

Compensadores Série de Tensão em Onda Quadrada: Aplicação na Mitigação de Afundamentos de Tensão

por

Igor Amariz Pires

TESE APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA COMO REQUISITO PARCIAL PARA A
OBTENÇÃO DO GRAU DE

Doutor em Engenharia Elétrica

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

2011

Vencer não é competir com o outro. É derrotar seus inimigos interiores.

(Roberto Shinyashiki)

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela oportunidade da vida.

Ao prof. Braz, pela orientação, discussões, ideias e amizade construída ao longo deste trabalho.

À Débora, pelo companheirismo e compreensão.

Aos meus pais, pela educação e amor dedicados.

As minhas irmãs e sobrinho, pela alegria.

Aos meus amigos, pelos momentos de descontração.

Aos amigos do LAI, pela colaboração e incentivo

À CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

Resumo

Compensadores série de tensão (CST) têm se tornado, ao longo dos anos, a principal solução para proteção de cargas elétricas ao fenômeno afundamento de tensão. Novas tecnologias foram desenvolvidas procurando reduzir o tamanho deste dispositivo, em termos de potência e tensão, e, conseqüentemente, custo. Para alcançar tal objetivo algumas simplificações foram realizadas, dentre elas a retirada do transformador série e dos elementos armazenadores de energia. Esta tese propõe mais duas simplificações: retirada do filtro de saída e modulação do inversor de tensão série não mais em alta frequência e sim em onda quadrada. Topologias de compensadores série de tensão que trabalhem em onda quadrada são propostas. Há um estudo comparativo entre o CST em onda quadrada e os CSTs convencionais mostrando ser o CST em onda quadrada uma solução de menor custo. Para a coleta de dados experimentais, foram montados protótipos de CST em onda quadrada. Seus testes foram realizados para proteção de cargas eletrônicas a afundamentos de tensão, demonstrando a eficácia da compensação em onda quadrada. A utilização do CST em onda quadrada para mitigação de desequilíbrios de tensão é apresentada.

Abstract

Series voltage compensators (SVC) have become the main solution to protect electrical loads against voltage sags in recently years. Researchers have developed new technologies that aimed the reduction of the SVC size, in terms of power and voltage, and also cost. In order to achieve this purpose, some simplifications have been made, such as the absence of series transformer, and energy storage elements. This thesis proposes two simplifications: the remove of the output filter, and the modulation change on the series voltage inverter, from PWM to square-wave. Square-wave series voltage compensator topologies are proposed. Prototypes of the square-wave SVC have been assembled. The square-wave SVC was tested protecting electronic loads against voltage sags, demonstrating the effectiveness of the square-wave compensation. There is a comparison between the square-wave SVC and the conventional ones, showing that the square-wave solution has a lower cost. The use of the square-wave SVC to mitigate voltage unbalance is presented.

Sumário

1	Introdução	21
1.1	Aspectos Gerais	21
1.2	Contribuições	24
1.3	Organização do Texto	25
2	Compensadores Série de Tensão	26
2.1	CST com Armazenamento de Energia e Transformador Série	28
2.2	CST com Transformador Série e sem Armazenamento de Energia	30
2.2.1	DVR CEMIG	30
2.2.2	SIPCON-S	33
2.2.3	AVC - Active Voltage Conditioner ABB	34
2.3	CST sem Transformador Série e Armazenamento de Energia	34
2.3.1	Família DySC	35
2.3.2	Di^2PS	37
2.4	Compensadores com Transformador <i>Shunt</i> de Alta Frequência	38
2.5	Compensadores Baseados na Compensação Direta C.A.-C.A.	40
2.6	Compensador Série Baseado em Inversor Multinível	43
2.7	Conclusões	45

3	Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada	47
3.1	Introdução	48
3.2	Topologias do Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada	50
3.2.1	Modulação por Conversor C.C.-C.C. de Alta Frequência com Armaze- namento de Energia	51
3.2.2	Modulação por Conversor C.C.-C.C. de Alta Frequência sem Armaze- namento de Energia	52
3.2.3	Topologia Multinível com Células em Cascata	54
3.2.4	Topologia Multinível Através da Seleção de <i>Taps</i> do Transformador <i>Shunt</i> por Meio de Retificador Controlado	60
3.2.5	Topologias para o CST em Onda Quadrada Trifásico	64
3.3	Projeto do CST em Onda Quadrada	66
3.3.1	Transformador <i>Shunt</i>	66
3.3.2	Ponte Retificadora	67
3.3.3	Barramento c.c.	67
3.3.4	Inversor e <i>Bypass</i>	69
3.4	Controle do Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada	70
3.4.1	Implementação via Controle Digital	74
3.5	Comparativo entre CST Senoidal e Onda Quadrada	74
3.6	Conclusões	79
4	Simulações e Resultados Experimentais	83
4.1	Cargas Protegidas pelo Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada .	84
4.2	Simulações	85
4.2.1	Cargas Eletrônicas	85
4.2.2	Contatores	96

4.2.3	Máquinas Rotativas	99
4.3	Resultados Experimentais	114
4.3.1	Topologia Multinível em Cascata	114
4.3.2	PLC 1 - Siemens	116
4.3.3	Topologia Multinível com Retificador Controlado para Seleção de <i>Taps</i> do Transformador <i>Shunt</i>	121
4.3.4	Topologia Multinível em Cascata - Trifásico	124
4.4	Conclusões	129
5	Uso do CST em Onda Quadrada para Mitigação de Desequilíbrios de Tensão	130
5.1	Desequilíbrio de tensão	130
5.1.1	Compensação por Amplitude	132
5.1.2	CST em Onda Quadrada para Mitigação de Desequilíbrios de Tensão	134
5.2	Conclusões	141
6	Conclusões e Propostas de Continuidade	143
6.1	Propostas de continuidade	145
A	Gerador de Afundamento	146
A.1	Curvas de Susceptibilidade	148
A.1.1	Computador 1	148
A.1.2	Computador 2	150
A.1.3	PLC 1	150
A.1.4	PLC 2	150
A.1.5	Contator	152
A.2	Testes em Equipamentos de Proteção a Afundamento de Tensão	153

A.2.1	Estabilizador de tensão	153
A.2.2	Nobreak 1	155
A.2.3	Nobreak 2	158

Lista de Tabelas

3.1	Número de células versus porcentagem de afundamentos compensados	60
3.2	Custo comparativo entre módulos monofásicos	80
4.1	Componentes utilizados na simulação	86
4.2	Dados do contator usado nas simulações	97
4.3	Componentes utilizados para montagem do Compensador série em Onda Quadrada	114
4.4	Componentes utilizados para montagem do CST em Onda Quadrada - Topologia multinível com retificador controlado	122
5.1	Desequilíbrios de tensão compensados por tensões senoidal e quadrada	139
5.2	Desequilíbrios de tensão compensados por tensões senoidal e quase-senoidal .	139

Lista de Figuras

2.1	Modelo Simplificado do Compensador Série de Tensão	27
2.2	Topologia do Compensador Série de Tensão	28
2.3	DVR - Restaurador Dinâmico de Tensão (Conjunto Monofásico)	29
2.4	Diagrama esquemático do DVR CEMIG	32
2.5	Funcionamento DVR CEMIG - sinal de detecção (nível baixo para presença de distúrbios); tensão de entrada; tensão de saída compensada (escala sinal 1: 1V/div; sinais 2 e 3: 15V/div	33
2.6	Diagrama esquemático do SIPCON-S	33
2.7	Topologia básica do MiniDySC	36
2.8	Diagrama Esquemático do Di^2PS	38
2.9	Topologia do CST com Transformador <i>Shunt</i> de Alta Frequência [1].	39
2.10	Foto comparativa entre transformador <i>shunt</i> na frequência da rede e outro de alta frequência. CST projetado para uma carga de 5 kW/480V [1].	39
2.11	Topologia do compensador série baseado no conversor <i>buck</i> [2].	40
2.12	Topologia do compensador série baseado no conversor <i>boost</i> [3].	41
2.13	Topologia do compensador série baseado no conversor <i>boost</i> com cruzamento de fases [4].	42
2.14	Topologia monofásica do Conversor de Potência [5].	43

2.15	Diagrama esquemático do compensador série baseado em inversor multinível	44
3.1	Estágio inicial de entrada de cargas eletrônicas	48
3.2	Estágio inicial de entrada de cargas eletrônicas submetido a afundamento de 0,6 pu	49
3.3	Estágio inicial de entrada de cargas eletrônicas submetido a afundamento de 0,6 pu compensado por tensão em onda quadrada. (1) Tensão barramento c.c.. (2) Tensão c.a. de entrada (3) Tensão Compensada (4) Tensão em Onda Quadrada de 0,4 pu	50
3.4	CST em Onda Quadrada modulado por conversor c.c.-c.c. de alta frequência com armazenamento de energia [6]	52
3.5	Conversor c.c.-c.c. utilizado na figura 3.4	53
3.6	CST em Onda Quadrada modulado por conversor c.c.-c.c. de alta frequência sem armazenamento de energia.	53
3.7	CST em Onda Quadrada - topologia multinível com células em cascata . . .	55
3.8	Nível de compensação/Relação de transformação para recuperação do afundamento de tensão	56
3.9	Exemplo de Compensação	57
3.10	CST em Onda Quadrada - topologia multinível com células em cascata: modos de operação para duas células	58
3.11	Valores de tensão disponíveis pelos modos de operação descritos na figura 3.10	59
3.12	Custo e porcentagem de afundamentos compensados conforme número de células utilizadas para o CST em Onda Quadrada multinível	61
3.13	CST em Onda Quadrada - topologia multinível através da seleção de <i>taps</i> do transformador <i>shunt</i> por meio de retificador controlado	61

3.14	Modos de Operação do CST em Onda Quadrada - topologia multinível através da seleção de <i>taps</i> do transformador <i>shunt</i> por meio de retificador controlado.	63
3.15	Versão trifásica do CST em onda Quadrada Multinível em Cascata	64
3.16	Versão trifásica do CST em onda Quadrada via Retificador Controlado e Seleção de <i>taps</i> do transformador <i>shunt</i>	65
3.17	Ripple e Tempo de descarga de capacitores para um compensador de 300 VA em um afundamento de 0,7 pu	69
3.18	Filosofia de controle do CST em Onda quadrada	71
3.19	Implementação da filosofia controle da figura 3.18 por componentes discretos	72
3.20	Tempo de resposta para um estimador DCR com $R=2,7k\Omega$ e $C=4,7\mu F$. . .	73
3.21	Filosofia de controle digital para o CST em Onda Quadrada	74
3.22	Custo comparativo entre módulos monofásicos	81
4.1	Tensões para Afundamento de 0,8 pu: Azul - onda na entrada da carga protegida; Vermelho - Onda injetada proveniente do restaurador; Verde - onda proveniente da rede de alimentação; Marrom - Tensão do barramento CC da carga protegida; Preto tracejado - referência 1,05 pu e 0,9 pu	87
4.2	Tensões nos barramento CC de cada nível do restaurador para Afundamento de 0,8 pu: Nível 1 (0,2 pu - azul); Nível 2 (0,6 pu - vermelho)	87
4.3	Tensões para Afundamento de 0,7 pu: Azul - onda na entrada da carga protegida; Vermelho - Onda injetada proveniente do restaurador; Verde - onda proveniente da rede de alimentação; Marrom - Tensão do barramento CC da carga protegida; Preto tracejado - referência 1,05 pu e 0,9 pu	88
4.4	Tensões nos barramento CC de cada nível do restaurador para Afundamento de 0,7 pu: Nível 1 (0,2 pu - azul); Nível 2 (0,6 pu - vermelho)	88

4.5	Tensões para Afundamento de 0,6 pu: Azul - onda na entrada da carga protegida; Vermelho - Onda injetada proveniente do restaurador; Verde - onda proveniente da rede de alimentação; Marrom - Tensão do barramento CC da carga protegida; Preto tracejado - referência 1,05 pu e 0,9 pu	89
4.6	Tensões nos barramento CC de cada nível do restaurador para Afundamento de 0,6 pu: Nível 1 (0,2 pu - azul); Nível 2 (0,6 pu - vermelho)	89
4.7	Ride-Through de Inversores de Frequencia [7]	91
4.8	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento trifásico A - 0,8 pu	92
4.9	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento trifásico A - 0,7 pu	92
4.10	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento trifásico A - 0,6 pu	93
4.11	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento monofásico B - 0,8 pu	93
4.12	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento monofásico B - 0,7 pu	94
4.13	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento monofásico B - 0,6 pu	94
4.14	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento bifásico C - 0,8 pu	95
4.15	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento bifásico C - 0,7 pu	95
4.16	Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento bifásico C - 0,6 pu	96

