da tensão v_c . A carga tem indutância L_l e resistência r_l , enquanto que a indutância de dispersão L_f e a resistência de perdas r_f do transformador são utilizadas como componentes do filtro do DVR, juntamente com a capacitância C_f . Este desenho para o filtro é apenas uma possibilidade, não sendo este formato uma regra. Foi assumido que a relação de transformação do transformador é de 1:1. A partir das variáveis e o desenho do circuito, as equações de espaço de estados (4.1)-(4.4) podem ser obtidas:

$$v_i = v_c + r_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt}, \quad (4.1)$$

$$i_f = i_c + i_l, \quad (4.2)$$

$$i_c = C_f \frac{dv_c}{dt}, \quad (4.3)$$

$$v_l = v_s + v_c. \quad (4.4)$$

As equações (4.1)-(4.4) formam a base do modelo do DVR, as quais serão utilizadas para o projeto do controlador.

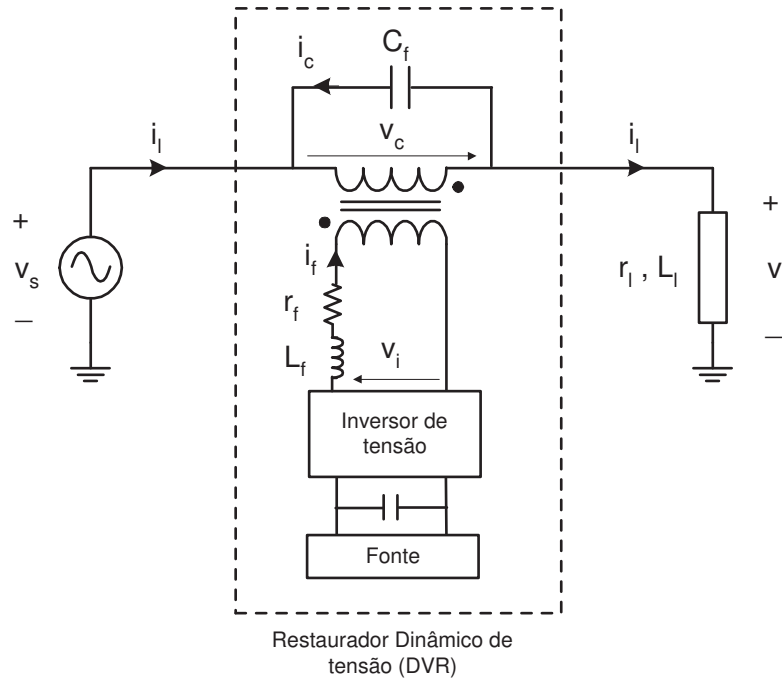


Figura 4.2. Representação monofásica de um restaurador dinâmico de tensão.

4.1.1 Sistema de Controle em Malha Aberta

O controlador de tensão em malha aberta para DVRs é o tipo mais simples de análise e projeto. O princípio de operação deste controlador é ilustrado na Fig. 4.3. A partir das medições das tensões da rede juntamente com as tensões de referência, as tensões a serem injetadas podem ser calculadas. A corrente do conversor pode servir de informação para a determinação da queda de tensão provocada pelo filtro. No controle em malha aberta, o parâmetro de referência é a tensão desejada na carga, V_l^* . A tensão de erro, $V_{s,erro}$, deve ser injetada pelo DVR:

$$V_{s,erro} = V_l^* - V_s. \quad (4.5)$$

Uma queda de tensão no filtro e no transformador pode ser determinada e utilizada para compensar com o controle em malha aberta, ou seja:

$$V_i^* = V_{s,erro} + V_{queda}. \quad (4.6)$$

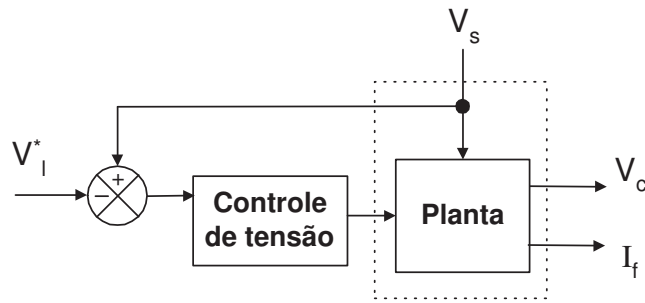


Figura 4.3. Controle de tensão em malha aberta para um DVR.

No sistema de controle em malha aberta do DVR, a tensão do lado da fonte é comparada com a tensão de referência do lado da carga e o erro é seguido para o inversor, onde serão gerados os sinais de PWM necessários. Utilizando as equações de (4.1)-(4.4), um diagrama de blocos descrevendo a compensação é mostrado na Fig. 4.4. Nesta figura, K_i representa o ganho assumido para o inversor.

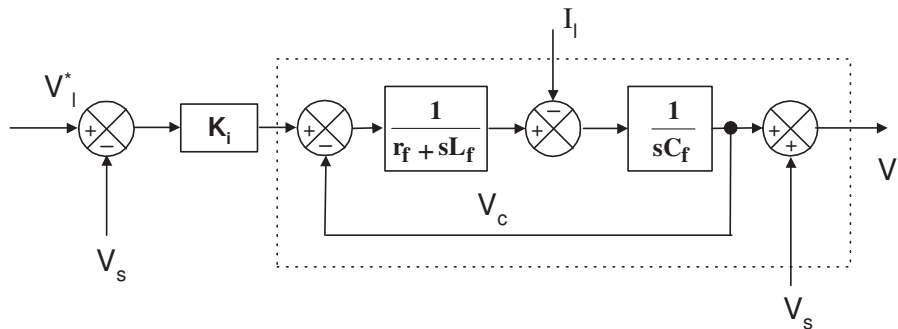


Figura 4.4. Controle em malha aberta para o DVR.

4.2 SISTEMA DE CONTROLE EM MALHA FECHADA

A resposta em frequência da função de transferência do sistema em malha aberta apresenta características de amortecimento inadequadas (VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002). O estágio de integração da corrente do capacitor que determina a tensão no capacitor, promove um atraso de 90° na fase. Este atraso diminui ou pode até inviabilizar as

margens de estabilidade do sistema de controle. Isto significa que um laço de realimentação externo da tensão da carga atuando sozinho pode não ser suficiente. Uma possibilidade para melhorar as margens de estabilidade é incluir um laço de realimentação interno. A utilização de um laço de corrente na malha interna é a alternativa escolhida, por possuir uma margem de estabilidade mais adequada, e além disso, a taxa de variação da tensão de saída do DVR é proporcional à corrente do capacitor do filtro ($i_c = C_f \frac{dv_c}{dt}$). Se esta corrente pode ser regulada adequadamente, a tensão da carga é controlada no caso de surgimento de variações.

O laço interno de corrente juntamente com o externo de tensão na carga descrito anteriormente formam o esquema de controle em malha fechada do DVR que será utilizado. Este esquema é mostrado na Fig. 4.5, onde ainda pode ser visto que a tensão na carga é comparada com seu valor de referência e o erro é multiplicado pelo ganho proporcional, passando para o estágio seguinte como referência para a corrente do capacitor. Esta corrente de capacitor é comparada com a corrente de capacitor medida, sendo o erro a entrada de um controlador PI. A quantidade resultante é passada para a geração dos sinais PWM por meio do inversor.

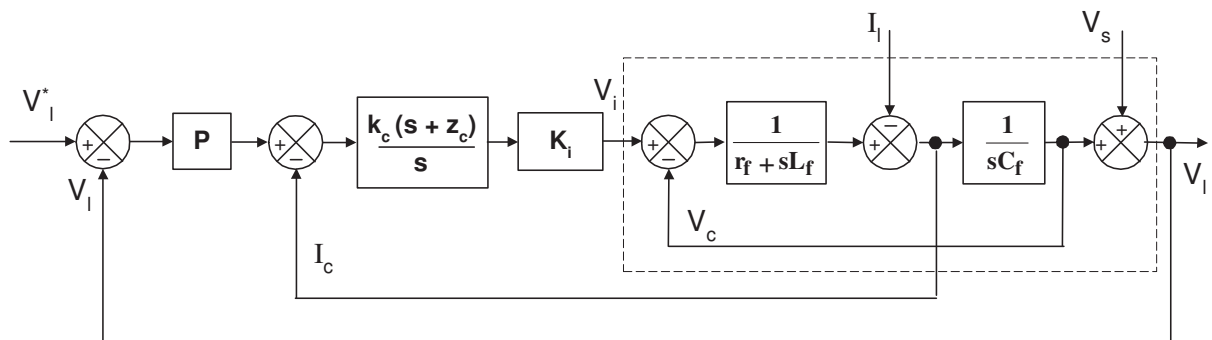


Figura 4.5. Controle em malha fechada para o DVR.

Alguns trabalhos utilizam v_c ao invés de v_l no laço mais externo (WANG; VENKATARAMANANN; ILLINDALA, 2006). Existe uma desvantagem associada a esta modificação que é o fato de a tensão v_c ser a injeção na rede. Sendo assim, o seu valor de referência,

v_c^* , deve variar com a presença de afundamentos na rede, e este valor não mais pode ser atribuído como uma constante.

Para o sistema de controle da Fig. 4.5, uma outra observação é em relação à corrente do capacitor I_c . Como o valor da capacitância do filtro é geralmente estável ao longo do tempo, temperatura e carga, o laço formado por esta corrente possibilita bom desempenho na regulação de tensão de correção V_c (RYAN; BRUMSICKLE; LORENZ, 1997; SILVA, 2005). Além disso, como esta corrente está localizada após a soma entre a corrente do filtro e da carga, o controle com o laço de corrente do capacitor reage imediatamente a qualquer mudança na corrente de carga e assim, oferece excelentes propriedades de rejeição à perturbação para a tensão de saída. O laço de controle mais externo tem a função de compensar variações na tensão.

O laço referente a corrente I_c utiliza um controlador PI, com um ganho proporcional k_c e um ganho integral $k_c z_c$. O ganho k_c atua para efetivamente aumentar o amortecimento do filtro LC, estabilizando sua ressonância. O ganho $k_c z_c$ permite rejeitar as correntes de perturbação da carga acima da frequência de corte. Para um ajuste adequado, a malha referente ao laço I_c pode ser contemplada com uma banda de passagem de $1/5$ a $1/8$ da frequência de chaveamento do inversor (RYAN; BRUMSICKLE; LORENZ, 1997), o que mantém margens de fase e de ganho adequados. E ainda, a banda de passagem da malha que contém V_l pode também ser estendida entre $1/5$ e $1/8$ da banda de passagem da malha que contém o laço I_c .

Um outro aspecto a ser considerado é que o sistema de controle deve regular a tensão de carga V_l enquanto rejeita a influência da corrente de carga I_l e a tensão da rede V_s . A carga pode apresentar-se como resistiva, indutiva, linear ou não e capacitiva, o que significa que esta carga terá uma influência atenuada para o sistema de controle. Na Figura 4.5, I_l e V_s estão representadas como entradas. Em uma análise mais detalhada, as Figuras 4.6(a) e 4.6(b) ilustram a tensão de carga v_l em função do tempo, sob duas diferentes situações; quando se tem a corrente de carga e tensão da rede como entradas, respectivamente. A partir

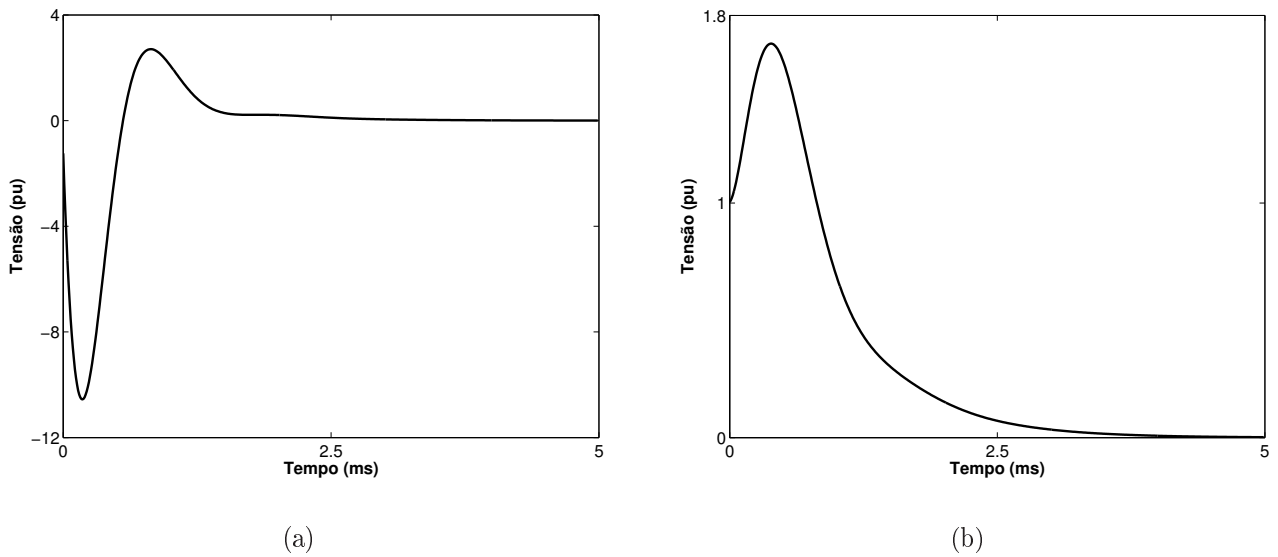


Figura 4.6. Tensão de carga. (a) Decaimento de v_l com entrada i_l em degrau unitário. (b) Decaimento de v_l com entrada v_s em degrau unitário.

destas figuras, fica mostrado que a tensão da carga tem valor zero em regime permanente, quando aquelas duas entradas são um degrau.

A partir da observação destas curvas, conclui-se que o sistema de controle rejeita-as no regime permanente. De fato, em um sistema para correção de afundamentos de tensão, a rejeição destas variáveis deve acontecer uma vez que o controle da tensão na carga não deve ser influenciado pela tensão da rede que sofre afundamentos, bem como a corrente da carga que se modifica em função do tipo de carga que está sendo protegida.

De forma similar à análise das Figs 4.6(a) e 4.6(b), uma outra observação pode ser feita em relação às respostas no tempo para a corrente do capacitor i_c quando a entrada é a sua referência i_c^* , ou seja, o sinal de saída do controlador P. A Figura 4.7(a) mostra esta situação, com a entrada sendo i_c^* normalizada, o que equivale a um degrau unitário. Esta figura representa a resposta do sistema de controle interno. Da mesma forma, a resposta no tempo para v_l representa a malha externa de controle. Analisando as duas figuras, o regime permanente de ambas é um. A diferença está na parte transitória, e principalmente na velocidade para alcançar o valor unitário. Como deve ser, a malha de controle interna é

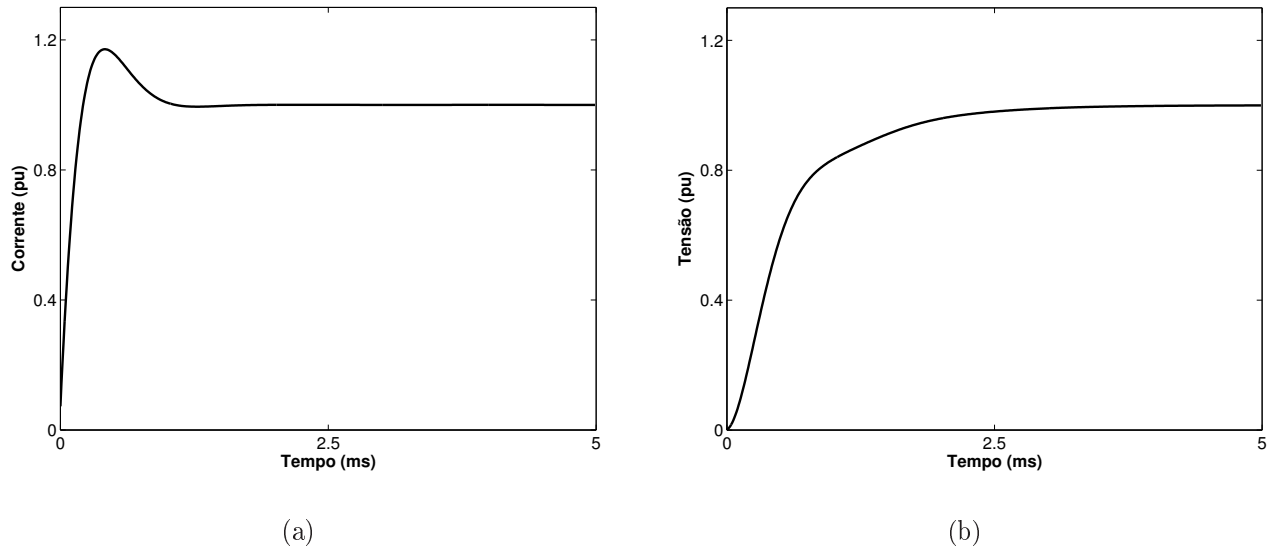


Figura 4.7. Respostas de corrente e tensão. (a) Corrente i_c com entrada i_c^* em degrau unitário. (b) Tensão v_l com entrada v_l^* em degrau unitário.

mais veloz, ou seja, atinge o regime permanente em um intervalo de tempo menor.

4.2.1 Decomposição instantânea em componentes de sequência

Inicialmente, considera-se que as tensões de fase de uma rede são amostradas em uma determinada frequência e que ficam disponíveis como dados de entrada para o estimador de componentes de sequência. As amostras de tensão $(v_{s_a}, v_{s_b}, v_{s_c})$ são convertidas em $(v_{s_\alpha}, v_{s_\beta}, v_{s_0})$ utilizando a transformação $(\alpha\beta 0)$ (KRAUSE; WASYNCZUK; SUDHOFF, 1995):

$$\begin{bmatrix} v_{s_0} \\ v_{s_\alpha} \\ v_{s_\beta} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} & \frac{1}{\sqrt{6}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s_a} \\ v_{s_b} \\ v_{s_c} \end{bmatrix}. \quad (4.7)$$

Quando valores sucessivos de v_{s_β} são desenhados graficamente como função de v_{s_α} , obtém-se um vetor que gira no sentido anti-horário. Para tensões da rede equilibradas, o vetor $(v_{s_\alpha} + j v_{s_\beta})$ tem uma magnitude constante e gira a uma velocidade angular constante. Quando as tensões da rede são desequilibradas, o vetor girante pode ser expresso como a soma do vetor de sequência positiva \mathbf{v}_p com velocidade angular ω no sentido anti-horário

e um vetor de seqüência negativa \mathbf{v}_n girando com a mesma velocidade ω no sentido horário, como indicado na Fig. 4.8.

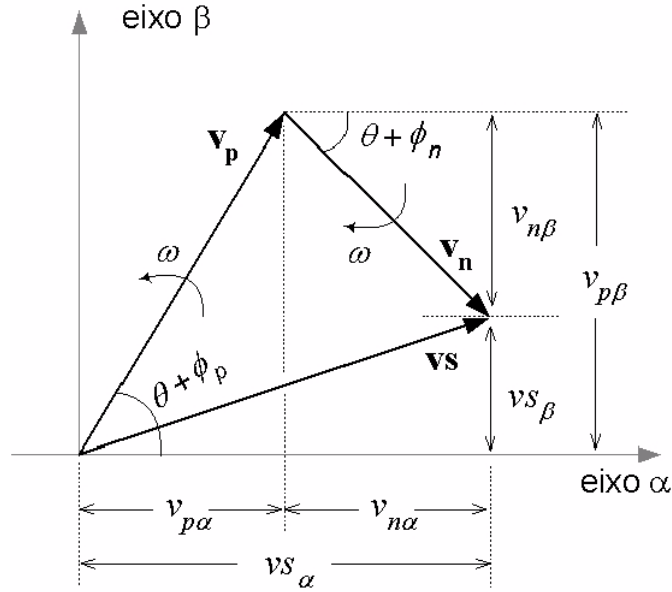


Figura 4.8. Componentes de seqüência no eixo $\alpha\beta$.

Definindo as magnitudes dos vetores de seqüência positiva e negativa como sendo v_p e v_n , respectivamente, tem-se a partir da Fig. 4.8:

$$v_{s\alpha} = v_p \cos(\theta + \phi_p) + v_n \cos(\theta + \phi_n), \quad (4.8)$$

$$v_{s\beta} = v_p \sin(\theta + \phi_p) - v_n \sin(\theta + \phi_n), \quad (4.9)$$

sendo ϕ_p , ϕ_n os ângulos de fase iniciais dos vetores \mathbf{v}_p , \mathbf{v}_n e $\theta = \omega t$. Expandindo cossenos e senos nas igualdades (4.8) e (4.9), tem-se:

$$v_{s\alpha} = (v_{p\alpha 0} + v_{n\alpha 0}) \cos(\omega t) + (-v_{p\beta 0} + v_{n\beta 0}) \sin(\omega t), \quad (4.10)$$

$$v_{s\beta} = (v_{p\beta 0} - v_{n\beta 0}) \cos(\omega t) + (v_{p\alpha 0} - v_{n\alpha 0}) \sin(\omega t), \quad (4.11)$$

sendo $v_{p\alpha 0} = v_p \cos \phi_p$, $v_{p\beta 0} = v_p \sin \phi_p$, $v_{n\alpha 0} = v_n \cos \phi_n$, $v_{n\beta 0} = v_n \sin \phi_n$. Rearrumando (4.10) e (4.11) em uma única igualdade, obtém-se:

$$(v_{s\alpha} + j v_{s\beta}) = (v_{p\alpha 0} + j v_{p\beta 0}) e^{j\omega t} + (v_{n\alpha 0} - j v_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}. \quad (4.12)$$

As equações (4.10) e (4.11) podem ser resolvidas utilizando a estimação de mínimos quadrados recursivo ponderado. Este procedimento utiliza a estimação prévia dos parâmetros e amostras atuais de vs_α e vs_β para atualizar a estimativa. As primeiras estimativas não são precisas. Após algumas amostras, a estimação tem praticamente erro nulo. Como uma outra alternativa, a detecção das fases bem como as frequências das componentes poderiam ser determinadas por meio de um algoritmo de PLL como apresentado em (NAIDU; FERNANDES, 2004).

A seguir, serão descritos os procedimentos para estimação dos parâmetros do caso em questão.

Estimação por Mínimos Quadrados Recursivo Ponderado

Vislumbrando a possibilidade de surgir componentes constantes nas tensões medidas, as equações dadas em (4.10) e (4.11) podem ser reescritas da seguinte forma:

$$vs_\alpha = X_0 + X_1 \cos(\omega t) + X_2 \sin(\omega t), \quad (4.13)$$

$$vs_\beta = Y_0 + Y_1 \cos(\omega t) + Y_2 \sin(\omega t), \quad (4.14)$$

sendo X_0 e Y_0 termos constantes, $X_1 = (v_{p\alpha 0} + v_{n\alpha 0})$, $X_2 = (-v_{p\beta 0} + v_{n\beta 0})$, $Y_1 = (v_{p\beta 0} - v_{n\beta 0})$, $Y_2 = (v_{p\alpha 0} - v_{n\alpha 0})$, $t = 0, T_s, 2T_s, \dots, nT_s$ e T_s o período de amostragem. Denominando $\theta_s = \omega T_s$, as equações (4.13) e (4.14) produzem um conjunto de equações que podem ser escritas na forma matricial como segue:

$$\begin{bmatrix} vs_\alpha(0) \\ vs_\alpha(T_s) \\ vs_\alpha(2T_s) \\ \vdots \\ vs_\alpha(nT_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\theta_s) & \text{sen}(\theta_s) \\ 1 & \cos(2\theta_s) & \text{sen}(2\theta_s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(n\theta_s) & \text{sen}(n\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_0 \\ X_1 \\ X_2 \end{bmatrix}, \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} vs_\beta(0) \\ vs_\beta(T_s) \\ vs_\beta(2T_s) \\ \vdots \\ vs_\beta(nT_s) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & \cos(\theta_s) & \text{sen}(\theta_s) \\ 1 & \cos(2\theta_s) & \text{sen}(2\theta_s) \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & \cos(n\theta_s) & \text{sen}(n\theta_s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_0 \\ Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix}. \quad (4.16)$$

que simplificando tomam o seguinte formato:

$$\mathbf{vs}_\alpha = \mathbf{C} \cdot \mathbf{X}, \quad (4.17)$$

$$\mathbf{vs}_\beta = \mathbf{C} \cdot \mathbf{Y}. \quad (4.18)$$

A determinação de $\mathbf{X} = [X_0 \ X_1 \ X_2]$ e $\mathbf{Y} = [Y_0 \ Y_1 \ Y_2]$ é realizada por meio do método mínimos quadrados recursivo. É importante notar que as matrizes de regressores nas equações (4.15) e (4.16) são idênticas. Como resultado, a solução destas equações requer um cálculo de matrizes de ganho e covariância comuns (NORTON, 1986).

O algoritmo para esta estimação está descrito a seguir (FERNANDES; NAIDU; COURAJR, 2008):

1. Definir inicialmente $\mathbf{X} = \mathbf{0}$ e $\mathbf{Y} = \mathbf{0}$; a matriz de covariância $\mathbf{P} = N \mathbf{I}$, sendo \mathbf{I} uma matriz identidade 3x3 e N um número grande o suficiente. Nas aplicações utilizadas neste trabalho, é razoável escolher $N = 100$.

2. Fazer j variar de 1 até n :

(a) Escrever o vetor de regressores $\mathbf{H} = [1 \ \cos \theta \ \sin \theta]$, sendo $\theta = (j - 1)\theta_s$;

(b) Calcular o escalar $r = 1 + \mathbf{H} \mathbf{P} \mathbf{H}'$, sendo \mathbf{H}' o transposto de \mathbf{H} ;

(c) Calcular a matriz de ganho $\mathbf{K} = \frac{1}{r} \mathbf{P} \mathbf{H}'$. A dimensão de \mathbf{K} é 3x1;

(d) Calcular \mathbf{X} e \mathbf{Y} :

$$\mathbf{X} = \mathbf{X} + (vs_\alpha - \mathbf{H} \mathbf{X}) \mathbf{K},$$

$$\mathbf{Y} = \mathbf{Y} + (vs_\beta - \mathbf{H} \mathbf{Y}) \mathbf{K};$$

(e) Calcular a partir de $\mathbf{X} = [X_0 \ X_1 \ X_2]'$ e $\mathbf{Y} = [Y_0 \ Y_1 \ Y_2]'$:

$$v_{p\alpha 0} = v_p \cos \phi_p = \frac{1}{2} (X_1 + Y_2), \quad v_{p\beta 0} = v_p \sin \phi_p = \frac{1}{2} (Y_1 - X_2),$$

$$v_{n\alpha 0} = v_n \cos \phi_n = \frac{1}{2} (X_1 - Y_2), \quad v_{n\beta 0} = v_n \sin \phi_n = -\frac{1}{2} (Y_1 + X_2).$$

(f) Atualizar a matriz de covariância:

$$\mathbf{P} = \frac{1}{\lambda} \{\mathbf{P} - \mathbf{K} \mathbf{H} \mathbf{P}\}.$$

A constante λ é o fator de esquecimento e introduz um peso maior às amostras mais recentes. Valores típicos para λ variam entre 0,95 e 0,99. Neste trabalho foi configurado para 0,95.

As fases ϕ_p e ϕ_n são as fases iniciais dos vetores \mathbf{v}_p e \mathbf{v}_n , e ainda podem ser determinadas com este procedimento, bastando tomar as variáveis do passo (e), da seguinte forma:

$$v_{p\alpha} = v_p \cos(\theta + \phi_p) = v_p \cos\phi_p \cos\theta - v_p \sen\phi_p \sen\theta, \quad (4.19)$$

$$v_p \cos(\theta + \phi_p) = v_{p\alpha 0} \cos\theta - v_{p\beta 0} \sen\theta, \quad (4.20)$$

$$\cos(\theta + \phi_p) = (v_{p\alpha 0} \cos\theta - v_{p\beta 0} \sen\theta)/v_p. \quad (4.21)$$

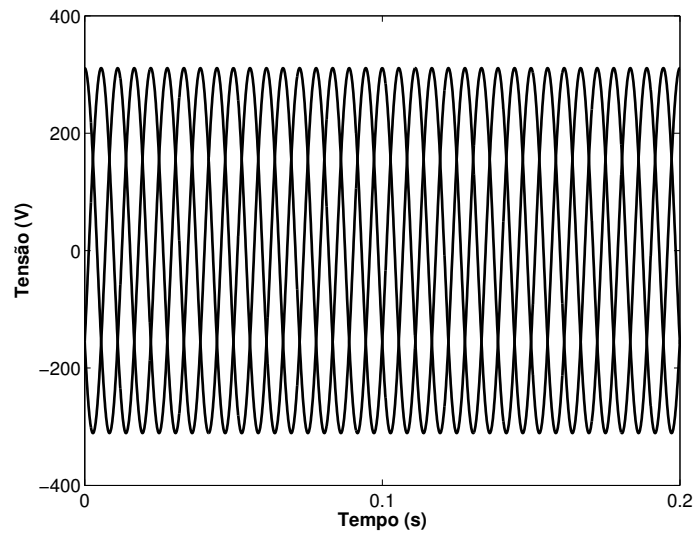
$$v_{p\beta} = v_p \sen(\theta + \phi_p) = v_p \sen\phi_p \cos\theta + v_p \cos\phi_p \sen\theta, \quad (4.22)$$

$$v_p \sen(\theta + \phi_p) = v_{p\beta 0} \cos\theta + v_{p\alpha 0} \sen\theta, \quad (4.23)$$

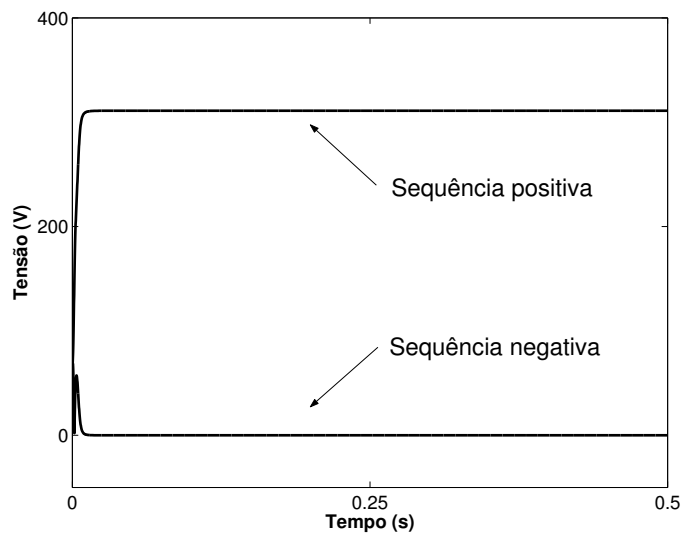
$$\sen(\theta + \phi_p) = (v_{p\beta 0} \cos\theta + v_{p\alpha 0} \sen\theta)/v_p, \quad (4.24)$$

sendo $v_p = \sqrt{v_{p\alpha 0}^2 + v_{p\beta 0}^2}$. A magnitude de \mathbf{v}_n é obtida de forma semelhante: $v_n = \sqrt{v_{n\alpha 0}^2 + v_{n\beta 0}^2}$.

Estando de posse dos parâmetros X_1, X_2, Y_1, Y_2 a cada instante de amostragem, tem-se as componentes de sequência $(v_{p\alpha} + j v_{p\beta})$ e $(v_{n\alpha} - j v_{n\beta})$ imediatamente. Para verificação da técnica em um programa computacional implementado em Matlab, considera-se inicialmente tensões trifásicas geradas sinteticamente, sem qualquer tipo de desequilíbrio. Por exemplo, considerando tensões trifásicas de 220 V RMS por fase (Fig.4.9(a)), a Fig. 4.9(b) mostra o cálculo da magnitude destas componentes instantaneamente. A sequência positiva calculada é de aproximadamente 311 V (valor de pico em cada fase) e 0 V para a sequência negativa, os quais são os valores esperados. Observa-se que existe um pequeno transitório, mas com duração de aproximadamente 80 períodos de amostragem. Esta quantidade de amostras equivalem a 8 ms de tempo, o qual é adequado para ser utilizado no sistema DVR, uma vez que as normas e recomendações descrevem o fenômeno de afundamento de tensão estando o



(a)



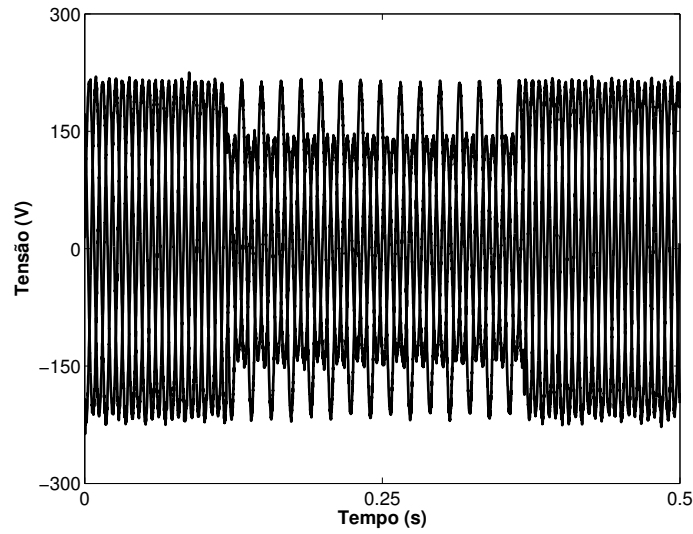
(b)

Figura 4.9. Decomposição instantânea em componentes de sequência. (a) Tensões trifásicas equilibradas; (b) Componentes positiva e negativa.

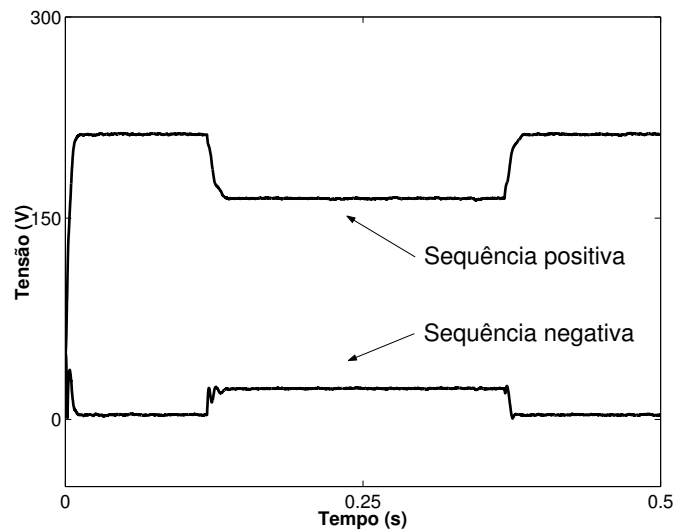
distúrbio em um intervalo de meio ciclo (aproximadamente 8,3 ms para uma onda de 60 Hz) a 1 min (IEEE 1159, 1995).

Agora, utilizando um sinal medido e desequilibrado a partir de uma fonte de tensão programável (California Instruments, modelo 3000Lx) como mostrado na Fig.4.10(a), é possível constatar novamente que as sequências positiva e negativa são estimadas, inclusive durante o

afundamento (Fig. 4.10(b)). As tensões sem variações correspondem a 150 V RMS e durante



(a)



(b)

Figura 4.10. Decomposição instantânea em componentes de sequência. (a) Tensões trifásicas com afundamentos em duas fases; (b) Componentes positiva e negativa.

a ocorrência da perturbação, duas fases são afundadas para 100 V RMS. Este tipo de afundamento pode representar uma falta fase-fase. Para comprovar a veracidade dos valores calculados instantaneamente nas Figs. 4.9(b) e 4.10(b), é possível determiná-los algebricamente

a partir da matriz de Fortescue durante o afundamento, a partir da transformação (4.25):

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_0 \\ \mathbf{v}_p \\ \mathbf{v}_n \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{v}_a \\ \mathbf{v}_b \\ \mathbf{v}_c \end{bmatrix}, \quad (4.25)$$

sendo \mathbf{v}_0 , \mathbf{v}_p e \mathbf{v}_n os fasores de sequência zero, positiva e negativa, respectivamente, \mathbf{v}_a , \mathbf{v}_b e \mathbf{v}_c os fasores correspondentes às tensões de fase, e $a = e^{j120^\circ}$.

No caso da Fig. 4.9(b), de fato não existe a necessidade de determiná-los algebricamente pois tratando-se de um equilíbrio, a componente positiva tem valor de aproximadamente 311 V, que é o valor de pico para uma fase de 220 V RMS, e zero para a negativa. No caso da Fig. 4.10(b), na determinação da componente positiva, calcula-se o valor de $\frac{7}{9} V_{pico}$ durante o afundamento, sendo V_{pico} a amplitude máxima antes da ocorrência do afundamento. Antes da ocorrência, o valor era de 150 V RMS (aprox. $212 V_{pico}$). Então, 165 V é o valor calculado. De forma semelhante é feito para a componente negativa. Durante o afundamento, calcula-se $\frac{1}{9} V_{pico}$, que equivale a aprox. 23,6 V. A partir das figuras, estes mesmos valores calculados são observados. Antes e depois do afundamento, as tensões são equilibradas e a componente positiva e negativa valem 212 V e 0 V, respectivamente. Ainda neste mesmo exemplo, as componentes positiva e negativa no eixo α - β que foram estimadas têm as curvas como mostrado na Fig. 4.11.