4.17	Contator submetido a um afundamento de tensão de 0,6 pu. Sem CST em	
	Onda Quadrada	97
4.18	Contator submetido a um afundamento de tensão de 0,6 pu. Com CST em	
	Onda Quadrada: recuperação do pico da tensão	98
4.19	Contator submetido a um afundamento de tensão de 0,6 pu. Com CST em	
	Onda Quadrada: recuperação do valor rms da tensão	98
4.20	Correntes do MIT frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação	
	e (b) com compensação.	102
4.21	Torque do MIT frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e	
	(b) com compensação.	102
4.22	Correntes do MIT frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem	
	compensação e (b) com compensação.	103
4.23	Torque do MIT frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem	
	compensação e (b) com compensação.	103
4.24	Correntes do MIT frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a)	
	sem compensação e (b) com compensação.	104
4.25	Torque do MIT frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem	
	compensação e (b) com compensação.	104
4.26	FFT das fases compensadas em onda quadrada: (a) bifásico sem salto de fase	
	(tipo E) e (b) bifásico com salto de fase (tipo C)	105
4.27	Correntes eficazes do MIT com compensadas em onda quadrada recuperando	
	a componente fundamental da onda de tensão: (a) bifásico sem salto de fase	
	(tipo E) e (b) bifásico com salto de fase (tipo C)	106

4.28 Torque do MIT com compensadas em onda quadrada recuperando a fundamental da onda de tensão: (a) bifásico sem salto de fase (tipo E) e (b) bifásico com salto de fase (tipo C)	106
4.29 Motor de Corrente Contínua alimentado por retificador controlado	107
4.30 Corrente de armadura do MCC frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação	109
4.31 Torque do MCC frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação.	109
4.32 Corrente de campo do MCC frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação	110
4.33 Rotação do MCC frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação.	110
4.34 Corrente de armadura do MCC frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação	111
4.35 Torque do MCC frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação	111
4.36 Rotação do MCC frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação	112
4.37 Corrente de armadura do MCC frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação	112
4.38 Torque do MCC frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação	113
4.39 Rotação do MCC frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação	113

- 4.40 Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 1 nível: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador 117
- 4.41 Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 1 nível em 2 ciclos no instante de compensação: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente do processador 117
- 4.42 Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 2 níveis: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador 118
- 4.43 Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 2 níveis: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador 118
- 4.44 Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,58 pu compensando com 2 níveis em 2 ciclos no instante de compensação: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador 119
- 4.45 Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,58 pu compensando com 2 níveis em 2 ciclos no instante de compensação: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador 119
- 4.46 Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,58 pu compensando com 2 níveis: detalhes do controle. Azul claro - tensão da rede; Azul escuro - tensão no estimador RC; Rosa - onda injetada em série; Verde - barramento c.c. do computador 1 120

4.47	Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 2 níveis: detalhes do barramento CC. Azul claro - tensão da rede; Azul escuro - tensão no capacitor nível 1; Rosa - onda compensada; Verde - barramento c.c. do computador 1	120
4.48	Compensador Série em Onda Quadrada - compensação PLC Siemens: azul - sem compensação; vermelho - com compensação	121
4.49	Protótipo do CST em Onda Quadrada - Topologia Multinível com Refitificador Controlado para Seleção de <i>Taps</i> do transformador <i>Shunt</i>	122
4.50	CST em onda quadrada com retificador controlado. Tensão de entrada (com afundamento), tensão compensada e tensão injetada em onda quadrada (escala: 50V/div)	123
4.51	CST em onda quadrada com retificador controlado. Tensão de entrada (com afundamento), tensão barramento c.c. e corrente no capacitor advinda do <i>tap</i> com maior relação de transformação (escala: sinal 1:100V/div 2:20V/div 3:3A/div)	123
4.52	Controle Digital do CST em onda quadrada trifásico	125
4.53	Protótipo do CST em Onda Quadrada - topologia Multinível em Cascata - Trifásico	125
4.54	Detalhe Protótipo do CST em Ona Quadrada - topologia Multinível em Cascata - Trifásico - Inversores de Frequência e Condicionamento de sinais (demultiplexador)	126
4.55	Detalhe Protótipo do CST em Ona Quadrada - topologia Multinível em Cascata - Trifásico - Transformadores <i>Shunt</i>	126

4.56	Sinais PLL. Azul: ângulo de referência (2V/div)); Vermelho: Tensão Va de entrada (50V/div)); Verde: Tensão Va de referência (50V/div); Rosa: Tensão de erro (50V/div)	127
4.57	Afundamento Trifásico desequilibrado - sem compensação: Va=63%, Vb=63% e Vc=82%. Vermelho: Va (50V/div); Azul (atrás vermelho):Vb (50V/div); Verde: Vc; Rosa (50V/div): Sinal de entrada do CST (5V/div)	127
4.58	Afundamento Trifásico desequilibrado - com compensação: Va=63%, Vb=63% e Vc=82%. Vermelho: Va (50V/div); Azul (atrás vermelho):Vb (50V/div); Verde: Vc (50V/div); Rosa: Sinal de entrada do CST (5V/div)	128
4.59	Detalhes do Afundamento Trifásico desequilibrado - com compensação: Va=63%, Vb=63% e Vc=82%. Vermelho: Va recuperada (50V/div); Azul Va de entrada (50V/div); Verde: Tensão no barramento CC de um nível (20V/div)	128
5.1	Diagrama fasores - Compensação por Amplitude	134
5.2	CST em Onda Quadrada para mitigação de desequilíbrio de tensão - versão monofásica	136
5.3	Formas de onda para teste do CST em Onda Quadrada	137
5.4	Diferença na modulação entre as formas de onda <i>Quase-Senoidal I</i> e <i>Quase-Senoidal II</i>	138
A.1	Gerador de Afundamento - versão monofásica	147
A.2	Gerador de Afundamento	147
A.3	Gerador de Afundamento: placa com PIC e lógica de disparo, e placa de disparo de tiristores	147
A.4	Gerador de Afundamento: Tiristores e transformadores monofásicos	148

A.5	Computador 1 submetido a 0,7 pu de afundamento - Azul escuro: Onda de tensão de entrada; Rosa: Barramento CC da fonte ATX do PC; Azul claro: corrente de alimentação do processador	149
A.6	Computador 1 submetido a 0,4 pu de afundamento - Azul escuro: Onda de tensão de entrada; Rosa: Barramento CC da fonte ATX do PC; Azul claro: corrente de alimentação do processador	149
A.7	Curva de susceptibilidade PLC Siemens: Azul - Todas saídas fechadas; Verde - metade das saídas fechadas; Vermelho - 1 saída fechada	151
A.8	Curva de susceptibilidade PLC WEG: (a) eixo y em Valor eficaz de tensão (Vrms) e (b) eixo y em valor pu de tensão; Azul - alimentação em 220 V; Vermelho - alimentação em 127 V	152
A.9	Curva de susceptibilidade Contator Siemens	153
A.10	Funcionamento estabilizador ForceLine: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída	154
A.11	Funcionamento estabilizador SMS: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída	155
A.12	Nobreak SMS submetido a afundamento de 0,30 pu: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída; rosa - corrente do processador; verde - tensão barramento CC	156
A.13	Nobreak SMS submetido a afundamento de 0,55 pu: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída; rosa - corrente do processador; verde - tensão barramento CC	156
A.14	Nobreak SMS submetido a afundamento de 0,63 pu: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída; rosa - corrente do processador; verde - tensão barramento CC	157

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo apresenta as motivações para a escolha do tema deste trabalho de doutorado. Inicialmente, os distúrbios de qualidade elétrica de energia relacionados com tensão são descritos, recebendo especial atenção o afundamento de tensão. As contribuições deste trabalho são destacadas, finalizando com um resumo de cada capítulo pertencente a este documento.

1.1 Aspectos Gerais

Afundamentos de tensão e interrupções momentâneas representam 92% dos problemas relacionados à qualidade de energia encontrados por consumidores industriais [8]. Apesar de serem fenômenos de curta duração, os prejuízos relacionados são muito grandes. Em um ambiente industrial, estes eventos podem resultar em custos operacionais substanciais, levando à parada de produção. Estes custos incluem perda de produtividade, custos de trabalho para limpeza da linha e reinício do processo produtivo, danos aos produtos fabricados, redução da qualidade do produto, atrasos em entregas e insatisfação dos consumidores [9]. Nos Estados Unidos, estudos mostram que os prejuízos relacionados ao afundamento de tensão

podem chegar a US\$ 400 bilhões por ano [10]. No Brasil, algumas pesquisas mostram que, paradas de produção devido à variações momentâneas de tensão apresentam uma média de US\$5,3/kWh, chegando a perdas anuais de US\$200 mil [11, 12].

Para solução deste problema, há diversas propostas. Uma delas é o *compensador série de tensão* (CST), dispositivo eletrônico localizado entre a rede e a carga a ser protegida. No instante de ocorrência de qualquer distúrbio na tensão, o compensador injeta uma determinada tensão visando a recuperação da tensão em valores pré-distúrbio. A carga, desta forma, é alimentada por uma tensão apropriada para seu contínuo funcionamento.

A principal finalidade em utilizar-se o compensador série de tensão é a proteção contra afundamentos de tensão. Afundamentos de tensão, conforme definição do IEEE [13], representam qualquer desvio de tensão entre 0,1 e 0,9 pu com duração compreendida entre 0,5 ciclo e 1 minuto. O *Prodist* (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional [14]), em seu módulo 8, utiliza-se do termo Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD), onde estão incluídas várias subdefinições para o afundamento de tensão.

Outro importante problema de qualidade de energia elétrica que também afeta os consumidores é o desequilíbrio de tensão. O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico é uma condição na qual as fases apresentam tensão com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente [15].

Assim como o afundamento de tensão, o compensador série de tensão pode corrigir desequilíbrios de tensão. Esta funcionalidade não é seu principal foco, já que, dentre os problemas de qualidade de energia relacionados à tensão, o mais representativo entre eles é o afundamento de tensão. Este trabalho de doutorado irá trabalhar com este dois problemas, com objetivo principal na mitigação do afundamento de tensão.

Os primeiros compensadores série de tensão eram equipamentos de grande porte para

média tensão e alguns MVA de potência. O primeiro compensador série comercial, chamado de Restaurador Dinâmico de Tensão (Dynamic Voltage Restorer - DVR®) foi de 2 MVA de potência com uma tensão 12,47kV [16]. Seu projeto previa a proteção de toda uma indústria. Como conceito básico, era utilizado um inversor de tensão com armazenamento de energia para produção da tensão, em conjunto com um transformador e um filtro de saída. O transformador e filtro ficavam em série com a carga.

Com a avanço nos estudos dos compensadores, chegou-se a um modelo que não utilizasse transformadores na inserção da tensão e também sem acumuladores de energia [17]. Isto fez com que o volume final do equipamento reduzisse significativamente. Sua utilização se dava em barramentos de baixa tensão. Outra tendência foi a procura por CSTs mais compactos, visando redução de custo e tamanho para proteção não de toda uma instalação, mas de cargas críticas e sensíveis em um processo produtivo [8, 18, 19, 20, 21].

A busca pela simplificação do compensador começa pela análise de cada componente de sua topologia. A tensão a ser injetada pelo compensador série visa o restabelecimento da tensão senoidal nominal. Entretanto, por se tratar de um fenômeno de curta duração, discute-se a necessidade de fornecimento de uma tensão de alta qualidade em detrimento da simplificação do compensador.

Este trabalho propõe a simplificação dos compensadores série de tensão convencionais modificando a forma de onda de tensão a ser injetada para mitigação dos problemas de qualidade de energia elétrica relacionados a tensão. Ao invés de produzir-se a tensão em um inversor modulado em alta frequência juntamente com um filtro senoidal, a tensão injetada será a inversão em baixa frequência da tensão do barramento c.c., tornando-se uma tensão em onda quadrada na frequência fundamental.

1.2 Contribuições

A primeira contribuição que este trabalho fornece é responder se a mitigação de problemas de qualidade de energia relacionados à tensão é possível com o uso de injeção de onda quadrada. Esta compensação foi testada para afundamentos de tensão e desequilíbrios de tensão. Partindo do princípio de que a onda quadrada possa compensar os problemas anteriormente citados, a forma de modular a tensão a ser injetada será abordada através de topologias propostas. É possível, através destas topologias, utilizar um controle bastante simplificado. Outra contribuição a ser realizada é o comparativo das topologias propostas de compensação em onda quadrada com topologias convencionais de compensadores, denominação utilizada para topologias que possuem um inversor modulado em PWM e filtro senoidal de saída.

Há um estudo do uso do CST em onda quadrada para mitigação de desequilíbrios de tensão.

Importante destacar que apenas 1 trabalho sobre compensador série de tensão injetando uma onda quadrada foi encontrado na literatura pesquisada [6]. Entretanto, neste trabalho, utiliza-se um conversor c.c.-c.c. de alta frequência, ideia oposta ao que se procurou neste trabalho, que foi eliminar quaisquer elementos de alta frequência, buscando a redução dos elementos de dissipação de calor.

Em resumo, destacam-se as seguintes contribuições:

- Uso da tensão em onda quadrada para mitigação de afundamentos de tensão e desequilíbrio de tensão;
- Simplificação na estrutura do compensador série de tensão através da retirada do filtro de saída e na mudança da modulação do inversor;
- Topologias para compensação em onda quadrada;

- Simplificação no controle do compensador série por meio de um circuito analógico de detecção de afundamentos de tensão;
- Avaliação da compensação em onda quadrada em cargas industriais, sobretudo em cargas eletrônicas (PLC e inversores de frequência) através de simulações e resultados experimentais;
- Comparativo entre o CST convencional e o CST em onda quadrada;
- Utilização da tensão quase-senoidal para eliminação de desequilíbrios de tensão, tensão esta produzida por uma topologia multinível em cascata;

1.3 Organização do Texto

O capítulo 2 realiza um resumo do estado da arte de Compensadores Série de Tensão, mostrando topologias pesquisadas na literatura, bem como compensadores comercializados pelos principais fabricantes de equipamentos elétricos.

O capítulo 3 apresenta a proposta desta tese: compensador série de tensão em onda quadrada. Quatro topologias são propostas, analisando cada uma. O projeto de cada elemento componente do CST em onda quadrada é demonstrado, assim como o controle utilizado para o CST. Por fim, um comparativo econômico entre soluções convencionais e a proposta desta tese é realizado.

O capítulo 4 apresenta simulações e resultados experimentais de protótipos do CST em onda quadrada que foram montados e testados protegendo cargas industriais.

O capítulo 5 mostra o uso do CST em onda quadrada para eliminação de desequilíbrios de tensão.

O capítulo 6 traz as conclusões deste trabalho, bem como propostas de continuidade.

Capítulo 2

Compensadores Série de Tensão

Desde o primeiro Compensador Série de Tensão (CST) surgido no mercado, várias propostas topológicas foram apresentadas, visando, principalmente, a simplificação para ter-se um custo competitivo. Este capítulo faz uma revisão bibliográfica desde a primeira topologia proposta até o atual estado-da-arte. As topologias pesquisadas foram divididas da seguinte forma: CST com Armazenamento de Energia e Transformador Série, CST com Transformador Série e sem Armazenamento de Energia, CST sem Transformador Série e Armazenamento de Energia, Compensadores com Transformador Shunt de Alta Frequência, Compensadores baseados na compensação direta c.a.-c.a. e Compensador série baseado em inversor multinível.

O Compensador Série de Tensão (CST) (figura 2.1) consiste em uma de fonte de tensão em série com a tensão de alimentação [22], posicionado, portanto, entre a rede elétrica e a carga a ser protegida. Na presença de um distúrbio proveniente do sistema elétrico, o objetivo do CST é injetar uma determinada tensão para a recuperação de valores e formas de onda pré-distúrbio, fazendo com que a tensão disponível à carga protegida seja a mais

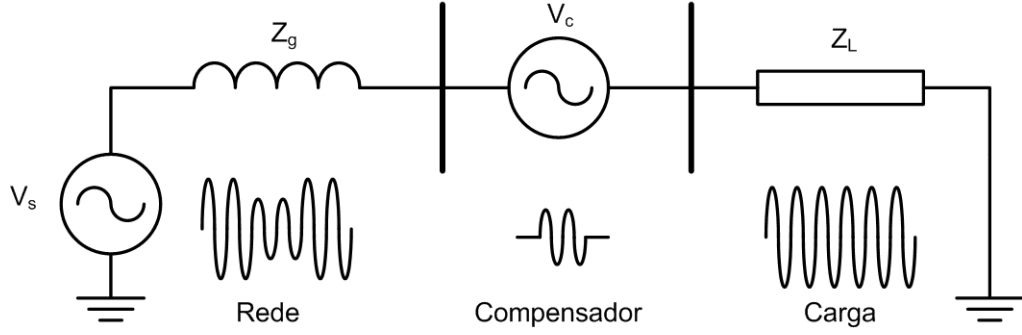


Figura 2.1: Modelo Simplificado do Compensador Série de Tensão

adequada possível para seu contínuo funcionamento. Analisando o cenário da qualidade de energia, os CSTs podem fornecer proteção para qualquer problema relacionado à tensão, sendo alguns: afundamentos de tensão, desequilíbrio de tensão, *flicker*, dentre outros. A tensão nos terminais da carga é a soma entre a tensão proveniente da rede elétrica e a tensão fornecida pelo compensador, sendo esta, idealmente, igual a tensão complementar para recuperação de 1 pu (equação 2.1).

$$V_{carga} = V_{rede} + V_{complementar} \quad (2.1)$$

A figura 2.2 apresenta uma topologia com todas possibilidades para um Compensador Série de Tensão. Em todas elas, um elemento comum é o inversor de frequência. Este é responsável por injetar a tensão de compensação no instante do afundamento. Normalmente, este componente é chaveado em alta-frequência, utilizando a técnica de modulação por largura de pulso (*PWM - Pulse Width Modulation*). Com as altas frequências envolvidas, há necessariamente um filtro de saída, normalmente de segunda ordem, composto por um capacitor e um indutor. Além destes dois elementos, pode-se ter a presença de um transformador série. Em CSTs de média tensão [22, 8], o transformador série está presente. Para completar a parte de injeção de tensão, há um chave de *bypass*, sendo esta, normalmente, constituída por um chave estática a tiristores. Para alimentar o barramento c.c. e fornecer a energia

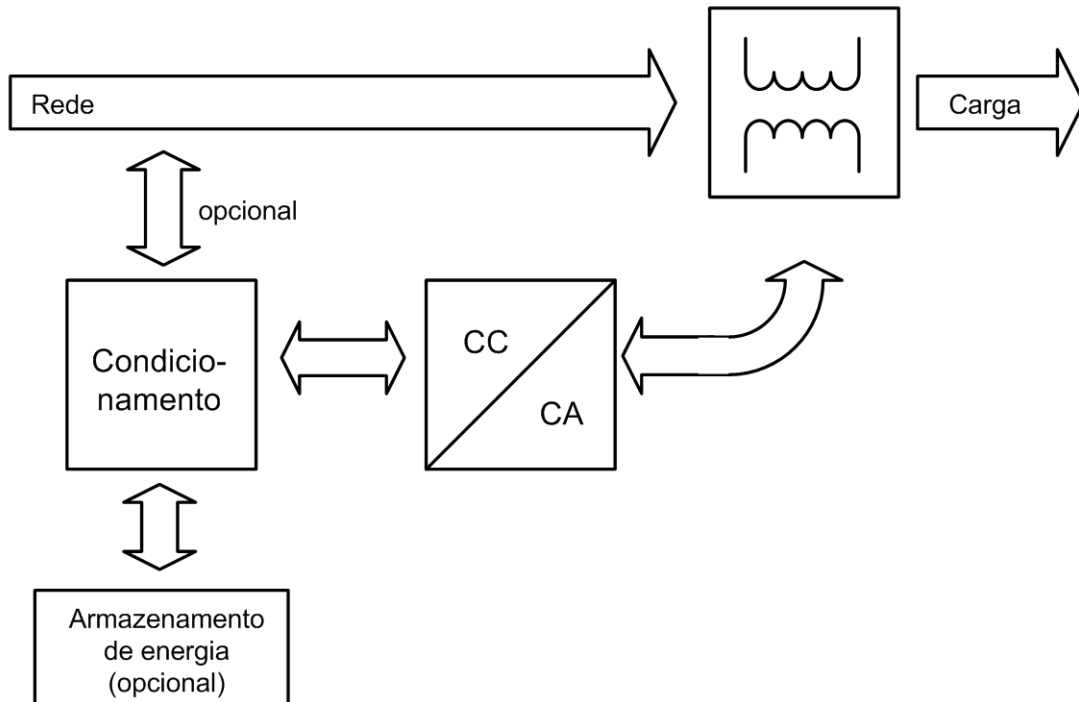


Figura 2.2: Topologia do Compensador Série de Tensão

ativa para o inversor de frequência, há duas opções: ou se retira a energia ativa da própria rede por meio de um trafo *shunt*, ou a energia ativa é fornecida através de elementos armazenadores de energia.

Nas seções seguintes, serão apresentados Compensadores Série de Tensão, comerciais e propostos por centros de pesquisas, baseados na possibilidades topológicas que a figura 2.2 proporciona.

2.1 CST com Armazenamento de Energia e Transformador Série

O primeiro compensador série comercial conhecido como DVR^{TM} - Restaurador Dinâmico de Tensão, foi desenvolvido pela Westinghouse e EPRI e posto em operação em agosto de 1996

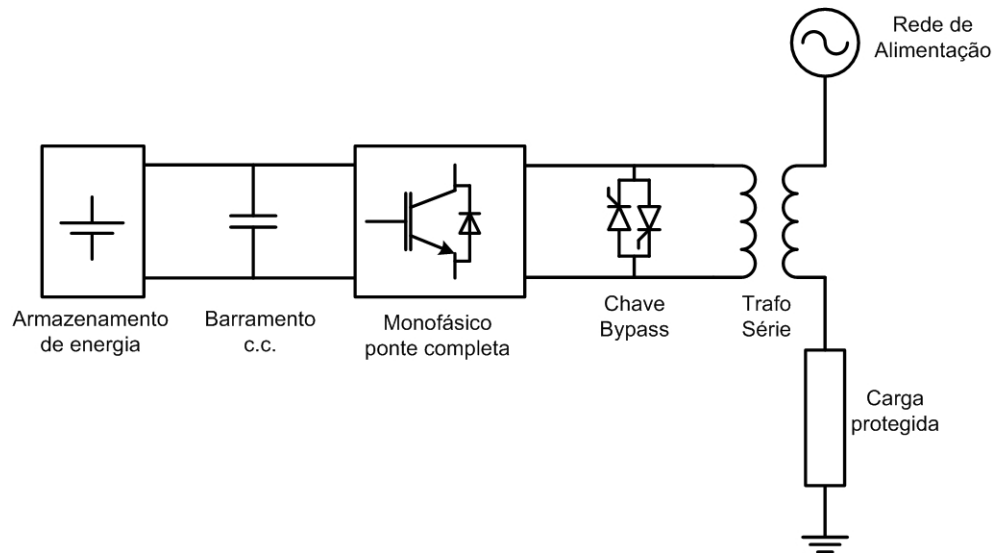


Figura 2.3: DVR - Restaurador Dinâmico de Tensão (Conjunto Monofásico)

nas instalações da Duke Power Company, localizado na Carolina do Norte, para proteção de uma fábrica textil [16]. O DVR era um compensador série para instalações em sistemas de distribuição (12,47 kV) e grande porte (2 MVA). Compensava afundamentos de até 50% com duração máxima de 500 ms.

DVR foi o nome dado para o compensador série projetado pela Westinghouse. Porém, o termo DVR, bem como "Restaurador Dinâmico de Tensão", passaram a ser utilizados em muitos casos para designar equipamentos que compensam afundamentos de tensão.

A figura 2.3 apresenta o diagrama monofásico do DVR, sendo que na versão trifásica utilizam-se três conjuntos. Como elemento série entre a rede e a carga, há um transformador. Este elemento injeta a tensão complementar, bem como possibilita a redução da tensão em seu primário. O inversor de frequência a IGBTs, além da sintetizar a tensão de compensação a ser inserida, executa a carga do sistema de armazenamento de energia quando a rede está livre de distúrbios. Este último é composto basicamente por um grande banco de capacitores. Há também uma chave c.a. de *bypass* composta por dois tiristores em anti-paralelo.

2.2 CST com Transformador Série e sem Armazenamento de Energia

No início do desenvolvimento de compensadores série, acreditava-se ser necessário o armazenamento de energia para que a energia acumulada fosse utilizada no instante do afundamento de tensão. Pensava-se que, caso a energia necessária para a compensação viesse da rede elétrica, a compensação poderia piorar o afundamento levando o sistema a um colapso de tensão. Este fato se confirma em locais onde a impedância do sistema elétrico é muito alta, da ordem de 2:1 na relação corrente de curto circuito por corrente nominal [23]. Sistemas com impedâncias de curto-circuito nestes valores são muito raros de encontrar.