A Figura 4.12 ilustra dois gráficos que representam dois momentos das tensões trifásicas mostradas na Fig. 4.10(a); os intervalos sem e com afundamentos. A curva desenhada no gráfico 4.12(a) representam os vetores quando não existe o afundamento. Pode-se observar que o desenho se aproxima de uma circunferência, a qual seria o desenho ideal. Isto é uma característica da representação vetorial de tensões trifásicas equilibradas, diferente do que apresenta a curva do gráfico 4.12(b), que tem o formato de uma elipse em virtude do surgimento do desequilíbrio. Esta curva é desenhada a partir de vetores formados com amostras durante a ocorrência do afundamento. A análise separada das componentes positiva e negativa mostra que as amplitudes antes e durante o afundamento são constantes, mas com valores diferentes. A vantagem de se controlar estas grandezas separadas em componentes é que a injeção de tensão tem o mesmo nível para as três fases na componente positiva,

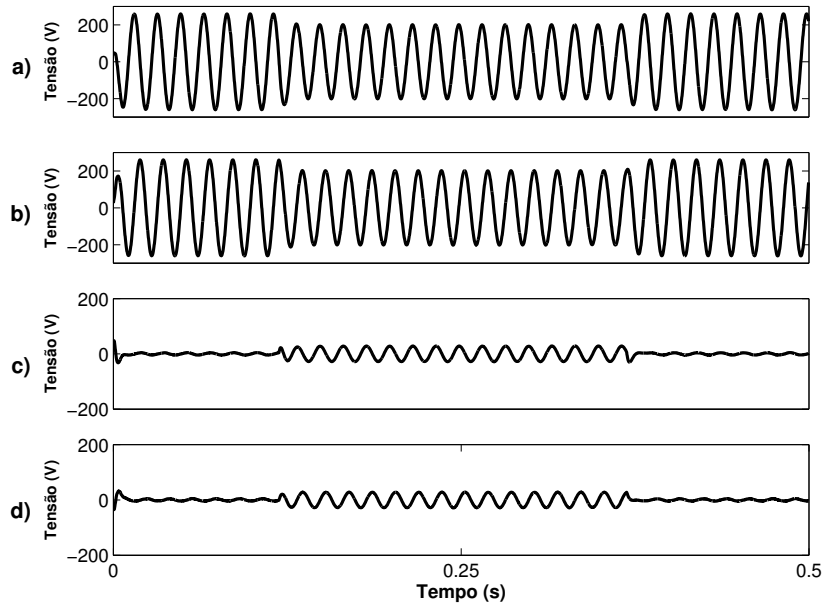
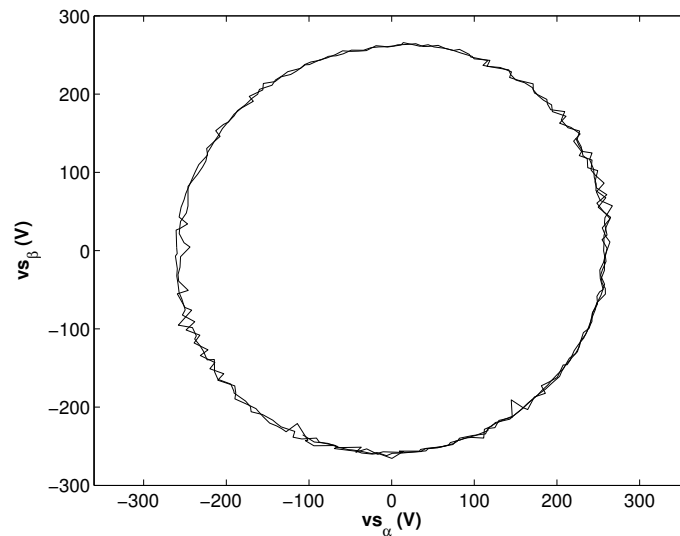


Figura 4.11. Componentes estimadas. (a) $vs_{p\alpha}$; (b) $vs_{p\beta}$; (c) $vs_{n\alpha}$; (d) $vs_{n\beta}$.

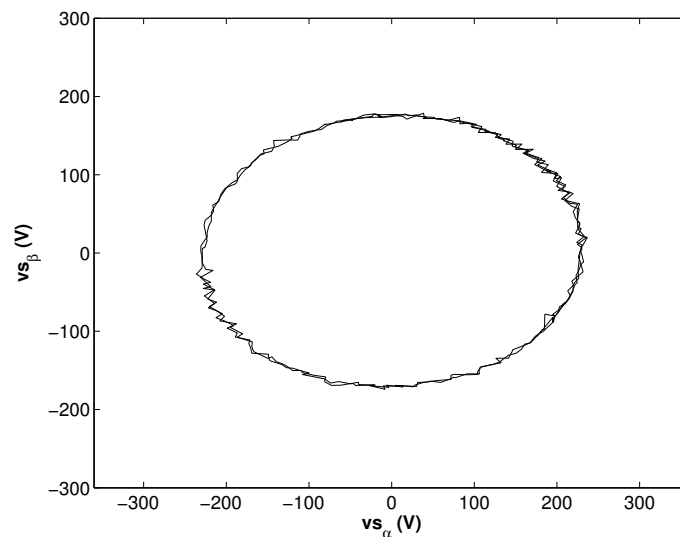
e um outro nível de tensão mas igual para as três fases da componente negativa. Sendo assim, determina-se estes níveis como mostrado na Fig. 4.10(b) para que em seguida sejam comparados com valores de referência pré-estabelecidos.

Uma outra comparação a ser considerada é em relação à extração das componentes de sequência a partir do uso de filtros. Dadas as tensões da Fig. 4.10(a) na ordem abc, pode-se, inicialmente, transformá-las em componentes dq por meio da transformação de eixos. Definidas as componentes v_d e v_q , a filtragem é realizada em v_d com o objetivo de extrair sua parcela c.c. Esta parcela define a amplitude da componente positiva. A amplitude da negativa é extraída a partir da filtragem da componente c.c. de v_d com as tensões trifásicas estando na ordem cba. As Figuras 4.13(a) e 4.13(b) mostram as tensões v_d extraídas das tensões trifásicas abc e cba. Para efeito de verificação, apenas a componente positiva será extraída.

Inicialmente, utilizam-se filtros de 1ª e 2ª ordens com frequência de corte de 50 Hz. Os resultados das filtrações da tensão da Fig. 4.13(a) estão mostrados nas Figs. 4.14(a) e 4.14(b). Uma outra frequência de corte, 100 Hz, também é utilizada com os mesmos dois filtros. Os resultados estão mostrados nas Figs. 4.15(a) e 4.15(b).



(a)



(b)

Figura 4.12. Vetores da rede trifásica no plano $\alpha\beta$. (a) Antes do afundamento. (b) Durante afundamento.

Como pode ser observado na Fig. 4.14(a), o tempo para alcançar o regime permanente é de aproximadamente 100 ms. Com a frequência de 100 Hz, este tempo cai para aproximadamente 60 ms, como observado na Fig 4.15(a). Estas faixas de tempo são elevadas para iniciar o processo de correção das VTCDs, pois estes eventos são caracterizados a partir de 8,3 ms (meio ciclo de 60 Hz) pela maioria das normas. Para o caso do filtro de 2^a ordem, o tempo

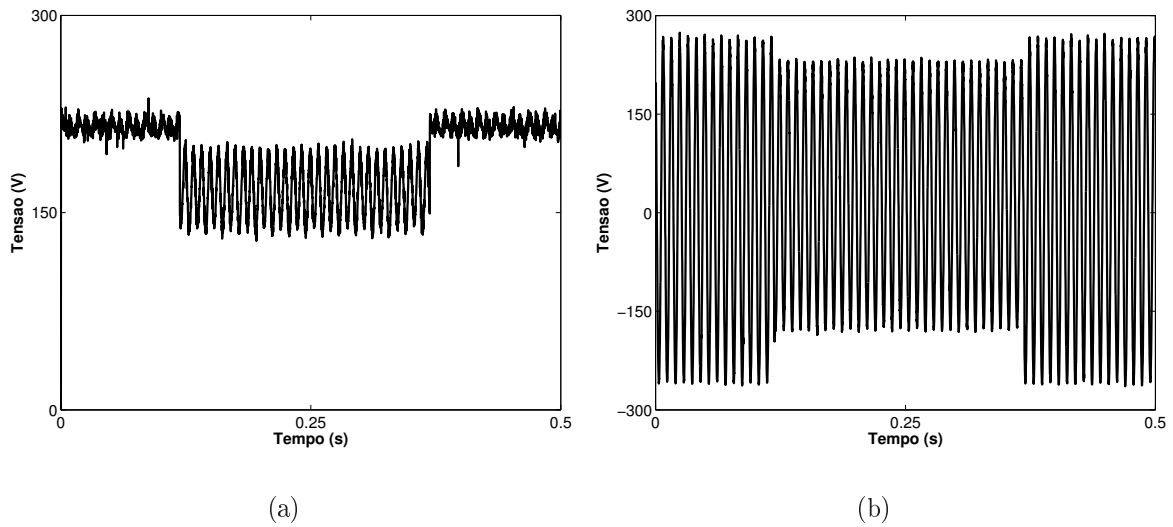


Figura 4.13. Tensão v_d . (a) abc; (b) cba.

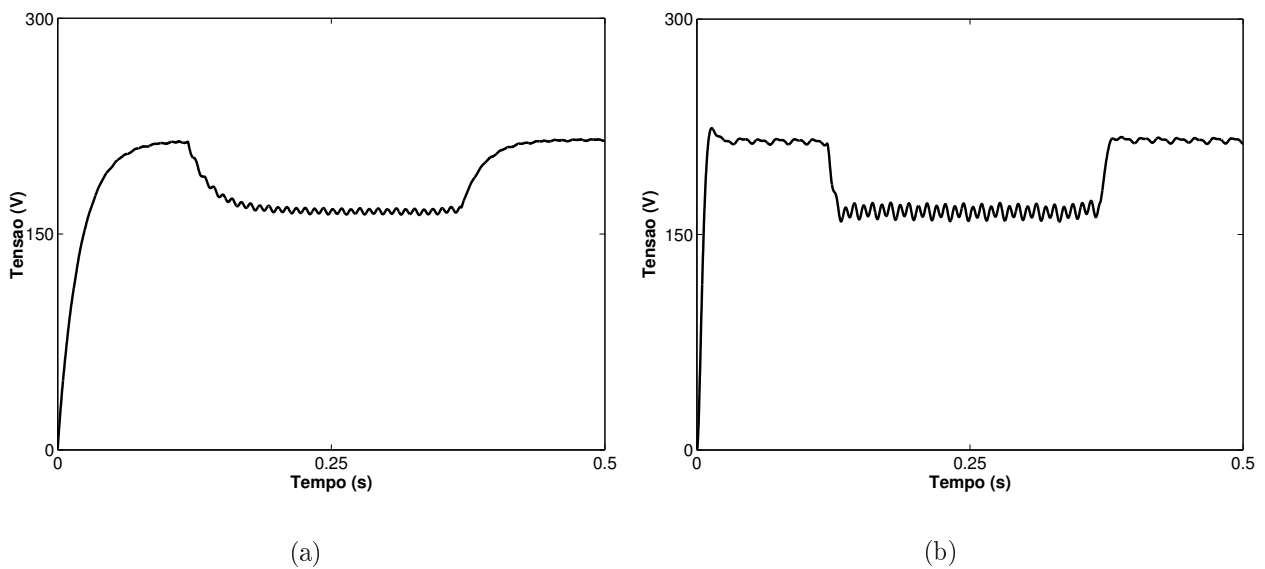


Figura 4.14. Filtragem da componente d de tensão com frequência de corte de 50 Hz. (a) Filtro de 1ª ordem; (b) Filtro de 2ª ordem.

de assentamento na ocorrência do afundamento e na recuperação da tensão ao valor nominal é reduzido para aproximadamente 15 ms na frequência de 50 Hz (Fig. 4.14(b)). O tempo de assentamento é mais adequado no caso mostrado na Fig.4.15(b) (freq. 100 Hz), com valor de aproximadamente 8 ms. No entanto, a filtragem não elimina todas as parcelas indesejadas e assim, permanece com oscilações durante toda a faixa de tempo, mais intensificada na

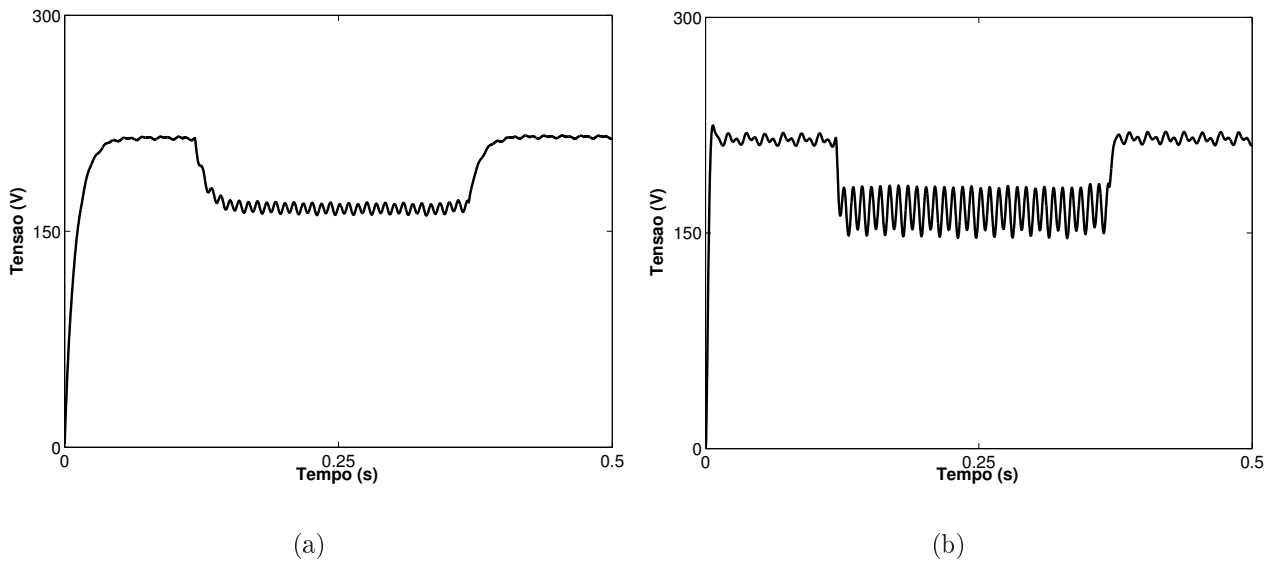


Figura 4.15. Filtragem da componente d de tensão com frequência de corte de 100 Hz. (a) Filtro de 1^a ordem; (b) Filtro de 2^a ordem.

ocorrência do afundamento, não sendo, portanto, uma boa escolha para a determinação da intensidade das componentes de tensão.

4.2.2 Sistema de controle proposto

Em sistemas trifásicos, as vantagens de se utilizar eixos síncronos são bem conhecidas. No controle de vetores de variáveis c.a. (tensão, corrente, fluxo), as análises são feitas a partir de um eixo síncrono na frequência fundamental de saída. Neste eixo, as quantidades c.a. tornam-se constantes e podem ser reguladas para um erro zero em regime permanente. Em sistemas com referências constantes, um PI pode ser utilizado no controle de tal propósito.

Como o controle utilizado será baseado em componentes d e q para cada sequência (positiva, negativa) e a zero individualmente, deve-se desenvolver as equações que definem a planta deste sistema de controle, e posteriormente, definir os controladores. Para tanto, baseado na estrutura do DVR mostrada na Fig.4.2, as seguintes equações em coordenadas

de fase podem ser obtidas:

$$\begin{bmatrix} vi_a \\ vi_b \\ vi_c \end{bmatrix} = L_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} if_a \\ if_b \\ if_c \end{bmatrix} + r_f \begin{bmatrix} if_a \\ if_b \\ if_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} vc_a \\ vc_b \\ vc_c \end{bmatrix}, \quad (4.26)$$

$$\begin{bmatrix} if_a \\ if_b \\ if_c \end{bmatrix} = C_f \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} vc_a \\ vc_b \\ vc_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} il_a \\ il_b \\ il_c \end{bmatrix}, \quad (4.27)$$

$$\begin{bmatrix} vl_a \\ vl_b \\ vl_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} vs_a \\ vs_b \\ vs_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} vc_a \\ vc_b \\ vc_c \end{bmatrix}. \quad (4.28)$$

Aplicando as transformações $\alpha\beta 0$ para as equações (4.26) a (4.28), sem considerar neste momento a componente de sequência zero, tem-se:

$$(vi_\alpha + j vi_\beta) = L_f \frac{d}{dt} (if_\alpha + j if_\beta) + r_f (if_\alpha + j if_\beta) + (vc_\alpha + j vc_\beta), \quad (4.29)$$

$$(if_\alpha + j if_\beta) = C_f \frac{d}{dt} (vc_\alpha + j vc_\beta) + (il_\alpha + j il_\beta), \quad (4.30)$$

$$(vl_\alpha + j vl_\beta) = (vs_\alpha + j vs_\beta) + (vc_\alpha + j vc_\beta). \quad (4.31)$$

Cada variável complexa nas equações (4.29) a (4.31) é decomposta em um vetor de sequência positiva e um vetor de sequência negativa da seguinte forma (FERNANDES; NAIDU, 2008a):

$$x_\alpha + j x_\beta = (x_{p\alpha 0} + j x_{p\beta 0}) e^{j\omega t} + (x_{n\alpha 0} - j x_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}, \quad (4.32)$$

sendo ω a frequência angular da componente fundamental. Assim, os sistemas de equações são separados em dois conjuntos de equações que disponibilizam as sequências positiva e negativa.

Aplicando esta transformação em cada variável complexa da equação (4.29), obtém-se:

$$\begin{aligned} [(vi_{p\alpha 0} + j vi_{p\beta 0}) e^{j\omega t} + (vi_{n\alpha 0} - j vi_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}] = \\ L_f \frac{d}{dt} [(if_{p\alpha 0} + j if_{p\beta 0}) e^{j\omega t} + (if_{n\alpha 0} - j if_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}] + \\ r_f [(if_{p\alpha 0} + j if_{p\beta 0}) e^{j\omega t} + (if_{n\alpha 0} - j if_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}] + \\ [(vc_{p\alpha 0} + j vc_{p\beta 0}) e^{j\omega t} + (vc_{n\alpha 0} - j vc_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}]. \quad (4.33) \end{aligned}$$

Para melhor entendimento, as componentes positiva e negativa serão analisadas separada-

mente da seguinte forma:

$$[(vi_{p\alpha 0} + j vi_{p\beta 0}) e^{j\omega t}] = L_f \frac{d}{dt} [(if_{p\alpha 0} + j if_{p\beta 0}) e^{j\omega t}] + r_f [(if_{p\alpha 0} + j if_{p\beta 0}) e^{j\omega t}] + [(vc_{p\alpha 0} + j vc_{p\beta 0}) e^{j\omega t}], \quad (4.34)$$

como sendo a componente positiva, e:

$$[(vi_{n\alpha 0} - j vi_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}] = L_f \frac{d}{dt} [(if_{n\alpha 0} - j if_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}] + r_f [(if_{n\alpha 0} - j if_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}] + [(vc_{n\alpha 0} - j vc_{n\beta 0}) e^{-j\omega t}], \quad (4.35)$$

como sendo a negativa.

Deve-se observar que a derivada de uma parcela do tipo $(x_{p\alpha 0} + j x_{p\beta 0}) e^{j\omega t}$ resulta em duas outras por se tratar da derivada de um produto, desta forma (para o caso da componente positiva):

$$[(vi_{p\alpha 0} + j vi_{p\beta 0}) e^{j\omega t}] = L_f \left[\frac{d}{dt} (if_{p\alpha 0} + j if_{p\beta 0}) e^{j\omega t} + j\omega (if_{p\alpha 0} + j if_{p\beta 0}) e^{j\omega t} \right] + r_f [(if_{p\alpha 0} + j if_{p\beta 0}) e^{j\omega t}] + [(vc_{p\alpha 0} + j vc_{p\beta 0}) e^{j\omega t}]. \quad (4.36)$$

Finalmente, esta equação é transformada para os eixos de rotação síncrono, com o eixo d alinhado com o vetor de tensão da rede de sequência positiva. A representação de (4.36) nos eixos dq é dada por:

$$(vi_{pd} + j vi_{pq}) = L_f \left[\frac{d}{dt} (if_{pd} + j if_{pq}) + j\omega (if_{pd} + j if_{pq}) \right] + r_f (if_{pd} + j if_{pq}) + (vc_{pd} + j vc_{pq}). \quad (4.37)$$

A representação da componente negativa de (4.35), também passa por um procedimento análogo ao da componente positiva, resultando em:

$$(vi_{nd} + j vi_{nq}) = L_f \left[\frac{d}{dt} (if_{nd} + j if_{nq}) + j\omega (if_{nd} + j if_{nq}) \right] + r_f (if_{nd} + j if_{nq}) + (vc_{nd} + j vc_{nq}). \quad (4.38)$$

A diferença está no fato de que para a determinação da equação (4.38), toma-se o conjugado das variáveis complexas para convertê-la em um sistema de sequência positiva equivalente,

e assim tornando-se possível utilizar um único sistema de controle para estas componentes. No caso do vetor conjugado da sequência negativa, o eixo d de outro par de eixos girantes é alinhado com este vetor. Sendo assim, ambos os vetores utilizados giram no sentido anti-horário.

O sistema de sequência positivo equivalente é desfeito após a etapa de controle, quando da passagem das componentes em dq para o tempo, mais precisamente com as variáveis em componentes $\alpha\beta$, onde as grandezas são reescritas fazendo o seu conjugado.

Neste instante, vale expor as equações nas duas sequências que ficaram faltando e considerando-as já no eixo dq. Estas equações são originadas a partir de (4.30) e (4.31).

$$(if_{pd} + j if_{pq}) = C_f \left[\frac{d}{dt} (vc_{pd} + j vc_{pq}) + j \omega (vc_{pd} + j vc_{pq}) \right] + (il_{pd} + j il_{pq}), \quad (4.39)$$

$$(if_{nd} + j if_{nq}) = C_f \left[\frac{d}{dt} (vc_{nd} + j vc_{nq}) + j \omega (vc_{nd} + j vc_{nq}) \right] + (il_{nd} + j il_{nq}), \quad (4.40)$$

e ainda:

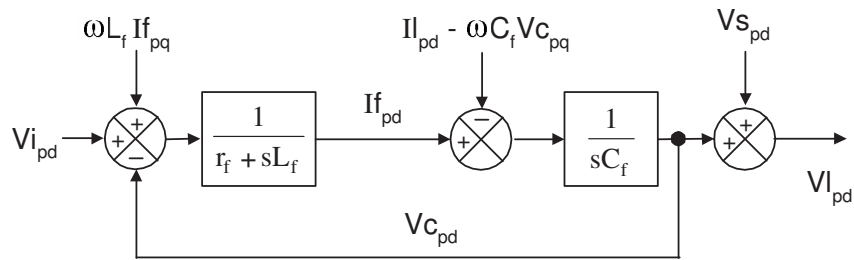
$$(vl_{pd} + j vl_{pq}) = (vs_{pd} + j 0) + (vc_{pd} + j vc_{pq}), \quad (4.41)$$

$$(vl_{nd} + j vl_{nq}) = (vs_{nd} + j 0) + (vc_{nd} + j vc_{nq}). \quad (4.42)$$

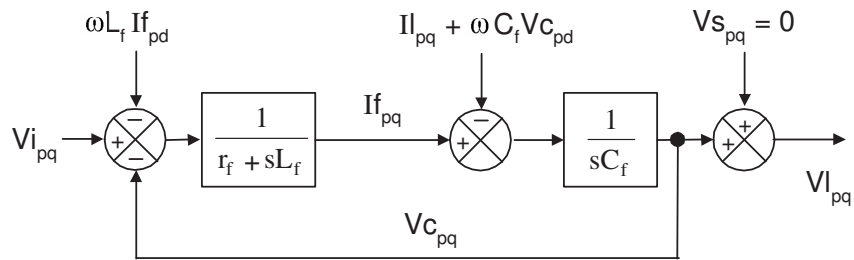
O procedimento para obtê-las é idêntico ao que foi mostrado anteriormente.

A partir das equações (4.37), (4.39) e (4.41), é possível construir o diagrama de blocos referente a planta do sistema com a componente positiva nos eixos dq (Fig. 4.16). O diagrama de blocos para a sequência negativa é obtido a partir das equações (4.38), (4.40) e (4.42) e é mostrado na Fig. 4.17. É importante notar que os termos de acoplamento cruzado aparecem no diagrama de blocos, ou seja, componentes de eixo q aparecem no diagrama do eixo d e vice-versa.

Uma vez definidas as equações da planta do sistema DVR, o controle é apresentado como dois controladores, um proporcional (P) e outro proporcional-integral (PI) já discutido anteriormente. A Figura 4.18 mostra o diagrama de blocos do sistema de controle para a sequência positiva.



(a)



(b)

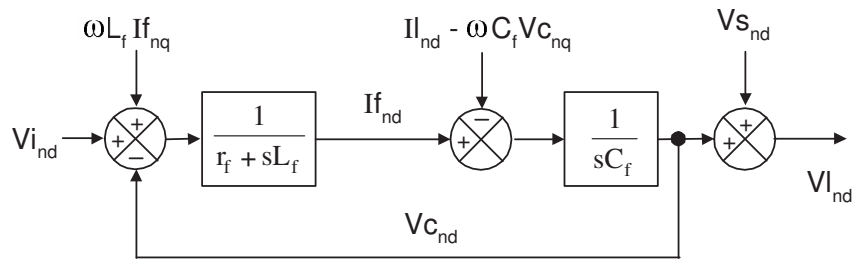
Figura 4.16. Diagrama de blocos de seqüência positiva para a planta. (a) eixo d; (b) eixo q.

Assim como para o diagrama de blocos da planta, o sistema de controle completo de seqüência negativa é igual ao da positiva, uma vez que a consideração do conjugado foi levada em conta. A diferença estão nas grandezas de entrada e saída dos blocos, que certamente correspondem à seqüência negativa. Este diagrama de blocos está mostrado na Fig. 4.19.

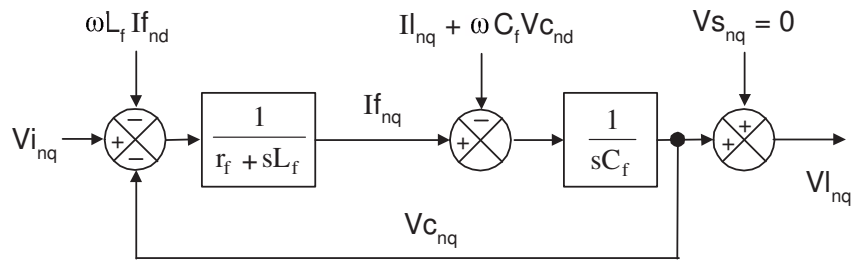
A tensão de carga é regulada pelo laço externo com o controlador proporcional. A referência de seqüência positiva de eixo d é o valor nominal da tensão de carga. O valor de referência para o eixo q é zero.

As equações que formulam as componentes de seqüência zero não aparecem com termos de acoplamento. No entanto, o diagrama de blocos referente ao seu controle tem os mesmos parâmetros das outras duas componentes. A Figura 4.20 mostra o diagrama de blocos para esta seqüência.

Os valores dos parâmetros para a planta e os controladores estão apresentados na Tabela 4.1.



(a)



(b)

Figura 4.17. Diagrama de blocos de sequência negativa para a planta. (a) eixo d; (b) eixo q.

Os parâmetros dos controladores são determinados a partir da escolha das faixas de passagens

Tabela 4.1. Parâmetros do sistema

Parâmetros da planta	Parâmetros do controlador
$r_f = 0,776 \Omega$	$k_c = 8,5$
$L_f = 1,12 \text{ mH}$	$z_c = 4000$
$C_f = 7,5 \mu\text{F}$	$P = 0,012$

das malhas internas e externas, tomando como referência a frequência de chaveamento do conversor que é de 10 kHz. Sendo assim, a faixa de passagem do laço mais interno é determinada para 1700 Hz, a qual é aproximadamente $\frac{1}{6}$ da frequência de chaveamento. A faixa de passagem do laço mais externo é ajustada para 300 Hz.

A partir do diagrama de blocos do sistema de controle, as funções de transferência para

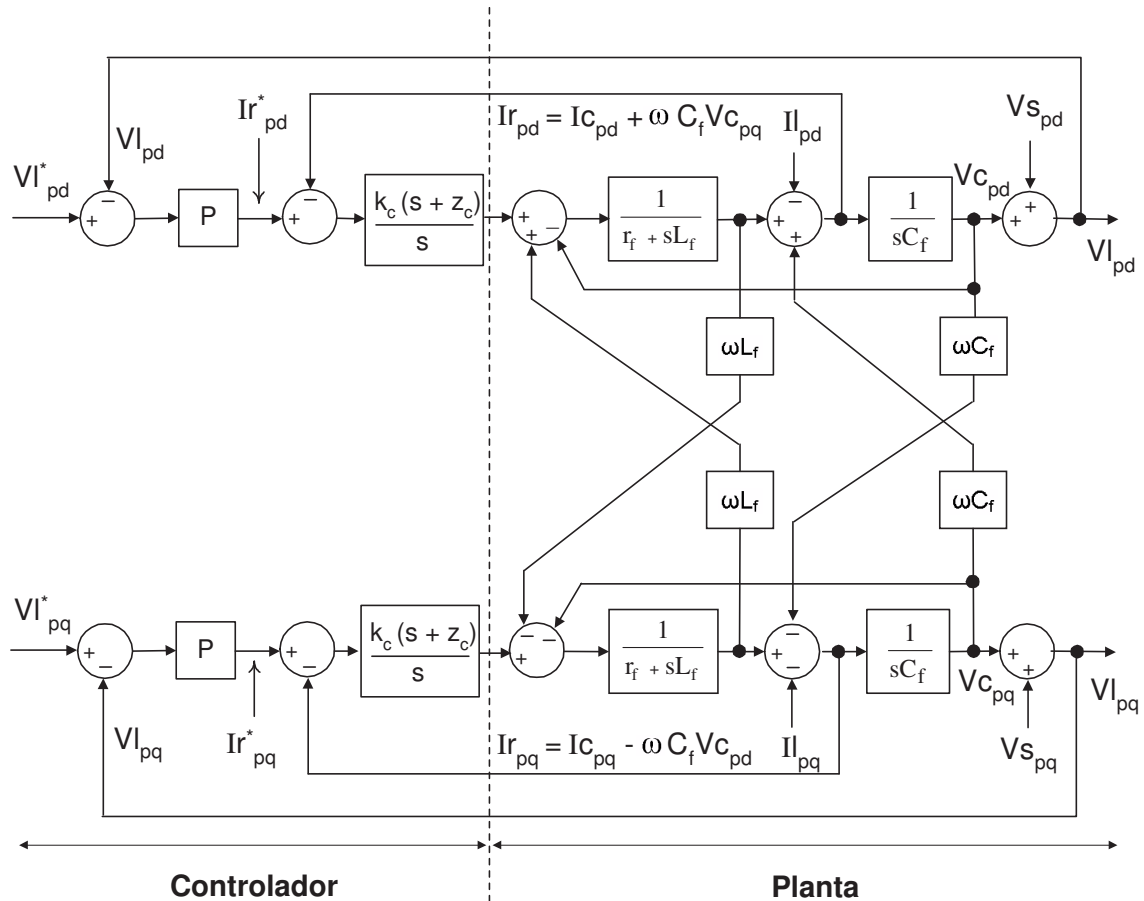


Figura 4.18. Sistema de controle de sequência positiva.

as componentes de eixo d são:

$$I r_d = \frac{k_c(s+z_c)}{s^2 L_f + s(r_f+k_c) + k_c z_c} I r_d^* + \frac{s \omega L_f}{s^2 L_f + s(r_f+k_c) + k_c z_c} I f_q - \frac{s(s L_f + r_f)}{s^2 L_f + s(r_f+k_c) + k_c z_c} (I l_d - \omega C_f V c_q), \quad (4.43)$$

$$V l_d = \frac{P k_c(s+z_c)}{D(s)} V l_d^* + \frac{s \omega L_f}{D(s)} I f_q - \frac{s(s L_f + r_f)}{D(s)} (I l_d - \omega C_f V c_q) + \frac{d(s)}{D(s)} V s_d, \quad (4.44)$$

sendo $d(s) = s^3 L_f C_f + s^2 (r_f + k_c) C_f + s k_c z_c C_f$ e $D(s) = d(s) + P k_c (s + z_c)$.

Dadas as funções de transferência (4.43) e (4.44), as Figuras 4.21(a) e 4.21(b) mostram os diagramas de Bode com relações entrada/saída para $I r_d / I r_d^*$ e $V l_d / V l_d^*$.

Retomando as tensões trifásicas da Fig. 4.10(a) e considerando-as como sendo as tensões da rede com afundamento, pode-se observar as variáveis que compõem os sistemas de controle em malha fechada propostos, como mostrado na Fig. 4.22.

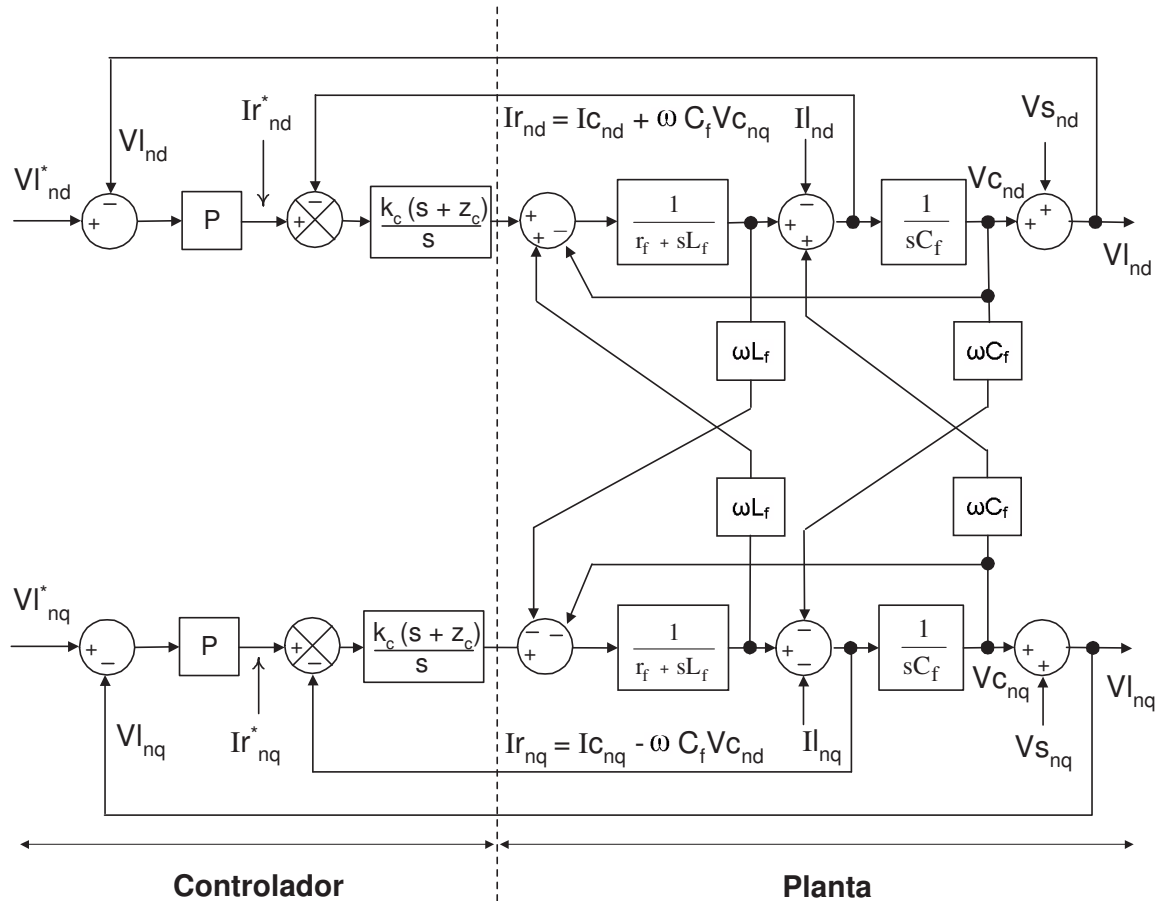


Figura 4.19. Sistema de controle de seqüência negativa.

Estes resultados são referentes ao controle de seqüência positiva. A tensão vc tanto de eixo d como q representa a tensão no capacitor, ou seja, o valor de tensão a ser injetado na rede, enquanto vl representa a tensão na carga. O valor elevado de tensão nos primeiros passos de tempo na Fig. 4.22(a) é devido às condições iniciais nulas, não se repetindo nos períodos seguintes. A mesma situação acontece para as demais três figuras. A Figura 4.22(b) representa o objetivo de controle, que é manter a amplitude de tensão constante na carga. As pequenas variações na amplitude são atenuadas quando a tensão é de fato reconstituída, ou seja, quando o módulo da variável é determinado a partir das componentes d e q . Por exemplo, o módulo da tensão injetada pelo DVR é $vc = \sqrt{vc_d^2 + vc_q^2}$. Esta mesma observação é válida também para o que aparece nas Figs. 4.22(c) e 4.22(d). Nestas duas figuras, o nível de tensão é zero porque o vetor de seqüência positiva foi colocado em fase com o eixo girante d .

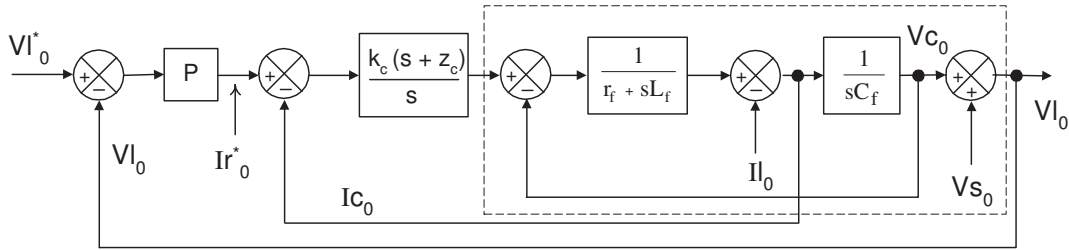
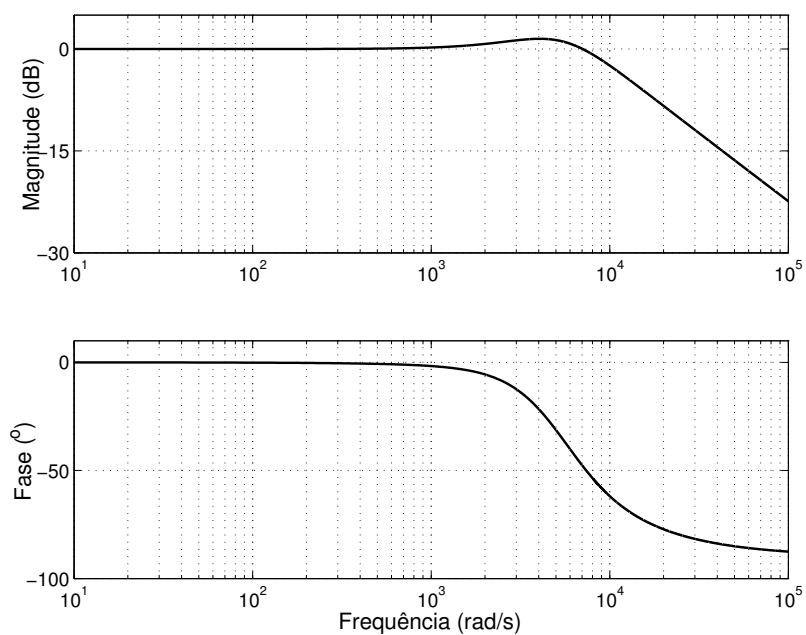


Figura 4.20. Sistema de controle de sequência zero.