Pode-se, desta forma, retirar o elemento armazenador de energia, levando a uma diminuição de custos de manutenção e também de aquisição. A energia para compensação é retirada da rede por meio de um transformador *shunt* e retificador não-controlado. Este conjunto alimenta o barramento c.c. do inversor de frequência do compensador. Três exemplos desta alternativa são:

1. DVR CEMIG
2. Sipcon-S
3. AVC ABB

2.2.1 DVR CEMIG

Em 1999 foram iniciados estudos para concepção, projeto e construção do primeiro Compensador Série de Tensão da América Latina. Este projeto foi realizado através de uma parceria entre a concessionária CEMIG e o Laboratório de Aplicações Industriais da UFMG, detalhado em [24].

Este DVR nasceu com a proposta de atender as necessidades das empresas brasileiras de proteção contra afundamentos de tensão. Na época, os fornecedores de equipamentos de condicionamento de energia comercializados centravam sua produção em condicionadores com potência superior a 2 MVA, potência muito maior que a instalação da maioria das empresas brasileiras. Assim, buscou-se o desenvolvimento de um compensador série com potência nominal de 500 kVA e de baixa tensão (440V).

A figura 2.4 mostra o diagrama esquemático do DVR Cemig. Como pode ser visto através da figura 2.4, não há elementos armazenadores de energia. A energia a ser injetada no instante de ocorrência do distúrbio é fornecida pela própria rede, através do retificador trifásico. Utiliza-se esta topologia de inversor para síntese da tensão complementar, ao invés de três inversores monofásicos de onda completa, reduzindo à metade o número de chaves do inversor. A desvantagem nesta aplicação é a perda de capacidade de compensação de componentes de sequência zero da tensão. Em [25], um estudo acerca das possibilidades de compensação apenas das sequências positivas e negativas é realizado. Dentre os afundamentos característicos A-G, descritos em [22], apenas os afundamentos B e E possuem sequência zero. Sendo assim, [25] conclui que, a compensação deste afundamentos ocorrerá com sobretensões nas fases sãs ou sem afundamentos. No caso do afundamento tipo B, apenas 1 fase sofre afundamento. No pior caso, ou seja, tensão residual igual a zero, o DVR Cemig é capaz de recuperar esta fase, com uma sobretensão de 20% nas outras fases. Para afundamentos menos severos, tais como 50% de tensão residual na fase afetada, a sobretensão nas outras fases é de 10%. Para o afundamento tipo E, duas fases sofrem afundamento, enquanto uma permanece com valores nominais. Assim, no pior cenário, duas fases com tensões residuais iguais a zero, é possível recuperar estas fases com 90% de tensão residual e uma sobretensão de 35% na fase que não sofre distúrbios. Para 50% de afundamento, as fases afetadas são recuperadas com tensão residual de 93% com sobretensão de 16% na fase não afetada pelo afundamento. Importante

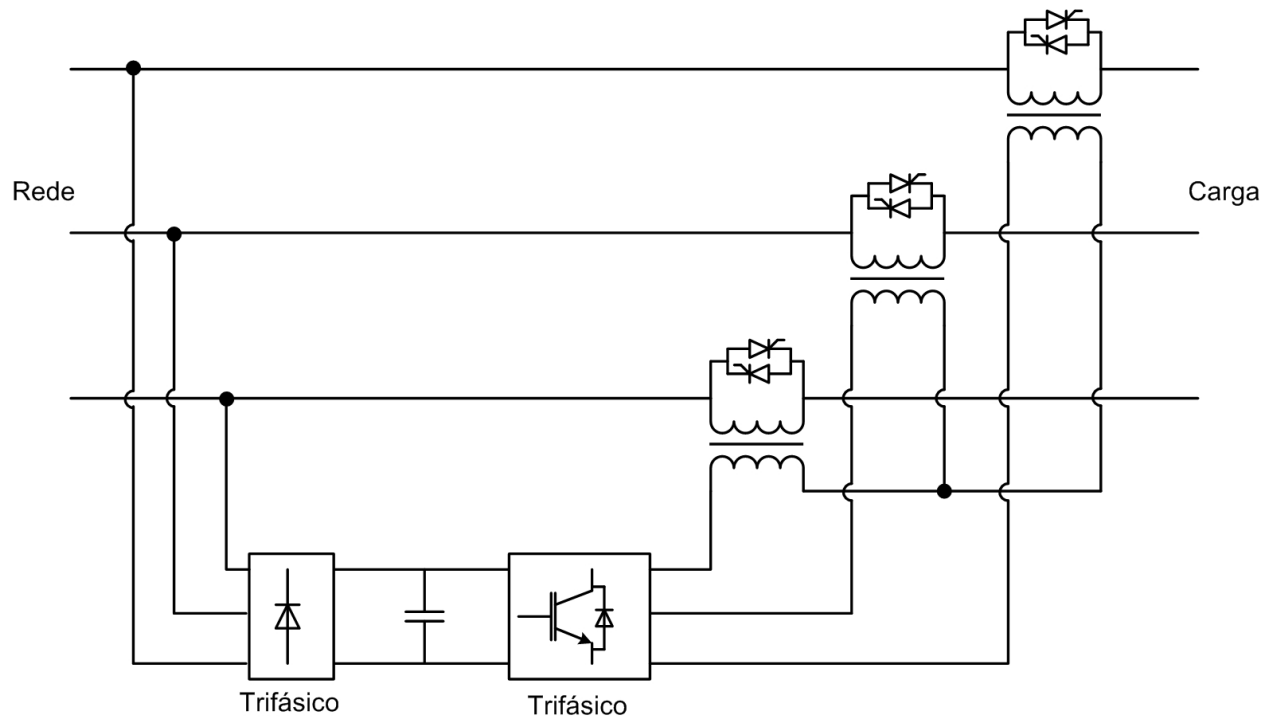


Figura 2.4: Diagrama esquemático do DVR CEMIG

ressaltar que, apesar destas diferentes tensões, o desequilíbrio de tensão de linha permanece em valores próximos de zero. Isto é esperado, já que há compensação das sequências positiva e negativa.

O DVR Cemig encontra-se em fase final de testes. Testes com pequenas cargas já foram realizados. Um exemplo do desempenho indicado pode ser visualizado na figura 2.5, mostrando o funcionamento do compensador na mitigação de afundamentos e elevações de tensão. O próximo passo é a adaptação da subestação do antigo prédio do CPDEE para que o DVR Cemig possa proteger a instalação elétrica do mencionado prédio.

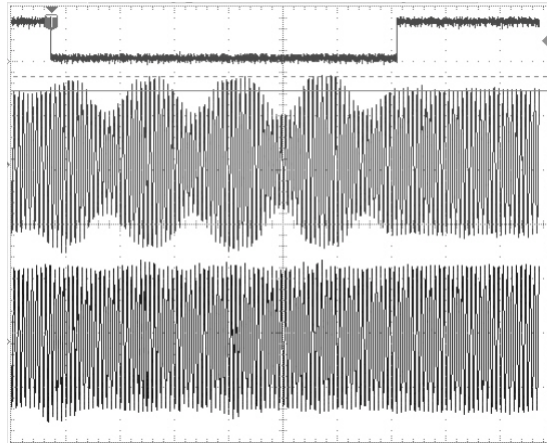


Figura 2.5: Funcionamento DVR CEMIG - sinal de detecção (nível baixo para presença de distúrbios); tensão de entrada; tensão de saída compensada (escala sinal 1: 1V/div; sinais 2 e 3: 15V/div)

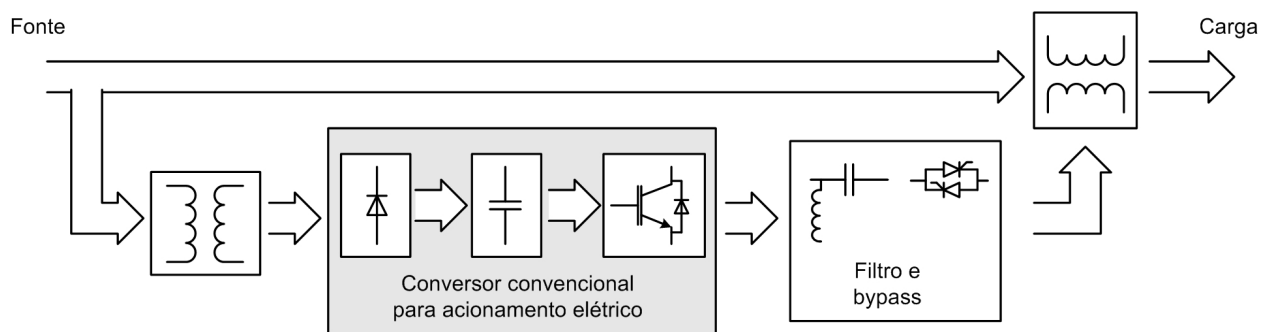


Figura 2.6: Diagrama esquemático do SIPCON-S

2.2.2 SIPCON-S

A topologia básica do SIPCON-S (**SI**emens **P**ower **CON**ditioner) desenvolvida pela Siemens é apresentada na figura 2.6. Com a experiência anterior desta topologia, muitos compensadores série têm sido construídos através da adaptação de conversores comercialmente disponíveis para acionamentos elétricos em se tratando de potências inferiores a 1,5 MVA. O transformador de entrada só se faz necessário em aplicações de média tensão. O sistema SIPCON-S ainda permite a conexão de sistemas de armazenamento de energia ao barramento c.c. do conversor, tais como baterias, discos de inércia e sistemas supercondutores de armazenamento de energia magnética (SMES - *Superconducting magnetic energy storage*).

A Siemens quando propôs esta estrutura (abril de 2000) [26], possuía linha de produção em massa de conversores de 4 kVA a 1200 kVA, o que agilizava o processo de fabricação dos compensadores série. A grande experiência com a tecnologia de conversores para acionamentos elétricos confere um bom nível de confiabilidade ao equipamento. Entretanto, a presença de transformador série e a não otimização dos conversores c.a.-c.c. e c.c.-c.a. para operações de curta duração se mostraram desvantajosas.

2.2.3 AVC - Active Voltage Conditioner ABB

O AVC é um conversor desenvolvido por uma empresa neo-zeolandesas chamada Vectek Electronics [27]. Em maio de 2008, esta empresa foi vendida para a ABB e seu produto na área de conversores série, o AVC, passou a fazer parte do portfólio de soluções oferecidas pela ABB. A estrutura do conversor é parecida com a do DVR Cemig (figura 2.4) com duas diferenças: modo de operação não é *hot stand-by* e a chave CA de by-pass fica no primário, ao lado do conversor.

2.3 CST sem Transformador Série e Armazenamento de Energia

A presença do transformador série se justifica por dois motivos: isolamento elétrico do compensador série e compensação em alta e média tensão. Entretanto, com devidos cuidados de proteção e em aplicações de baixa tensão, o transformador série se torna desnecessário o que faz com que o compensador fique mais compacto e de menor custo.

Dois exemplos desta topologia são:

1. Família DySC

2. Di^2ps

2.3.1 Família DySC

A família DySC constitui uma gama de compensadores séries desenvolvidos pela SoftSwitching Technologies [19] para aplicação em baixa tensão (120V a 480V) com potências de 0,23 kVA a 3000 kVA [8]. Muito famoso no meio da qualidade de energia, a solução DySC foi uma das primeiras a oferecer soluções para baixas potências.

O desenvolvimento da solução DySC seguiu os seguintes princípios [8]:

- Custo de aquisição deveria ser pago na redução significativa dos prejuízos causados pelo afundamento de tensão. O DySC padrão protege 92% dos distúrbios momentâneos de tensão corrigindo afundamentos de até 50% e até 2 segundos de duração.
- Tamanho e peso deveriam ser reduzidos. Os produtos DySC, com potência até 500 kVA, não possuem o transformador série e têm um pequeno armazenamento de energia.
- Eficiência do equipamento deveria ser maximizada. O DySC inclui uma chave CA de *bypass* acionado em condições normais da rede elétrica, resultando em uma eficiência acima de 99%.

Destes requisitos, três produtos fazem parte da família DySC, todos de baixa tensão:

- MiniDySC: monofásico com potências entre 0,25 kVA e 14 kVA;
- ProDySC: trifásico com potências entre 10 kVA e 165 kVA;
- MegaDySC: trifásico com 333-2000 kVA.

A topologia básica do MiniDySC é apresentada na figura 2.7. Conforme mencionado, nota-se a ausência do transformador série, além de um número reduzido de dispositivos

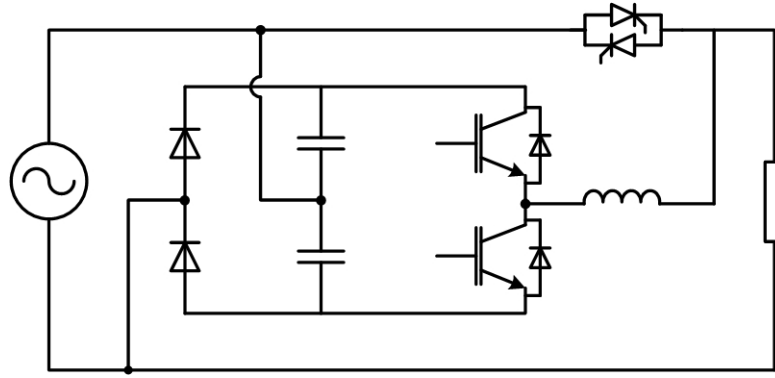


Figura 2.7: Topologia básica do MiniDySC [8].

semicondutores para a implementação dos conversores c.a.-c.c. e c.c.-c.a.. O elemento de filtragem das tensões da saída do conversor é realizado por apenas um indutor. Durante a operação normal, sem distúrbios, a carga recebe tensão direto da rede elétrica, transpassado pela chave c.a. estática. Na ocorrência do afundamento, a chave c.a. se abre e o conversor passa a operar em série com a rede de energia. A operação correta deste equipamento pressupõe a existência de cargas com fator de potência adequado de modo a permitir a filtragem apropriada das tensões de saída do conversor, o que impõe uma importante restrição sobre a sua utilização [28].

Esta topologia apresentada, além do transformador série, conseguiu eliminar inclusive o transformador *shunt*. Porém a topologia da figura 2.7 se apresenta como um indicativo da simplificação almejada, pois o produto comercializado miniDySC possui transformador *shunt* [29].

O ProDySC é uma solução estendida do MiniDySC para sistemas trifásicos a quatro fios. Sua topologia consiste em três dispositivos MiniDySC, ainda sem a presença de transformadores série. O MegaDySC completa a gama oferecida pela família DySC. Diferente do MiniDySC e ProDySC, sua topologia é bastante parecida com o DVR da Westinghouse possuindo transformador série e armazenamento de energia [19].

2.3.2 Di^2PS

O Laboratório de Aplicações Industriais da UFMG, após o DVR Cemig, iniciou projeto e construção de um protótipo de baixa tensão (440V) de 300 kVA, em parceria com a Coelba - Companhia de Eletricidade do Estado da Bahia. O objetivo era utilizar uma topologia de conversor que mitigasse os afundamentos de tensão com menor custo possível [28]. Para alcançar os objetivos propostos, algumas diretrizes foram consideradas:

- O compensador não deveria possuir elementos de armazenamento de energia, salvo os próprios capacitores do barramento c.c.;
- O compensador não deveria operar em modo *hot-standby*, regulação de tensão, bloqueio de tensões ou qualquer outro modo de operação que implicasse na operação contínua de seu conversor c.c.-c.a.;
- Redução do número de chaves estáticas e seus controladores, sem prejudicar o desempenho do equipamento ou onerar outros elementos, para não elevar o custo final do equipamento;
- O transformador série não deveria ser utilizado, devido ao seu peso elevado e custo.

A topologia que atende a tais requisitos é apresentada na figura 2.8. Em condições normais da rede, a chave de *bypass* c.a. permanece fechada, elevando a eficiência do dispositivo. Na instante do distúrbio de tensão, a chave de *bypass* é desligada e o inversor entra em operação injetando a tensão complementar no capacitor. Um indutor é inserido entre o inversor e o capacitor de modo a filtrar as componentes de alta frequência de tensão na saída do inversor. O barramento c.c. é alimentado por um retificador a diodos e transformador *shunt*.

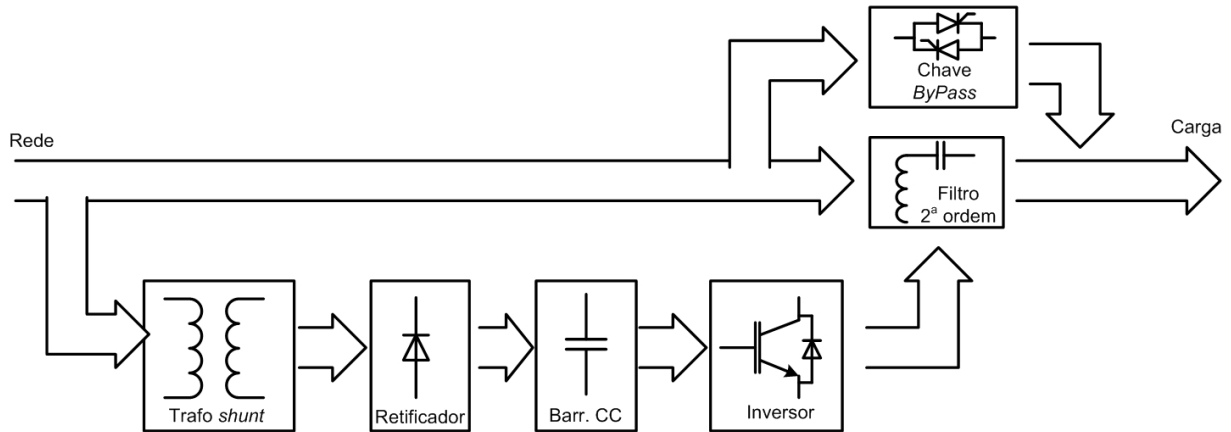


Figura 2.8: Diagrama Esquemático do Di^2PS .

O protótipo montado no LAI utiliza um retificador trifásico e um inversor em ponte completa para cada fase, sendo que três conjuntos das citadas topologias integram o conversor trifásico. Atualmente, o Di^2PS se encontra em fase de comissionamento.

2.4 Compensadores com Transformador *Shunt* de Alta Frequência

Em [1] é proposto um CST com transformador *shunt* de alta frequência em um conversor c.c.-c.c.. A motivação para esta topologia, segundo os autores, é obter uma estrutura compacta utilizando um pequeno transformador comparado com transformador convencionais que trabalham na frequência da rede. A topologia proposta é apresentada em 2.9. Na figura 2.10, há uma foto comparando dois transformadores *shunt*, um de frequência da rede e outro de alta frequência (20 kHz), utilizados em um CST especificado para proteção de uma carga de 5kW/480V.

Há uma diferença nesta topologia para as anteriormente mostradas. O ponto de retirada da potência ativa é feito do lado da carga, quando anteriormente foi realizado no lado da

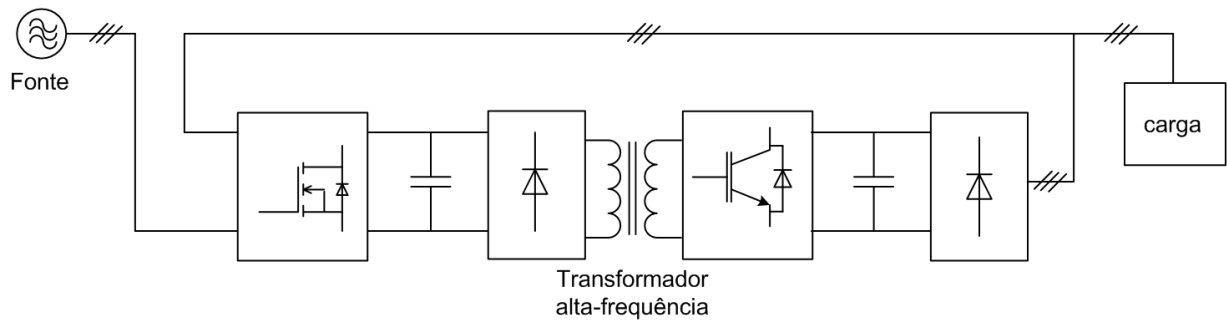


Figura 2.9: Topologia do CST com Transformador *Shunt* de Alta Frequência [1].

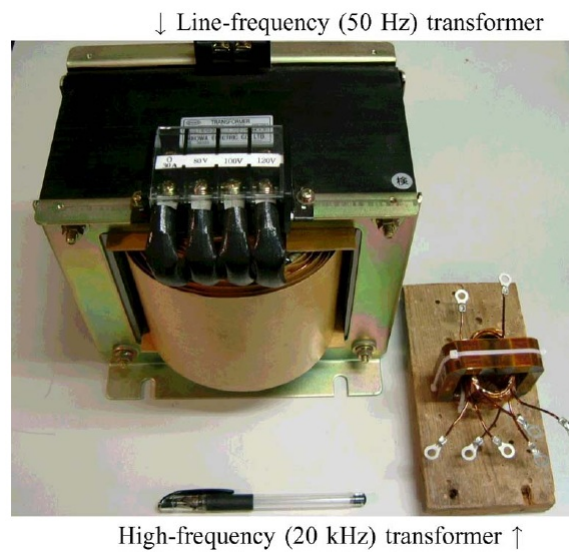


Figura 2.10: Foto comparativa entre transformador *shunt* na frequência da rede e outro de alta frequência. CST projetado para uma carga de 5 kW/480V [1].

fonte. A grande vantagem é a obtenção de uma tensão no barramento CC controlada [28]. Entretanto há um aumento nas correntes do ramo série e consequentemente sua potência, pois, durante o afundamento de tensão, a corrente que passa pela parte série contém, não somente a corrente de carga, mas também a corrente que será fornecida ao ramo *shunt* [30].

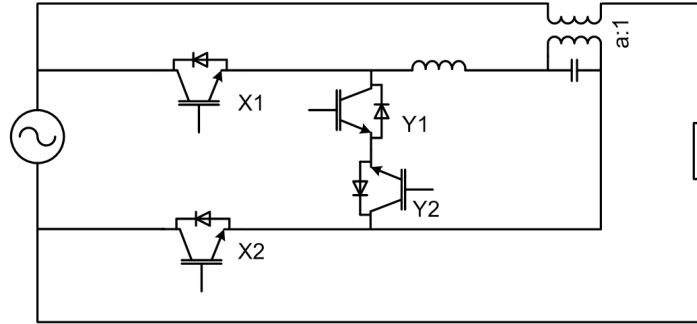


Figura 2.11: Topologia do compensador série baseado no conversor *buck* [2].

2.5 Compensadores Baseados na Compensação Direta C.A.-C.A.

Uma ideia de condicionamento de energia é a conversão direta da tensão da rede afetada por um afundamento, em níveis nominais para a carga protegida. Várias proposições desta foram realizadas por grupos de pesquisa.

Em [2] é apresentada uma topologia de compensador série baseado no conversor *buck*, com um transformador elevador na saída. O esquema básico desta topologia para sistemas monofásicos é apresenta na figura 2.11. Neste sistema, as chaves X1 e X2 são comutadas simultaneamente. O estado das chaves Y1 e Y2 é complementar ao das primeiras.

A tensão de saída do compensador é pela equação 2.2.

$$V_{out} = V_s \left(1 + \frac{D}{a}\right) \quad (2.2)$$

sendo

- V_s = tensão da rede;
- D = ciclo de trabalho, dado pela relação entre o tempo de condução de X1 e X2 e o período de chaveamento;

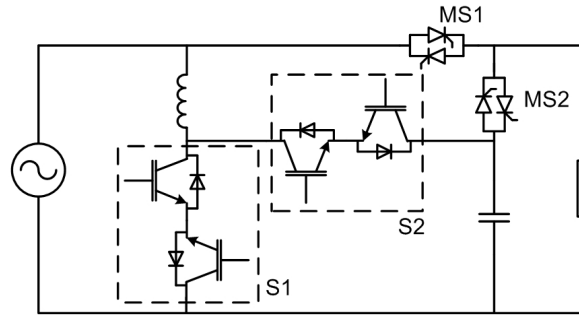


Figura 2.12: Topologia do compensador série baseado no conversor *boost* [3].

- a = relação de espiras do transformador.

Em [3], uma topologia baseada no conversor *boost* é proposta. A topologia monofásica é mostrada na figura 2.12. Em condições de ausência de distúrbio, a carga é alimentada pela rede através da chave MS1. Na ocorrência de um afundamento, MS1 é desligada, MS2 é fechada e o conversor *boost* entra em operação. O autor defende a operação do conversor apenas em condições de operação de curta duração. Desta forma, são evitados eventuais problemas de ressonância ou interferência.