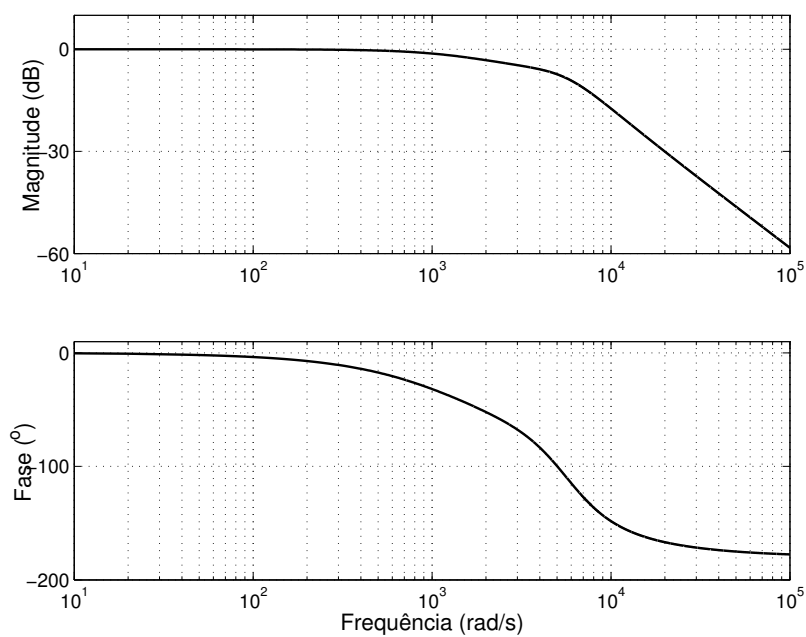
As variáveis mostradas na Fig. 4.23 fazem parte do sistema de controle de sequência negativa. As Figuras 4.23(a) e 4.23(c) representam as tensões a serem injetadas na rede. Como no caso da sequência positiva, o vetor girante de sequência negativa é colocado em fase com outro eixo girante d . Por isso, a curva da Fig. 4.23(c) permanece em torno de zero, que é a componente a ser injetada de eixo q . Pode-se observar ainda na Fig. 4.23(a) que durante o afundamento, a tensão é negativa. Isso faz parte da técnica de inserção da tensão negativa na rede, ou seja, o oposto do que é estimado para esta componente para anular a presença desta na carga a ser protegida. A tensão de sequência negativa na carga deve permanecer com valor zero, incluindo o intervalo do afundamento. Por isso, as curvas das Figs. 4.23(b) e 4.23(d) têm os valores apresentados. As pequenas variações que ocorrem durante o intervalo de tempo observado nestas quatro figuras acontecem pelos mesmos motivos da sequência positiva.

Para completar o sistema de controle, a Fig. 4.24 mostra variáveis do controle de sequência zero. Vale observar que estas curvas não são de amplitudes como no caso das sequências positiva e negativa. A Figura 4.24(a) mostra a tensão a ser injetada na rede pelo DVR (tensão no capacitor v_{c_0}), enquanto que a Fig. 4.24(b) é a tensão na carga. De fato, esta última deve ser nula pois a única componente que deve aparecer na carga é a positiva.

Para verificação do desempenho do sistema de controle foi realizada uma simulação de um caso de afundamento de tensão em uma rede trifásica, como mostrado na Fig. 4.25. As tensões da rede mostradas na Fig. 4.25(a) representam um afundamento desequilibrado durante 250 ms, e acontece com as três amplitudes diferentes: a fase “a” permanece intacta



(a)



(b)

Figura 4.21. Diagramas de Bode. (a) Função de transferência $I r_d / I r_d^*$; (b) Função de transferência $V l_d / V l_d^*$.

com 310 V de pico, a fase “b” tem afundamento de 210 V de pico e a fase “c”, 270 V. Pode ser observado também que a duração do transitório (da tensão de pré-afundamento

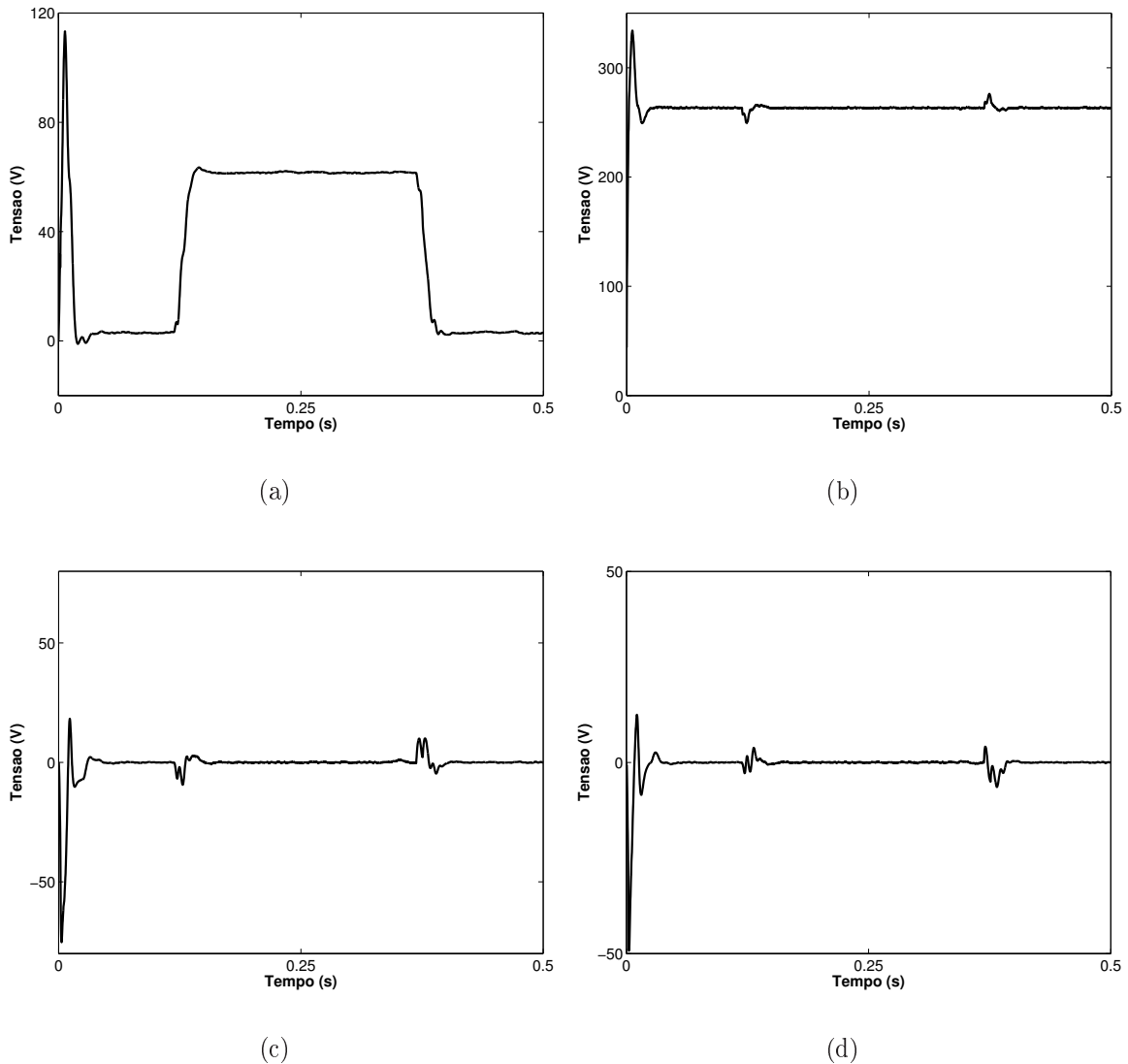


Figura 4.22. Variáveis do sistema de controle em malha fechada. (a) Amplitude da tensão no capacitor - eixo d ($v_{c_{pd}}$); (b) Amplitude da tensão na carga - eixo d ($v_{l_{pd}}$); (c) Amplitude da tensão no capacitor - eixo q ($v_{c_{pq}}$); (d) Amplitude da tensão na carga - eixo q ($v_{l_{pq}}$).

para o afundamento e do afundamento para o pós-afundamento) tem um valor representativo. Isto para representar uma condição diferente na avaliação do desempenho do DVR. A Figura 4.25(b) representa as tensões injetadas pelo DVR na rede após todo o processamento com as técnicas de controle, e posterior filtragem das tensões PWM. A Figura 4.25(c) representa as tensões corrigidas e que são entregues à carga. Como observado nesta figura, o resultado é satisfatório, uma vez que as amplitudes das tensões permanecem constantes e o sinal é equilibrado do começo ao fim da faixa de tempo.

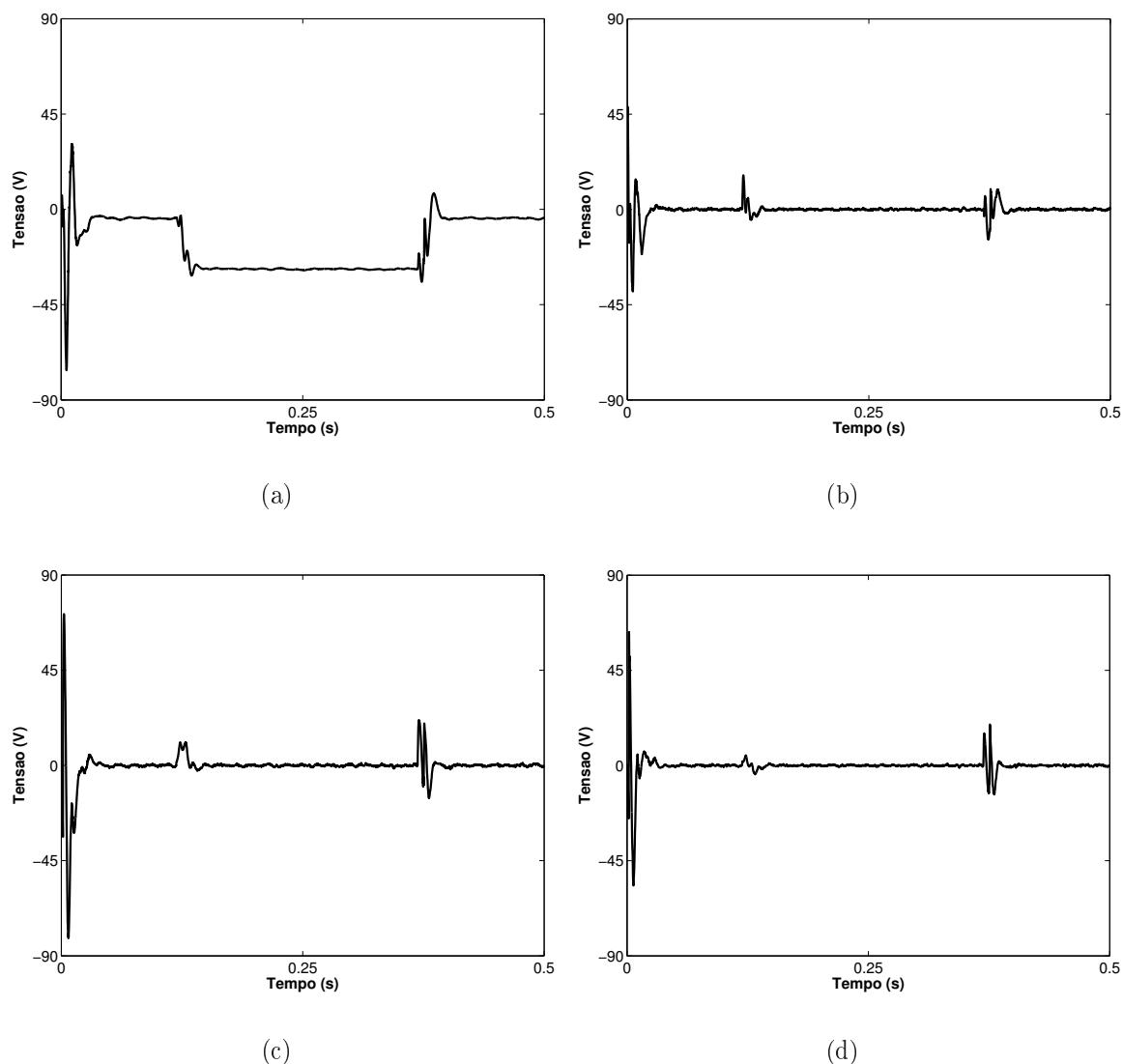


Figura 4.23. Variáveis do sistema de controle em malha fechada. (a) Amplitude da tensão no capacitor - eixo d (vc_{nd}); (b) Amplitude da tensão na carga - eixo d (vl_{nd}); (c) Amplitude da tensão no capacitor - eixo q (vc_{nq}); (d) Amplitude da tensão na carga - eixo q (vl_{nq}).

4.3 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o modelo para o restaurador dinâmico de tensão que será utilizado na plataforma experimental. A partir deste modelo, a planta do sistema ficou definida, e conseqüentemente, o controle em malha aberta.

A decomposição instantânea em componentes de sequência permite tratar individualmente cada uma destas componentes, e por serem tensões equilibradas, as técnicas de cor-

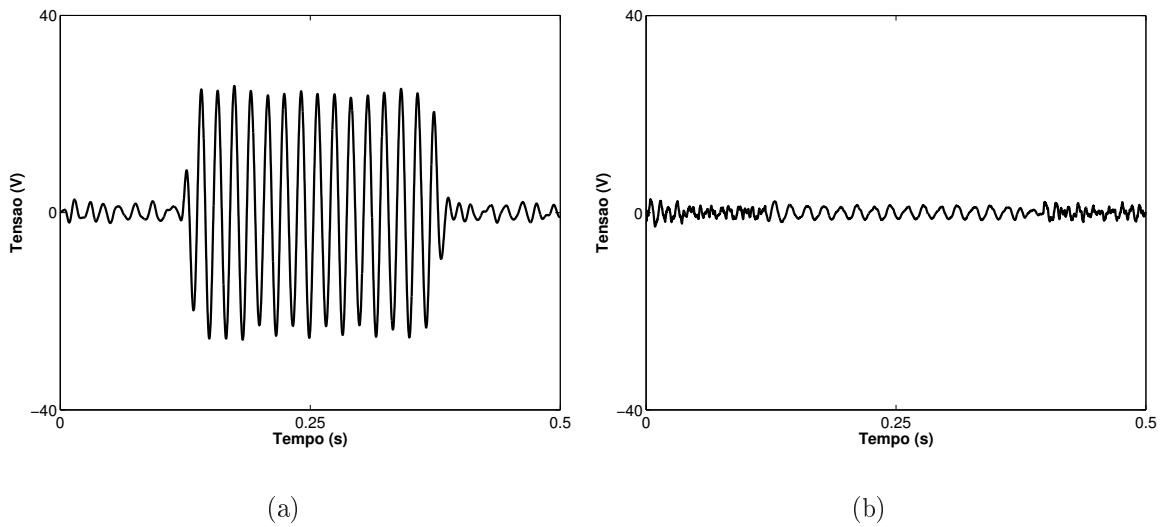


Figura 4.24. Variáveis do sistema de controle em malha fechada. (a) Tensão no capacitor - sequência zero (vc_0); (b) Tensão na carga - sequência zero (vl_0).

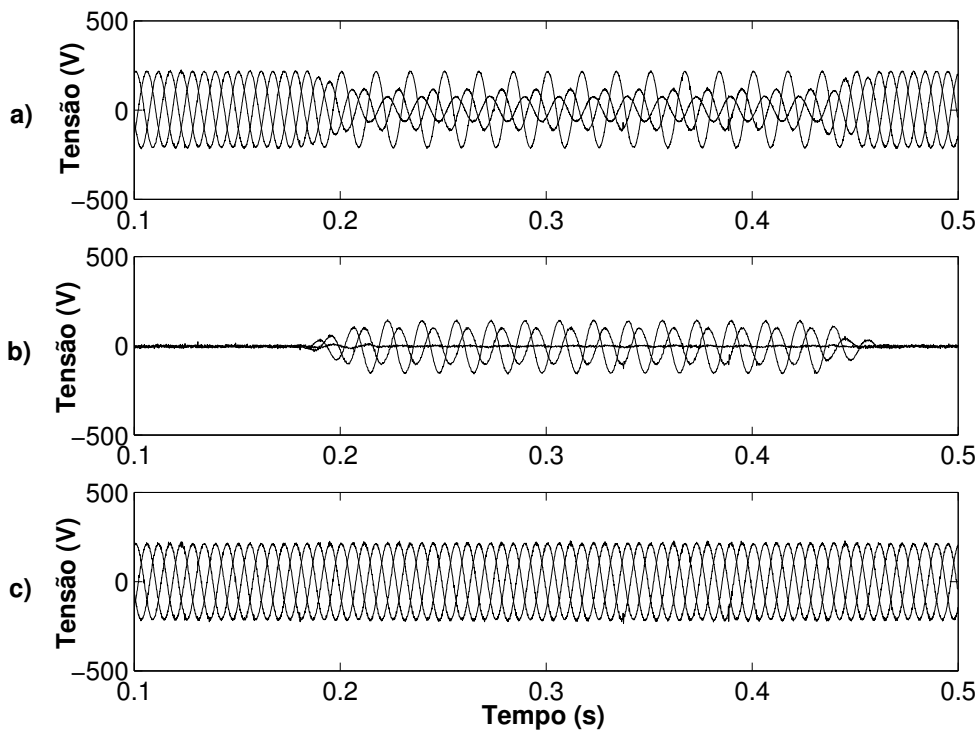


Figura 4.25. Resultado de simulação com uma carga resistiva trifásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

reção empregadas são facilitadas, já que as tensões a serem injetadas são as mesmas para as três fases de cada componente. Em relação à extração das componentes de sequência, filtros de 1ª e 2ª ordens foram analisados para comparação de desempenho com o processo de

estimação recursiva, proposto neste trabalho. Apesar dos filtros de 1ª ordem apresentarem ondulações de menor amplitude, o tempo de assentamento é elevado para atuar em um DVR. Enquanto que nos de 2ª ordem, o tempo de assentamento é adequado, mas no entanto, a amplitude de tensão estimada não condiz com o valor correto. Portanto, baseado nos resultados apresentados, a estimação recursiva é a técnica escolhida para a determinação das amplitudes das componentes positiva e negativa.

Com as duas malhas de realimentação e a inclusão do controlador proporcional e o proporcional-integral, o sistema em malha fechada foi definido. As variáveis associadas às realimentações tratam diretamente dos níveis de tensão a serem injetados na rede, e como pôde ser observado, este sistema de controle é utilizado para cada componente de sequência.

Resultados de simulação dos sistemas de controle em malha fechada foram apresentados, bem como um resultado para todo o sistema operando por completo. As tensões sobre a carga apresentaram os valores nominais de amplitude pré-afundamento durante toda a faixa de tempo. Resultados experimentais serão mostrados no capítulo 7, que é dedicado a este propósito.

INVERSORES DE TENSÃO EM RESTAURADORES DINÂMICOS DE TENSÃO

Um DVR tem maior flexibilidade quando é projetado para corrigir um afundamento que contém a componente de sequência zero. Geralmente, cargas industriais são conectadas por transformadores com ligações Δ -Y, os quais bloqueiam a propagação das componentes de sequência zero para o lado secundário. No entanto, existem sistemas que utilizam transformadores com ligações Y-Y com neutro aterrado. Estes transformadores permitem a propagação das componentes de sequência zero para a carga na ocorrência de faltas desequilibradas. Nesta situação, o DVR é requisitado para o controle das tensões de sequência positiva, negativa e zero aplicadas a carga durante faltas desequilibradas.

A geração de tensões desequilibradas por meio de inversores de tensão de 3 braços faz necessária uma ligação entre o neutro da carga e o ponto comum entre os capacitores do barramento c.c. do inversor de tensão (CAMPOS, 1994). Embora o controle deste inversor seja simples, uma importância especial deve ser dada ao equilíbrio das tensões do barramento c.c.

A partir de um inversor trifásico com quatro braços, também é possível gerar a tensão de sequência zero para corrigir o desequilíbrio da carga ou da fonte (ALI; KAZMIERKOWSKI, 1998; SHEN; LEHN, 2002; ZHANG; PRASAD; BOROYEVICH, 2002), e estes conversores são conhecidos por serem uma alternativa adequada para as condições de desequilíbrio (DONG; OJO, 2007).

Em (ZHANG; PRASAD; BOROYEVICH, 2002), é proposta uma estratégia de modulação PWM vetorial tridimensional (3D) para um inversor de 4 braços. Nesta técnica, os instantes de fechamento das chaves superiores são determinados após algumas etapas e o espaço no

qual o vetor de referência está localizado é dividido em 6 prismas. O prisma contendo o vetor de referência é identificado baseado na projeção deste vetor no plano $\alpha\beta$. Cada prisma é dividido em 4 tetraedros formados pelos vetores de estado. Os vetores de estado adjacentes são selecionados baseados nas polaridades das tensões de fase. O ciclo de trabalho é então calculado e para este propósito, uma tabela de 24 matrizes é determinada. Finalmente, os instantes de fechamento de cada chave são calculados baseados nos arranjos dos vetores de estado não nulos. Um esquema de modulação PWM vetorial tridimensional com um inversor de quatro braços semelhante à (ZHANG; PRASAD; BOROYEVICH, 2002) foi proposto em (SOUZA; SEVERO-MENDES; SEIXAS, 2007) com a vantagem da não necessidade de localização do vetor de referência nos tetraedros. Como pode ser observado, o algoritmo de modulação PWM vetorial 3D é mais complexo para implementação em um DSP.

Tentativas de utilizar a técnica de modulação vetorial PWM bidimensional em inversores de 4 braços foram apresentadas em (OJO; KSHIRSAGAR, 2004) e (KIM; SUL, 2004). Na primeira, os 16 vetores de estado que determinam os chaveamentos são divididos em 3 categorias: a primeira e a segunda categorias têm os mesmos componentes de eixo d e q. A terceira categoria consiste de dois vetores de estado que têm componentes de sequência zero de polaridades opostas e sem componentes de sequência positiva e negativa. A necessidade de determinar o setor onde a tensão de referência está localizada e as diferentes expressões da modulação necessárias para cada setor, demandam também um esforço computacional elevado para este esquema. Em (KIM; SUL, 2004), a técnica descrita é baseada numa portadora triangular, cuja implementação computacional em um DSP faz-se necessária o uso de um *hardware* exclusivo para esta implementação.

Este capítulo trata do DVR que utiliza um inversor de tensão de 4 braços e como será observado, a estratégia de modulação empregada para este inversor não é significativamente mais complexa do que para um inversor de 3 braços. Nesta estratégia, as tensões trifásicas instantâneas a serem geradas são decompostas em componentes de sequência positiva, negativa e zero. Os primeiros três braços são utilizados para gerar as componentes de sequência

positiva e negativa. O quarto braço é utilizado exclusivamente para gerar a componente de sequência zero.

A seguir, serão mostradas algumas topologias possíveis de serem utilizadas em inversores de tensão.

5.1 TOPOLOGIAS PARA O INVERSOR DE TENSÃO

O inversor de tensão é o principal dispositivo de um DVR e a escolha de uma topologia adequada é essencial para o bom desempenho do sistema. A análise das topologias do inversor tem sido limitada a incluir transformadores conectados a inversores com comutação forçada e topologias simétricas (NIELSEN; BLAABJERG, 2005). As topologias básicas de inversores são:

- Topologias de meia ponte.
- Topologias de ponte completa.
- Topologias multinível.

Os seguintes parâmetros foram incluídos na investigação e comparação de topologias individuais:

- A frequência de chaveamento, a qual influencia o tamanho do filtro.
- O número de dispositivos no caminho da corrente, os quais ocasionam perdas e quedas de tensão sobre o DVR.
- O número de dispositivos passivos e ativos com a intenção de se ter confiabilidade, baixos custo e complexidade no sistema.
- Levar em conta correntes e tensões de sequência zero. Como já mencionado, apenas um certo número de topologias pode realizar a compensação da tensão de sequência zero.

- Utilização da tensão do barramento c.c.

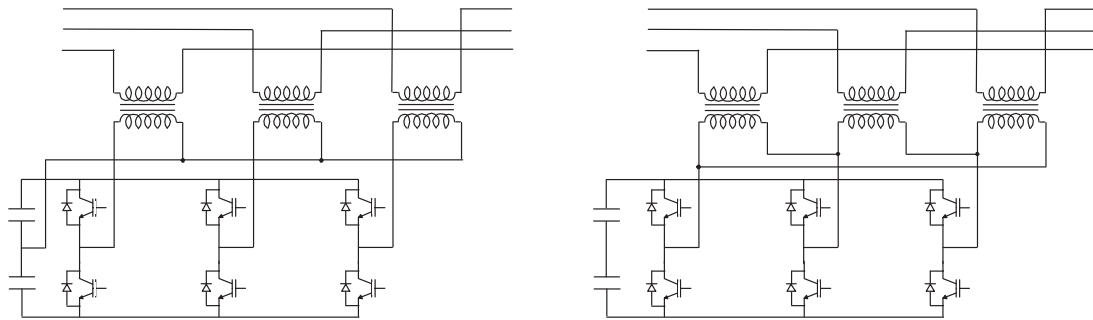
Estes parâmetros são bastante relevantes para aplicações de DVRs e podem ser avaliados para quatro topologias de inversores.

5.1.1 Inversor em Meia Ponte com Transformador Conectado em Estrela Aberto/Estrela - Topologia I

O inversor em meia ponte como ilustrado na Fig. 5.1(a) utiliza seis chaves para gerar as tensões trifásicas e existem três chaves no caminho da corrente. O inversor pode gerar somente dois níveis de tensão e o ponto central do barramento c.c. é conectado ao neutro dos transformadores para que seja possível injetar a componente de sequência zero no sistema. A tensão do barramento c.c. deve ser ativamente balanceada. Alguns trabalhos fazem uso desta configuração, como em (YAO; PHILIPS; NORUM, 1993; VILATHGAMUWA; PERERA; CHOI, 2002; ZHAN; ARULAMPALAM; JENKINS, 2003; MAREI; EL-SAADANY; SALAMA, 2007).

5.1.2 Inversor em Meia Ponte com Transformador Conectado em Estrela Aberto/Delta - Topologia II

O inversor em meia ponte como ilustrado pela Fig. 5.1(b) pode injetar componentes de sequência positiva e negativa no sistema, o qual é suficiente apenas para um determinado número de aplicações. As correntes de sequência zero fluindo na rede irão circular no enrolamento delta do transformador. O barramento c.c. tem menos problemas de desbalanceamentos e a tensão de linha do inversor tem três níveis de tensão, as quais são injetados na rede. Em (ZHAN, 2001b) é utilizada esta configuração.



(a) Inversor em meia ponte com transformador conectado em estrela aberto/estrela - topologia I

(b) Inversor em meia ponte com transformador conectado em estrela aberto/delta - topologia II

Figura 5.1. Topologias de inversores - I.

5.1.3 Inversor em Ponte Completa com Transformador Conectado em Estrela Aberto/Estrela - Topologia III

O inversor ponte completa ilustrado na Fig. 5.2(a) faz uso de doze chaves ativas e sempre tem duas chaves de potência por fase no caminho da corrente. Com um esquema de chaveamento adequado, o inversor pode gerar três níveis de tensão. Isto permite menos distorção na tensão e o tamanho dos filtros pode ser reduzido. O inversor ponte completa pode injetar componentes de sequência zero e não necessita de uma divisão do barramento c.c. Alguns trabalhos fazem uso desta configuração, como em (NIELSEN; BLAABJERG, 2001; KIM; SUL, 2005; WANG; VENKATARAMANANN; ILLINDALA, 2006; LI, 2007a, 2007c)

5.1.4 Inversor de Três Níveis em Meia Ponte com Transformador Conectado em Estrela Aberto/Delta - Topologia IV

A Figura 5.2(b) ilustra o inversor de três níveis. O inversor apresentado na figura não pode injetar tensões de sequência zero com a conexão utilizada para os transformadores.

De forma geral, os benefícios das topologias multinível são que os dispositivos de potência podem ser usados com níveis de tensão maiores, DHT e filtros reduzidos. Uma estrutura

semelhante a esta foi utilizada em (LOH, 2004).

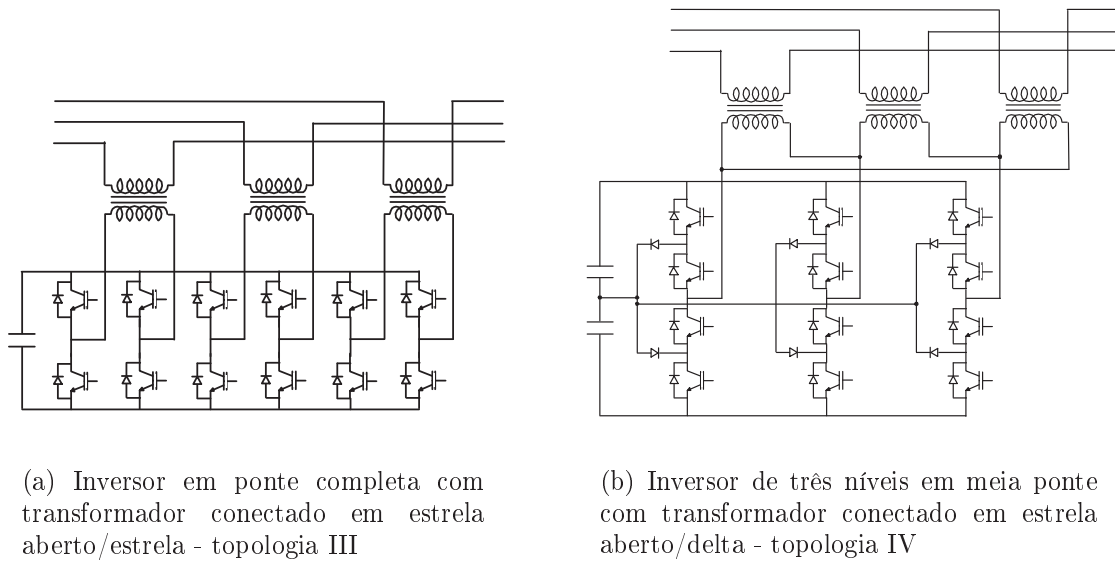


Figura 5.2. Topologias de inversores - II.

5.1.5 Comparação entre as Topologias dos Inversores

Dentre as quatro topologias mostradas, algumas diferenças podem ser vistas. A injeção de tensão de sequência zero pode somente ser assegurada pelas topologias I e III sendo que a I tem pouca efetividade na utilização do barramento c.c. As topologias III e IV têm uma maior quantidade de componentes no caminho da corrente, o que faz com que aumente a complexidade e perdas. Estas limitações são compensadas pela maior capacidade de uso da potência e a frequência de chaveamento é duplicada em relação ao de meia ponte. O tamanho dos filtros podem ser reduzidos assim como as perdas e os custos.

Alguns parâmetros importantes para as quatro topologias são evidenciados na Tab. 5.1 e as vantagens e desvantagens são sumarizadas na Tab. 5.2. Nesta última, (+) indica bom desempenho/possível e (-) indica fraco desempenho/impossível.

Tabela 5.1. Comparação das topologias de inversores para DVRs (1)

Topologia	IGBT/diodos	Componentes no caminho da corrente	Níveis de tensão
I	6/6	3	2
II	6/6	3	3
III	12/12	6	3
IV	12/18	6	5

Tabela 5.2. Comparação das topologias de inversores para DVRs (2)

Topologia	Injeção de tensão zero	Controle do barramento c.c.	Utilização do barramento c.c.
I	+	-	-
II	-	+	+
III	+	+	-
IV	-	-	+

5.2 INVERSORES TRIFÁSICOS A TRÊS FIOS

A Fig. 5.3 mostra um inversor de tensão de três braços a três fios com o filtro de tensão conectado em Y para que o circuito possa ser analisado em termos de tensão de fase. O uso deste inversor evidencia a falta de graus de liberdade necessários para produzir três tensões independentes, tornando inadequado o uso deste para cargas com tensões desequilibradas, uma vez que inversores de três braços podem produzir somente duas tensões de saída independentes, ou seja, se v_{ab} e v_{bc} são conhecidas, então v_{ca} fica definida. Assim, inversores de três braços podem produzir somente tensões trifásicas equilibradas se o filtro conectado for equilibrado. O padrão a ser notado é que um inversor de N braços nestas condições pode produzir somente N-1 tensões de saída independentes. A partir da Fig. 5.3, as tensões de fase são definidas como:

$$v_{an} = v_{a0} - v_{n0} \tag{5.1}$$

$$v_{bn} = v_{b0} - v_{n0} \tag{5.2}$$

$$v_{cn} = v_{c0} - v_{n0}. \tag{5.3}$$

Para um filtro balanceado:

$$v_{n0} = \frac{v_{a0} + v_{b0} + v_{c0}}{3}. \tag{5.4}$$

Então, pode-se perceber que as tensões de fase são determinadas a partir das tensões de polo (v_{a0}, v_{b0}, v_{c0}), ou seja, a partir do chaveamento do inversor com os níveis de tensão $+V_{cc}/2$ e $-V_{cc}/2$.

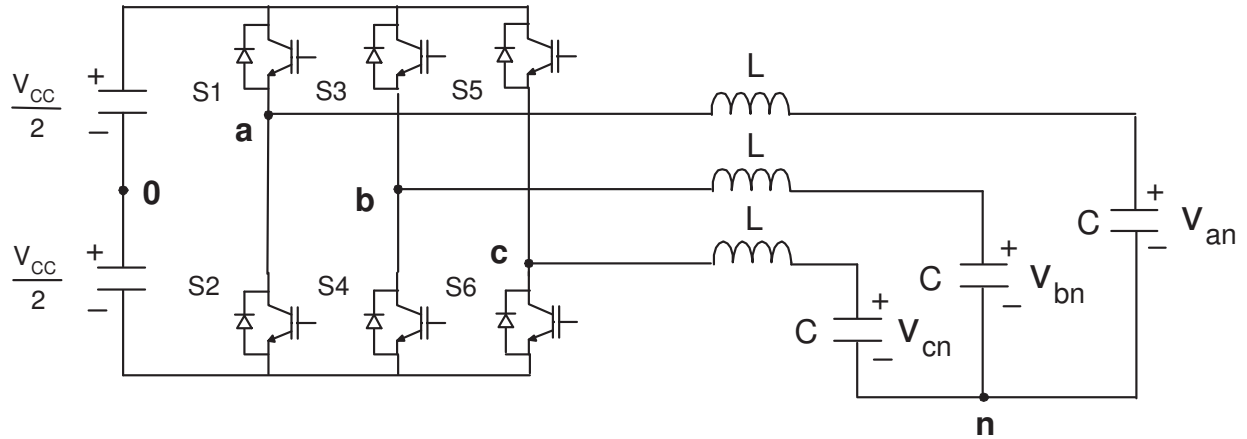


Figura 5.3. Topologia de inversor com três braços.

Alguns inversores trifásicos têm o neutro do filtro/carga conectado ao ponto central dos capacitores que formam o barramento c.c. como mostrado na Fig. 5.1(a) e desenhado novamente na Fig. 5.4 com a inclusão do filtro na saída do inversor. Este sistema é equivalente a três sistemas monofásicos separados e para tanto, técnicas de controle monofásicas podem ser aplicadas. Estes tipos de inversor podem ser aplicados a cargas trifásicas desequilibradas, mas possuem desvantagens como o nível máximo de tensão na fase ser limitado ao valor de $\frac{V_{cc}}{2}$, menor do que $\frac{2V_{cc}}{3}$ como seria disponível em um inversor a três fios, ou mesmo o desbalanceamento do barramento c.c. devido à corrente que circula pelo mesmo. Para evitar estas limitações, o inversor trifásico a quatro fios com quatro braços é proposto, como será observado na próxima seção.

Considerando mais uma vez as tensões de fase trifásicas com afundamento da Fig. 4.10(a) e mostrada novamente na Fig. 5.5, é possível fazer uma análise das tensões de sequência positiva e negativa para observar que a soma destas duas componentes, fase a fase, é zero em todos os instantes, e assim tornando-se possível utilizar os três primeiros braços do inversor para produzir estas duas componentes.

Inicialmente, realiza-se a decomposição em componentes de sequência positiva e negativa

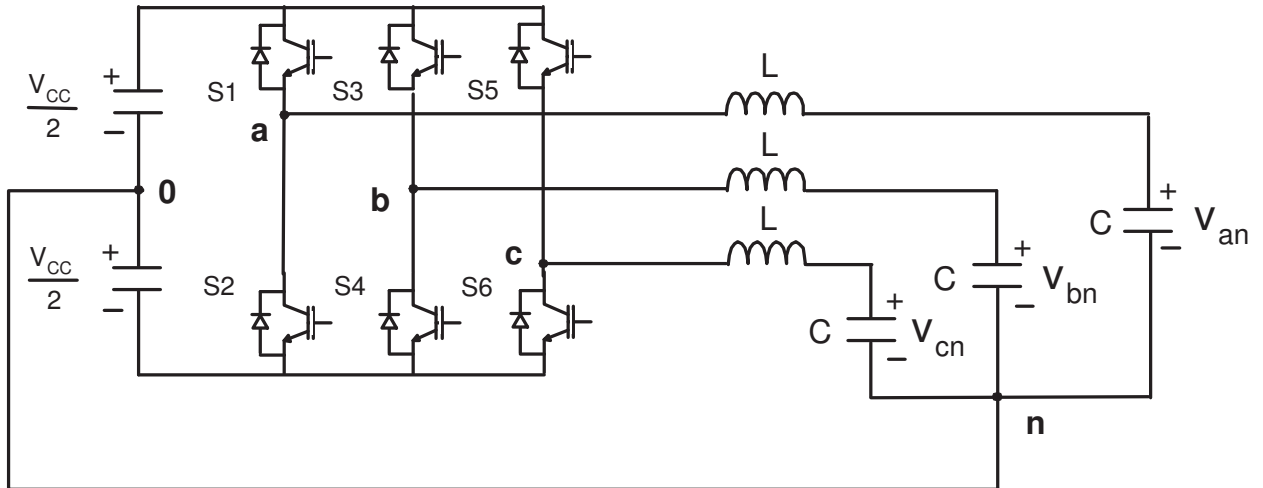


Figura 5.4. Topologia de inversor com três braços e ligação ao ponto central entre os capacitores.

instantâneas, como desenvolvido no capítulo 4. O resultado destas decomposições durante toda a janela de duração de 500 ms é mostrado na Fig. 5.6 para a positiva e Fig. 5.7 para a negativa. Como era de se esperar, as tensões de cada sequência são equilibradas, mesmo durante o afundamento de tensão desequilibrado.