Em [4], também se propõe um conversor *boost* sendo que a síntese da tensão na fase afetada é feita pelo chaveamento das outras fases, conforme mostrado na figura 2.13. Denominado de ZESC (*Zero Energy Sag Corrector*), a topologia proposta consegue sintetizar um 1 pu de tensão em uma fase desde que as outras duas outras fase permaneçam com 0,5 pu. É chamada a atenção para o fato do conversor não ter elementos de armazenamento de energia. Para uma topologia trifásica, a figura 2.13 é replicada três vezes com o devido cruzamento de fases.

As topologias apresentadas possuem a vantagem do número reduzido de componentes e ausência do barramento c.c., o que sugere redução em custo. Por outro lado, nos conversores *buck* e *boost*, a capacidade de compensação destas topologias é limitada a distúrbios sem a ocorrência de salto de fase, visto que a conversão direta tensão-tensão pressupõe a síntese

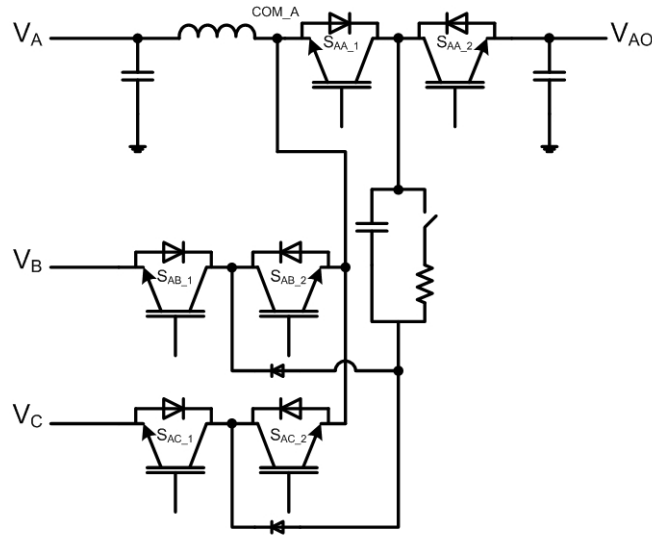


Figura 2.13: Topologia do compensador série baseado no conversor *boost* com cruzamento de fases [4].

da tensão de saída em fase com a da rede [28]. No conversor *boost* com cruzamento de fases, a desvantagem é necessitar de outras duas fases para compor a primeira, o que limita, em alguns casos, sua aplicação.

Há uma outra topologia de conversão direta c.a.-c.a. proposta em [5]. A topologia monofásica pode ser visualizada na figura 2.14. Sua topologia é bastante parecida com os compensadores série de tensão sem armazenamento de energia. A diferença é que se excluiu o capacitor do barramento c.c. responsável por filtrar as oscilações na tensão retificada. O bloco chamado de *conversor de potência* retifica a tensão da rede e chaveia em alta frequência esta tensão c.c., obtendo a tensão necessária para a compensação do afundamento de tensão. Há um filtro LC para as altas frequências. A tensão é injetada no sistema elétrico através de um transformador série.

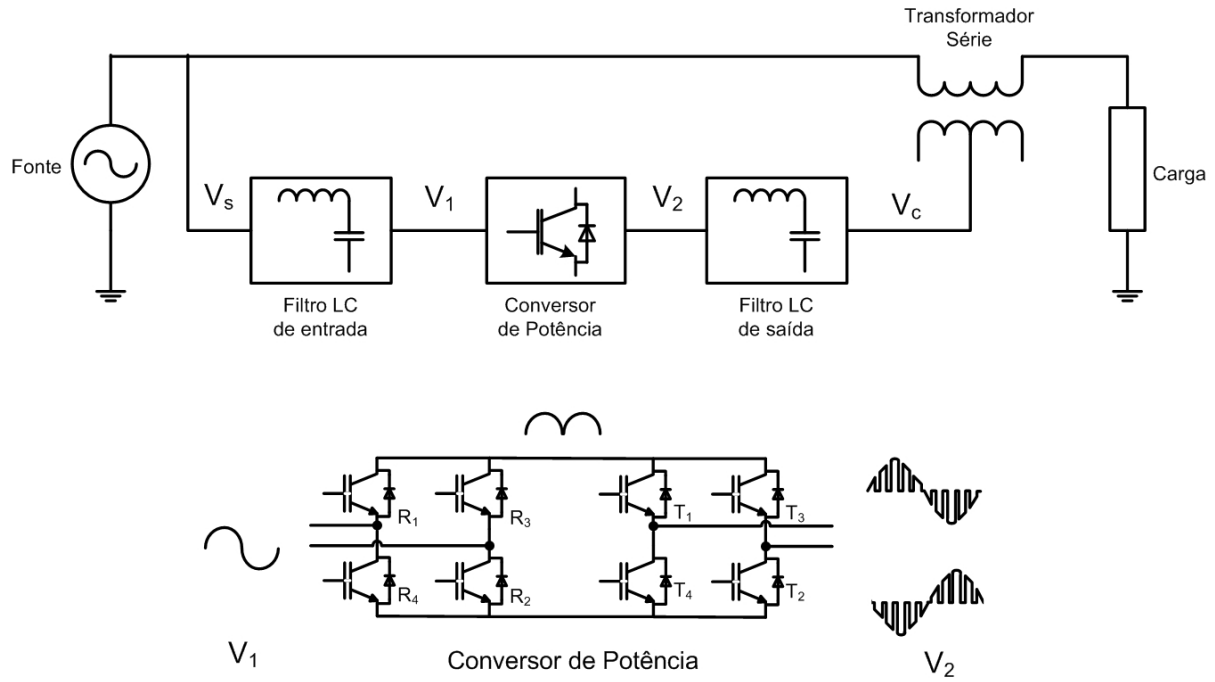


Figura 2.14: Topologia monofásica do Conversor de Potência [5].

2.6 Compensador Série Baseado em Inversor Multinível

Em aplicações de média tensão a utilização de transformadores série se justifica pela redução do nível de tensão dos elementos do conversor, tornando tal nível compatível com o atual estado da arte dos elementos envolvidos, tais como chaves do inversor, capacitores do barramento, etc. Uma alternativa à utilização do transformador série, neste caso, é o emprego do capacitor série, cuja tensão é injetada por um inversor multinível, conforme descrito em [31]. Esta estrutura, chamada de HVDVR (*High Voltage DVR*), é apresentada na figura 2.15. Estrutura semelhante é mostrada em [32].

O conversor c.c.-c.a. é implementado através da conexão em série de inversores monofásicos em ponte, cada qual com sua própria fonte c.c. isolada. O número de níveis de tensões injetadas será tanto maior quanto for o número de inversores em ponte, o que melhora a qualidade da tensão da saída. Esta característica é especialmente atrativa em aplicações

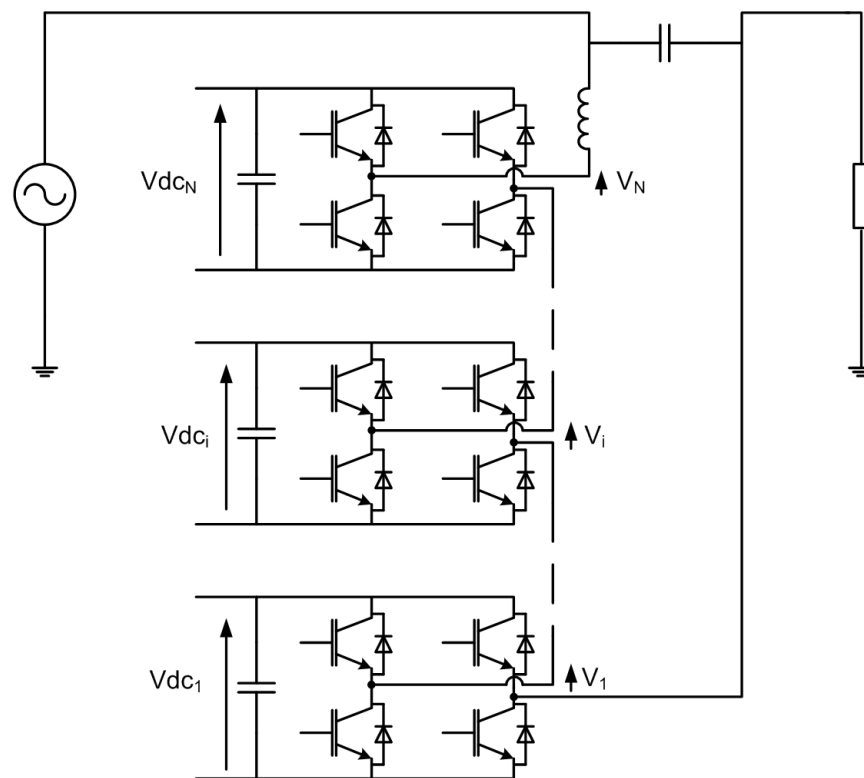


Figura 2.15: Diagrama esquemático do compensador série baseado em inversor multinível

em que o compensador opera continuamente, tais como regulação de tensão e bloqueio de harmônicas de tensão. Estes argumentos constituem uma potencial justificativa para o uso desta solução em baixa tensão. Por outro lado, o elevado número de chaves aumenta o custo do equipamento reduzindo, também, a confiabilidade do mesmo. Apesar de multinível, os inversores em ponte-H são chaveados em alta frequência.

2.7 Conclusões

Este capítulo apresentou o atual estado de arte para Compensadores Série de Tensão. As topologias apresentada indicaram a tendência à simplificação do CST, principalmente para cargas de baixa tensão. A estrutura com transformador série e armazenamento de energia, tendo o DVR Westinghouse como exemplo principal, é a topologia mais encontradas em trabalhos científicos. Logo em seguida, a estrutura sem armazenamento de energia mas com transformador série também é bastante encontrada, exemplificada pelo atual produto comercializado pela ABB, o AVC - Active Voltage Conditioner. Por último, encontra-se a topologia sem transformador série e armazenamento de energia, sendo a família DySC o destaque. Outra alternativa é a topologia com conversão c.a.-c.a. direta.

O armazenamento de energia em compensadores série se justifica em locais onde a razão de curto circuito é muito baixa. Neste cenário, se o compensador tivesse uma estrutura onde fosse retirada energia da própria rede no instante da compensação, poderia-se chegar a um colapso de tensão no sistema elétrico protegido. Se possível for a retirada de energia da própria rede no instante do distúrbio, o que ocorre na maioria das redes, a presença do transformador série apenas é explicada se a utilização do compensador série se der em sistemas de média e alta tensão. O transformador série também se configura como uma solução bastante peculiar visto que a utilização deste se dá somente em seu transitório já

que o fenômeno a ser mitigado é muito rápido. Isto faz com que este dispositivo tenha ter no mínimo 2 pu de potência em relação à carga protegida, o que aumenta seu custo e tamanho.

Em sistemas de baixa tensão, a razão de curto circuito é alta e a tecnologia de dispositivos semicondutores está extremamente consolidada para esta faixa de tensão. Assim, não há justificativa para armazenagem de energia e utilização do transformador série para o compensador série de tensão. Naturalmente, para esta faixa de tensão a tendência à simplificação dos CSTs mostra ser extremamente viável. Outro argumento para a simplificação e compactação do CST é a necessidade de proteção apenas das cargas mais críticas: de nada adianta a proteção de uma grande instalação se o efeito do afundamento de tensão em algumas cargas é irrelevante, como por exemplo, em iluminação.

O próximo capítulo apresenta uma simplificação na estrutura do CST: retirada do filtro senoidal de saída e mudança na modulação do inversor de tensão, *PWM* para onda quadrada.

Capítulo 3

Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada

Este capítulo apresenta o Compensador Série de Tensão que injeta uma onda quadrada em série com a tensão de entrada a fim de recuperar o valor de pico da tensão a valores nominais. Em relação ao compensador série convencional, há a eliminação do filtro senoidal de saída e modulação em onda quadrada ao invés de PWM. Serão apresentadas quatro topologias para execução desta proposta: Topologia com conversor c.c.-c.c. isolado de alta frequência (com ou sem armazenamento de energia), topologia multinível em cascata e topologia com retificador controlado para seleção de taps de transformador. Em seguida, há um detalhamento do projeto do CST, abordando cada elemento integrante do compensador. O controle utilizado para o CST em onda quadrada também é discutido. Ao final, um comparativo em termos de custo entre o CST convencional e em onda quadrada é realizado.

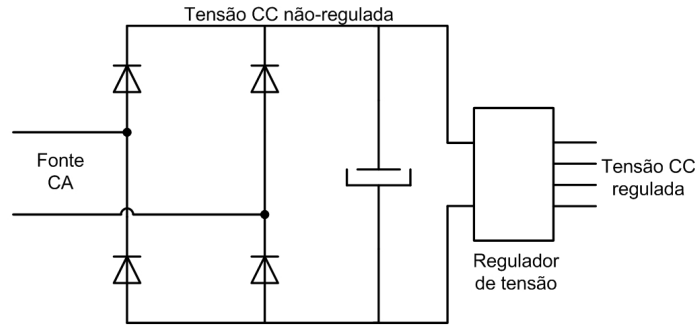


Figura 3.1: Estágio inicial de entrada de cargas eletrônicas

3.1 Introdução

Os compensadores série de tensão, apresentados no capítulo anterior, tinham a missão de, na presença de um afundamento, recuperar a forma de onda de tensão com as mesmas características da tensão pré-afundamento. Para obter-se esta forma de onda pré-afundamento, necessário o uso de um inversor com modulação PWM e um filtro de saída senoidal. Tal esforço é compreensível já que os compensadores se destinam a uma gama enorme de cargas elétricas. Entretanto, esta generalização contribui para a elevação do custo final do compensador.

Algumas cargas industriais não necessitam de uma onda de tensão puramente senoidal para seu correto funcionamento. Um exemplo destas é a carga eletrônica. A figura 3.1 ilustra o estágio inicial de equipamentos eletrônicos [22]. Com a entrada composta por um retificador a diodos e capacitor, basta recuperar o pico da tensão para seu correto funcionamento. Esta filosofia é utilizada em alguns *no-breaks* que empregam uma onda quadrada para alimentação das cargas eletrônicas no instante de falta da rede (*no-break* 1 - apêndice A).

A figura 3.2 mostra um estágio de entrada submetido a um afundamento de 0,6 pu, sendo apresentadas a tensão de entrada e a tensão no capacitor do barramento c.c.. Há uma descarga no capacitor até o momento em que seu valor se torna menor que a tensão c.a. de entrada. Neste instante ocorre a carga da capacitor, mas até o pico da nova tensão, no

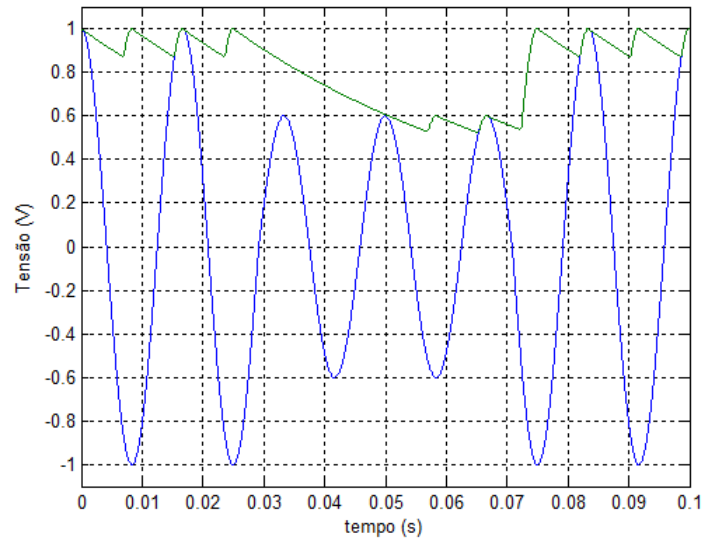


Figura 3.2: Estágio inicial de entrada de cargas eletrônicas submetido a afundamento de 0,6 pu

caso 0,6 pu. Se, no instante do afundamento, uma tensão em onda quadrada com amplitude igual a 0,4 pu fosse injetada, a tensão no barramento c.c. não sofreria qualquer mudança. Esta hipótese é ilustrada na figura 3.3. Como pode ser visto na figura, o barramento c.c. se manteve constante, comprovando a eficácia da compensação por onda quadrada em cargas eletrônicas.

Alguns equipamentos já são bastante utilizados para proteção de cargas eletrônicas a afundamentos de tensão em ambientes industriais: o *DySC* [8, 19] e o transformador *CVT* [33]. Assim os propósitos de um compensador simplificado que pudesse ser tão eficiente quanto os citados foi baseado nos seguintes requisitos:

- Eliminação do filtro de saída senoidal;
- Simplificação do controle;
- Aumento da densidade de potência;
- Não possuir armazenamento de energia.

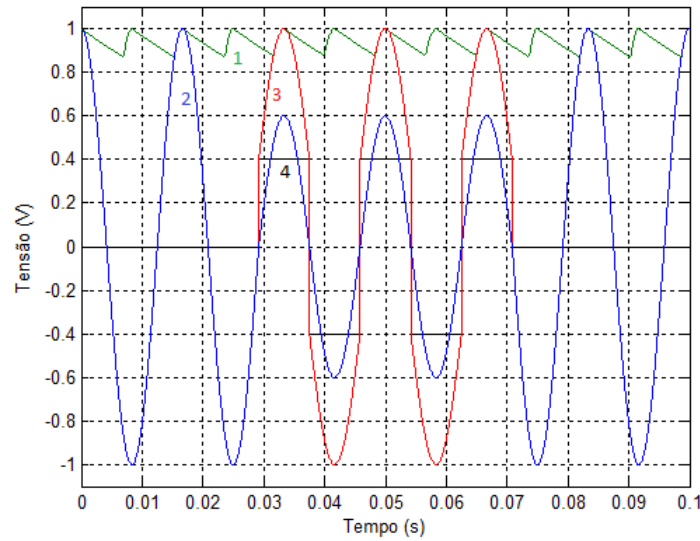


Figura 3.3: Estágio inicial de entrada de cargas eletrônicas submetido a afundamento de 0,6 pu compensado por tensão em onda quadrada. (1) Tensão barramento c.c.. (2) Tensão c.a. de entrada (3) Tensão Compensada (4) Tensão em Onda Quadrada de 0,4 pu

3.2 Topologias do Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada

O compensador série de tensão em onda quadrada constitui-se uma fonte em série com a rede de alimentação. Sob condições normais de operação da rede c.a., o CST ou injetaria tensão zero ou seria transpassado por uma chave estática. No instante de afundamento, a tensão série, que será somada a tensão afundada, deve possuir um valor exato para que a tensão resultante seja compatível com a tensão de alimentação do equipamento protegido. O objetivo central está na recuperação da tensão de pico de acordo com o valor de interesse para cargas eletrônicas.

As propostas de topologia para o CST em onda quadrada, comparado com as diversas topologias de CSTs convencionais, não possuirão filtro senoidal no conversor série e este passará de uma modulação em alta frequência para uma modulação na frequência da rede. O principal ponto negativo do CST em onda quadrada é a tensão de compensação fixa,

resultado da eliminação da modulação de largura de pulso. Esta restrição potencialmente limita o interesse na compensação em onda quadrada e deve ser atacada.

As diferenças nas topologias a serem propostas para o CST em onda quadrada estão no forma de modular a tensão em onda quadrada a ser injetada. Quatro topologias são apresentadas, sendo que três delas foram concebidas nesta tese:

1. Modulação por conversor c.c.-c.c. de alta frequência com armazenamento de energia (proposta encontrada na literatura);
2. Modulação por conversor c.c.-c.c. de alta frequência sem armazenamento de energia
3. Topologia multinível através de células em cascata
4. Topologia multinível através da seleção de *taps* do transformador *shunt* por meio de retificador controlado

3.2.1 Modulação por Conversor C.C.-C.C. de Alta Frequência com Armazenamento de Energia

A referência [6] é a única encontrada na literatura que também, assim como esta tese, propõe a compensação de afundamentos de tensão através da injeção de tensão em onda quadrada. Para a solução do problema da modulação da tensão do barramento c.c., os autores propõe um conversor c.c.-c.c. de alta frequência, conforme visualizado na figura 3.4. Nesta mesma figura, nota-se a presença de elementos armazenadores de energia, não atendendo os requisitos para obtenção de um produto de baixo custo de aquisição e manutenção. O conversor c.c.-c.c. de alta frequência utilizado nesta proposta é apresentado na figura 3.5.

Além da existência do sistema de armazenamento de energia, a utilização de um conversor c.c.-c.c. de alta frequência apenas transfere a modulação em alta frequência do conversor

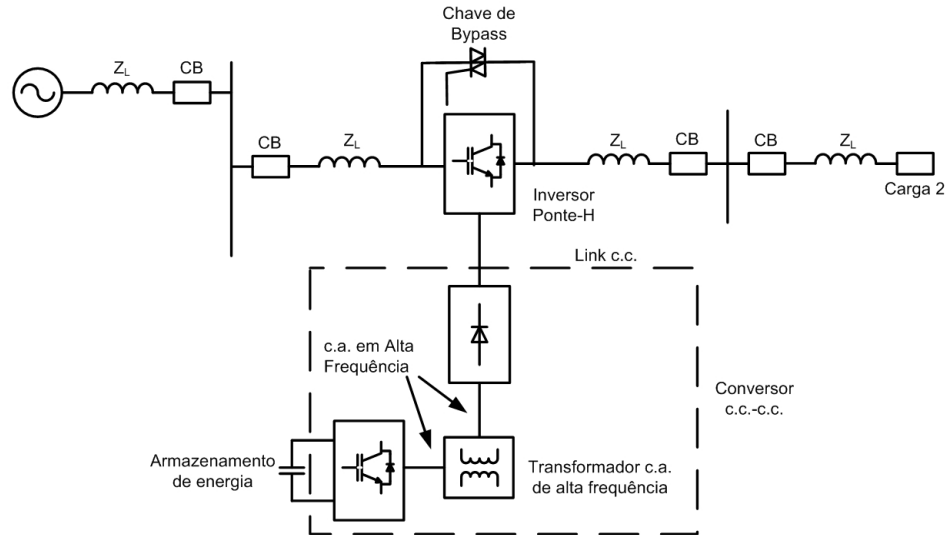


Figura 3.4: CST em Onda Quadrada modulado por conversor c.c.-c.c. de alta frequência com armazenamento de energia [6]

série para o barramento em corrente contínua. A justificativa apresentada pelos autores para esta mudança está na compactação do transformador isolador, que aparece na figura 3.5.

3.2.2 Modulação por Conversor C.C.-C.C. de Alta Frequência sem Armazenamento de Energia

Um dos problemas da topologia anterior é o sistema de armazenamento de energia. A alternativa a este é retirar a potência necessária à compensação da própria rede c.a.. Para tal, basta substituir o sistema de armazenamento de energia por um ponte de diodos e um filtro capacitivo, conforme proposto na figura 3.6 [34].

Assim como na estrutura anterior, há um conversor chaveando em alta-frequência. Como um dos objetivos traçados na introdução deste capítulo é diminuir as perdas por chaveamento, deseja-se uma topologia que não utilize modulação de alta frequência. As próximas duas topologias atendem a estes requisitos.

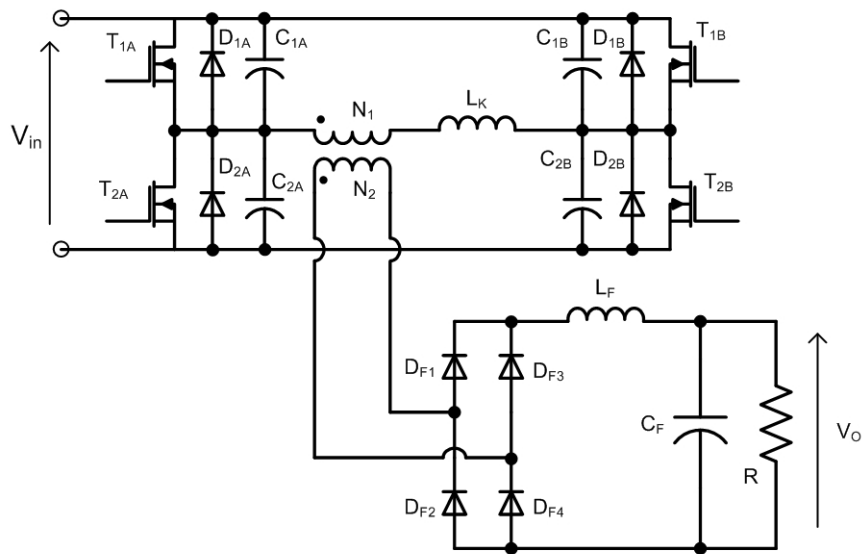


Figura 3.5: Conversor c.c.-c.c. utilizado na figura 3.4

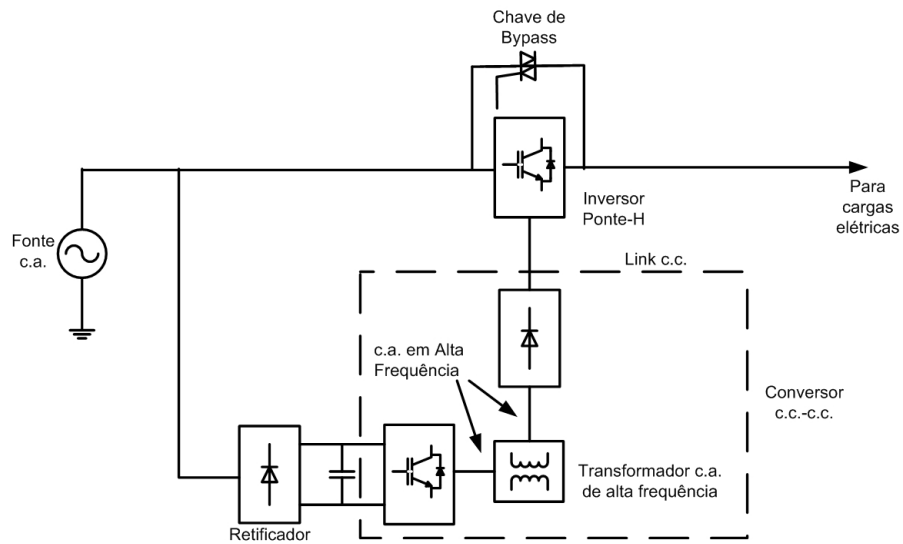


Figura 3.6: CST em Onda Quadrada modulado por conversor c.c.-c.c. de alta frequência sem armazenamento de energia.