A soma de três amostras em um determinado instante em qualquer uma destas componentes é zero. Tensões trifásicas resultantes da soma entre as duas componentes podem ser obtidas. Esta soma é realizada com cada amostra de um mesmo instante e entre fases correspondentes. Por exemplo, a amostra do instante de 20 ms da fase c da componente positiva é somada com a amostra de 20 ms da fase c da componente negativa. O resultado deste procedimento em toda a janela de 500 ms está mostrado na Fig. 5.8. Tomando dois conjuntos de três amostras (uma por fase) em dois instantes distintos, a saber 50 ms e 250 ms, tem-se como resultado da soma $-2,8422 \cdot 10^{-14}$ V e $-2,8422 \cdot 10^{-14}$ V, respectivamente. Estes instantes foram escolhidos propositalmente sem ocorrência do afundamento e com ocorrência do afundamento. Deve-se observar que durante o período transitório, ou seja, no período de passagem do pré-afundamento para afundamento e afundamento para pós-afundamento, a soma também é nula. No instante de 130 ms, a soma calculada é de $-7,1054 \cdot 10^{-15}$ V.

A Figura 5.9(a) é uma representação da diferença entre a tensão de sequência positiva de referência e a tensão de sequência positiva estimada. A determinação da referência é

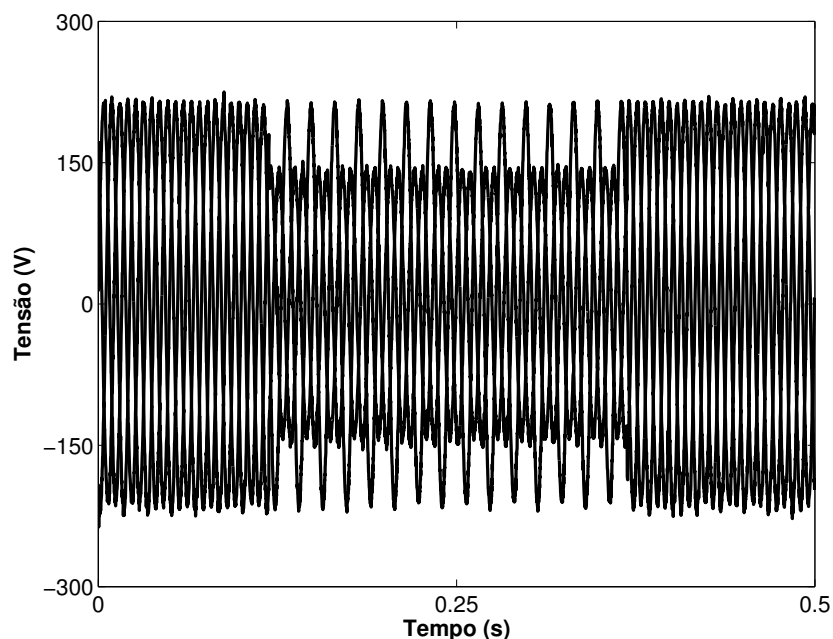
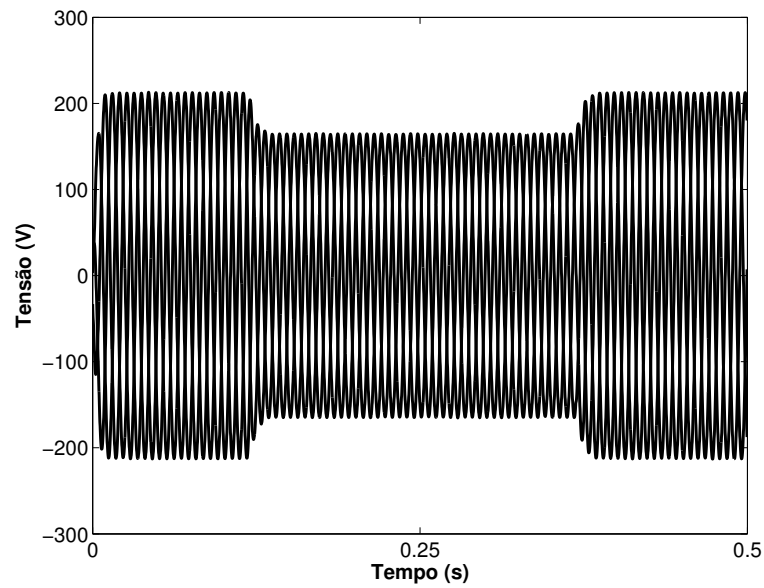


Figura 5.5. Tensões trifásicas com afundamentos em duas fases.

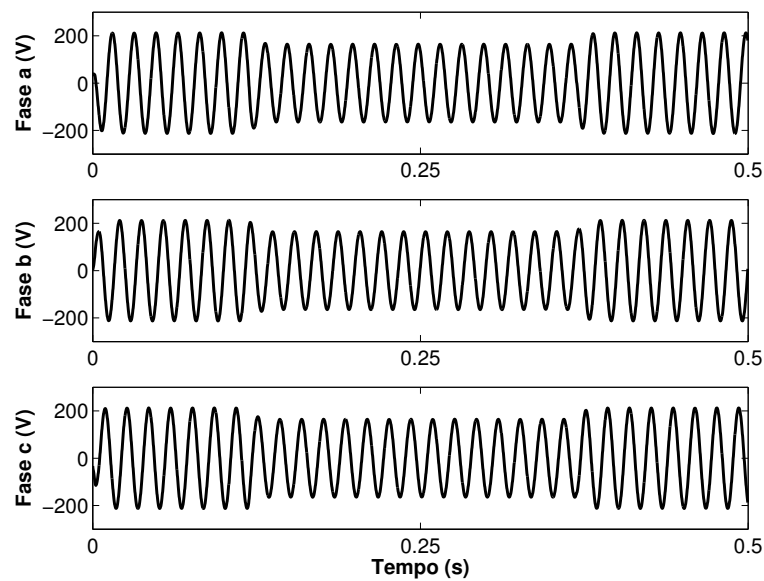
baseada na suposição da não existência de afundamentos durante toda a janela de tempo, ou seja, durante os 500 ms. O resultado mostrado na figura representa exatamente como é realizado o processo de restauração das amplitudes das tensões trifásicas. Estas tensões, subtraídas da componente negativa de tensão, resultam nas tensões mostradas na Fig. 5.9(b), que são exatamente as tensões injetadas com os três primeiros braços do inversor de tensão. O processo da "diferença" com as resultantes de sequência positiva é realizado pois deve-se anular o efeito da componente negativa na carga. A anulação da sequência zero na carga também será realizada, mas exclusivamente com o quarto braço do inversor, como será visto mais adiante. Todo este processo representa a metodologia utilizada para correções de afundamentos desequilibrados por meio do DVR utilizado neste trabalho.

Para que possa ser gerada pelos três primeiros braços do inversor, a soma das amostras de cada instante da Fig. 5.9(b) deve ser nula. Sendo assim, tomando os mesmos instantes como no caso anterior, o resultado da soma é de 0 V e $2,8422 \cdot 10^{-14}$ V, respectivamente para aqueles mesmos instantes. Para o instante de 130 ms referente ao período transitório, a soma é de $-2,1316 \cdot 10^{-14}$ V.

A partir destas análises, é possível constatar que o inversor de 3 braços pode gerar tensões



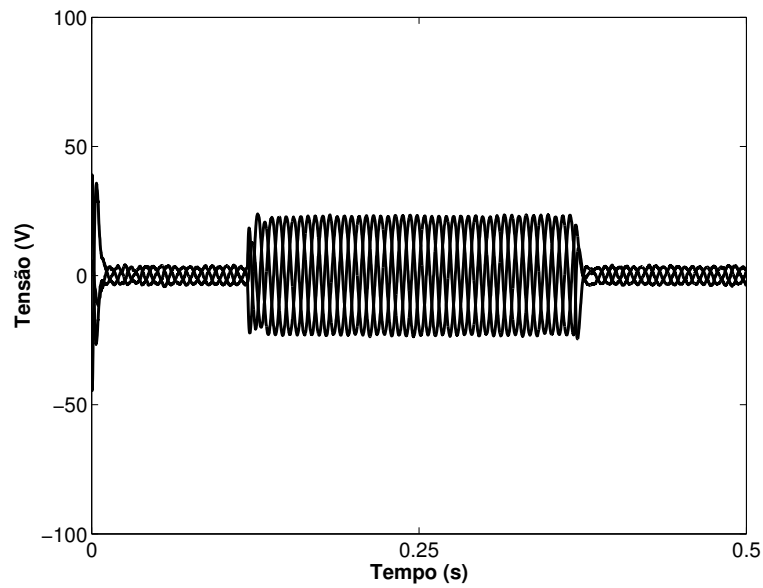
(a)



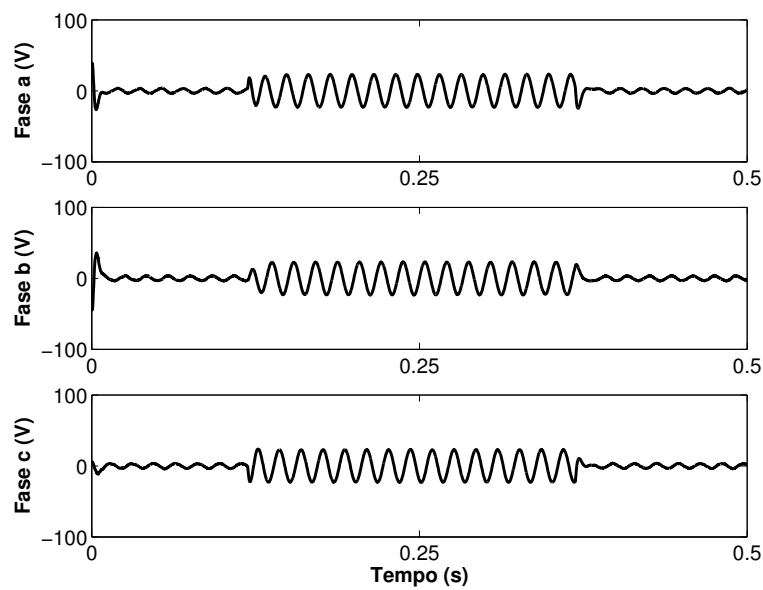
(b)

Figura 5.6. Decomposição em componentes de sequência. (a) Tensões de fase de sequência positiva; (b) Tensões de fase de sequência positiva vistas separadamente.

trifásicas equilibradas e desequilibradas, desde que estas tenham tensões de sequência zero excluídas.



(a)



(b)

Figura 5.7. Decomposição em componentes de sequência. (a) Tensões de fase de sequência negativa; (b) Tensões de fase de sequência negativa vistas separadamente;

5.3 METODOLOGIA PROPOSTA

Considere uma rede elétrica que contém cargas sensíveis protegidas por um DVR (Fig. 5.10(a)). Para a geração de três tensões de fase e_1 , e_2 , e_3 por meio do inversor de quatro braços (Fig. 5.10(b))

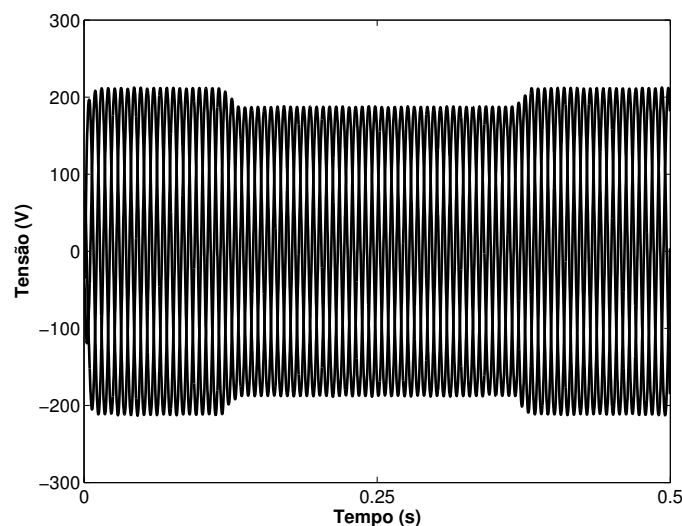


Figura 5.8. Composição entre as componentes de sequência positiva e negativa ($v_p + v_n$).

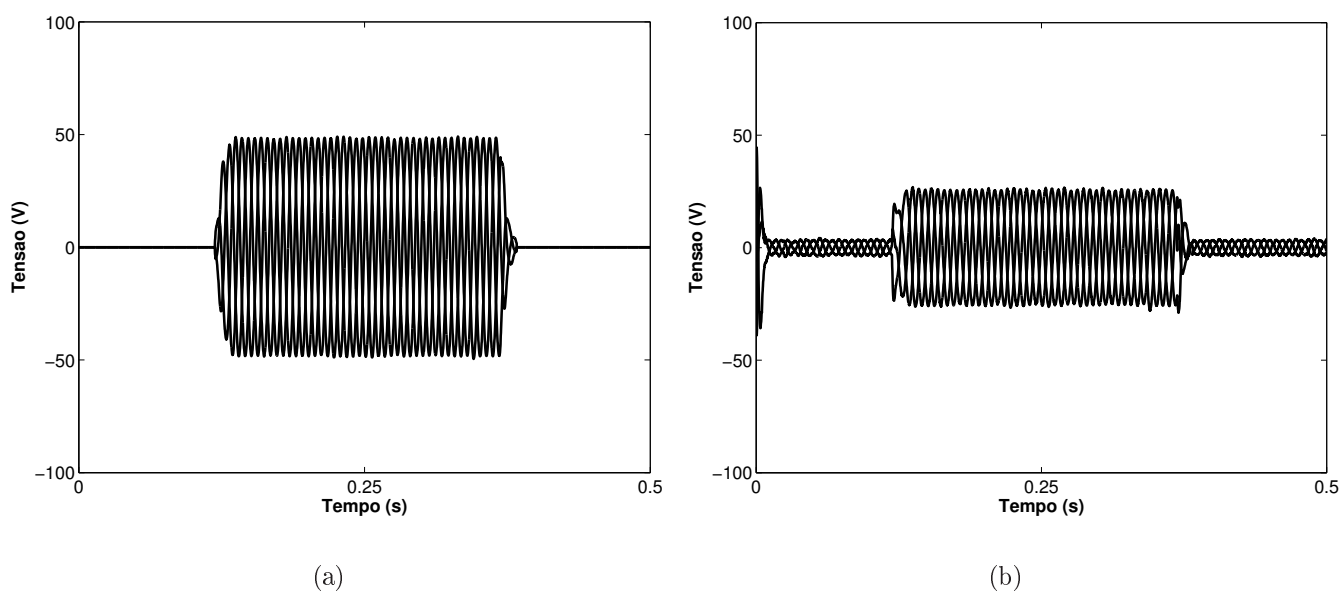


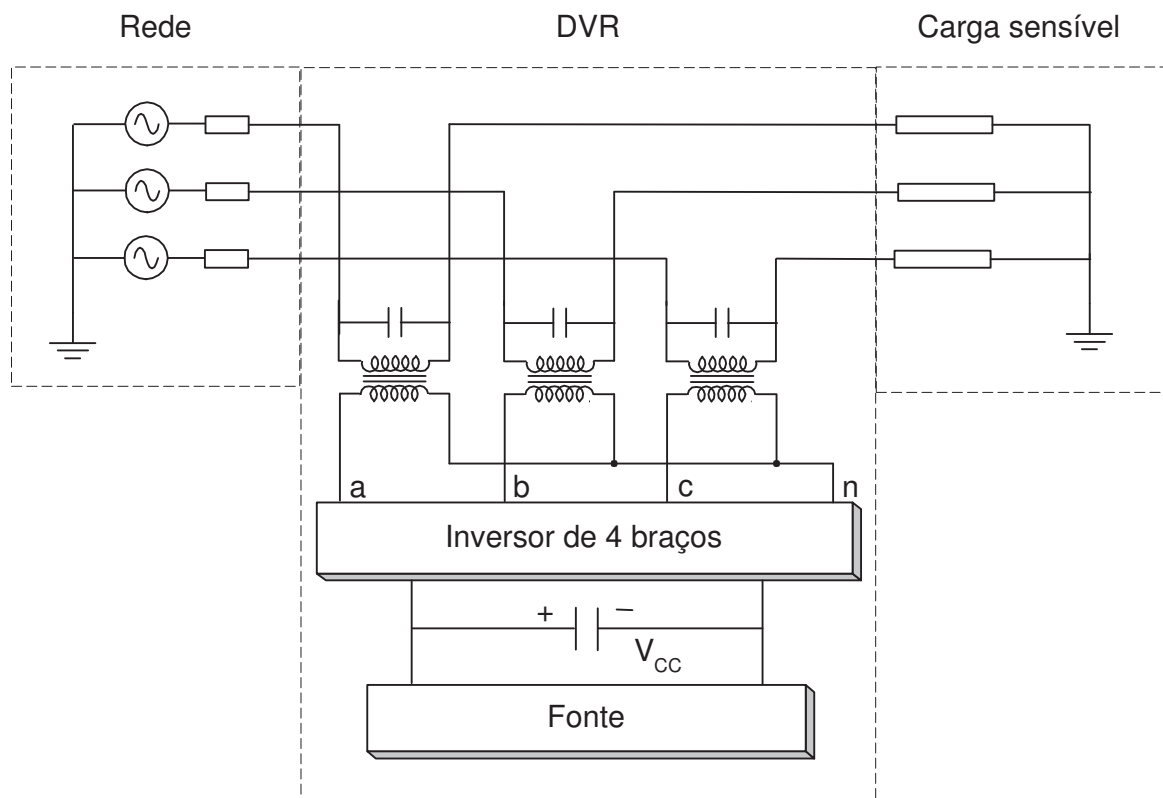
Figura 5.9. Composição entre as componentes de sequência. (a) $v_p^* - v_p$; (b) $(v_p^* - v_p) - v_n$.

é necessário inicialmente uma representação em componentes $0\alpha\beta$ como mostrado nas equações (5.5), (5.6) e (5.7) (FERNANDES; NAIDU, 2008c):

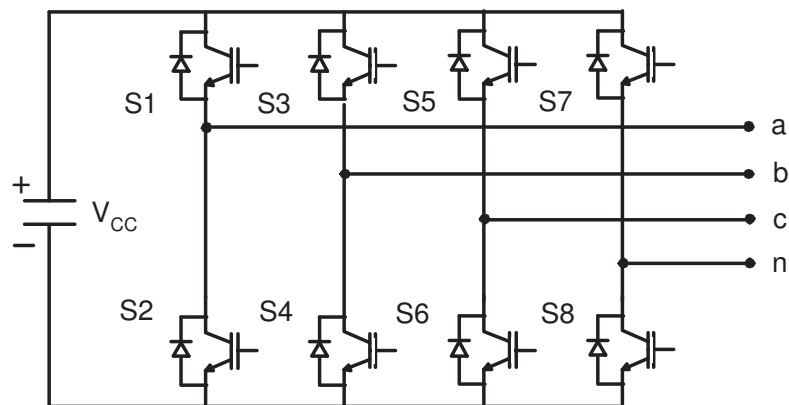
$$v_0 = \frac{1}{3}(e_1 + e_2 + e_3), \quad (5.5)$$

$$v_\alpha = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[e_1 - \frac{(e_2 + e_3)}{2} \right], \quad (5.6)$$

$$v_\beta = \sqrt{\frac{1}{2}}(e_2 - e_3). \quad (5.7)$$



(a)



(b)

Figura 5.10. Restaurador dinâmico de tensão. (a) DVR conectado à rede de distribuição; (b) Inversor de 4 braços.

5.3.1 Determinação das Tensões Utilizando Três Braços do Inversor

O vetor de tensão $\mathbf{v} = v_{\alpha} + j v_{\beta}$ é a representação das tensões trifásicas a serem injetadas na rede pelos três primeiros braços e está mostrado no plano- $\alpha\beta$ da Fig. 5.11. Como é bem

conhecido da modulação vetorial (BROECK; SKUDELNY; STANKE, 1988), cada um dos oito vetores pré-estabelecidos $\mathbf{V}_0, \mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_7$ definem um conjunto de chaveamento do inversor que possui seis chaves. Seis destes vetores ($\mathbf{V}_1, \dots, \mathbf{V}_6$) são chamados vetores ativos e entre um destes e seu adjacente existe um deslocamento de 60° . E ainda, dois destes vetores (\mathbf{V}_0 e \mathbf{V}_7) são vetores nulos. Em cada setor em que \mathbf{v} está localizado, existe uma sequência de chaveamento pré-definida e que envolve dois dos vetores ativos adjacentes mais os dois vetores nulos. A Tabela 5.3 fornece as sequências de chaveamento nos seis setores disponíveis. A escolha dessa sequência é baseada na minimização do número de comutações na transição de um estado pré-definido para outro (VALLE; RODRIGUEZ; CONTRERAS, 1991). A Tabela 5.4 indica as chaves que ficam fechadas para cada um dos vetores pré-estabelecidos.

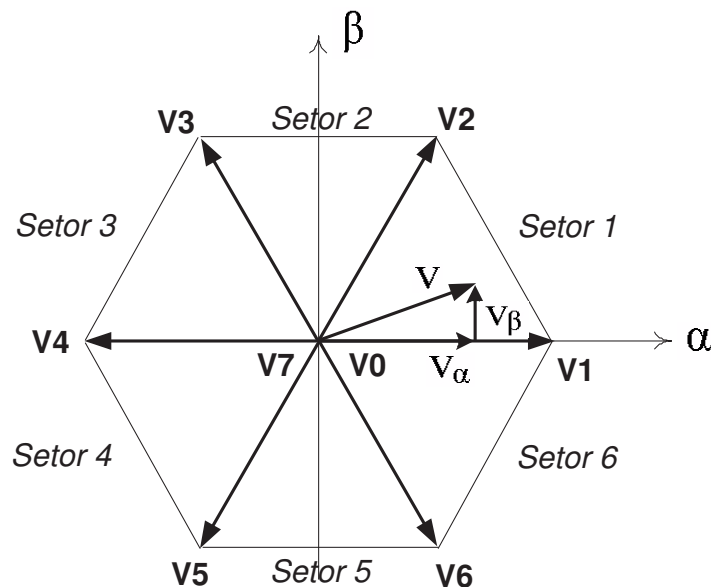


Figura 5.11. Plano $\alpha\beta$.

Na estratégia de modulação PWM vetorial, conhecido o vetor de tensão \mathbf{v} , o mesmo pode ser redefinido em função dos vetores adjacentes como:

$$\mathbf{v} = \frac{t_k}{t_s} \mathbf{V}_k + \frac{t_l}{t_s} \mathbf{V}_l, \quad (5.8)$$

sendo t_s o período de amostragem e t_k e t_l intervalos de tempo durante os quais os vetores adjacentes \mathbf{V}_k e \mathbf{V}_l são aplicados, respectivamente. E ainda, $k = 1, \dots, 6; l = k + 1$ se $k \leq 5$ e $l = 1$ se $k = 6$.

Tabela 5.3. Seqüência de chaveamento para geração dos vetores no plano

Setor	Seqüência de chaveamento						
1	V7	V1	V2	V0	V2	V1	V7
2	V7	V3	V2	V0	V2	V3	V7
3	V7	V3	V4	V0	V4	V3	V7
4	V7	V5	V4	V0	V4	V5	V7
5	V7	V5	V6	V0	V6	V5	V7
6	V7	V1	V6	V0	V6	V1	V7

Tabela 5.4. Chaves fechadas em cada estado

Vetor	S1	S2	S3	S4	S5	S6
V0	■		■		■	
V1	■			■		■
V2	■		■			■
V3		■	■			■
V4		■	■		■	
V5		■		■	■	
V6	■			■	■	
V7		■		■		■

Reescrevendo a equação (5.8) em termos de componentes dq, tem-se:

$$t_k = \frac{(V_{ql} v_d - V_{dl} v_q) t_s}{V_{dk} V_{ql} - V_{dl} V_{qk}}, \tag{5.9}$$

$$t_l = \frac{(V_{dk} v_q - V_{qk} v_d) t_s}{V_{dk} V_{ql} - V_{dl} V_{qk}}, \tag{5.10}$$

sendo $\mathbf{V}_k = V_{dk} + j V_{qk}$ e $\mathbf{V}_l = V_{dl} + j V_{ql}$. O tempo relativo à duração dos vetores nulos, t_0 , é aplicado ao restante do intervalo:

$$t_0 = t_s - (t_k + t_l) = t_{0i} + t_{0f}. \tag{5.11}$$

Normalmente, quando se faz uso da modulação vetorial, o intervalo de tempo de atuação dos vetores não-nulos (\mathbf{V}_0 e \mathbf{V}_7) é igualmente distribuído, ou seja, $t_{0i} = t_{0f} = t_0/2 = t_z$. A distribuição dos tamanhos destes intervalos pode ser quantificada pela variável μ , definida como:

$$\mu = \frac{t_{0i}}{t_{0i} + t_{0f}} \quad 0 \leq \mu \leq 1. \quad (5.12)$$

Uma mudança em μ altera o ritmo de comutação do inversor produzindo técnicas de PWM diferentes (ALVES, 1991), (HARAS; ROYE, 1995).

A Figura 5.12(a) mostra funções das chaves superiores S1, S3 e S5 típicas para a geração dos vetores no plano localizados no primeiro setor. A inversão da sequência de dois vetores não-nulos no começo de cada período de amostragem reduz perdas de chaveamento e minimiza a distorção harmônica da corrente de carga (JACOBINA; LIMA; SILVA, 1997).

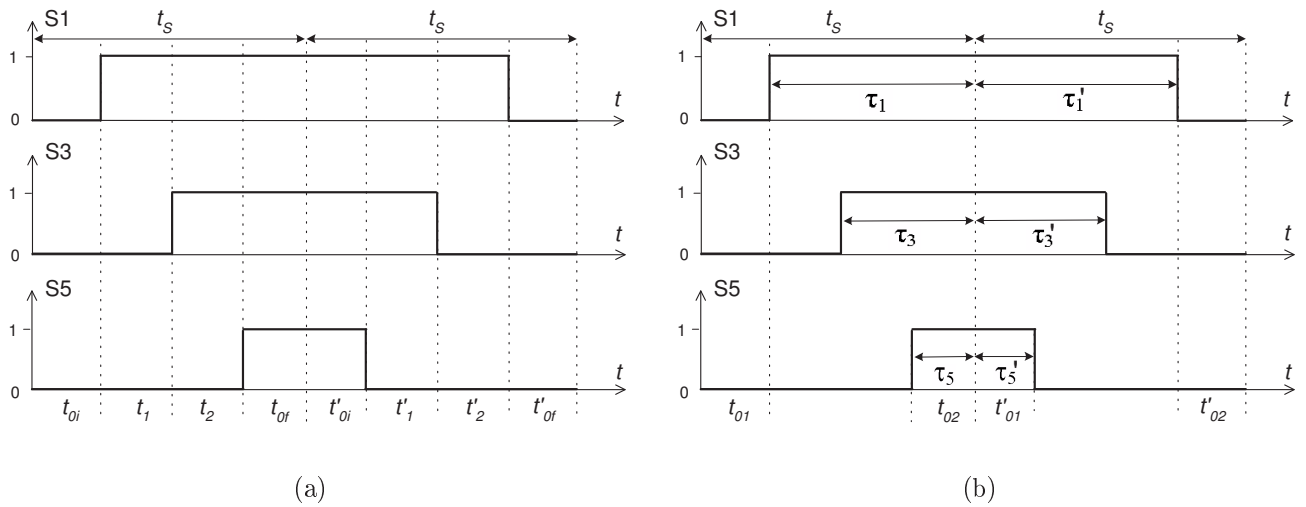


Figura 5.12. Funções de chaveamento para um vetor de referência localizado no primeiro setor. (a) Tensões trifásicas produzidas a partir da modulação vetorial; (b) Tensões trifásicas produzidas a partir da modulação escalar digital.

5.3.1.1 Modulação escalar digital. Uma abordagem de aplicação simples para gerar as tensões PWM em um sistema trifásico foi mostrada em (JACOBINA, 2001). Ela é baseada na média da tensão correspondente à tensão de fase de referência durante o período de

amostragem. Isto permite impor uma tensão de polo para cada braço do inversor trifásico, a qual produzirá a tensão desejada (de referência) na carga. Tensões de referência podem ser modificadas (v_{an}^{I*} , v_{bn}^{I*} e v_{cn}^{I*}) e definidas a partir das tensões de referência senoidal trifásicas (v_{an}^* , v_{bn}^* e v_{cn}^*) como em (5.13):

$$v_{jn}^{I*} = v_{jn}^* + v_h, \quad j = a, b, c, \quad (5.13)$$

sendo v_h uma componente homopolar.

A largura do pulso em um período de amostragem é dada por:

$$\frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} v_{jn}^{I*} dt = \frac{1}{t_s} \int_0^{t_s} v_{j0} dt, \quad (5.14)$$

sendo v_{j0} a tensão de polo. Resolvendo (5.14) e desde que v_{jn}^{I*} assume um valor constante durante t_s :

$$\tau_1 = \left(\frac{v_{an}^{I*}}{V_{cc}} + \frac{1}{2} \right) t_s, \quad (5.15)$$

$$\tau_3 = \left(\frac{v_{bn}^{I*}}{V_{cc}} + \frac{1}{2} \right) t_s, \quad (5.16)$$

$$\tau_5 = \left(\frac{v_{cn}^{I*}}{V_{cc}} + \frac{1}{2} \right) t_s. \quad (5.17)$$

As larguras de pulso τ_1 , τ_3 e τ_5 são os intervalos de tempo em que as chaves 1, 3 e 5 permanecem fechadas, como definido na Fig. 5.12(b).

Em termos de componentes d e q, as equações (5.15)-(5.17) ficam expressas por (JACOBINA; LIMA; SILVA, 1997):

$$\tau_1 = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{v_d^{I*}}{V_{cc}} + \frac{v_h}{V_{cc}} + \frac{1}{2} \right) t_s, \quad (5.18)$$

$$\tau_3 = \left(-\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{v_d^{I*} - \sqrt{3}v_q^{I*}}{V_{cc}} + \frac{v_h}{V_{cc}} + \frac{1}{2} \right) t_s, \quad (5.19)$$

$$\tau_5 = \left(-\frac{1}{\sqrt{6}} \frac{v_d^{I*} + \sqrt{3}v_q^{I*}}{V_{cc}} + \frac{v_h}{V_{cc}} + \frac{1}{2} \right) t_s, \quad (5.20)$$

sendo v_d^{I*} e v_q^{I*} as componentes de eixo d e q das tensões de fase v_{an}^{I*} , v_{bn}^{I*} e v_{cn}^{I*} .

5.3.1.2 Análise entre as duas modulações. A comparação entre as figuras 5.12(a) e 5.12(b) mostra que os intervalos de tempo t_1 e t_2 correspondem à duração em que os vetores \mathbf{V}_1 e \mathbf{V}_2 permanecem atuando (Setor 1, $k = 1$, $l = 2$), respectivamente, e as relações entre estes tempos e as larguras de pulso da Fig. 5.12(b) são dadas por:

$$t_1 = \tau_1 - \tau_3, \quad (5.21)$$

$$t_2 = \tau_3 - \tau_5. \quad (5.22)$$

A partir das equações (5.9) e (5.10), estes intervalos de tempo podem ser calculados, para $k = 1$ e $l = 2$, como:

$$t_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{t_s}{V_{cc}} \left(\sqrt{3}v_d - v_q \right), \quad (5.23)$$

$$t_2 = \sqrt{2} \frac{t_s}{V_{cc}} v_q. \quad (5.24)$$

Um resultado similar é obtido quando t_1 e t_2 são calculados de (5.21) e (5.22), com τ_1 , τ_3 e τ_5 dados por (5.18)-(5.20). Este fato demonstra que o inversor controlado pela modulação vetorial ou pela escalar digital produzem as mesmas larguras de pulso aplicadas à carga.

Uma equivalência completa entre ambas as modulações é conseguida somente se $t_{01} = t_{0i}$ e $t_{02} = t_{0f}$. Este fato é equivalente a calcular (5.13) com:

$$v_h = V_{cc} \left(\frac{1}{2} - \mu \right) - (1 - \mu)v_M - \mu v_m, \quad (5.25)$$

sendo v_M e v_m os valores máximo e mínimo das tensões de referência em cada período de amostragem.

Neste estudo, o esquema de chaveamento descrito em (JACOBINA, 2001) tem sido considerado e utilizado para os três primeiros braços, consistindo nos seguintes passos:

- (i) Determinar as tensões de referência para serem geradas pelo inversor, dado $v_{i\alpha}$ e $v_{i\beta}$

$$v_{an}^* = \sqrt{\frac{2}{3}} v_{i\alpha}, \quad (5.26)$$

$$v_{bn}^* = \frac{1}{\sqrt{6}} \left(-v_{i\alpha} + \sqrt{3} v_{i\beta} \right), \quad (5.27)$$

$$v_{cn}^* = -\frac{1}{\sqrt{6}} \left(v_{i\alpha} + \sqrt{3} v_{i\beta} \right), \quad (5.28)$$

sendo $v_{i\alpha}$ e $v_{i\beta}$ as componentes positiva e negativa de tensão calculadas pelo sistema de controle e a serem produzidas pelo inversor.

(ii) Considerando que $v_M = \max(v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*)$ e $v_m = \min(v_{an}^*, v_{bn}^*, v_{cn}^*)$, calcular

$$v_h = -(v_M + v_m) / 2. \quad (5.29)$$

Como mencionado anteriormente, o v_h de (5.29) é determinado a partir da escolha de $\mu = 0,5$ em (5.25).

(iii) Calcular

$$\tau_1 = \left[\frac{1}{2} + (v_{an}^* + v_h) / V_{cc} \right] t_s, \quad (5.30)$$

$$\tau_3 = \left[\frac{1}{2} + (v_{bn}^* + v_h) / V_{cc} \right] t_s, \quad (5.31)$$

$$\tau_5 = \left[\frac{1}{2} + (v_{cn}^* + v_h) / V_{cc} \right] t_s, \quad (5.32)$$

que correspondem as larguras dos pulsos em cada um dos três braços no período de amostragem.

(iv) Classificar (τ_1, τ_3, τ_5) em $(\tau_{min}, \tau_i, \tau_{max})$. Então

$$t_k = (\tau_{max} - \tau_i), \quad (5.33)$$

$$t_l = (\tau_i - \tau_{min}), \quad (5.34)$$

O passo (iv) tem a finalidade única de definir t_k e t_l da modulação vetorial para ser utilizado no cálculo da largura do pulso do quarto braço, como será visto adiante.

5.3.2 Produção da Tensão de Seqüência Zero

Considere a inclusão do quarto braço e ainda que as chaves nos três braços sejam operadas para gerar o vetor de componentes positiva e negativa nos moldes já definidos anteriormente. Como um exemplo, estando S1 fechada e S3, S5 permanecendo abertas e com o quarto braço ainda fora de operação (isto é, S7, S8 abertas), as tensões de fase são $\frac{2}{3}V_{cc}$, $-\frac{1}{3}V_{cc}$ e $-\frac{1}{3}V_{cc}$. Considere o fechamento de S8 sem mudar as posições das outras chaves. As tensões de fase

são agora:

$$v_{an} = V_{cc} = \frac{2}{3}V_{cc} + \frac{1}{3}V_{cc}, \quad (5.35)$$

$$v_{bn} = 0 = -\frac{1}{3}V_{cc} + \frac{1}{3}V_{cc}, \quad (5.36)$$

$$v_{cn} = 0 = -\frac{1}{3}V_{cc} + \frac{1}{3}V_{cc}. \quad (5.37)$$

Estas tensões são as mesmas em relação aquelas geradas pelos 3 braços mas com a inclusão da tensão de sequência zero em cada uma das tensões de fase (FERNANDES; NAIDU, 2007). A Tabela 5.5 mostra a tensão de sequência zero gerada pelo quarto braço com as chaves nos primeiros três braços ajustadas para os vetores de estado.

Tabela 5.5. Tensões de sequência zero em cada estado

Estado	Tensão de sequência zero	
	chave S7	chave S8
V0	0	V_{cc}
V1	$-\frac{2}{3}V_{cc}$	$\frac{1}{3}V_{cc}$
V2	$-\frac{1}{3}V_{cc}$	$\frac{2}{3}V_{cc}$
V3	$-\frac{2}{3}V_{cc}$	$\frac{1}{3}V_{cc}$
V4	$-\frac{1}{3}V_{cc}$	$\frac{2}{3}V_{cc}$
V5	$-\frac{2}{3}V_{cc}$	$\frac{1}{3}V_{cc}$
V6	$-\frac{1}{3}V_{cc}$	$\frac{2}{3}V_{cc}$
V7	$-V_{cc}$	0

Considerando a sequência de comutação mostrada na Tabela 5.3 para reproduzir o vetor em qualquer um dos setores, as tensões de fase para o conversor de 4 braços são a soma das correspondentes tensões do conversor de 3 braços e a tensão de sequência zero cuja variação durante o período de comutação é mostrada na Fig. 5.13. As duas formas de onda mostradas

resultam da condução de S7 ou S8. Os degraus que cada uma apresenta têm uma distância constante, ou seja, as linhas horizontais são equidistantes verticalmente de $1/3 V_{cc}$. Como pode ser visto, estas duas curvas representam os valores contidos na Tabela 5.5.

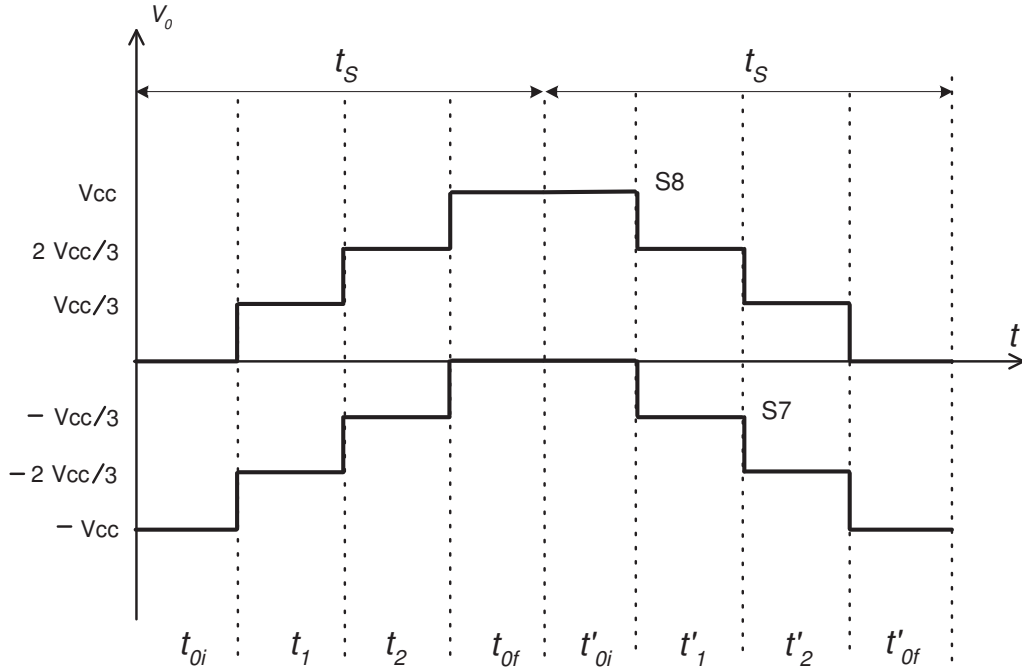


Figura 5.13. Variação da tensão de sequência zero durante qualquer período de chaveamento.

Com a chave S8 fechada, a máxima tensão de sequência zero que pode ser gerada durante qualquer sequência de chaveamento é a forma de onda superior mostrada na Fig.5.13. A tensão média para esta forma de onda no intervalo t_s e com o vetor \mathbf{v} localizado no primeiro setor pode ser obtida da seguinte forma (NAIDU; FERNANDES, 2007):

Normalmente, o intervalo de aplicação dos vetores nulos é igualmente distribuído, ou seja, $t_{0i} = t_{0f} = t_0/2 = t_z$. Sendo assim:

$$2t_z + t_1 + t_2 = t_s. \quad (5.38)$$

O valor médio da tensão é expresso por:

$$V_{0+} = \frac{\frac{1}{3}V_{cc}t_1 + \frac{2}{3}V_{cc}t_2 + V_{cc}t_z}{t_s}. \quad (5.39)$$

Isolando t_z de (5.38), substituindo em (5.39) e após algumas manipulações, chega-se a

seguinte expressão:

$$V_{0+} = V_{cc} \left(\frac{1}{2} - \frac{t_1 - t_2}{3t_s} \right). \quad (5.40)$$

Esta é a tensão média se a chave S8 permanecesse fechada durante todo o período de amostragem. Caso contrário, se a chave S7 permanecesse fechada ao invés da chave S8, a tensão média obtida seria dada por:

$$V_{0-} = -V_{cc} \left(\frac{1}{2} + \frac{t_1 - t_2}{3t_s} \right). \quad (5.41)$$

Estes são valores obtidos quando o vetor \mathbf{v} estiver no primeiro setor da Fig. 5.11. No entanto, quando \mathbf{v} estiver em qualquer outro setor, as formas de onda da Fig. 5.13 serão as mesmas, como já observado na Tabela 5.5. Para produzir a tensão de sequência zero desejada durante o período de amostragem, deve-se utilizar estas duas tensões de forma ponderada. Esta ponderação é determinada pela largura do pulso t_c como mostrado na Fig. 5.14. Esta largura de pulso controla as chaves do quarto braço do inversor de tensão. O valor elevado corresponde ao fechamento da chave S7 e abertura da S8, enquanto que o valor baixo corresponde ao complementar desta situação (FERNANDES; NAIDU, 2008b).

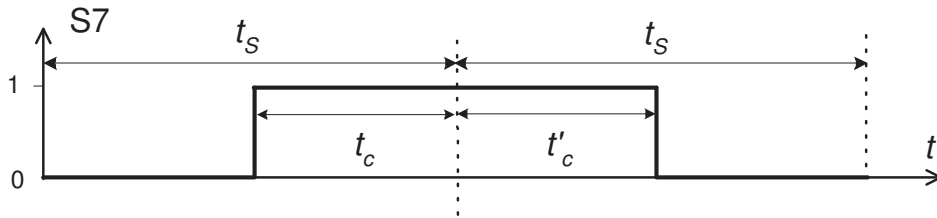


Figura 5.14. Função de chaveamento para S7.

A determinação da largura do pulso t_c é feita a partir da tensão média que é obtida com o quarto braço da seguinte forma:

$$v_0 = V_{0+} - \frac{t_c}{t_s} V_{cc}, \quad (5.42)$$

ou seja,

$$v_0 = V_{cc} \left(\frac{1}{2} + \frac{t_1 - t_2}{3t_s} \right) - \frac{t_c}{t_s} V_{cc}. \quad (5.43)$$

Isolando t_c de (5.43), obtém-se:

$$t_c = t_s \left(\frac{1}{2} - \frac{v_0}{V_{cc}} \right) - \frac{t_1 - t_2}{3}. \quad (5.44)$$

De uma forma mais geral, t_1 e t_2 podem ser substituídos na expressão e na Fig. 5.13 por t_k e t_l , respectivamente. Os valores de k e l dependem da localização do vetor no plano.

Resumindo, o sinal de PWM para um inversor de tensão de 4 braços é obtido como mostrado nos passos abaixo:

(i) A partir das tensões de sequência positiva e negativa calculadas pelo sistema de controle, determinar as tensões de referência a serem geradas pelo inversor como em (5.26)-(5.28).

(ii) Calcular a tensão v_h a partir de (5.25).

(iii) Calcular as larguras dos pulsos (equações (5.30)-(5.32)), a partir do esquema de chaveamento para os três braços.

(iv) Calcular o intervalo de tempo t_c para o quarto braço, como dado pela equação (5.44).

Quando t_{0i} é considerado igual a t_{0f} , é o mesmo que atribuir $\mu = 0,5$. Este valor de μ é otimizado para uso da tensão V_{cc} (BLASKO, 1996; JACOBINA, 2001). No entanto, fazendo-se a consideração para um μ qualquer, variando entre 0 e 1, uma nova expressão para a largura de pulso t_c pode ser obtida (ver Apêndice A).

A Figura 5.15 apresenta a DHT ponderada da tensão modulada com uso da metodologia proposta em função do índice de modulação (m). Esta curva foi determinada para cada m a partir da seguinte expressão:

$$WDHT = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n \left(\frac{a_i}{i}\right)}}{a_1}, \quad (5.45)$$

sendo n o número de componentes harmônicas extraídas de um ciclo da tensão, a_i a amplitude da componente harmônica e i o número do harmônico. Esta curva única é uma média do WDHT extraído em cada uma das três tensões de fase na saída do inversor. Como pode ser observado, a partir de um m de aproximadamente 0,1, a curva tem um comportamento monotônico, chegando a um mínimo no valor de $m = 1$.

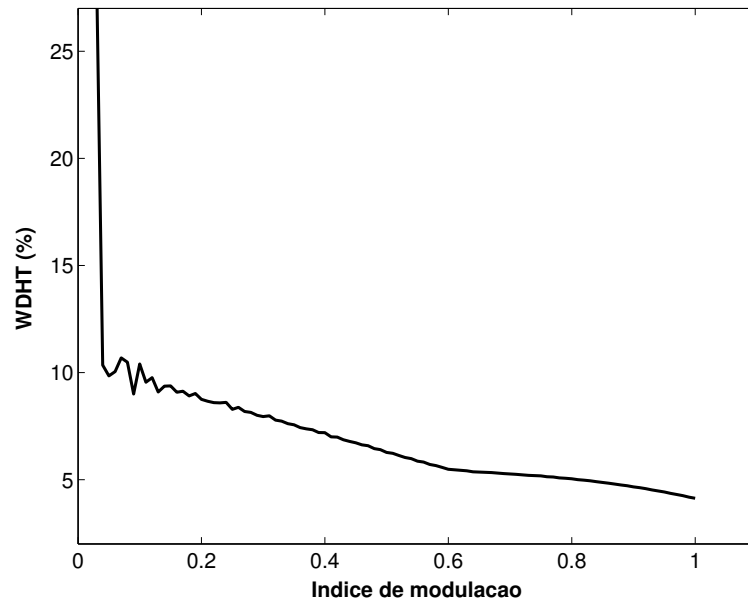


Figura 5.15. Distorsão harmônica total ponderada da tensão.

5.3.3 Simulação da Estratégia de Modulação

A Figura 5.16 mostra um inversor de 4 braços que supre uma carga trifásica por meio de um filtro passa-baixas. Este circuito é similar ao estudado em (KIM; SUL, 2004) e foi simulado utilizando um programa de análise transitória desenvolvido em Matlab[®]. A estratégia de PWM proposta é também analisada com esta mesma configuração.

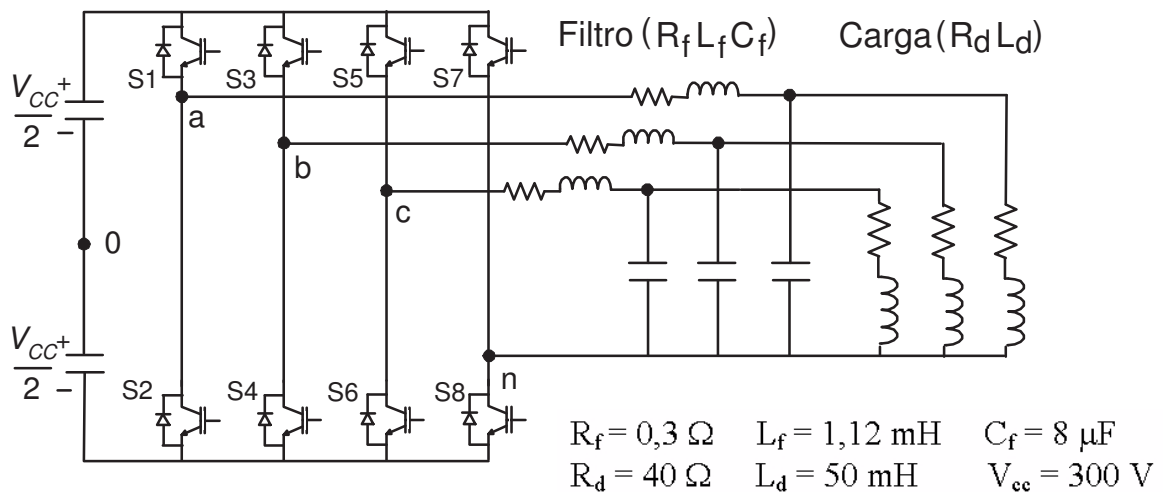


Figura 5.16. Carga trifásica alimentada pelo inversor de 4 braços.

As tensões de referência na carga a serem geradas são descritas nas equações (5.46)-(5.48),

$$V_{an} = 100\sqrt{3}\cos(120\pi t) + 106,7, \quad (5.46)$$

$$V_{bn} = 100\sqrt{3}\cos(120\pi t - 2\pi/3) + 106,7, \quad (5.47)$$

$$V_{cn} = 100\sqrt{3}\cos(120\pi t + 2\pi/3) + 106,7. \quad (5.48)$$

O valor de *offset* das tensões de referência é de 106,7 V. A inclusão da resistência do filtro promove uma queda de tensão na carga. Como o valor da resistência do filtro é de 0,3 Ω , o *offset* de tensão esperado para a carga é de $\frac{40}{40,3} 106,7 = 105,9$ V. O valor do *offset* extraído da simulação é de 105 V a partir do valor médio entre os picos da tensão de fase, como observado na Fig. 5.17(a). As tensões de pico da referência são $100\sqrt{3} + 106,7 \approx 279$ V e o valor extraído da simulação é de 277 V. As tensões V_{a0} e V_{n0} correspondem às tensões de pólo e homopolar, respectivamente.

A Figura 5.17(b) mostra as correntes calculadas em cada uma das fases, que são determinadas a partir das respectivas tensões nas fases. Dado que a tensão de *offset* de referência sobre a resistência da carga é de 105,9 V, a corrente a ser obtida é de $\frac{105,9}{40} = 2,64$ A. O valor de 2,60 A para esta corrente de *offset* é extraído da simulação.

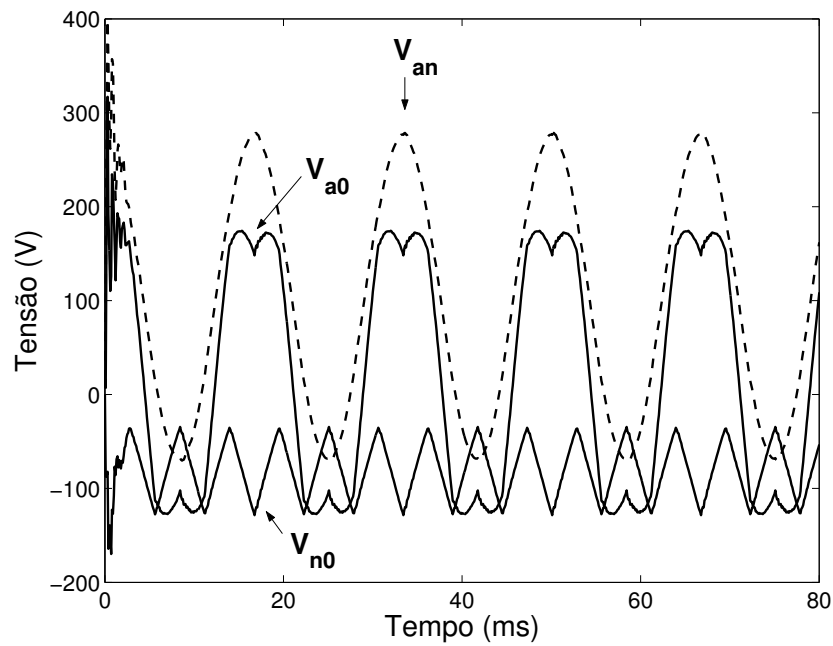
De forma semelhante, as equações (5.49)-(5.51) representam tensões de referência a serem geradas na carga.

$$V_{an} = 100\sqrt{3}\cos(120\pi t) + 106,7\cos(120\pi t), \quad (5.49)$$

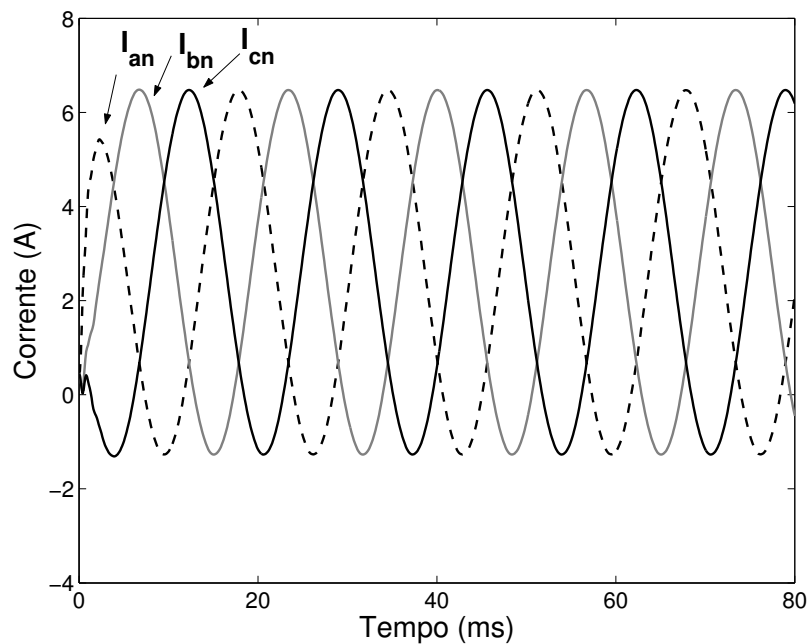
$$V_{bn} = 100\sqrt{3}\cos(120\pi t - 2\pi/3) + 106,7\cos(120\pi t), \quad (5.50)$$

$$V_{cn} = 100\sqrt{3}\cos(120\pi t + 2\pi/3) + 106,7\cos(120\pi t). \quad (5.51)$$

A segunda parcela de cada uma destas equações é uma função senoidal, e a tensão de referência V_{an} é uma soma entre duas senóides em fase. Sendo assim, a tensão de pico de referência é $100\sqrt{3} + 106,7 \approx 279$ V. A Figura 5.18(a) mostra tensões resultantes após o processo de modulação. O valor da tensão de pico de V_{an} extraído a partir da simulação é de 278 V. As correntes da Fig. 5.18(b) são calculadas a partir das tensões previamente determinadas.



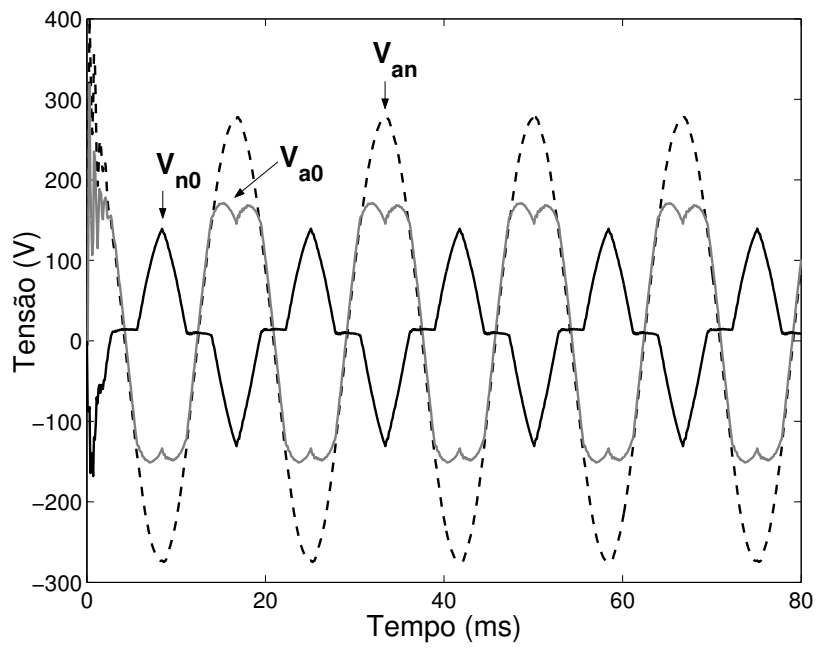
(a)



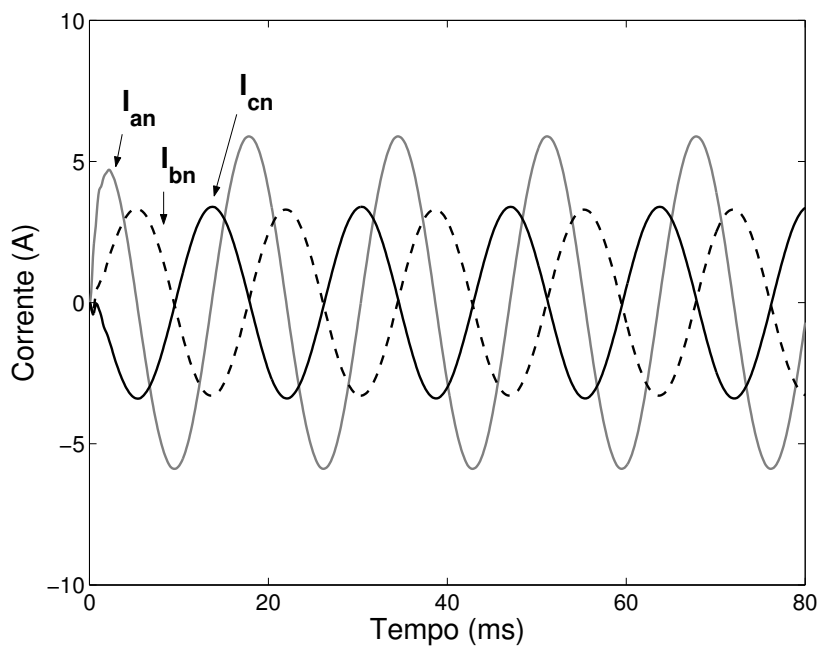
(b)

Figura 5.17. Resultados de simulação com tensões de referência adicionado deslocamento constante. (a) Tensões de referência; (b) Correntes de carga trifásicas.

As formas de onda obtidas na simulação mostradas nas Figs. 5.17 e 5.18 são idênticas aquelas mostradas em (KIM; SUL, 2004). Deve ser notado que o circuito da Fig. 5.16 inclui



(a)



(b)

Figura 5.18. Resultados de simulação com tensões de referência adicionado deslocamento senoidal. (a) Tensões de referência; (b) Correntes de carga trifásicas.

filtros passa-baixas e que a simulação gerou um transitório a partir de condições iniciais nulas.

5.4 ASPECTOS CONSTRUTIVOS E SUPRIMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE CONVERSOR C.A./C.C.

Uma especificação correta dos dispositivos de potência a serem empregados no conversor deve ser fundamentada em alguns critérios que garantam a capacidade de operação do equipamento, sem a necessidade de um projeto sobredimensionado.

Uma escolha preliminar para os dispositivos de potência deve passar por dois critérios: a corrente máxima de saída do inversor e a tensão do barramento c.c. A corrente máxima define a corrente nominal dos dispositivos, limitada pela capacidade térmica dos mesmos. A ultrapassagem da corrente nominal por um curto intervalo de tempo, como em situações transitórias, pode ser suportada pelos dispositivos. No entanto, a escolha da tensão de ruptura deve ser feita de modo que seja superior a tensão do barramento c.c. Isto se deve ao fato do limite de tensão dos dispositivos estar relacionado principalmente às rupturas que ocorrem nas superfícies dos semicondutores, fazendo com que as sobretensões transitórias que surgem nestes dispositivos levem a sua destruição.

Um critério de natureza prática, utilizado para a escolha da tensão de ruptura das chaves, consiste em escolhê-las com aproximadamente o dobro da tensão do barramento c.c. Apesar de aparentar ser uma margem de segurança excessiva, as taxas elevadas de variação de corrente no barramento c.c. provocam sobretensões, o que pode levar ao fenômeno de ruptura nos dispositivos.

De modo geral, pode-se dividir as perdas de potência de um dispositivo em perdas de condução e perdas de chaveamento. As primeiras estão relacionadas à queda de tensão na condução de uma dada quantidade de corrente. As perdas de chaveamento advêm do fato de que, durante o instante em que o dispositivo é ligado ou desligado, há corrente e tensão simultaneamente sobre o mesmo.

A opção de utilizar um barramento c.c. sem uma fonte de tensão possuiria a vantagem de se ter um sistema com um menor número de componentes, mas no entanto, teria a desvan-

tagem de se colocar um capacitor significativamente maior do que em outras topologias, ou mesmo sofrer o esgotamento de energia que o barramento continha depois de diversas solicitações eventualmente demandadas pela rede.

Para efeito de ilustração, suponha que se deseje realizar a compensação com injeção de potência ativa sem fonte extra de energia ao barramento c.c., para uma carga com 20 kW. Uma vez que toda a energia para o suprimento desta potência deve estar armazenada no banco de capacitores, a seguinte relação é válida:

$$\varepsilon = P \Delta t = \frac{1}{2} CV^2. \quad (5.52)$$

Para um afundamento trifásico a ser compensado, com duração de 0,5 s e estimando que a tensão do barramento não seja inferior a 5% do valor inicial que seria de 400 V, tem-se:

$$C = 1,28 F. \quad (5.53)$$

Este valor de capacitância é elevado, podendo tornar-se inviável o projeto com a mesma.

O fornecimento de energia ao barramento c.c. por meio de um sistema independente permite a compensação de afundamentos, desde que este sistema de suprimento disponha de capacidade suficiente. Dois modos possíveis para a implementação se dão por uma ponte retificadora alimentada a partir de uma rede isolada do sistema principal; e outro, por meio de banco de baterias.

A utilização de um retificador controlado leva a uma estrutura mais versátil para o carregamento do barramento. A vantagem desta topologia é a possibilidade de controlar a tensão no nível desejado, dispensando a utilização de um valor mais elevado na capacitância. Certamente, a aplicação desta topologia deve ser avaliada cuidadosamente, uma vez que leva a um sistema significativamente mais complexo e dispendioso. Uma simplificação bastante interessante é obtida pela substituição do retificador controlado por uma ponte retificadora não-controlada. Por se mostrar uma alternativa que une simplicidade, eficiência e baixo custo, o suprimento de energia ao barramento c.c. por meio do retificador não-controlado é escolhido para o projeto do restaurador dinâmico de tensão considerado neste trabalho.

5.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentadas inicialmente algumas possibilidades de inversores de tensão para serem utilizados em restauradores dinâmicos de tensão. Baseado nestas configurações, o inversor de quatro braços seria o mais simples, em termos de quantidade de chaves, capaz de realizar a inserção de tensões trifásicas desequilibradas, sem fazer a ligação do neutro da carga na saída do inversor com o ponto central dos capacitores. A partir desta configuração, propõe-se que as componentes positiva e o oposto da negativa sejam somadas e geradas com os três primeiros braços, e o quarto braço para injetar a componente de sequência zero. Estas duas etapas possuem estratégias de modulação diferentes, sendo que não são significativamente mais complexas do que a utilizada em um inversor de três braços. Um exemplo foi mostrado a partir da aquisição de tensões senoidais trifásicas desequilibradas medidas e utilizadas como entrada. Em todos os instantes das tensões resultantes da soma entre as componentes de sequência, o resultado é zero. Sendo assim, é adequado utilizar os três braços para este propósito. A modulação para o quarto braço foi mostrada para o caso em que $\mu = 0,5$ para facilitar o entendimento. A generalização para um μ variando entre 0 e 1 está demonstrada no apêndice.

No próximo capítulo será apresentada a plataforma experimental do DVR montada em laboratório.

PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Até o momento, foram apresentados modelos para afundamentos de tensão em redes trifásicas, os sistemas de controle, a topologia do inversor, além das estratégias de modulação associadas a esta topologia. Neste capítulo, uma plataforma experimental de um DVR é apresentada para validação do que foi proposto.

A Figura 6.1 ilustra o sistema DVR proposto neste trabalho para correções de elevações, mas principalmente afundamentos de tensão. A carga trifásica é alimentada por uma fonte de tensão programável, e entre estas duas estruturas, o DVR, a partir do qual as tensões são injetadas para a devida correção. Os transformadores são os elementos passivos do DVR que devidamente conectados, adicionam suas tensões às tensões da rede. O capacitor em paralelo ao transformador configura o filtro LC necessário para eliminar as componentes da tensão modulada advindas do inversor. A decomposição instantânea em componentes de sequência está presente nas nove grandezas medidas, as quais serão utilizadas no sistema de controle. Após a etapa de controle, os sinais de referência, ou seja, aqueles que serão adicionados à rede, passam pela modulação. Estes sinais modulados irão transformar-se em tensões moduladas por meio do inversor de quatro braços, até que finalmente sejam filtrados e adicionados à rede. As nove grandezas são medidas por meio de sensores e condicionadas para que os sinais de tensão e corrente (medida como tensão por meio do sensor de corrente) sejam ajustados entre 0 e 3,3 V, que é a faixa de tensão aceita como entrada para o DSP. O barramento c.c. é alimentado por uma ponte retificadora a diodos, que por sua vez recebe as tensões de um autotransformador. Nem sempre pode existir uma rede trifásica disponível para carregar o barramento c.c., ou mesmo esta rede estar livre de perturbações. Uma alternativa para este problema seria modificar a configuração do retificador, como mostrado na Fig. B.1, no

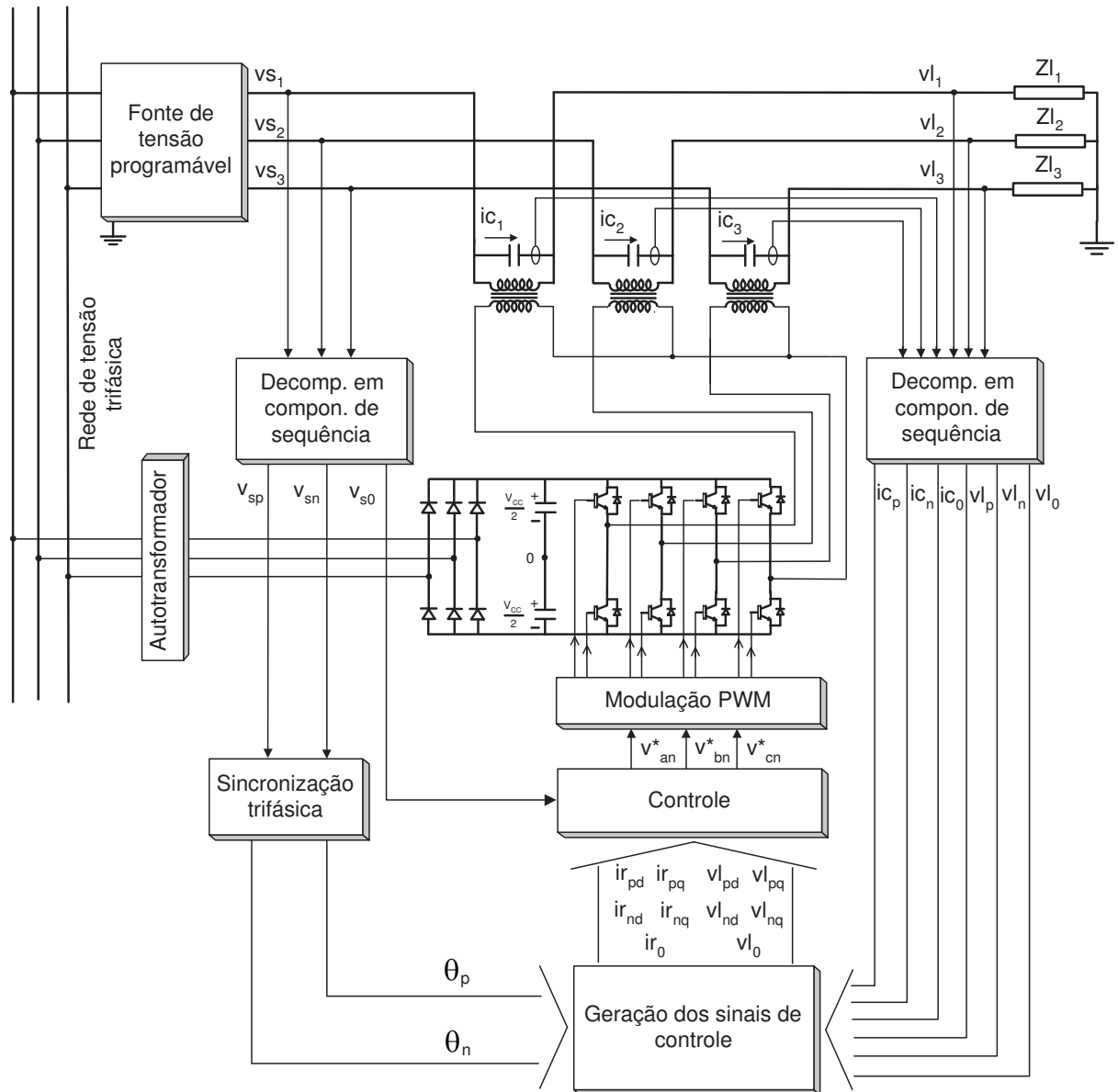


Figura 6.1. Diagrama esquemático utilizado na plataforma experimental do DVR.

Apêndice B. Nesta nova configuração, o carregamento é feito a partir das próprias tensões da rede que alimentam a carga. A inclusão de mais dois diodos garante que se pelo menos uma das fases permanecer sem perturbações, a tensão do barramento é carregada com o valor de pico da tensão alternada da referida fase. A suposição de uma das fases da rede permanecer intacta é bastante razoável, uma vez que a grande maioria dos afundamentos está associada a faltas monofásicas ou bifásicas (com mais de 90% de ocorrência).

O processador digital de sinais (DSP) não está apresentado diretamente na figura, mas as etapas de decomposição instantânea em componentes de sequência, sincronização trifásica,

geração dos sinais de controle, controle e PWM são etapas desenvolvidas e processadas no mesmo. As cargas utilizadas nos ensaios variam entre um banco de resistores de potência, motor c.c., retificador trifásico a diodos e combinações entre elas.

A seguir, estas etapas serão descritas com um maior número de detalhes para que seja esclarecido como a plataforma experimental foi construída para realização dos testes.

6.1 ESPECIFICAÇÕES DO FILTRO LC

A saída do inversor de tensão é constituída por sinais modulados por largura de pulso, e portanto, com conteúdo harmônico. Estes harmônicos devem ser filtrados pois para a correção da amplitude de tensão da rede somente interessa o conteúdo da forma de onda fundamental. De acordo com a Fig. 6.1, as indutâncias utilizadas no filtro LC são as próprias indutâncias de dispersão dos transformadores monofásicos, os quais são utilizados como elementos passivos para a inserção de tensão, bem como utilizados para promoverem a isolação elétrica entre o DVR e a rede. A determinação dos valores das indutâncias é realizada por meio do teste de curto-circuito no transformador. Com este teste, as indutâncias de dispersão e as resistências associadas às perdas dos enrolamentos são determinadas. A Tabela 6.1 resume os parâmetros referentes aos transformadores.

Tabela 6.1. Parâmetros dos transformadores monofásicos

Potência nominal	1,5 kVA
Relação transf.	1:1
L	1,12 mH
R	0,776 Ω

O valor da capacitância utilizada é 7,5 μF . Com os parâmetros da indutância e capacitância determinados, a frequência de corte do filtro fica estabelecida e cujo valor é dado por:

$$f_c \approx 1,7 \text{ kHz}, \quad (6.1)$$

6.2 CIRCUITOS PARA CONDICIONAMENTO DE TENSÃO E CORRENTE

Para monitorar os afundamentos de tensão em cada fase do sistema trifásico, é necessário fazer aquisição de seis sinais de tensão e três de corrente. Para tanto, foram construídos dois circuitos, um para a aquisição dos sinais de tensão e o outro para aquisição dos sinais de corrente, ambos usando a mesma tecnologia de sensoriamento, que tem como princípio de funcionamento o efeito *Hall*. Estes sensores são integrados, o que diminui as dimensões físicas dos circuitos construídos. Possuem também isolamento galvânica, permitindo-se trabalhar com níveis de tensão menores.

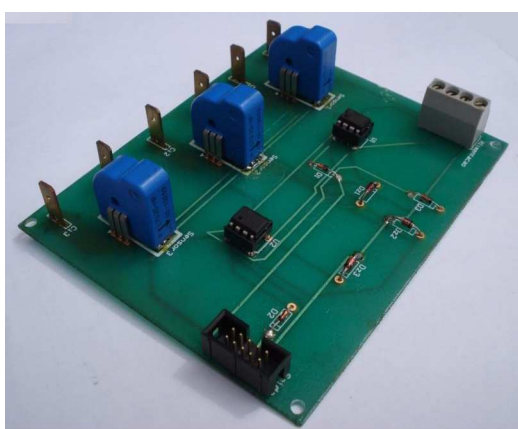
6.2.1 Sensoriamento de Corrente

O sensoriamento dos sinais de corrente é feito a partir de um transdutor de efeito *Hall* com laço-fechado (L/F), fabricado pela *LEM Components*, e de referência LTS 6 - NP. Este sensor possui três espiras que foram ligadas em paralelo para medir correntes mais elevadas, e necessita de +5V c.c. de alimentação. O sinal de saída deste sensor é uma tensão, onde foi projetado um circuito de proteção para o conversor A/D do DSP, o qual garante uma tensão dentro da faixa permitida para o processador. Para tanto, foram utilizados diodos Zener de 3,3 V (1N4728), amplificador operacional (TL082) e mais um diodo de sinal (1N4148). O circuito impresso confeccionado para o propósito de sensoriamento de corrente está mostrado na Fig. 6.2(a).

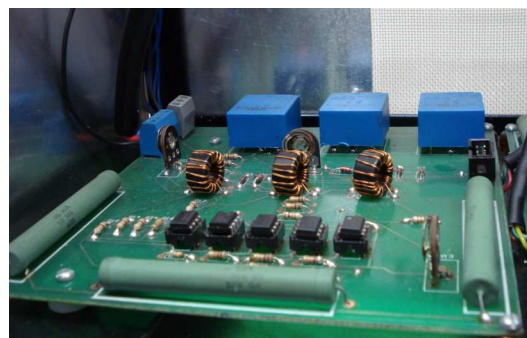
Neste transdutor de corrente, o sinal de saída e a corrente de entrada são determinados por uma relação linear. A tensão de saída é um sinal em torno de 2,5 V, que é exatamente metade da tensão de alimentação do componente. Então, o *offset* existe sem a inclusão de um circuito extra, sendo necessário e adequado, uma vez que os canais do conversor A/D exigem tensões entre 0 e 3,3 V.

6.2.2 Sensoriamento de Tensão

O transdutor de tensão com laço-fechado de fabricação *LEM Components*, tem referência LV25. Ele é baseado no mesmo princípio de operação do transdutor de corrente. A diferença está no circuito primário, o qual é feito de um enrolamento com um número maior de espiras. Para limitar a corrente advinda da rede, um resistor de potência de $56\text{ k}\Omega/20\text{W}$ é conectado em série com os terminais de entrada do sensor. Os circuitos que são associados ao sensor, devem realizar o deslocamento da forma de onda sensoreada (*offset*) para se tornar adequada aos canais A/D e promoverem uma isolação com o DSP. Desta forma, o circuito impresso é confeccionado com os referidos circuitos projetados para cada fase, totalizando três destes conjuntos por placa. A Figura 6.2(b) mostra o produto final e utilizado como condicionamento de tensão e as Figs. 6.3(a) e 6.3(b) ilustram sinais de saída da referida placa de condicionamento de tensão. A primeira corresponde ao sinal produzido na saída



(a)



(b)

Figura 6.2. Condicionamento utilizado na plataforma experimental. (a) Condicionamento de corrente. (b) Condicionamento de tensão.

sem nenhuma tensão da rede, apenas a fonte c.c. ligada para alimentar os componentes, e a segunda corresponde ao condicionamento de uma das fases da rede trifásica, que neste caso, foi ajustada para 150 V RMS.

O sinal entre 0 e 3,3 V é uma imposição feita pelo DSP e todo sinal de entrada deve

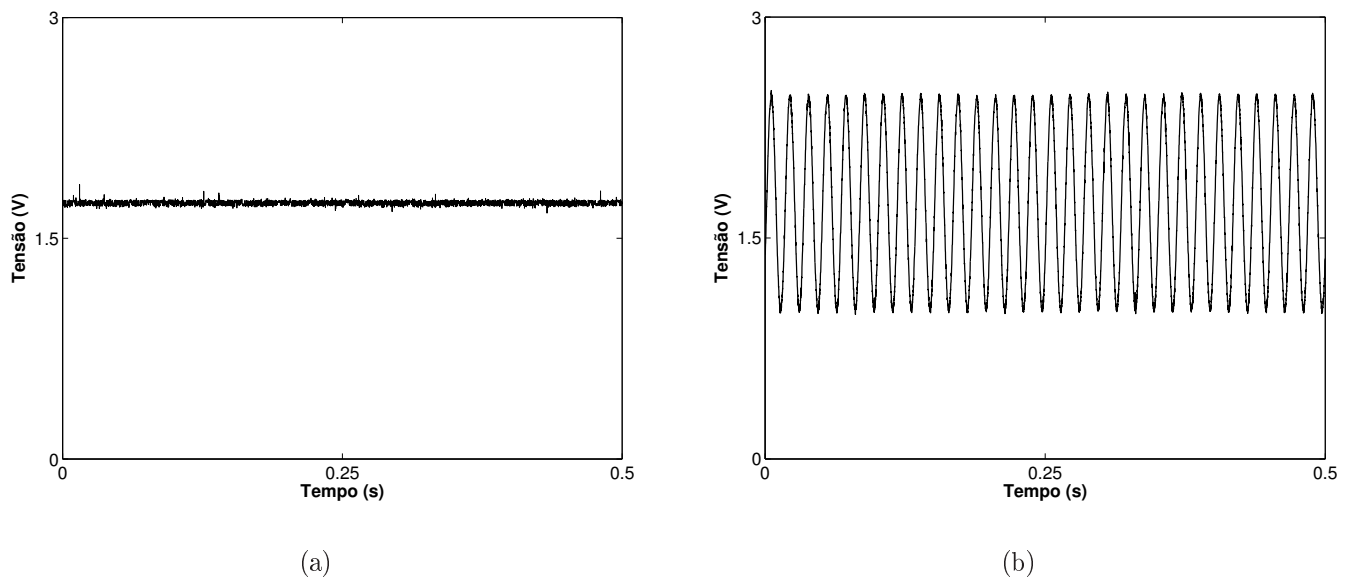


Figura 6.3. Sinais na saída da placa de condicionamento de tensão. (a) Sinal de *offset* necessário para entrada do conversor A/D. (b) Sinal da rede (± 150 V) após condicionamento.

ser assim configurado. Uma vez condicionado e depois digitalizado pelo conversor, o sinal é então armazenado nos registradores de entrada. No programa principal, o conteúdo destes registradores passam para variáveis criadas pelo usuário e assim as tensões da rede ficam incluídas no processamento. Mas, a inclusão somente se torna completa quando é desfeito o condicionamento do sinal para o programa, ou seja, elimina-se o *offset* e os valores das amplitudes são ajustadas para seus valores reais. No entanto, os ajustes não são precisos ao ponto de desfazer exatamente o que os circuitos de condicionamento fizeram, ficando um resíduo como erro. Este erro é justificado devido à tolerância existente nos componentes físicos que constituem os circuitos da placa. As consequências do erro são mais críticas em relação ao *offset*, pois a multiplicação que se faz necessária para desfazer este condicionamento provoca um deslocamento considerável na tensão que será usada na variável do programa. Por exemplo, um resíduo de 0,1 V provoca um deslocamento de aproximadamente 10 V, uma vez que o fator para desfazer o condicionamento da amplitude é em torno de 100. A consequência disso é que o DVR tentaria corrigir o valor do *offset* e assim a tensão na carga ficaria deslocada, pois o *offset* na verdade não existe na tensão da rede. A solução escolhida

para este problema foi recorrer ao uso da estimação por mínimos quadrados recursivo, como já discutido no capítulo 5. Este procedimento permite estimar a componente c.c. da variável e assim, reconstrói-se o sinal sem a mesma.

6.3 IMPLEMENTAÇÃO NO DSP

Atualmente, o uso de processadores digitais de sinal (DSP) tem se difundido para aplicações que necessitam de um processador dedicado, com capacidade e velocidade consideráveis e baixo consumo de energia. Além disso, estes processadores possibilitam realizar o controle do processo em tempo real e as interfaces estão se tornando mais flexíveis, permitindo uma programação mais acessível (FERNANDES; COSTA; Sá, 2006).

Algumas das principais características de um DSP são (TEXAS INSTRUMENTS, 2004a, 2005a, 2005b, 2004b, 2005c; SPECTRUM DIGITAL, INC., 2003):

- Operações de multiplicação e acumulação em um único ciclo de instrução.
- Funções matemáticas de alto nível.
- Arquitetura de memória com múltiplos acessos.
- Modos especializados de endereçamento.
- Periféricos internos ao *chip* e *interfaces* de I/O.

Todos os blocos apresentados na Fig. 6.1 que utilizam algum processamento são desenvolvidos em rotinas computacionais e executados de forma *online* em um DSP da Texas Instruments da família TMS320 e plataforma F2812 (Fig. 6.4). Diversas configurações estão associadas a este DSP e algumas das mais importantes e que foram exploradas neste trabalho estão citadas a seguir:

- Velocidade de operação de até 150 MIPS (Milhões de Instruções Por Segundo).

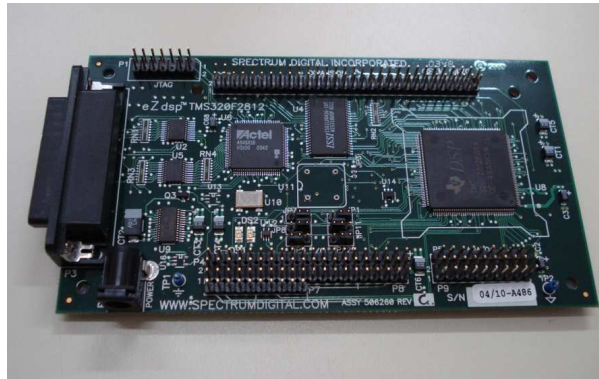


Figura 6.4. DSP TMS320F2812 utilizado como processador do DVR.

- Registradores de dados de 16 bits.
- Oscilador de 30 MHz *onboard*.
- Memória interna ao *chip*:
 - 18k *words* x 16 bits de RAM;
 - 128k *words* x 16 bits de Flash.
- *Interface* com memória externa.
- Dois módulos gerenciadores de eventos (EVA e EVB) cada um com dois temporizadores de 16 bits, oito canais PWM, três unidades de comparação e três unidades de captura.
- Memória externa ao *chip* de 64k *words* x 16 bits SRAM.
- Conversor Analógico/Digital (A/D) com 16 canais e 12 bits de resolução em cada canal.
- Canais de entrada e saída com tensões variando entre 0 e 3,3 V.
- Ambiente de programação *Code Composer* da Texas Instruments (TI F28xx).

As modulações utilizadas na comutação das oito chaves do inversor é efetivamente realizada por meio de módulos de gerenciadores de eventos (EV). Os circuitos PWM associados com as unidades de comparação tornam possível gerar os sinais PWM nos canais de saída. Nestas unidades, existem registradores de comparação que quando carregados são comparados com o valor do temporizador, o qual está configurado no modo de contagem contínuo

crescente. A Figura 6.5 ilustra a geração de um sinal PWM com a unidade de comparação ativada. Uma pequena modificação é feita em relação ao que está mostrado na figura. Se o sinal é alto ao fim do período t_s , no início do período seguinte ele deve permanecer alto e vice-versa. Para isso, ao invés de carregar o registrador de comparação com a diferença $t_s - \tau_x$, onde τ_x é a largura do pulso calculada, carrega-o apenas com τ_x . No período seguinte, carrega-se com $t_s - \tau_y$, e assim por diante. Os sinais PWM em um inversor de quatro braços necessitam de quatro unidades de comparação diferentes, uma para cada braço.

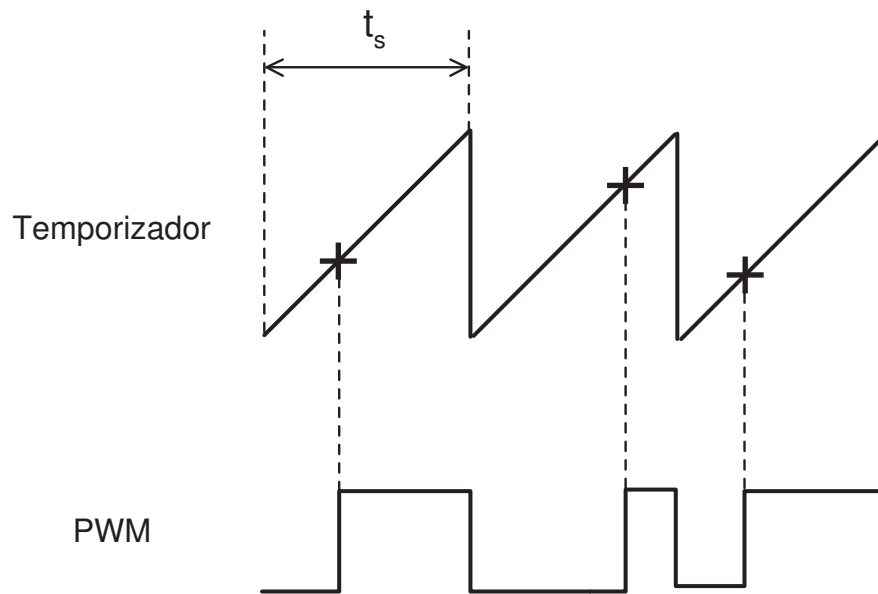


Figura 6.5. Geração do sinal PWM a partir da unidade de comparação.

O algoritmo utilizado para determinar as larguras de pulso é dividido em duas partes: uma rotina que calcula as larguras de pulso por meio de (5.15)-(5.17) e uma subrotina onde registradores de comparação são carregados para realizar a geração dos sinais PWM de saída. Todas as operações são executadas antes da ocorrência da interrupção. Após o carregamento dos registradores de comparação, a qualquer instante antes do fim do período de amostragem, pode acontecer a comparação, ou seja, a transição de borda do sinal PWM, uma vez que a contagem do temporizador não depende da execução do programa principal.

Em relação ao conversor A/D, a velocidade máxima de aquisição disponível nesta plataforma é de 25 MHz. Esta mesma velocidade foi configurada, mas é acima da necessária para

aquisição, uma vez que a velocidade relacionada ao período de amostragem t_s é de 10 kHz. Sendo assim, um modo estabelecido para as aquisições foi o *start-stop*, onde uma única aquisição é realizada por período de amostragem. Este período é estabelecido em 100 μ s (período relativo a 10 kHz). Como a frequência de conversão é de 25 MHz, existiriam várias conversões em um período de amostragem, mas desnecessárias, pois uma única amostra é utilizada por período. Isso justifica o uso do referido modo na conversão.

O tempo mínimo de conversão é de aproximadamente 520 ns, correspondendo a treze ciclos de clock na velocidade de 25 MHz. Neste trabalho, dos dezesseis canais A/D disponíveis, foram utilizados nove: três para aquisição das tensões da rede, três para correntes dos capacitores e três para tensões na carga, conforme mostrado na Fig. 6.1. Estes sinais são adquiridos no modo sequenciado, ou seja, os sinais são convertidos em sequência de acordo com uma ordem pré-estabelecida, um por vez. Em relação aos sinais de saída do DSP, são necessários oito canais, pois existem oito chaves no inversor de tensão.

Um outro aspecto a ser considerado é em relação a memória externa do DSP (XINTF). Como já foi mostrado em capítulos anteriores, para poder observar as três tensões da rede com defeitos, as três tensões de correção e as três tensões na carga, todas simultaneamente, seriam necessários nove canais de osciloscópios para capturá-las. Uma outra restrição nestas medições é que os osciloscópios disponíveis no laboratório capturam até 2500 amostras por janela, distribuídas para todas as formas de onda presentes. Ficou constatado que janelas de 0,5 s são adequadas para observação dos fenômenos de afundamento e elevação de tensão apresentados neste trabalho. No entanto, o uso do osciloscópio com este intervalo de tempo apresenta-se com pouca resolução, difícil de observar os sinais e portanto, tendencioso a conclusões erradas em relação ao que de fato ocorre. O uso da memória externa se configurou como a solução para medição dos sinais e com janelas de 0,5 s, sendo possível armazenar 5000 amostras para cada forma de onda. Então, 9 canais do conversor A/D foram utilizados para a medição das tensões, sendo um canal para uma tensão. Como as 3 tensões da rede já eram medidas para os propósitos de controle, as outras 6 tensões foram medidas a partir

de mais duas placas com 6 sensores e respectivos condicionamentos, como já mostrado na Fig. 6.2(b).

Como mencionado, o período de amostragem é fixado em $100\mu\text{s}$. Para garantir que este tempo seja cronometrado corretamente, uma interrupção associada ao temporizador é habilitada. Esta interrupção faz parte do grupo 2 que é disponibilizada pelo processador, e é acionada quando o temporizador iguala a um valor pré-estabelecido, no caso, $100\mu\text{s}$ transformado em número de *clocks*. Ao ser acionada a interrupção, o programa passa a executar a subrotina feita para carregar os registradores de comparação. Mesmo no instante de execução da subrotina, o contador que logo tinha sido zerado, recomeça a contagem. Finalizando a subrotina, o programa retorna ao principal e reinicia os cálculos do período seguinte.

6.4 INVERSOR DE TENSÃO

O inversor de tensão é o principal componente de um DVR. Um capítulo foi dedicado a este dispositivo, inclusive para tratar das estratégias de modulação utilizadas. Já foi comentado que o inversor utilizado na montagem experimental (Fig. 6.6(a)) é de quatro braços. As tensões de saída são em PWM de dois níveis e as duas chaves constituintes de um braço são complementares, ou seja, quando uma está aberta a outra está fechada e vice-versa. O *driver* utilizado para o acionamento das chaves é o SKHI 22B da Semikron. Este *driver* possibilita configurar o tempo morto (*dead time*) no próprio dispositivo, sendo então desnecessário fazer esta consideração na programação do DSP. Dentre as possibilidades existentes, $1,3\mu\text{s}$ para o tempo morto foi configurado.

As oito chaves de potência utilizadas no inversor são IGBTs, também de fabricação Semikron. O modelo utilizado destas chaves suporta até 1200 V de tensão e 50 A de corrente a 25°C . Como é conhecido, os IGBTs são chaves que têm o disparo e o bloqueio controlados. A bidirecionalidade de corrente é conseguida com um diodo em anti-paralelo com o transistor.

Detalhes dos *drivers* e dos IGBTs do inversor da plataforma experimental, estão mostrados na Fig. 6.6(b).

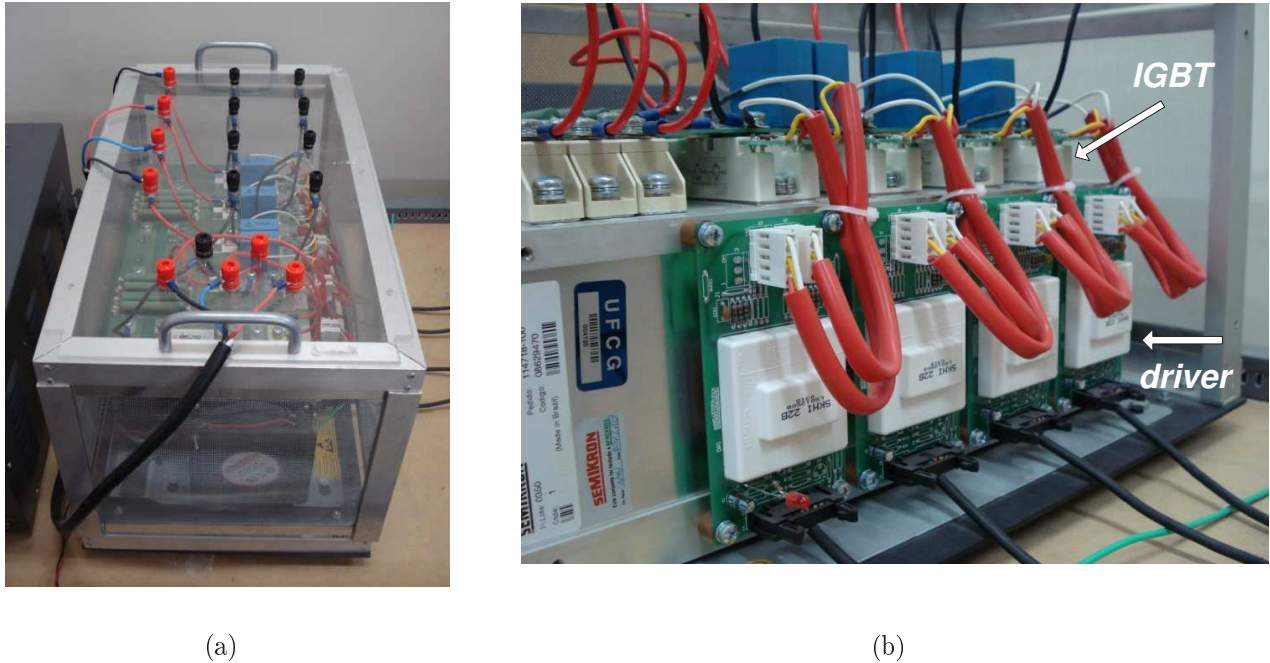


Figura 6.6. Inversor de tensão de quatro braços. (a) Conjunto utilizado na plataforma experimental do DVR. (b) Detalhes dos *drivers* e dos IGBTs.

A tensão c.c. que corresponde a tensão na entrada do inversor é armazenada em capacitores (Fig.6.7(a)). Estes capacitores formam o barramento c.c., sendo V_{cc} a tensão total. Quatro capacitores de $4700 \mu\text{F}/450 \text{ V}$ formam o barramento, sendo que dois para configurar o nível de tensão $+V_{cc}/2$ e os outros dois para $-V_{cc}/2$. Existem algumas possibilidades para o carregamento destes componentes, como por meio de banco de baterias, ou mesmo por outro conversor. Vantagens e desvantagens estão associadas a cada uma destas configurações. No caso da plataforma experimental deste trabalho, um retificador a diodos foi utilizado (Fig.6.7(b)). Como observado na Fig. 6.1, este retificador não-controlado é conectado à rede, e é ele quem garante o fornecimento de tensão ao barramento c.c. do inversor. Na maioria dos experimentos que foi realizada neste trabalho, a tensão do barramento foi ajustada para 400 V.



(a)



(b)

Figura 6.7. Partes constituintes do inversor de tensão. (a) Capacitores que formam o barramento c.c. (b) Ponte de diodos trifásica.

6.5 REDE TRIFÁSICA

A representação da rede trifásica da plataforma experimental é feita a partir de uma fonte de tensão programável de fabricação *California Instruments*, modelo 3000Lx (Fig. 6.8(a)). Com este gerador é possível programar as formas de onda de tensão trifásicas de saída que irão constituir as tensões da rede, e ainda incluir afundamentos, elevações, saltos de fase, distorções e transitórios, bem como a duração destes eventos. A fonte tem potência 3000 VA 3ϕ e até 200 V RMS por fase.

Alguns tipos de cargas foram utilizadas, sendo alimentadas pela rede descrita anteriormente. Esta variedade de cargas é feita para testar o desempenho do sistema de controle, bem como o próprio sistema DVR em diferentes cenários. Os testes com cargas lineares foram feitos com cargas resistivas, dispostas em bancos de resistores, como mostrado na Fig. 6.8(b). Para representação de uma carga não-linear, utilizou-se uma ponte retificadora a diodos 6.9(a) alimentando um motor c.c. 6.9(b), ou mesmo o banco de resistores ao invés do motor. O motor c.c. utilizado tem os parâmetros mostrados na Tabela 6.2.

A geração da corrente de campo em todos os experimentos com o motor c.c. é obtida a partir da utilização de uma outra ponte retificadora a diodos, alimentada por um au-

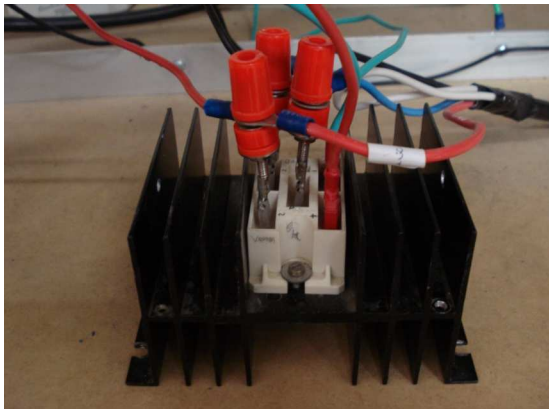


(a)



(b)

Figura 6.8. Elementos do sistema trifásico. (a) Fonte de tensão programável utilizada como rede trifásica. (b) Banco de resistores.



(a)



(b)

Figura 6.9. Outras cargas para o sistema trifásico. (a) Ponte retificadora trifásica a diodo. (b) Motor c.c.

totransformador (diferente daquele mostrado na Fig. 6.1). A tensão retificada alimenta a armadura.

Tabela 6.2. Parâmetros do motor c.c.

Parâmetro	Valor
Potência nominal	1,5 HP
Tensão armadura	200 V
Corrente armadura	7,5 A
Velocidade	1800 rpm

6.6 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentado o restaurador dinâmico de tensão desenvolvido em laboratório. O diagrama esquemático que foi mostrado é uma representação de como as técnicas são utilizadas até a geração das tensões injetadas. Em seguida, cada uma das etapas correspondente a plataforma foi descrita para um melhor entendimento do projeto. No caso do condicionamento de tensão e corrente, o *offset* de tensão seria uma dificuldade em desfazer o condicionamento no programa, pois existem as tolerâncias dos elementos que constituem os circuitos de condicionamento. A estimação desta componente possibilita a reconstituição do sinal sem *offset* e que não vai ser gerado e injetado na rede.

O DSP utilizado é adequado para a aplicação do DVR, uma vez que possui uma quantidade de canais A/D e sinais PWM suficientes para produzir as tensões a serem injetadas, além de realizar um processamento rápido e disponibilizar recursos que ajudam na operacionalidade como interrupções, gerenciadores de evento, biblioteca matemática para programação em ponto fixo, entre outros. Existe ainda a possibilidade de usar a memória externa para armazenar tensões e correntes, neste caso, assumindo a função de medidor.

No capítulo seguinte, alguns cenários de diferentes afundamentos e elevações com diferentes tipos de cargas são apresentados, todos extraídos da plataforma experimental.

RESULTADOS E ANÁLISES

Os controles em malha aberta e fechada podem ser aplicados ao sistema de controle de um DVR. As limitações, vantagens e desvantagens de cada um foram mencionadas nos capítulos 3 e 4. O controle em malha aberta necessita apenas da aquisição das tensões trifásicas da rede para que em seguida seja realizada a comparação com os valores de referência. É conveniente lembrar que as referências estão dispostas em componentes d e q e também separadas em componentes de sequência, uma vez que o DVR deve contemplar afundamentos desequilibrados. Sendo assim, um conjunto de experimentos foi realizado com objetivo de testar o desempenho do DVR montado como plataforma experimental e validar as estratégias propostas neste trabalho.

A Figura 7.1 mostra as tensões medidas nos terminais secundários de um transformador trifásico, o qual está atuando como a rede trifásica que alimenta as cargas. Os afundamentos foram introduzidos selecionando apropriadamente os taps com relés. Duas destas fases foram afundadas de $320 V_{pico}$ para $272 V_{pico}$ como mostrado na Fig. 7.1(a). Durante o período de pré-afundamento, a decomposição instantânea produz $320 V$ na amplitude da componente da sequência positiva e pequenas tensões residuais de componentes negativa e zero. Durante o afundamento, as componentes de sequência medidas são $287 V_{pico}$, $23 V_{pico}$ e $17 V_{pico}$ e os valores calculados para o tipo de afundamento apresentado são de $288 V_{pico}$, $24 V_{pico}$ e $16 V_{pico}$.

No capítulo 4 foi mostrado na Fig 4.25 um resultado de simulação referente a um afundamento adquirido de uma rede trifásica e com amplitudes diferentes. Estas tensões estão mostradas novamente na Fig. 7.2(a). Elas são geradas a partir da fonte de tensão pro-

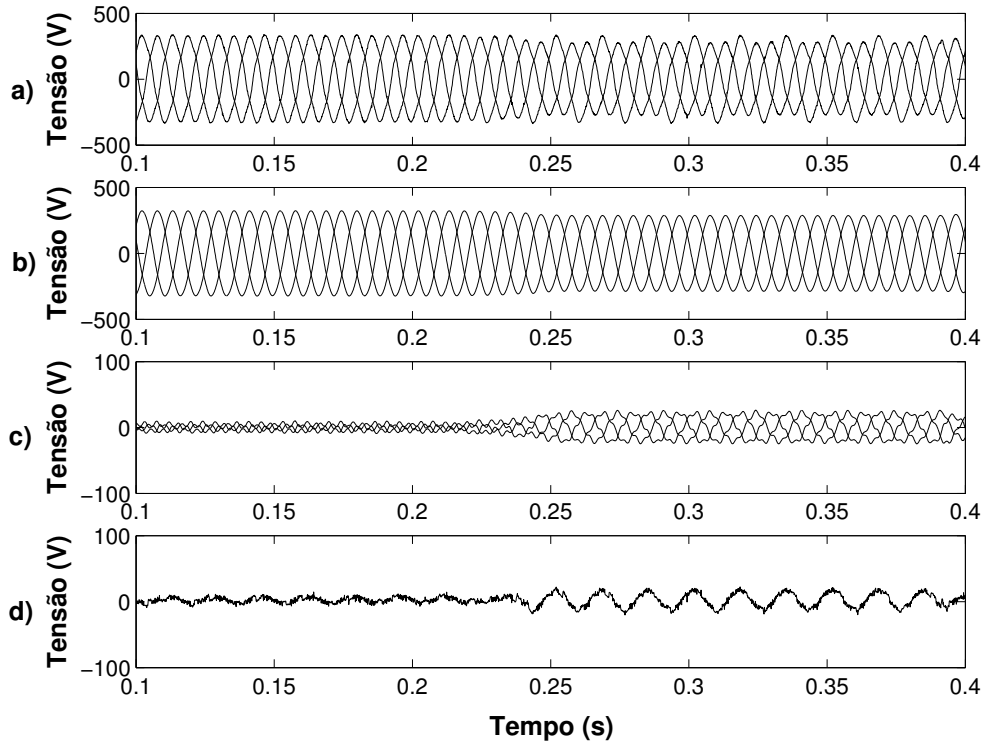


Figura 7.1. Componentes de sequência de tensões trifásicas com afundamento desequilibrado. (a) Tensões trifásicas. (b) Sequência positiva. (c) Sequência negativa. (d) Sequência zero.

gramável (Fig. 6.8(a)). Os afundamentos têm duração de 250 ms com intensidades diferentes em duas fases, neste caso. Na fase b, o afundamento é de 30% enquanto na fase c é de 50%. Neste texto, entende-se por afundamento a forma de onda de tensão remanescente na ocorrência do distúrbio. Portanto, 30% de afundamento significa uma diminuição de 70% na amplitude da tensão. A escolha das intensidades para os afundamentos mostrados nesta figura, não seguem nenhum critério específico. A intenção é chamar a atenção para a presença de um desequilíbrio intenso entre as tensões da rede. A duração de 250 ms na ocorrência do distúrbio caracteriza o afundamento como sendo Momentâneo, segundo o Módulo 8 da Recomendação Brasileira da ANEEL (ANEEL, 2007).

Na verdade, este processo de correção é realizado *online* e portanto, este resultado de medição é obtido primeiramente. De posse dos dados das tensões da rede é que se torna possível utilizá-las como dados de entrada na simulação que foi mostrada no cap. 4. Da mesma forma, a Fig. 7.2(b) representa a inserção de tensão na rede por meio do DVR, sendo que neste caso, por ser experimental, deve-se passar pelos processos de aquisição das tensões,

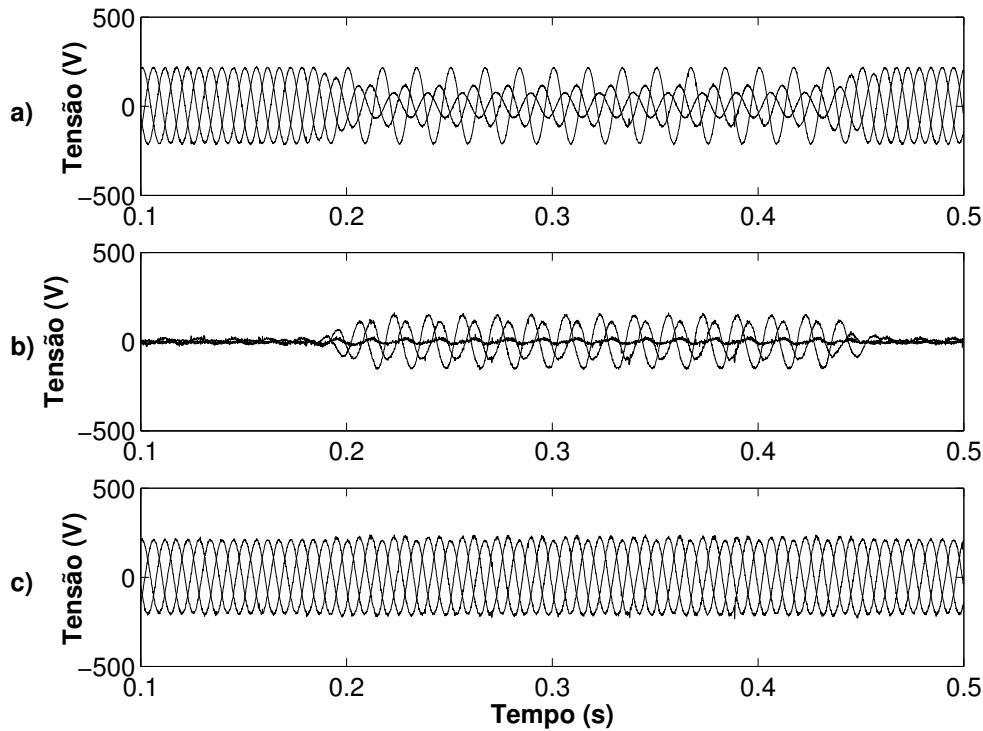


Figura 7.2. Resultado experimental com mesmas tensões de rede da Fig. 4.25. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

condicionamento dos sinais, processamento, produção dos sinais PWM, filtragem e inserção na rede. A soma das tensões da rede com as tensões a serem injetadas estão mostradas na Fig. 7.2(c). No intervalo de correção, existem duas fases com amplitudes com 7% de elevação em relação ao valor nominal (1 pu). Este resultado ainda é plenamente satisfatório pois baseando-se pelas normas (IEEE 1159, 1995) e (ANEEL, 2007), recomenda-se que as tensões da rede devem ser mantidas a $1 \text{ pu} \pm 10\%$. Portanto, a precisão da resposta de um DVR não é a essencialidade.

Um outro experimento a ser realizado é com uma carga trifásica resistiva (Fig.6.8(b)). Por ser resistiva, o fator de potência é unitário e sendo uma carga linear, as formas de onda de corrente também são senoidais, uma vez que as tensões da rede são assim definidas. A Figura 7.3 representa o experimento realizado. As tensões da rede foram configuradas na fonte de tensão programável. Antes do afundamento, as tensões assumem 150 V RMS, que é aproximadamente 212 V de pico. Como mencionado no cap. 2, a ocorrência de uma falta em pontos distantes centenas de quilômetros da carga podem ocasionar elevações

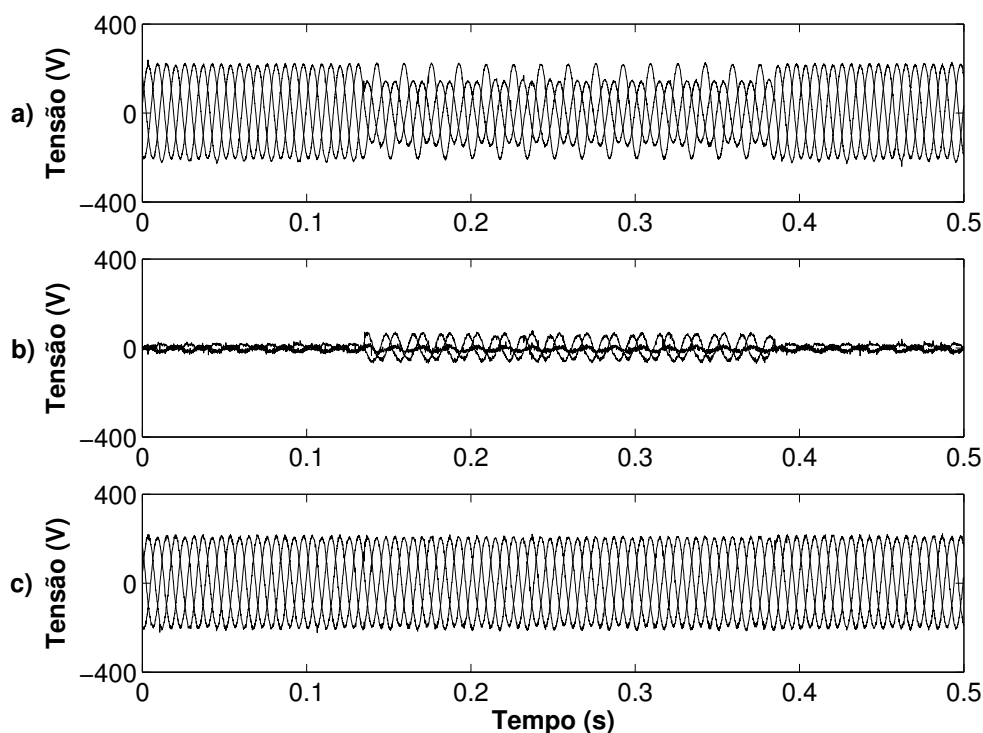


Figura 7.3. Resultado experimental com uma carga resistiva trifásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

e/ou afundamentos de tensão para a mesma. Dependendo do tipo de falta, o afundamento é caracterizado de uma determinada forma. No caso da Fig. 7.3, duas fases afundaram, então, está representando uma falta fase-fase ou mesmo uma falta fase-terra de acordo com a Fig. 2.7. A tensão que é entregue a carga (Fig. 7.3(c)) possui características satisfatórias, pois a amplitude nominal é restaurada durante toda a faixa de tempo.

Na tentativa de mostrar com mais detalhes o desenvolvimento deste experimento, algumas etapas são mostradas nas Figs. 7.4 e 7.5. A Figura 7.4(a) é uma representação da tensão da rede de eixo β em função da tensão da rede de eixo α . As amostras que compõem esta curva foram adquiridas pelas respectivas variáveis no DSP, durante a ocorrência do afundamento. O desenho é uma imagem do vetor formado pelas três fases em cada instante e a curva se apresenta como uma elipse, que é característico de um sistema desequilibrado. Dependendo da intensidade ou do tipo de desequilíbrio, a elipse toma formas diferentes. A Figura 7.4(b) mostra a tensão de sequência zero adquirida a partir da variável que calcula esta componente no programa, e determinada a partir das tensões da rede. Tanto no controle em malha aberta

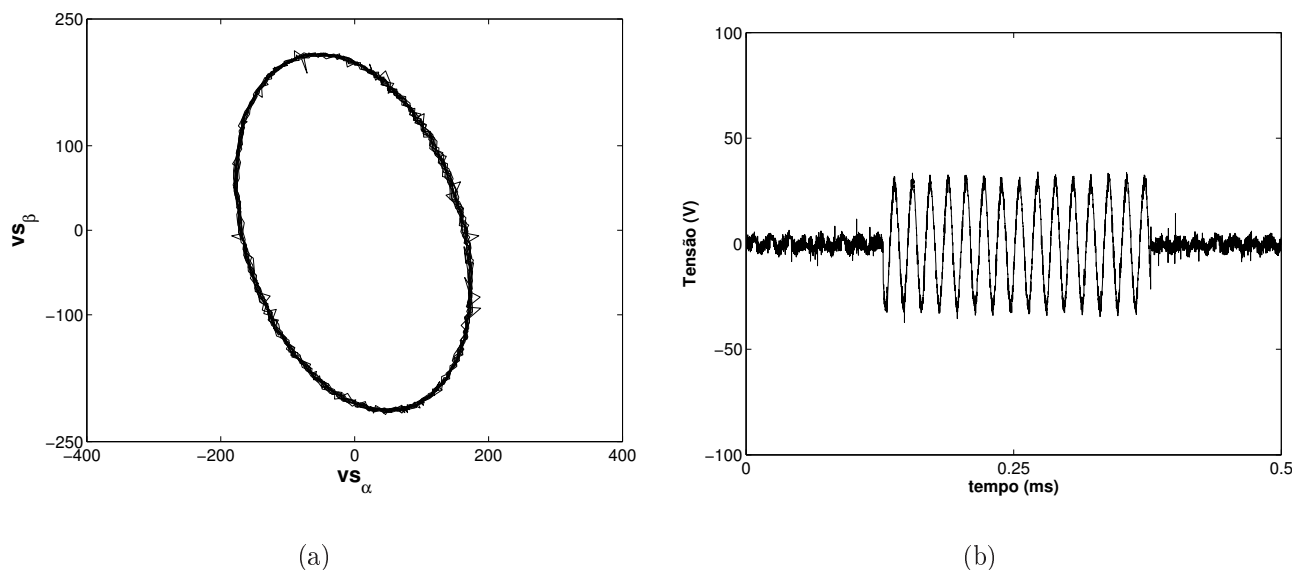
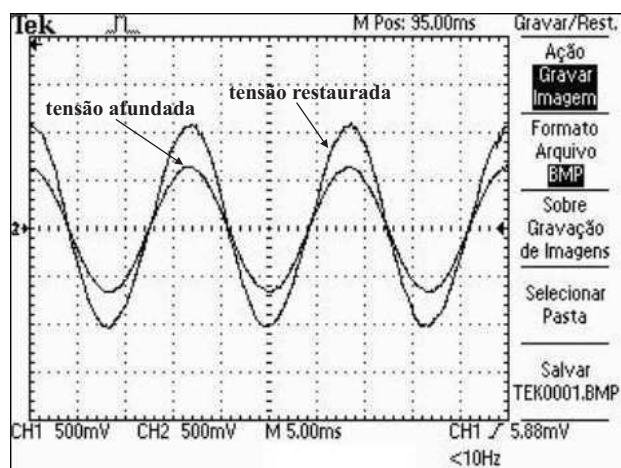


Figura 7.4. Curvas experimentais medidas para um afundamento em duas fases - Parte 1. (a) Tensão da rede de eixo β em função da tensão da rede de eixo α . (b) Componente de sequência zero.

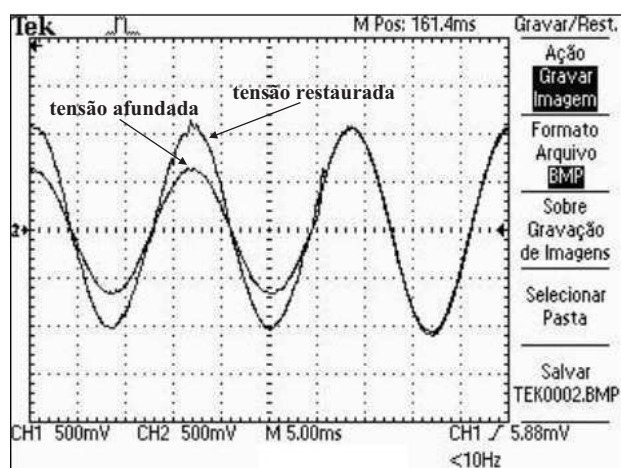
como fechada, esta componente é gerada exclusivamente no quarto braço do inversor.

A Figura 7.5(a) é uma medição em osciloscópio de uma fase para ilustrar a correção durante o afundamento da tensão nominal de 150 V RMS, enquanto que a Fig. 7.5(b) ilustra a mesma medição, mas com detalhe na transição entre o afundamento e o pós-afundamento. O retorno da tensão da rede ao valor nominal é realizado em tempo mínimo possível estabelecido pela fonte de tensão programável, e a tensão na carga volta a rastrear rapidamente esta tensão, graças aos procedimentos de controle projetados e utilizados. A Figura 7.5(c) mostra ainda a mesma medição com a tensão na rede, ou seja, a montante do DVR, e a tensão corrigida sobre a carga a jusante, com a escala de tempo do osciloscópio aumentada para ter esta visualização. A Figura 7.5(d) completa o conjunto de resultados mostrando a tensão no barramento c.c. durante este experimento. Pode-se observar que durante os 500 ms, não houve o decaimento de tensão dos 230 V aplicados. Vale ressaltar que para estas medições, a ponta de prova diferencial foi configurada para estabelecer uma queda de tensão de 200 vezes.

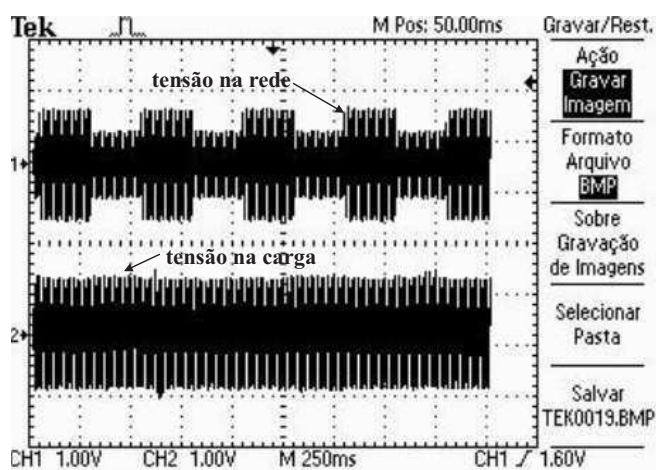
Os afundamentos e elevações de tensão geralmente são acompanhados de saltos de fase.



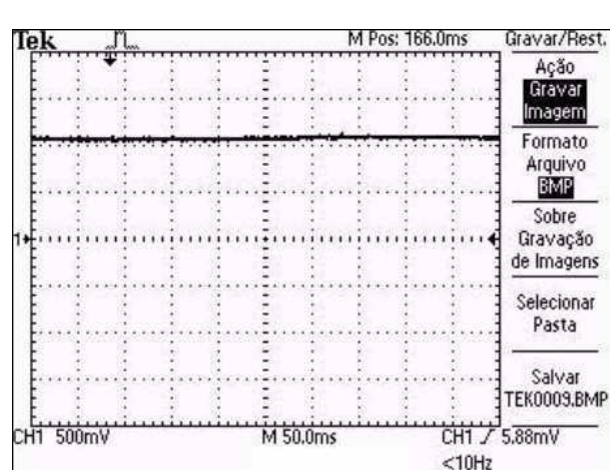
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 7.5. Curvas experimentais medidas para um afundamento em duas fases - Parte 2. (a) Medição na fase c durante afundamento. (b) Medição na fase c enfocando a transição entre o afundamento e o pós-afundamento. (c) Medição na fase c visualizando a tensão na rede sem correção e a tensão na carga após correção. (d) Tensão do barramento c.c.

Alguns tipos de cargas são mais sensíveis a estes fenômenos, principalmente conversores de potência que utilizam a informação do ângulo de fase para os instantes de comutação. Para mostrar o desempenho do DVR experimental em relação ao salto de fase, afundamentos na rede trifásica acompanhados de saltos de fase de 40° foram programados na fonte de tensão e estão mostrados na Fig. 7.6(a). O afundamento é desequilibrado com amplitudes diferentes nas três fases. As tensões corrigidas das amplitudes e saltos de fase estão mostradas

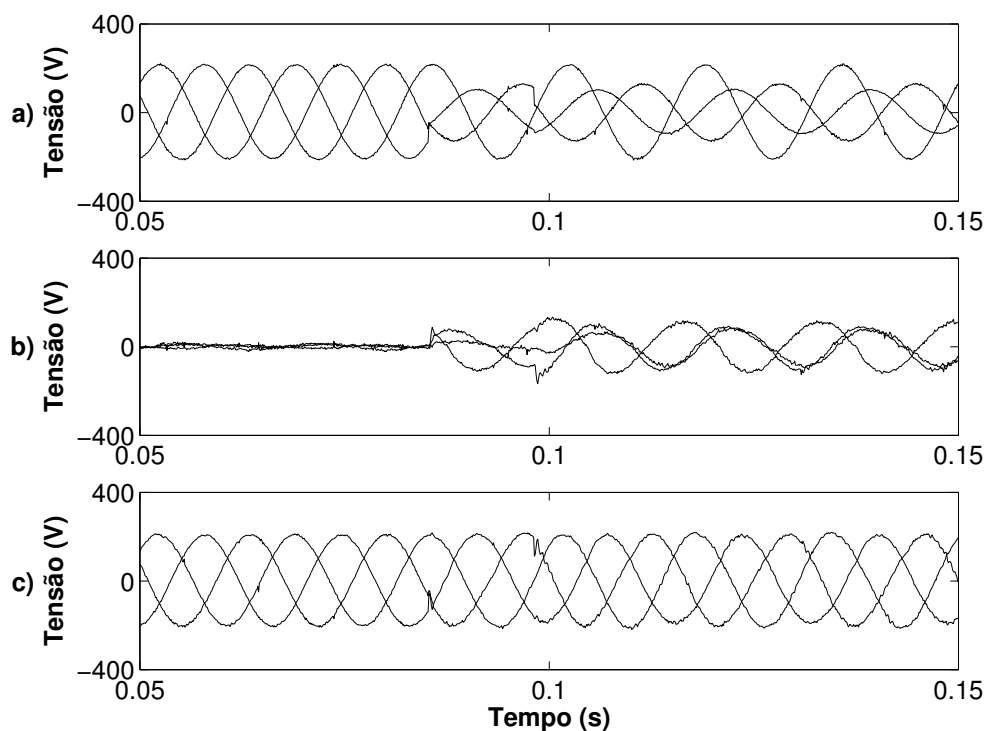


Figura 7.6. Desempenho do DVR em relação ao salto de fase. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

na Fig. 7.6(c). É possível observar que ocorre um transitório de pequena duração, mas que é rapidamente amortecido. Este bom desempenho deve-se ao sistema que realiza a sincronização de fases, bem como o sistema de controle. Os parâmetros deste sistema foram determinados, dentre outras características, para uma velocidade de compensação adequada à duração de ocorrência de afundamentos, como é determinado pelas recomendações da ANEEL (ANEEL, 2007). O mesmo desempenho relativo aos saltos de fase para outros tipos de afundamentos também foram alcançados, como pode ser visto nos demais resultados.

Como já mencionado anteriormente, cargas não-lineares nos experimentos são conseguidas por meio de um retificador trifásico não-controlado (retificador trifásico a diodos). A primeira carga a ser utilizada e alimentada pelo retificador é o motor c.c., cuja configuração foi descrita anteriormente. Os resultados desta montagem estão mostrados nas Figs. 7.7 e 7.8.

Mais uma vez, os gráficos com letra “a” correspondem às tensões da rede, enquanto que as letras “b” às tensões injetadas pelo DVR na rede e as letras “c” às tensões corrigidas sobre a carga. As tensões da rede pré e pós-afundamento têm amplitude de 120 V. Este valor se

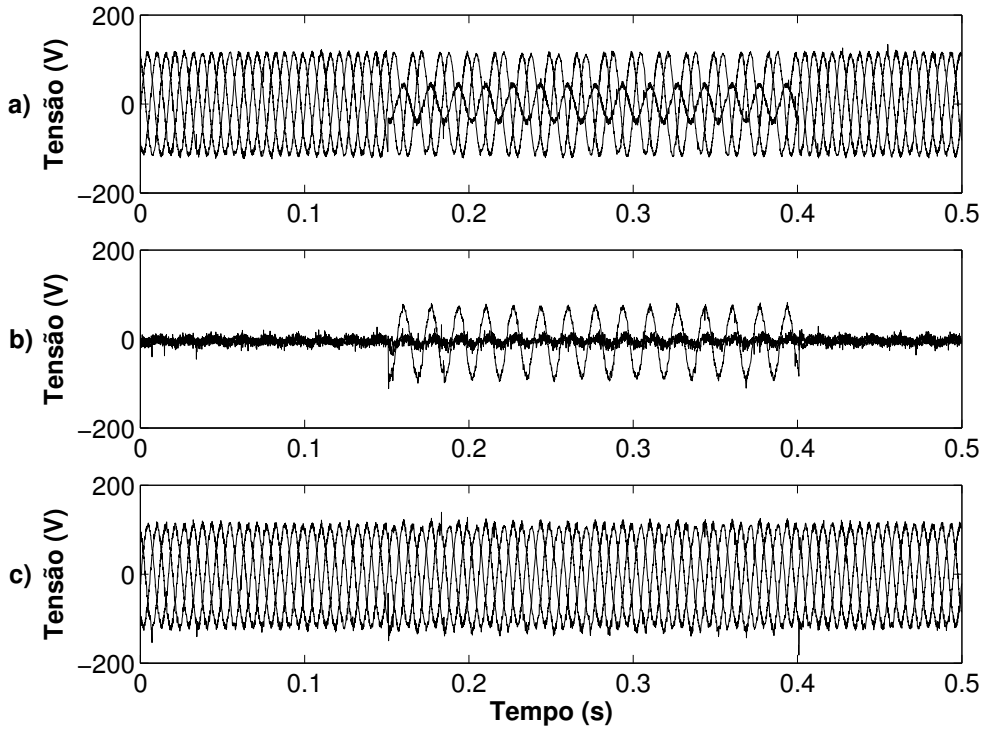


Figura 7.7. Resultado experimental do retificador com motor c.c. representando uma falta monofásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

justifica pelo fato de a tensão nominal de armadura ser 200 V, ou seja, dada a tensão de pico na fase da rede, a tensão RMS de saída do retificador (tensão de armadura) é dada por (RASHID, 1993):

$$V_{oRMS} = \left(\frac{3}{2} + \frac{9\sqrt{3}}{4\pi} \right)^{1/2} V_{pfase} = 1,6554V_{pfase}. \tag{7.1}$$

É importante observar que a carga mencionada corresponde ao conjunto retificador-motor. As três figuras representam tipos de afundamentos diferentes, os quais estão relacionados com os tipos de falta. Na Fig. 7.7(a), o afundamento monofásico é de 30%, enquanto que na Fig. 7.8(a) o afundamento trifásico é de 30%.

Uma outra análise a ser considerada é em relação às correntes produzidas na rede quando se tem este tipo de carga. A Figura 7.9 ilustra esta grandeza quando as tensões em 7.8(a) são aplicadas sobre a carga.

A apresentação desta corrente é feita monofásica para uma melhor visualização, pois como se trata de um afundamento trifásico, as outras duas formas de onda de corrente são

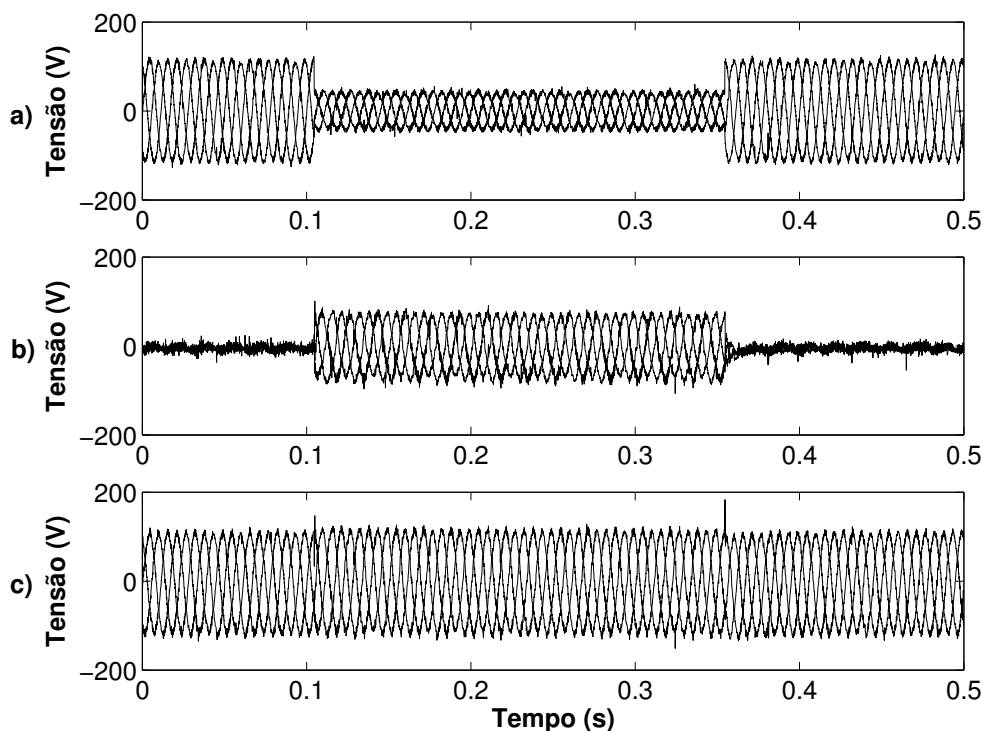


Figura 7.8. Resultado experimental do retificador com motor c.c. representando uma falta trifásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

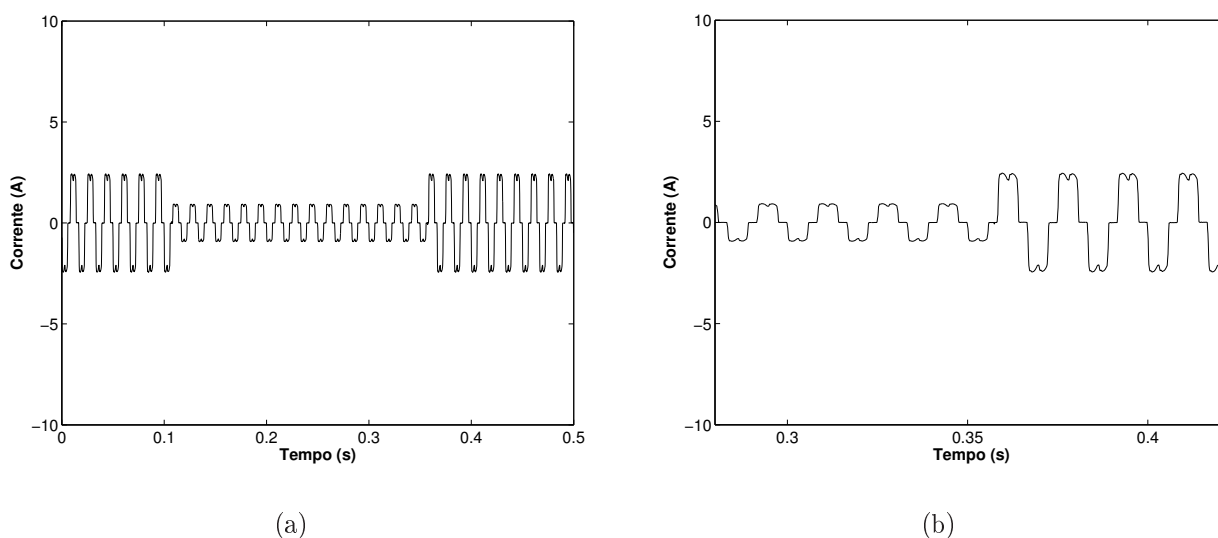


Figura 7.9. Corrente do retificador para o afundamento trifásico mostrado na Fig.7.8. (a) Representação de uma fase. (b) Estreitamento horizontal da janela para uma melhor visualização da forma de onda.

semelhantes, mas existindo a defasagem de 120° de uma em relação a outra. Vale observar que para a aquisição destas correntes foi utilizada a memória externa do DSP, adquiridas por meio de mais três canais do conversor A/D.

A não-linearidade da carga faz com que estas correntes sejam distorcidas, promovendo a distorção das tensões na carga devido a impedância da fonte. Este efeito é observado nas letras “c” das Figs. 7.7 e 7.8.

7.1 CONTROLE EM MALHA FECHADA

Até o momento foram mostrados resultados a partir do controle em malha aberta. Nesta seção serão apresentados os resultados referentes a correção de tensão a partir do controle em malha fechada proposto, apresentado no capítulo 4, e com as mesmas metodologias de inserção na rede também propostas neste trabalho.

A Figura 7.10 representa a correção de um afundamento de tensão em uma rede que alimenta uma carga resistiva. Assim como nos casos anteriores, a duração do afundamento é

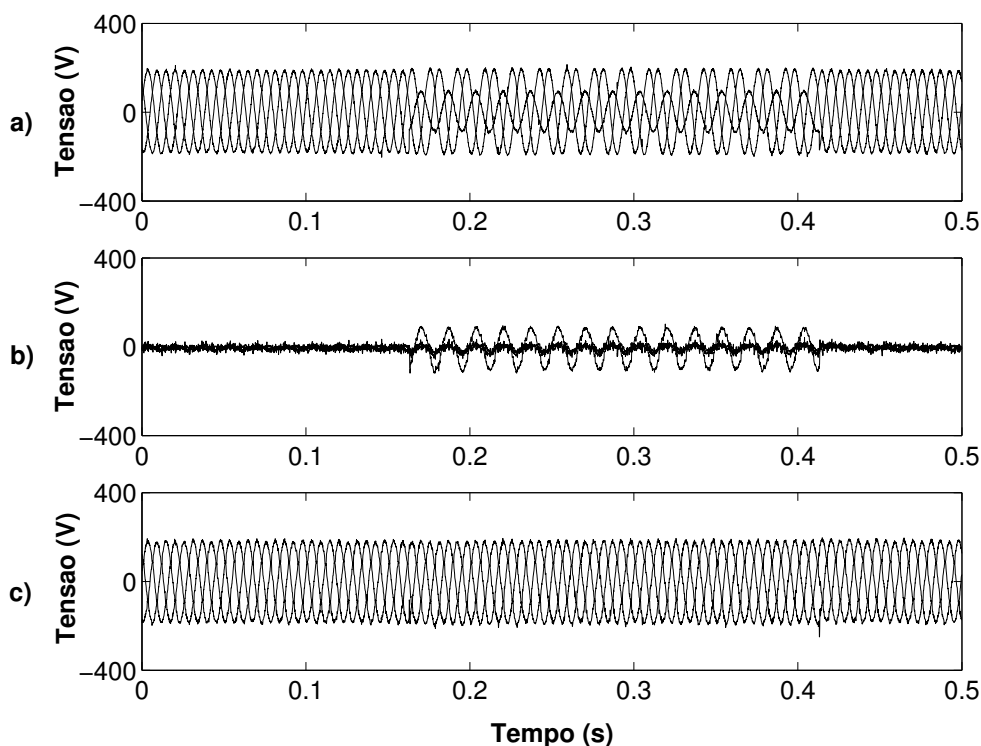


Figura 7.10. Resultado experimental com carga resistiva representando uma falta monofásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

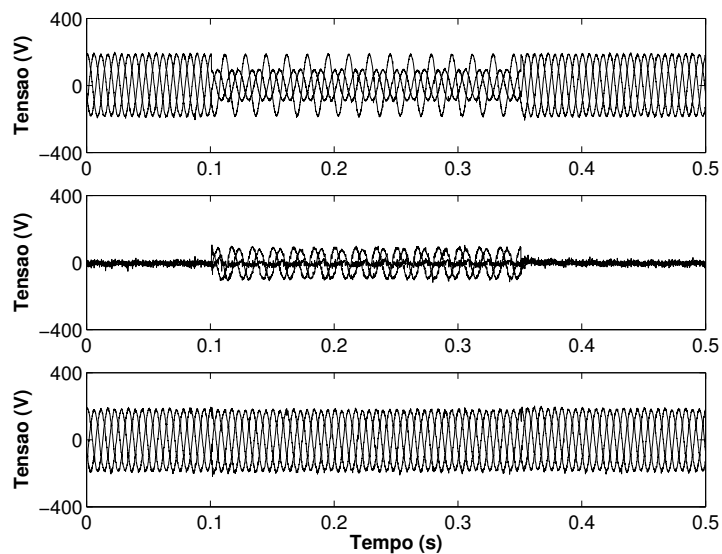
programada para uma duração de 250 ms (Fig 7.10(a)), metade do tempo total apresentado na figura. Este afundamento representa a consequência de uma falta monofásica ocorrida

no sistema elétrico, propagando e manifestando-se na forma de afundamento na carga. A amplitude é programada para 50% na fonte de tensão programável. Nas transições pré e pós afundamento existem pequenos transitórios devido à variação da tensão que portanto, exige um pequeno tempo para o restabelecimento das novas condições de regime permanente. Mas como observado na Figura 7.10, são rapidamente amortecidos e durante toda a faixa de tempo em que ocorre o afundamento, a correção é satisfatória, ficando a carga imune do distúrbio presente na rede.

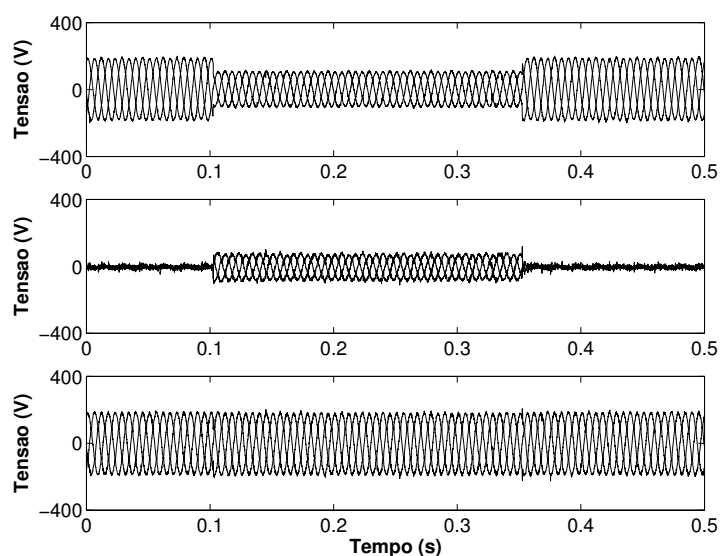
Da mesma forma, a partir de uma tensão programada de 150 V RMS ($212 V_{pico}$), um afundamento bifásico representando uma falta fase-fase ou fase-fase-terra no sistema elétrico foi configurado e está mostrado na Fig. 7.11(a). Mais intenso que no caso anterior, o afundamento nas duas fases é de 40% sobre a carga resistiva. A observação da tensão sobre a carga evidencia a restauração ocorrida, uma vez que a amplitude é praticamente constante durante toda a faixa de tempo. Pequenas variações são observadas nas transições pelos mesmos motivos já expostos no caso anterior.

A Figura 7.11(b) mostra o terceiro caso experimental com carga resistiva. Este afundamento de 50% nas três fases é uma representação de uma falta trifásica. Como também pode ser observado, a tensão na carga tem o mesmo nível de tensão durante toda a faixa de tempo. A presença dos pequenos transitórios são inevitáveis, mas como já comentado, suas presenças são desprezíveis ao analisar toda a faixa de tempo.

Analisados os resultados com uma carga resistiva e linear, serão mostrados resultados a partir de uma carga não-linear, constituída por uma ponte retificadora a diodos e resistores de potência conectados à sua saída. As correntes têm o mesmo formato como visto no caso de malha aberta e não serão mostradas novamente. A Figura 7.12 representa os resultados de um afundamento monofásico (Fig. 7.12(a)), as tensões injetadas na rede estão mostradas na Fig. 7.12(b) e as tensões restauradas e entregues à carga na Fig. 7.12(c). Como pode ser visto, a tensão na carga é restaurada. Observa-se que existem pequenas falhas no intervalo de duração do afundamento, diferente do que ocorreu no mesmo caso para a carga puramente



(a)



(b)

Figura 7.11. Resultado experimental com carga resistiva. (a) Representação de uma falta bifásica. (b) Representação de uma falta trifásica.

resistiva. Esta pequena diferença pode estar relacionada à estimação das componentes de sequência onde não é contemplada as parcelas das componentes harmônicas, o que pode prejudicar a qualidade da estimação e assim corrigir a tensão com pequenos erros. Dependendo da intensidade destas harmônicas, o nível de deterioração pode ser menor ou maior. No

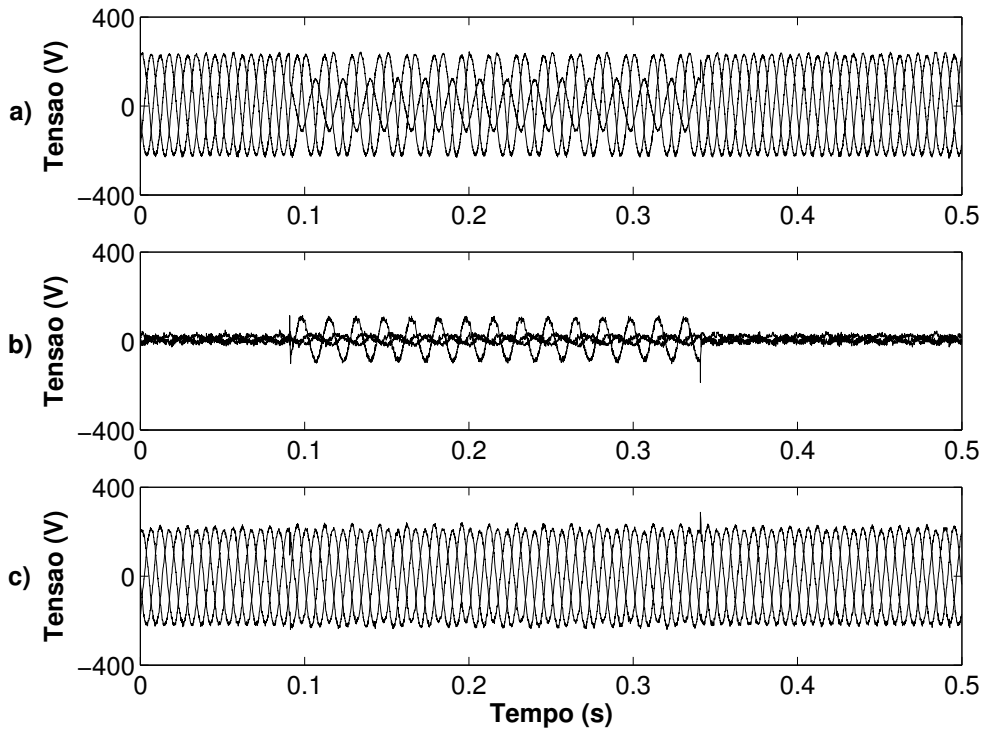
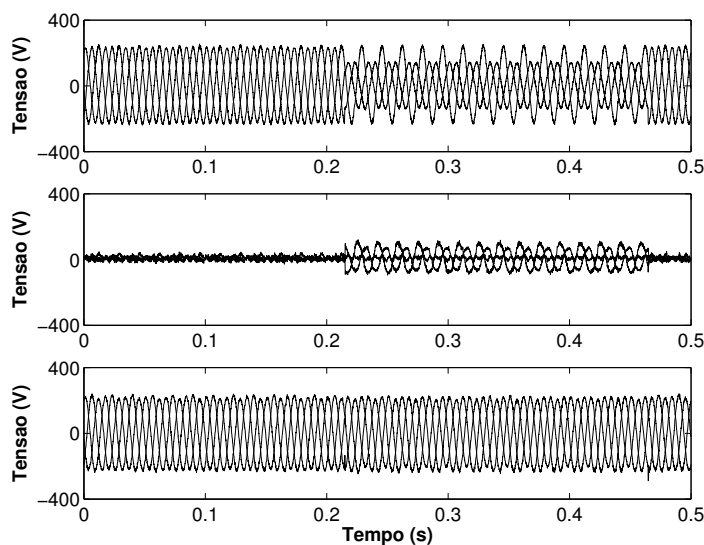


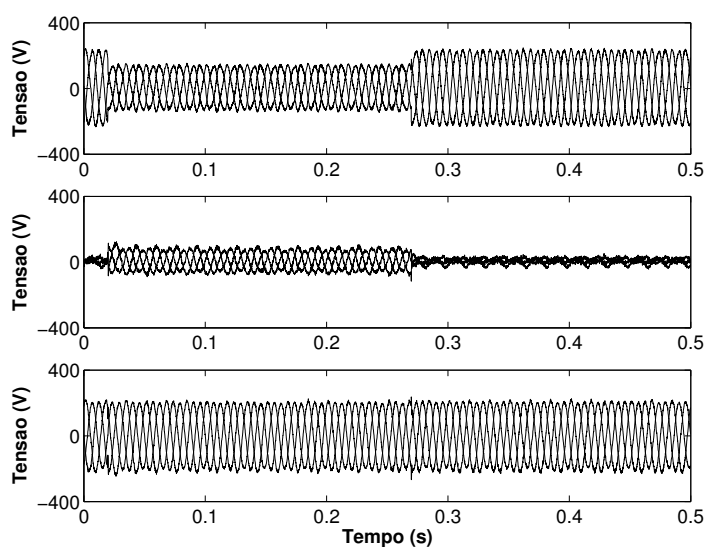
Figura 7.12. Resultado experimental com carga não-linear representando uma falta monofásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

entanto, quando é feita a comparação com o caso em que se usa o controle em malha aberta (Fig. 7.7), a qualidade desta restauração é melhor. Além disso, este resultado é aceitável uma vez que as normas e recomendações indicam que uma tensão sofre um afundamento quando sua amplitude é inferior a 90% do valor nominal, ou sofre uma elevação quando é superior a 110%. O resultado da Fig. 7.12(c) está contido nesta faixa, e portanto, é um resultado aceitável. Assim como no caso dos resistores, seguem os resultados com os outros tipos de falta, mas com a mesma carga não-linear. Na Figura 7.13(a) estão mostrados os resultados para um afundamento bifásico e na Fig. 7.13(b), os resultados referentes a um afundamento trifásico. Nos dois casos, os afundamentos foram configurados em 50%. Em ambas as figuras, a restauração da tensão apresenta características semelhantes ao caso monofásico.

No Capítulo 2 foram apresentados os tipos de perturbações que afetam a qualidade de energia de uma rede elétrica, inclusive as variações de tensão de curta duração, que são os distúrbios em que o DVR atua. Os resultados mostrados até agora representam afundamentos de tensão, que aparecem em maior quantidade na rede elétrica e que são os maiores cau-



(a)



(b)

Figura 7.13. Resultado experimental com carga não-linear. (a) Representação de uma falta bifásica. (b) Representação de uma falta trifásica.

sadores de defeitos nas cargas entre as VTCDs (BOLLEN, 2000; SANKARAN, 2002; DUGAN, 2003; KAGAN; ALMEIDA; SILVA, 2006; BIANCHIN, 2008). Mas para contemplar um cenário mais completo das correções destes tipos de distúrbio, o DVR deve ser capaz de restaurar as elevações de tensão. Assim como os afundamentos, a maioria das elevações que surgem na rede também são causadas por faltas no sistema elétrico.

Sendo assim, a Fig. 7.14 mostra as etapas de correção de uma elevação de tensão monofásica. A carga trifásica utilizada é resistiva e a elevação de 150% (Fig. 7.14(a)) foi

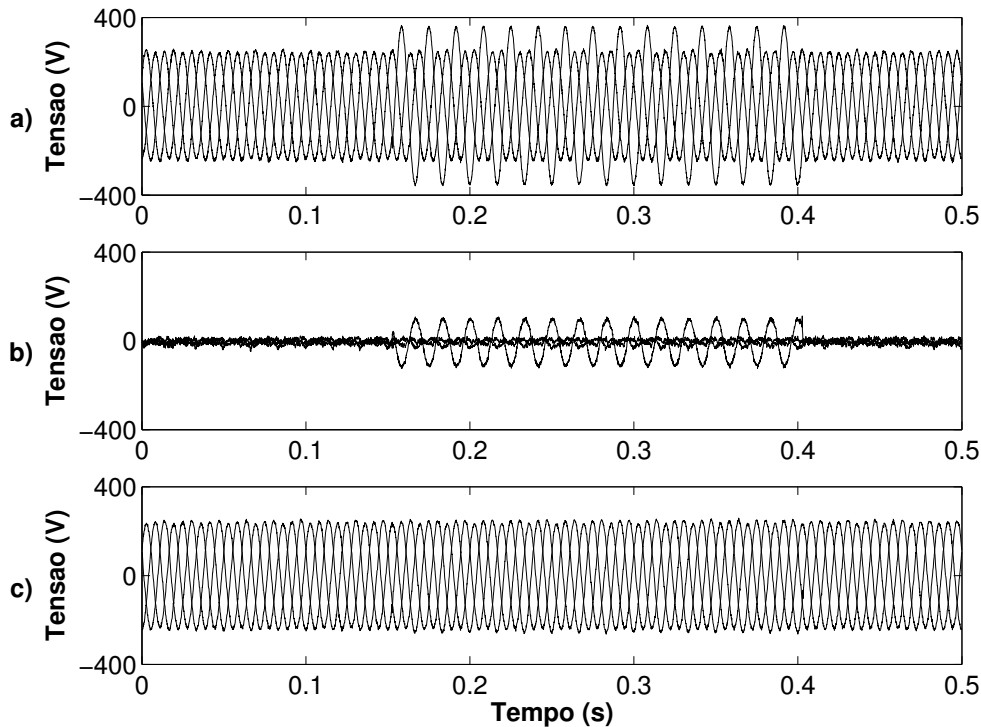
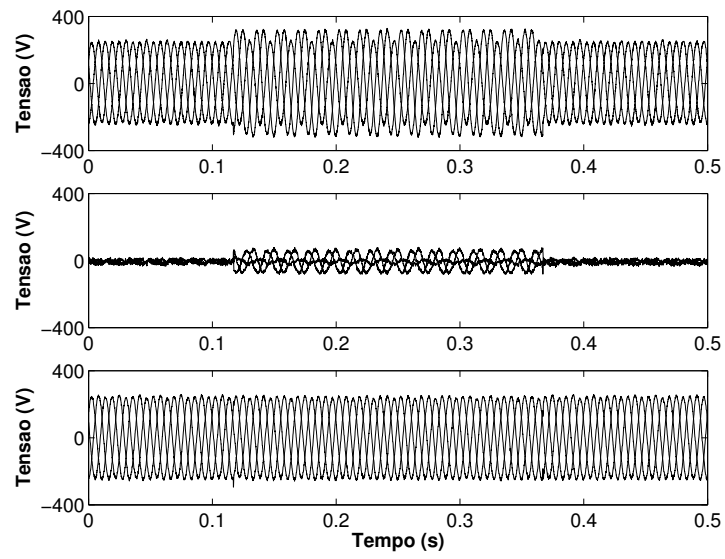


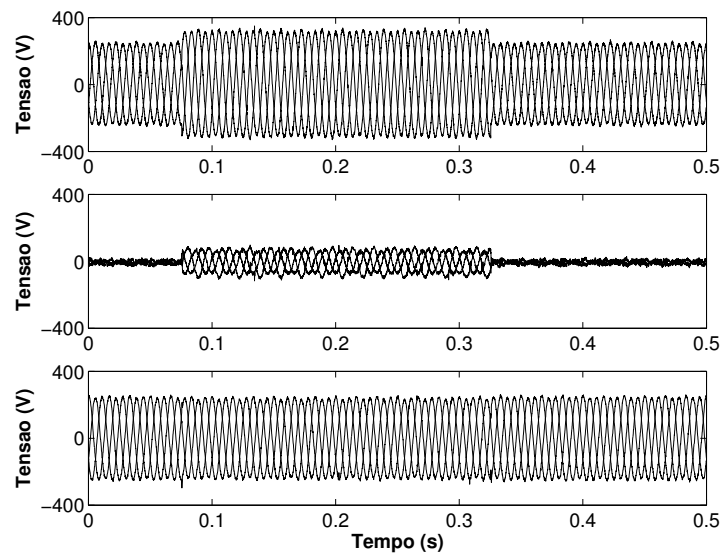
Figura 7.14. Resultado experimental de uma elevação de tensão monofásica. (a) Tensões da rede. (b) Tensões injetadas pelo DVR. (c) Tensões da carga corrigidas.

programada para uma duração de 250 ms. Neste texto, assim como no caso do afundamento, a porcentagem de elevação representa a tensão remanescente durante o distúrbio. A Figura 7.14(b) é a tensão injetada na rede e a Fig. 7.14(c) representa a tensão na carga. Analisando a tensão injetada, a mesma é somada com a da rede na intenção de subtrair a fase com elevação. No entanto, não existe a necessidade de nenhuma modificação das técnicas ou mesmo da metodologia utilizada, uma vez que o reconhecimento da amplitude maior ou menor do que o valor nominal é inerente às técnicas de controle. A correção de tensão na carga é considerada satisfatória, pois a amplitude é praticamente constante durante toda a faixa de tempo.

Como já foi realizado para os casos anteriores, a Fig. 7.15(a) representa a restauração de uma elevação bifásica e a Fig. 7.15(b), a restauração de uma elevação trifásica. Em ambos os casos, as elevações correspondem a 130% e como observado, as tensões na carga



(a)



(b)

Figura 7.15. Resultados experimentais com elevações. (a) Representação bifásica. (b) Representação trifásica.

são restauradas, deixando as cargas imunes a este tipo de perturbação.

7.2 CONCLUSÃO

Este capítulo foi dedicado à apresentação dos resultados referentes às correções de problemas de variações de tensão de curta duração. Os resultados apresentados foram divididos em duas partes; controle em malha aberta e controle em malha fechada. Ambos os sistemas foram apresentados no Capítulo 4. Em relação à plataforma experimental, foram realizados testes com cargas lineares e não-lineares. Em cada conjunto de resultados, o desempenho do DVR foi avaliado para três tipos de faltas que pode ocorrer no sistema elétrico e propagar-se até a carga, sendo elas monofásica, bifásica e trifásica. As variedades nos tipos de falta, carga, afundamentos e elevações utilizados tornam a avaliação do desempenho do DVR mais consolidada, pois contempla um cenário mais diversificado e portanto, mais próximo de casos reais. Cada forma de onda mostrada foi medida no DSP, contendo 5000 amostras com passo de amostragem de $100 \mu\text{s}$, totalizando janelas de 500 ms.

Os pequenos transitórios oriundos dos saltos de fase foram rapidamente amortecidos, estando de acordo com o propósito do DVR, pois os problemas de VTCDs exigem uma recuperação rápida da tensão para que não exista discordância com a duração do afundamento. Mais precisamente, algumas normas classificam o distúrbio como sendo uma VTCD aquela que tem uma duração a partir de meio-ciclo da forma de onda, que nos casos abordados é de aproximadamente 8,3 ms, e menor que 1 min. Como pode ser observado, os resultados experimentais que contêm transitórios têm duração menor que meio ciclo.

Os resultados das correções nas cargas são considerados satisfatórios uma vez que o nível de restauração das tensões encontra-se entre variações de $\pm 10\%$ da amplitude nominal, que são as variações aceitas por norma para que a tensão não seja considerada um distúrbio.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho de tese foi apresentado um restaurador dinâmico de tensão que é capaz de proteger cargas sensíveis de uma rede elétrica contra elevações, afundamentos e interrupções de tensão trifásicos de curta duração. De uma forma geral, foram apresentadas as técnicas de controle empregadas para as correções, os métodos de geração das tensões a serem injetadas, bem como uma plataforma experimental para comprovação das técnicas.

Em relação às VTCDs foi dada ênfase à alguns aspectos como definições, causas, consequências e formas de mitigação, especialmente ao afundamento de tensão, que é o distúrbio mais comum e que causa maiores danos entre as VTCDs. A classificação e caracterização de VTCDs e o impacto que causam nas cargas dos consumidores devem sempre observar estudos que correlacionem o comportamento das cargas frente aos distúrbios, não se limitando ao estudo exclusivamente do evento, ou ao estudo das cargas de modo puramente empírico.

O desempenho do sistema elétrico de potência é normalmente avaliado em termos da frequência em que os eventos ocorrem nos pontos de medição. Em geral, a análise é realizada através dos parâmetros de magnitude e de duração do evento, distribuindo sua incidência em faixas de magnitude e de duração com o objetivo de estabelecer formas de correlacioná-las com a vulnerabilidade das cargas em determinado ponto de medição. As atuais referências normativas apresentam convergências bem claras, que são as normas americanas e européias. As referências normativas de outros países por consequência acabam seguindo uma delas, como é o caso da brasileira. Pôde-se observar ainda que o mecanismo de propagação das VTCDs sobre o sistema elétrico depende de diversos fatores, como por exemplo, da topologia, carregamento e nível de curto-circuito do sistema elétrico, conexão dos transformadores, do

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

O DVR pode fornecer o melhor custo-benefício para mitigar afundamentos de tensão estabelecendo o nível de qualidade de tensão exigido pelo consumidor. Quando ocorre uma falta na rede de distribuição, rapidamente o afundamento irá surgir nas imediações da carga. O DVR instalado em uma carga sensível, restaura a tensão de fase para seu valor nominal em um tempo de resposta de poucos milissegundos evitando assim a interrupção de fornecimento para a carga.

A escolha entre os controles otimizados da qualidade da tensão, amplitude da tensão e da energia na ocorrência de afundamentos equilibrados, dependerá das características da fonte de tensão c.c. disponível, bem como do tipo de carga que está sendo protegida. Um outro aspecto de escolha do controle é em relação ao tipo, como sendo em malha aberta ou fechada. No primeiro, a facilidade de implementação e os bons resultados que eventualmente possam apresentar são as suas vantagens. Por outro lado, o controle em malha fechada pode eliminar a influência de perturbações, compensar quedas de tensão dos transformadores ou mesmo dos filtros, podendo-se ainda obter uma resposta rápida e correta.

A decomposição em componentes de sequência positiva e negativa é feita a partir do estimador de mínimos quadrados recursivo. Com este estimador, foi possível determinar tanto a fase como as amplitudes destas componentes. Uma outra vantagem associada a esta estimação é a parcela de valor constante que é contemplada no regressor. Uma vez conhecida, o sinal pode ser reconstituído sem esta componente, e sendo assim, os erros para desfazer o condicionamento quanto ao *offset* que existiriam no processamento no DSP, não surgem mais. A consequência deste erro é que o DVR iria injetar tensões constantes na rede sem que

de fato o oposto destas tensões constantes existissem. A forma que esta decomposição em componentes é realizada não foi encontrada na literatura e portanto, constitui uma novidade.

Para contemplar a geração de tensões trifásicas inclusive desequilibradas, foi apresentado um inversor de tensão de quatro braços. Um inversor mais simples, de três braços, também poderia ser utilizado mas existiria o inconveniente de um desbalanceamento mais intenso no barramento c.c. e um menor aproveitamento da tensão deste mesmo barramento. A técnica consiste em utilizar os três primeiros braços para produzir a soma das tensões de sequência positiva e o oposto da sequência negativa por meio da modulação escalar digital. Esta modulação produz as mesmas larguras de pulso que a modulação vetorial produziria, mas com um maior atrativo no sentido de realizar uma quantidade menor de processamento, configurando-se como uma grande vantagem, visto que o tempo de processamento no DSP é um parâmetro crítico para a realização de todas as técnicas empregadas, inclusive a geração dos sinais de PWM. O quarto braço é de uso exclusivo para a geração da componente de sequência zero. A técnica de modulação empregada para este braço consiste em realizar uma ponderação entre os valores médios que cada uma das duas chaves produz em um período de chaveamento e reproduzir o oposto da tensão de sequência zero requisitado naquele período de chaveamento. Como pode ser percebido, a utilização das modulações nos quatro braços é mais simples que uma modulação tridimensional já proposta em alguns trabalhos para um inversor de quatro braços, e não é significativamente mais complexa do que a utilizada em um inversor de três braços. As duas componentes de tensão geradas pelos três primeiros braços mais a tensão do quarto braço são somadas na saída do inversor, e assim, a correção é efetivada. Estas técnicas para correção utilizadas em um sistema DVR não foram encontradas na literatura e se configuram como uma novidade.

A plataforma experimental foi submetida a vários testes com diferentes possibilidades. Os três tipos de afundamentos foram configurados para os sistemas de controle em malha aberta e fechada, nos quais foram utilizados diferentes tipos de carga. No controle em malha aberta, os resultados foram mais satisfatórios para as cargas lineares, embora a correção ter

sido realizada com as cargas não-lineares. Em relação aos resultados em malha fechada, aqueles com cargas não-lineares também tiveram piores desempenhos, apesar destas correções estarem dentro de níveis aceitáveis por norma. As possíveis distorções presentes nas formas de onda de tensão prejudicam a estimação instantânea das componentes de sequência, as quais podem deteriorar a correção. No geral, os resultados apresentados para o controle em malha fechada tiveram melhor desempenho do que os de malha aberta. Este desempenho era esperado, pois além de existir a rejeição da corrente de carga e da tensão da rede que se configuram como perturbações no sistema de controle, existe a realimentação da tensão da carga e a corrente do capacitor, que tem uma relação direta com a tensão de inserção. Um controle com realimentações permite uma maior robustez em relação a possíveis variações de parâmetros.

Para contemplar um cenário mais diversificado das VTCDs e assim, aproximar mais ainda de casos reais, o DVR foi avaliado com a presença de elevações nas tensões da rede. Com as mesmas técnicas utilizadas nos casos de afundamentos, a partir do controle em malha fechada e com cargas resistivas, os ensaios experimentais foram realizados. As correções foram efetivadas e as amplitudes de tensão na carga permaneceram constantes durante toda a faixa de tempo, para os três casos apresentados.

8.1 TRABALHOS FUTUROS

1) DVR conectado ao sistema elétrico de média tensão

As técnicas propostas neste trabalho foram validadas por meio de simulações e ensaios experimentais em um plataforma com tensões de linha de até 345 V, tensão máxima que pode ser produzida pelo gerador de distúrbio disponível no laboratório. Os DVRs são conectados em redes de distribuição de energia para proteger cargas industriais, comerciais, hospitalares e residenciais. Sendo assim, seria interessante construir um DVR com componentes adequados ao nível de tensão de distribuição e utilizando as mesmas técnicas e metodologias

propostas. Espera-se que o dispositivo compense as perturbações da mesma forma que o protótipo, uma vez que o nível de tensão não deve interferir nas técnicas utilizadas. Nesse nível de tensão, faz-se necessário a proteção do DVR.

2) Robustez às distorções provenientes da rede

A presença de componentes harmônicas na tensão da rede pode prejudicar a estimação das componentes de sequência instantâneas. Para evitar erros nas correções realizadas pelo DVR, um sistema mais robusto em relação à presença daquelas componentes pode ser investigado.

3) Redução de componentes

Uma possibilidade para redução de componentes no sistema DVR apresentado é a eliminação dos transformadores. Com a nova configuração, tem-se uma planta diferente para o sistema de controle e faz-se necessário uma investigação da adaptação e viabilidade de uso das técnicas apresentadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALI, S. M.; KAZMIERKOWSKI, M. P. PWM voltage and current control of four-leg VSI. In: IEEE–IES. *Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics*. Pretória–South Africa, 1998. v. 1, p. 196–201. ISIE'98.

ALVES, R. N. C. et al. A new approach to the problem of synthesizing nonsinusoidal waveforms for analog and digital implementations of space vector PWM strategies. In: SOBRAEP. *Brazilian Power Electronics Conference*. Florianópolis, 1991. v. 1, p. 228–233. COBEP.

ANDERSON, P. M. *Analysis of faulted power systems*. New York: IEEE Press, 1995.

ANEEL. [S.l.], 2007. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica.

ARRILAGA, J.; BOLLEN, M.; WATSON, N. R. Power quality following deregulation. *Proceedings of IEEE*, v. 88, n. 2, p. 246–261, Feb. 2000.

AWAD, H.; BLAABJERG, F. Mitigation of voltage swells by static series compensator. In: IEEE–PELS. *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference*. Mexico City, 2004. v. 5, p. 3505–3511. PESC'04.

BIANCHIN, C. G. et al. Pesquisa e aplicação de restauradores dinâmicos de tensão (DVR) em linhas de distribuição. In: IAS. *Anais da VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*. Poços de Caldas–Brasil, 2008. v. 1, p. 1–5. INDUSCON'08.

BLASKO, V. A hybrid PWM strategy combining modified space vector and triangle comparison methods. In: IEEE–PELS. *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference*. Baveno–Italy, 1996. v. 2, p. 1872 – 1878. PESC'96.

BOLLEN, M. H. J. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. New York: IEEE Press, 2000.

BROECK, H. W. V. der; SKUDELNY, H.-C.; STANKE, G. V. Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 24, n. 1, p. 142–150, Jan./Feb. 1988.

CAMPOS, A. et al. Analysis and design of a series voltage unbalance compensator based on a three-phase VSI operating with unbalanced switching functions. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 10, n. 1, p. 269–274, May 1994.

CENELEC EN 50160. [S.l.], 1999. Specifications for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sags Immunity – European Committee for Electro technical Standardization.

CHAN, P. K. W.; CHUNG, H. S. H.; HUI, S. Y. R. Boundary control of dynamic voltage restorers in voltage harmonic compensation. In: IEEE–PELS. *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference*. Jeju–South Korea, 2006. v. 1, p. 1–7. PESC'06.

CHEN, S. Feature selection for identification and classification of power quality disturbances. In: IEEE–PES. *Proceedings of PES General Meeting Conference*. San Francisco–Ca, 2005. v. 1, p. 1–6. PESGM'05.

CHUNG, S. Design and analysis of the inverter-side filter used in the dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 3, p. 857–864, July 2002.

COSTA, J. G.; ALVES, M. F. Avaliação do impacto econômico do afundamento de tensão na indústria. In: CIGRE–BRASIL. *Anais do XVII Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*. Uberlândia–Brasil, 2003. v. 1, p. 1–5. SNPTEE'03.

DONG, G.; OJO, O. Current regulation in four-leg voltage source converters. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 54, n. 4, p. 2095–2105, Aug. 2007.

DUGAN, R. et al. *Electrical Power Systems Quality*. New York: McGraw-Hill, 2003.

FERNANDES, D. A.; COSTA, F. F.; Sá, J. S. Comparison between space vector and digital scalar modulation based on a DSP implementation. In: IAS. *Anais da VII Conferência Internacional de Aplicações Industriais*. Recife—Brasil, 2006. v. 1, p. 1–5. INDUSCON'06.

FERNANDES, D. A.; NAIDU, S. R. A novel PWM scheme for the 4-leg voltage source converter and its use in dynamic voltage restoration. In: IEEE—PES. *Proceedings of PES General Meeting Conference*. Tampa—Fl, 2007. v. 1, p. 1–5. PESGM'07.

FERNANDES, D. A.; NAIDU, S. R. Close-loop control of a dynamic voltage restorer based on a 4-leg voltage source converter. In: IEEE—IES. *Proceedings of International Symposium on Industrial Electronics*. Cambridge—England, 2008. v. 1, p. 80–85. ISIE'08.

FERNANDES, D. A.; NAIDU, S. R. Estratégia de modulação para um inversor de tensão de quatro braços utilizado em um restaurador dinâmico de tensão. *Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, v. 13, n. 1, p. 69–76, Maio 2008.

FERNANDES, D. A.; NAIDU, S. R. A four leg voltage source converter based dynamic voltage restorer. In: IEEE—PELS. *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference*. Rhodes—Greece, 2008. v. 1, p. 3760–3766. PESC'08.

FERNANDES, D. A.; NAIDU, S. R.; COURA-JR, C. A. E. Instantaneous sequence-components resolution of 3-phase variables and its application to dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, Accepted and to be published 2008.

FERREIRA, A. A. *Caracterização e Análise de Variações de Tensão de Curta Duração*. Dissertação (Mestrado) — UNICAMP, março 2002.

FITZER, C. et al. Mitigation of saturation in dynamic voltage restorer connection transformer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 17, n. 6, p. 1058–1066, Nov. 2002.

GHOSH, A.; LEDWICH, G. Compensation of distribution system voltage using DVR. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 4, p. 1030–1036, Oct. 2002.

GHOSH, A.; LEDWICH, G. *Power Quality Enhancement Using Custom Power Devices*. Norwell, Massachusetts: KAP, 2002.

HAQUE, M. H. Voltage sag correction by dynamic voltage restorer with minimum power injection. *IEEE Power Engineering Review*, v. 1, n. 1, p. 56–58, May 2001.

HARAS, A.; ROYE, E. Vector PWM modulator with continuous transition to the six-step mode. In: IEEE. *Proceedings of European Conference on Power Electronics and Applications*. Sevilha—Spain, 1995. v. 1, p. 1729–1734. EPE'95.

HUANG, C. H.; HUANG, S. J.; PAI, F. S. Design of dynamic voltage restorer with disturbance-filtering enhancement. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 18, n. 5, p. 1202–1210, Sep. 2003.

IEEE 1159. [S.l.], 1995. Recommended Practices on Monitoring Electric Power Quality.

JACOBINA, C. B.; LIMA, A. M. N.; SILVA, E. R. C. da. PWM space vector based on digital scalar modulation. In: IEEE—PELS. *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference*. St.Louis, 1997. v. 1, p. 100–105. PESC'97.

JACOBINA, C. B. et al. Digital scalar pulse-width modulation: A simple approach to introduce non-sinusoidal modulating waveforms. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 16, n. 3, p. 351–359, May 2001.

KAGAN, N.; ALMEIDA, C. F. M.; SILVA, L. M. C. Alocação ótima de medidores de qualidade de energia em redes de transmissão para a monitoração de variações de tensão de curta duração. In: *Anais do X Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica*. Florianópolis—Brasil: [s.n.], 2006. v. 1, p. 1–5. SEPOPE'06.

KAURA, V.; BLASKO, V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 1, p. 58–63, Jan. 1997.

KIM, H.; SUL, S. A carrier-based PWM method for three-phase four-leg voltage source converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 1, p. 66–75, Jan. 2004.

KIM, H.; SUL, S. Compensation voltage control in dynamic voltage restorers by use of feed forward and state feedback scheme. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 20, n. 5, p. 1169–1177, Sep. 2005.

KRAUSE, P. C.; WASYNCZUK, O.; SUDHOFF, S. D. *Analysis of Electric Machinery*. New York: IEEE Press, 1995.

LI, Y. W. et al. Design and comparison of high performance stationary-frame controllers for DVR implementation. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 2, p. 602–612, Mar. 2007.

LI, Y. W. et al. A robust control scheme for medium-voltage-level DVR implementation. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 54, n. 4, p. 2249–2261, Aug. 2007.

LI, Y. W. et al. A dual-functional medium voltage level DVR to limit downstream fault currents. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 22, n. 4, p. 1330–1340, July 2007.

LOH, P. C. et al. Multilevel dynamic voltage restorer. In: IEEE–PES. *Proceedings of Power System Technology*. Singapore, 2004. v. 2, p. 1673–1678. POWERCON'04.

LOPES, B. M. et al. Análise crítica de dispositivos estáticos de compensação série de baixa tensão com transformadores shunt: custos versus funcionalidade. *Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, v. 11, n. 1, p. 53–60, Março 2006.

MAREI, M. I.; EL-SAADANY, E. F.; SALAMA, M. A. A new approach to control DVR based on symmetrical components estimation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 22, n. 4, p. 2017–2023, Oct. 2007.

MARTINEZ, J. A.; ARNEDO, J. M. Voltage sag studies in distribution networks - part I: system modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 3, p. 1670–1678, July 2006.

MELHORN, C. J.; DAVIS, T. D.; BEAM, G. E. Voltage sags: Their impact on the utility and industrial customers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 34, n. 3, p. 549–558, May/June 1998.

MIDDLEKAUFF, S. W.; COLLINS, E. R. System and customer impact: considerations for series custom power devices. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 13, n. 1, p. 278–282, Jan. 1998.

NAIDU, S. R.; FERNANDES, D. A. A software phase-locked loop for custom power devices. In: SBA. *Anais do XV Congresso Brasileiro de Automática*. Gramado–Brasil, 2004. v. 1, p. 1–5. CBA'04.

NAIDU, S. R.; FERNANDES, D. A. A novel PWM scheme for the 4-leg voltage source converter and its use in dynamic voltage restoration. In: IEEE–PELS. *Proceedings of Power Electronics Specialists Conference*. Orlando–Fl, 2007. v. 1, p. 1–5. PESC'07.

NIELSEN, J.; BLAABJERG, F. Comparison of system topologies for dynamic voltage restorers. In: IEEE–IAS. *Proceedings of Industry Applications Conference*. Chicago–Il, 2001. v. 4, p. 2397–2403. IAS'01.

NIELSEN, J.; BLAABJERG, F.; MOHAN, N. Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jumps. In: IEEE–PELS-IAS. *Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition*. Anaheim–Ca, 2001. v. 2, p. 1267–1273. APEC'01.

NIELSEN, J. G.; BLAABJERG, F. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 5, p. 1272–1280, Sep./Oct. 2005.

NORTON, J. P. *An introduction to identification*. London: Academic Press, 1986.

OJO, O.; KSHIRSAGAR, P. Concise modulation strategies for four-leg voltage source inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 19, n. 1, p. 46–53, Jan. 2004.

QUIRL, B. J.; JOHNSON, B. K.; HESS, H. L. Mitigation of voltage sags with phase jump using a dynamic voltage restorer. In: IEEE–PES. *Proceedings of 38th North American Power Symposium*. Carbondale–Il, 2006. v. 1, p. 647–654. NAPS'06.

RASHID, M. H. *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.

RYAN, M. J.; BRUMSICKLE, W. E.; LORENZ, R. D. Control topology options for single-phase UPS inverters. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 33, n. 2, p. 493–501, March/April 1997.

SABIN, D. D. et al. Statistical analysis of voltage dips and interruptions-final results from the EPRI distribution system power quality monitoring survey. In: CIRED. *Proceedings of International Conference on Electricity Distribution*. Nice–France, 1999. v. 1, p. 1–6. CIRED'99.

SANKARAN, C. *Power Quality*. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2002.

SEMI F47. [S.l.], 2000. Specifications for semiconductor processing equipment voltage sags immunity.

SHEN, D.; LEHN, P. W. Fixed-frequency space-vector-modulation control for three-phase four-leg active power filters. *IEE Proceedings Electric Power Applications*, v. 149, n. 4, p. 268–274, July 2002.

SILVA, S. M. et al. Analysis of a dynamic voltage compensator with reduced switch-count and absence of energy storage system. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 41, n. 5, p. 1255–1262, Sept./Oct. 2005.

SOUZA, W. F.; SEVERO-MENDES, M. A.; SEIXAS, P. F. PWM vetorial para inversor trifásico de quatro-braços. *Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP)*, v. 12, n. 2, p. 89–96, Julho 2007.

- SPECTRUM DIGITAL, INC. Stafford—Texas, 2003. eZdspTMF2812 Technical Reference, disponível em <http://www.spectrumdigital.com/>.
- STONES, J.; COLLINSON, A. Power quality. *Power Engineering Journal*, v. 15, n. 2, p. 58–64, April 2001.
- STRZELECKI, R.; BENYSEK, G. Control strategies and comparison of the dynamic voltage restorer. In: IEEE. *Proceedings of Power Quality and Supply Reliability Conference*. Parnu—Estonia, 2008. v. 1, p. 79–82. PQ'08.
- TEXAS INSTRUMENTS. Dallas—Texas, 2004. TMS320x281x DSP Event Manager (EV) Reference Guide, in *spru065c.pdf* disponível em <http://www.ti.com/>.
- TEXAS INSTRUMENTS. Dallas—Texas, 2004. TMS320x281x, 280x DSP Peripheral Reference Guide, in *spru566b.pdf* disponível em <http://www.ti.com/>.
- TEXAS INSTRUMENTS. Dallas—Texas, 2005. TMS320x281x DSP Analog-to-Digital Converter (ADC) Reference Guide, in *spru060d.pdf* disponível em <http://www.ti.com/>.
- TEXAS INSTRUMENTS. Dallas—Texas, 2005. TMS320x281x DSP System Control and Interrupts Reference Guide, in *spru078c.pdf* disponível em <http://www.ti.com/>.
- TEXAS INSTRUMENTS. Dallas—Texas, 2005. TMS320x281x DSP Optimizing C/C++ Compiler User's Guide, in *spru514b.pdf* disponível em <http://www.ti.com/>.
- UIE-DWG-2-92-D. [S.l.], 1993. UIE Guide to Measurements of Voltage Dips and Short Interruptions Occurring in Industrial Installations.
- VALLE, J. D.; RODRIGUEZ, J.; CONTRERAS, G. Técnicas de modulación vectorial en inversores trifasicos. In: SOBRAEP. *Brazilian Power Electronics Conference*. Florianópolis, 1991. v. 1, p. 234–237. COBEP.

VILATHGAMUWA, M.; PERERA, A. A. D. R.; CHOI, S. S. Performance improvement of the dynamic voltage restorer with closed-loop load voltage and current-mode control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 17, n. 5, p. 824–834, Sep. 2002.

VILATHGAMUWA, M.; PERERA, A. A. D. R.; CHOI, S. S. Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 18, n. 3, p. 928–936, July 2003.

VILATHGAMUWA, M.; WIJEKOON, H. M.; CHOI, S. S. A novel technique to compensate voltage sags in multilane distribution system - the interline dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 53, n. 5, p. 1603–1611, Oct. 2006.

WANG, B.; VENKATARAMANANN, G.; ILLINDALA, M. Operation and control of a dynamic voltage restorer using transformer coupled h-bridge converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 21, n. 4, p. 1053–1061, July 2006.

WOODLEY, N. H.; MORGAN, L.; SUNDARAM, A. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 14, n. 3, p. 1181–1186, July 1999.

WOODLEY, N. H. et al. Field experience with the new platform-mounted DVR. In: IEEE–PES. *Proceedings of International Conference on Power System Technology*. Western–Australia, 2000. v. 3, p. 1323–1328. POWERCON'00.

YALÇINKAYA, G.; BOLLEN, M. H.; CROSSLEY, P. A. Characterization of voltage sags in industrial distribution systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 34, n. 4, p. 682–688, Jul./Aug. 1998.

YAO, G.; PHILIPS, S.; NORUM, L. Three-phase inverters-analysis of ability to maintain symmetrical output voltages. In: IEEE–IES. *Proceedings of International Conference on Industrial Electronics*. Hawaii–USA, 1993. v. 2, p. 1033–1039. IECON'93.

ZHAN, C.; ARULAMPALAM, A.; JENKINS, N. Four-wire dynamic voltage restorer based on a three-dimensional voltage space vector pwm algorithm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 18, n. 4, p. 1093–1102, July 2003.

ZHAN, C. et al. Software phase-locked loop applied to dynamic voltage restorer (DVR). In: IEEE–PES. *Proceedings of PES Winter Meeting*. Columbus–OH, 2001. v. 3, p. 1033–1038. PESWM'01.

ZHAN, C. et al. Dynamic voltage restorer based on voltage-space-vector PWM control. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 37, n. 6, p. 1855–1863, Nov./Dec. 2001.

ZHAN, Y. Q.; CHOI, S. S.; VILATHGAMUWA, D. M. A voltage-sag compensation scheme based on the concept of power quality control center. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 21, n. 1, p. 296–304, January 2006.

ZHANG, R.; PRASAD, V. H.; BOROYEVICH, D. Three-dimensional space vector modulation for four-leg voltage-source converters. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 17, n. 3, p. 314–326, May 2002.

GENERALIZAÇÃO DA LARGURA DE PULSO PARA O QUARTO BRAÇO DO INVERSOR

Para a generalização do uso da variável t_c , deve-se considerar que os tempos dos vetores nulos são diferentes. Fazendo uso desta consideração e ainda baseando-se na Fig. 5.13, a tensão média obtida para a curva mais positiva, ou seja, a curva que é formada quando a chave S8 permanece fechada é dada por:

$$V_{0+} = \frac{\frac{1}{3}V_{cc}t_k + \frac{2}{3}V_{cc}t_l + V_{cc}t_{0f}}{t_s}, \quad (\text{A.1})$$

sendo que agora:

$$t_s = t_{0i} + t_k + t_l + t_{0f}. \quad (\text{A.2})$$

A partir da definição da variável μ (5.12), obtém-se:

$$t_s = \left(\frac{\mu}{1 - \mu} \right) t_{0f} + t_k + t_l + t_{0f}. \quad (\text{A.3})$$

Isolando t_{0f} em (A.3):

$$t_{0f} = (t_s - t_k - t_l)(1 - \mu). \quad (\text{A.4})$$

Substituindo (A.4) em (A.1), obtém-se:

$$V_{0+}t_s = V_{cc} \left[\frac{1}{3}t_k + \frac{2}{3}t_l + (t_s - t_k - t_l)(1 - \mu) \right]. \quad (\text{A.5})$$

Isolando-se V_{0+} em (A.5):

$$V_{0+} = V_{cc} \left[(1 - \mu) - \left(\frac{2}{3} - \mu \right) \frac{t_k}{t_s} - \left(\frac{1}{3} - \mu \right) \frac{t_l}{t_s} \right]. \quad (\text{A.6})$$

De forma análoga, a tensão média obtida para a curva mais negativa, ou seja, a curva que é formada quando a chave S7 permanece fechada é dada por:

$$V_{0-} = -V_{cc} \left[\mu + \left(\frac{2}{3} - \mu \right) \frac{t_k}{t_s} + \left(\frac{1}{3} - \mu \right) \frac{t_l}{t_s} \right]. \quad (\text{A.7})$$

Como em (5.43), a tensão média de sequência zero é calculada a partir de uma ponderação de tempo de fechamento entre as chaves S7 e S8, tal como mostrado na Fig. 5.14. Sendo assim:

$$v_0 = V_{cc} \left[(1 - \mu) - \left(\frac{2}{3} - \mu \right) \frac{t_k}{t_s} - \left(\frac{1}{3} - \mu \right) \frac{t_l}{t_s} \right] - \frac{t_c}{t_s} V_{cc}. \quad (\text{A.8})$$

Após algumas manipulações algébricas para isolar t_c , chega-se à seguinte expressão:

$$t_c = t_s \left(1 - \mu - \frac{v_0}{V_{cc}} \right) - \left(\frac{2}{3} - \mu \right) t_k - \left(\frac{1}{3} - \mu \right) t_l. \quad (\text{A.9})$$

DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

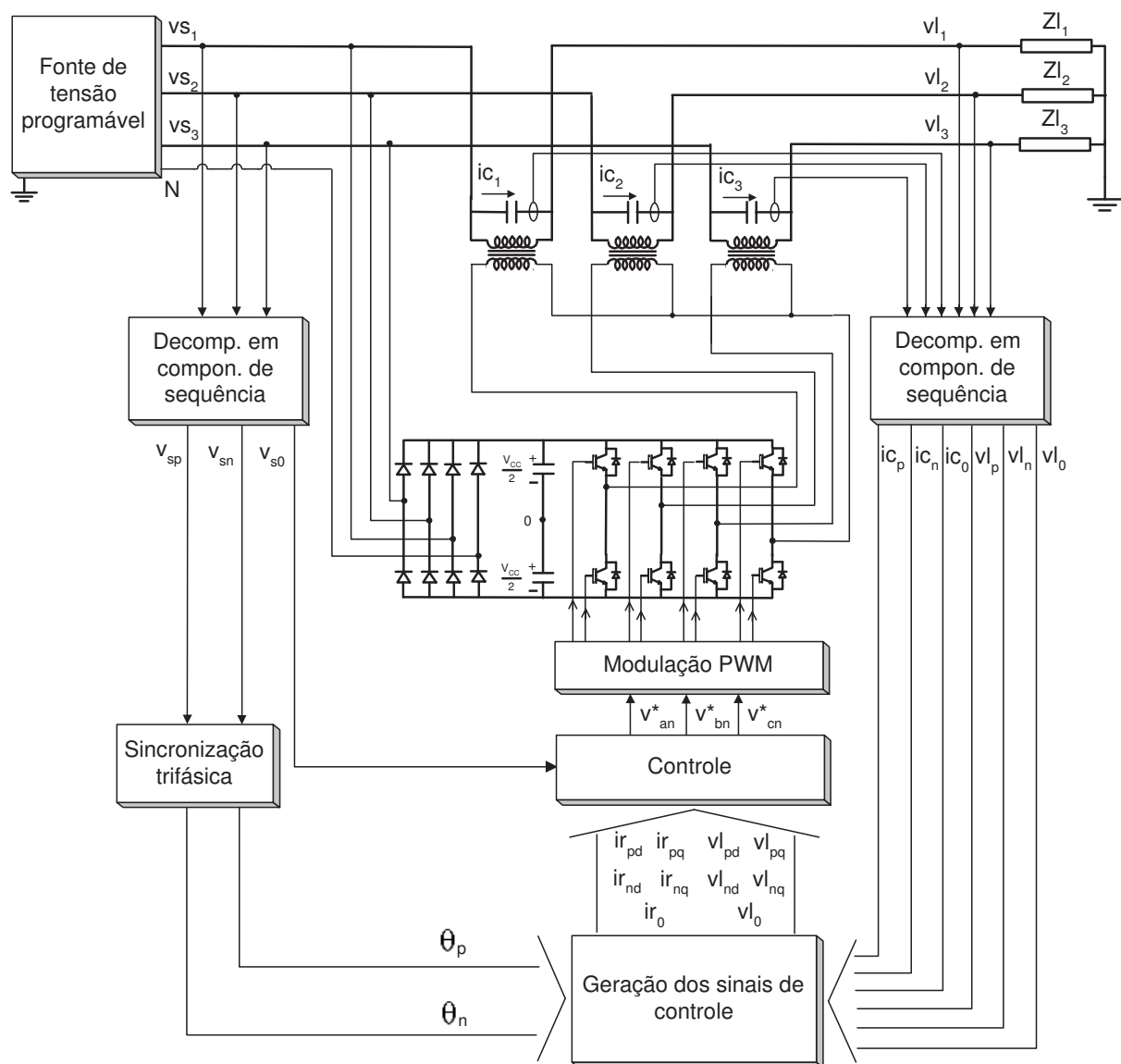


Figura B.1. Alternativa para o diagrama esquemático utilizado na plataforma experimental do DVR.

TRABALHOS PUBLICADOS

Artigos completos em periódicos

- FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. Estratégia de modulação para um inversor de tensão de quatro braços utilizado em um restaurador dinâmico de tensão. Revista Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP), v. 13, p. 69-76, 2008.
- FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. ; COURA Jr, C. A. E. Instantaneous sequence-components resolution of 3-phase variables and its application to dynamic voltage restoration. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. Accepted and to be published, 2008.
- NAIDU, S. R. ; FERNANDES, D. A. Dynamic voltage restorer based on 4-leg voltage source converter. IET Generation, Transmission and Distribution, submitted, 2008.

Trabalhos completos publicados em anais de congressos

- FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. ; LIMA, A. M. N. Closed-loop Control of a Dynamic Voltage Restorer Based on a 4-leg Voltage Source Converter. In: IEEE ISIE, 2008, Cambridge. Proceedings of International Symposium on Industrial Electronics, 2008. p. 80-85.
- FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. ; LIMA, A. M. N. A Four Leg Voltage Source Converter Based Dynamic Voltage Restorer. In: IEEE PESC, 2008, Rhodes. Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, 2008. p. 3760-3766.

- NAIDU, S. R. ; FERNANDES, D. A. Generation of Unbalanced 3-Phase Voltages for Dynamic Voltage Restoration Using The 4-Leg Voltage Source Converter. In: PESC, 2007, Orlando. Proceedings of Power Electronics Specialists Conference, 2007. v. 1. p. 1-6.
- NAIDU, S. R. ; FERNANDES, D. A. The 4-Leg Voltage Source Converter and its Application to Dynamic Voltage Restoration. In: ISIE, 2007, Vigo, Spain. IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2007. v. 1. p. 1-6.
- COSTA, F. F. ; CARDOSO, A. J. M., FERNANDES, D. A. Harmonic analysis based on kalman filtering and prony's method. In: IEEE POWERENG, 2007, Setúbal, Portugal. Proceedings of International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, 2007. v. 1. p. 696-701.
- FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. A Novel PWM Scheme for the 4-Leg Voltage Source Converter and its Use in Dynamic Voltage restoration. In: IEEE PESGM, 2007, Tampa, Florida. Proceedings of Power Engineering Society General Meeting, 2007. v. 1. p. 1-6.
- FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. ; COURA Jr, C. A. E. Instantaneous Sequence-Components Resolution of 3-Phase Variables and Its Application to Dynamic Voltage Restoration. In: IMTC, 2007, Warsaw, Poland. Proceedings of Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2007. v. 1. p. 1-4.
- FERNANDES, D. A. ; COSTA, F. F. ; Sá, J. S. Comparison between Space Vector and Digital Scalar Modulation Based on a DSP Implementation. In: Induscon, 2006, Recife. Proceedings of Induscon, 2006.
- FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. ; COSTA, F. F. A Differentiation Matrix for Simulating the Steady-state Response of Power Converters. In: Power Electronics Specialists Conference, 2005, Recife, Brazil. Proceedings of PESC'05. p. 1069-1073.

- COSTA, F. F. ; FERNANDES, D. A. ; ALMEIDA, L. A. L. Comparison Between Prony's Method and FFT for Analyzing Power Converter Signals. In: 8th Brazilian Power Electronics Conference, 2005, Recife, Brazil. Proceedings. p. 110-114.
- FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. ; COSTA, F. F. ; de Almeida, L. A. L. Steady-state Time-domain Simulation of Power Converters Using a Differentiation Matrix. In: 11th European Conference on Power Electronics and Applications, 2005, Dresden, Germany. Proceedings of EPE'05, 2005.
- COSTA, F. F. ; FERNANDES, D. A. ; NAIDU, S. R. ; de Almeida, L. A. L. Prony's Method versus FFT for Analyzing Power Converters Signals. In: 11th European Conference on Power Electronics and Applications, 2005, Dresden, Germany. Proceedings of EPE'05, 2005.
- COSTA, F. F. ; NAIDU, S. R. ; COSTA, E. G. ; FERNANDES, D. A. Metodologia de estimação de harmônicos e inter-harmônicos em sistemas elétricos de distribuição. In: 6º Encuentro de potencia, instrumentación y medidas, 2005, Montevidéo, Uruguay.
- NAIDU, S. R. ; FERNANDES, D. A. A Software Phase-Locked Loop for Custom Power Devices. In: CBA - XV Congresso Brasileiro de Automática, 2004, Gramado-RS. Anais do CBA'04.
- NAIDU, S. R. ; Mascarenhas, A. W. ; FERNANDES, D. A. A Software Phase-Locked Loop for Unbalanced and Distorted Utility Conditions. In: International Conference on Power System Technology - POWERCON, 2004, Singapore. Proceedings of the POWERCON'04.