3.2.3 Topologia Multinível com Células em Cascata

Para solução do problema da modulação da tensão a ser injetada pelo conversor série, propõe-se uma topologia multinível com células em cascata. A topologia multinível em cascata é apresentada na figura 3.7. Em cada célula, há um transformador *shunt* com uma relação de transformação $1:a_x$, um retificador em ponte completa, um barramento c.c. e um inversor em ponte-H [35, 36, 37].

Há uma questão a ser resolvida para esta topologia: qual o número adequado de células e qual relação de transformação do transformador *shunt* e, conseqüentemente, valor de tensão de cada nível devem possuir. Para responder a estas indagações, normas internacionais são consultadas para descobrir qual o nível mínimo de tensão deve ser disponibilizado para a carga protegidas. ANSI [38] e o guia IEEE [39] recomendam que a tensão de entrada para os equipamentos eletrônicos deve estar entre 0,9 e 1,05 pu. Desta forma há uma margem de afundamentos em que um nível do compensador consegue atender, o que otimiza o número de níveis. Para compreender como a relação de transformação de cada célula recupera a tensão, utiliza-se a teoria de matemática intervalar [40] para tal objetivo. As equações 3.1 a 3.4 apresentam a relação de transformação para recuperação no intervalo entre 0,9 e 1,05.

$$[V_1 : V_2] + a[V_1 : V_2] = [0,9 : 1,05] \quad (3.1)$$

$$(1 + a)[V_1 : V_2] = [0,9 : 1,05] \quad (3.2)$$

$$V_1 = \frac{0,9}{1 + a} \quad (3.3)$$

$$V_2 = \frac{1,05}{1 + a} \quad (3.4)$$

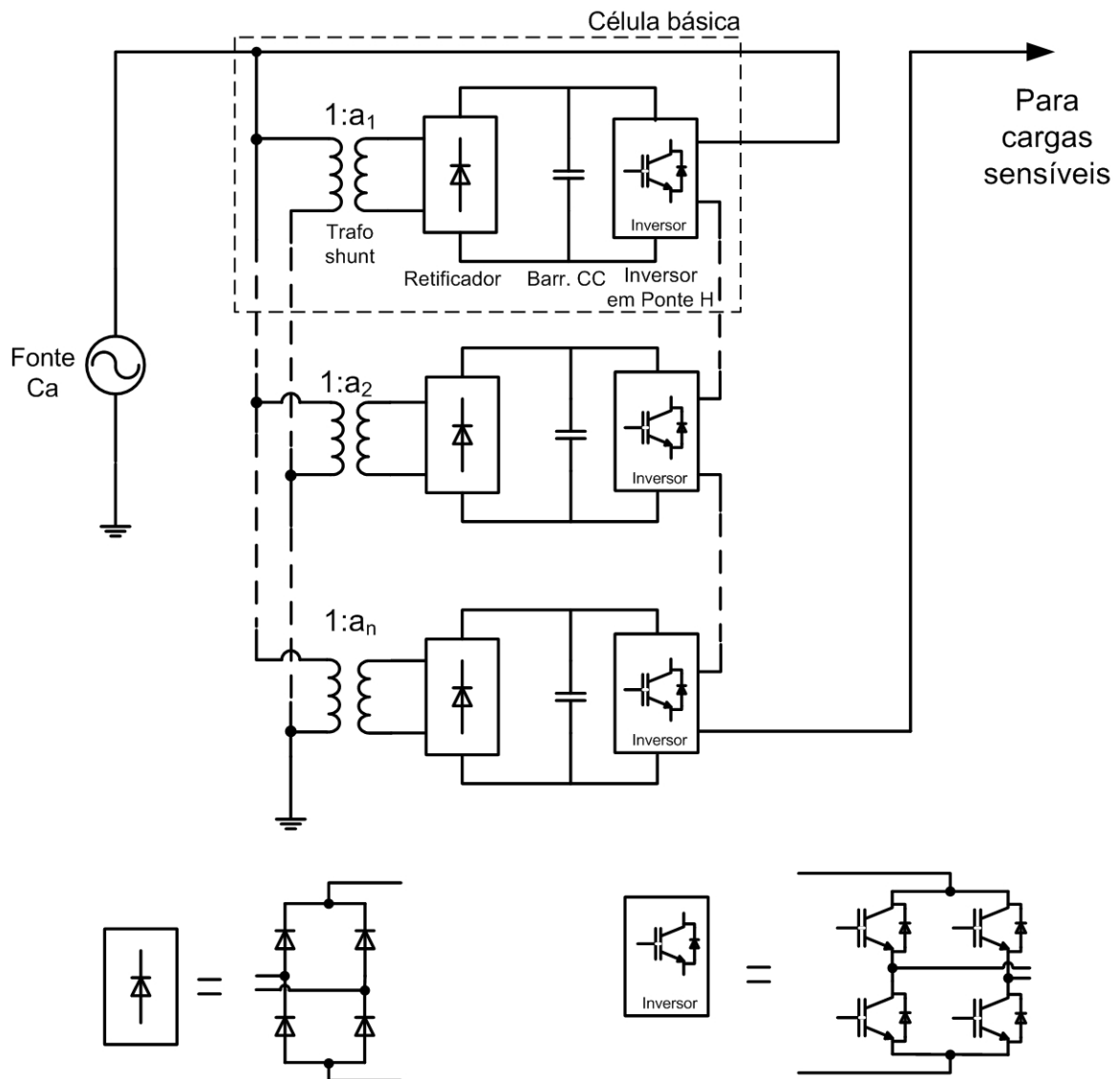


Figura 3.7: CST em Onda Quadrada - topologia multinível com células em cascata

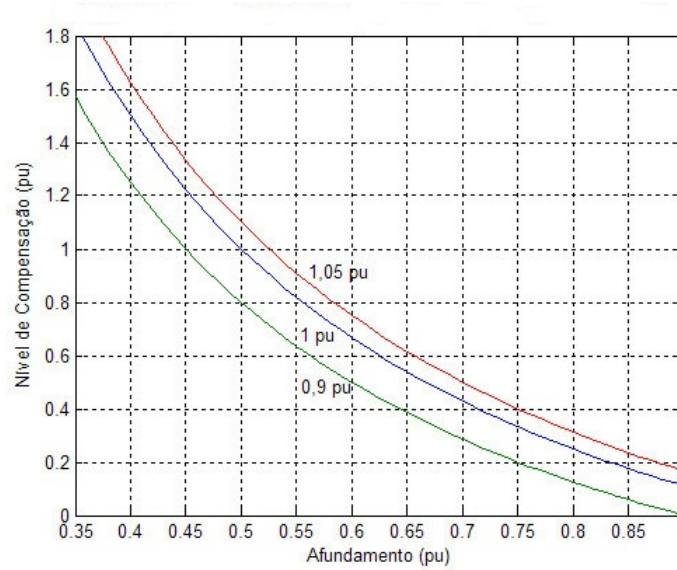


Figura 3.8: Nível de compensação/Relação de transformação para recuperação do afundamento de tensão

Como exemplo de utilização das equações anteriores, para um transformador *shunt* com relação de $1:0,2$, V_1 seria 0,75 pu enquanto V_2 daria 0,875. Ou seja, uma relação de transformação $1:0,2$ compensaria a faixa de afundamentos que vai de 0,75 a 0,875 pu, resultando em uma tensão compensada entre 0,9 e 1,05 pu. Para escolha da relação de transformação, a figura 3.8 colabora nesta tarefa. Ela traz a relação entre o afundamento de tensão e o nível a ser injetado, dado pelas equações 3.1 a 3.4.

A utilização da figura 3.8 é exemplificado na figura 3.9. Com a relação de transformação $1:0,2$, pode-se compensar afundamentos entre 0,75 pu ($0,75+0,75 \times 0,2=0,9$) e 0,875 pu ($0,875+0,875 \times 0,2=1,05$). Para um nível de compensação de 0,4 pu, pode-se compensar afundamentos de 0,64 pu ($0,64+0,64 \times 0,4=0,90$ pu) a 0,75 pu ($0,75+0,75 \times 0,4=1,05$). Com $1:0,6$, os afundamentos compensados são de 0,56 pu ($0,56+0,56 \times 0,6=0,9$) a 0,65 pu ($0,65+0,65 \times 0,6=1,05$). Com a relação $1:0,8$, a compensação se dá para afundamentos de 0,50 pu ($0,50+0,50 \times 0,8=0,9$) a 0,58 pu ($0,58+0,58 \times 0,8=1,05$).

No exemplo da figura 3.9, há quatro níveis de tensão utilizados: 0,2, 0,4, 0,6 e 0,8. É

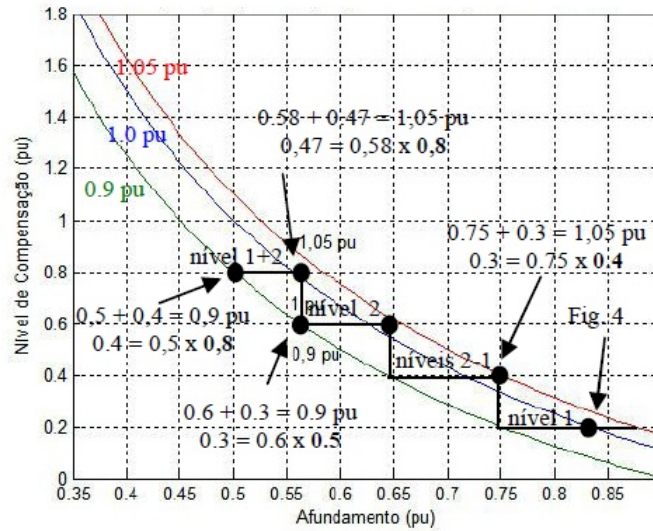


Figura 3.9: Exemplo de Compensação

possível conseguir estes quatro níveis com apenas duas células: 1:0,2 e 1:0,6. A figura 3.10 mostra os modos de operação para um CST em onda quadrada com duas células. O primeiro modo de operação é o *bypass*. Injeta-se uma tensão nula pelas duas células. Este modo pode ser substituído por uma chave de *bypass*. Pode-se ainda injetar apenas um dos níveis: o mais baixo ou mais alto (na figura 3.10, célula 1 e célula 2, respectivamente). É possível ainda a combinação das duas células, injetando ou a soma do nível mais alto com nível mais baixo, ou a subtração destes níveis. Assim, para as relações 1:0,2 e 1:0,6, é possível injetar: 0, 1:0,2 (célula 1), 1:0,4 (célula 2-1), 1:0,6 (célula 2) e 1:0,8 (célula 2+1). A figura 3.11 ilustra estes possíveis níveis de tensão. Um CST em onda quadrada construído com estas relações de transformação compensa afundamentos de 0,5 pu a 0,875 pu.

Estudo da Electric Power Research Institute [41] em 12 concessionárias de energia norte-americanas e uma chinesa mostrou que 80% dos afundamentos têm uma tensão residual maior que 50%. Assim, com o exemplo citado, utilizando células 1:0,2 e 1:0,6, haveria mitigação de 80% dos afundamentos mais frequentes.

A fim de avaliar o número necessário de células para mitigar toda a faixa de afundamentos,

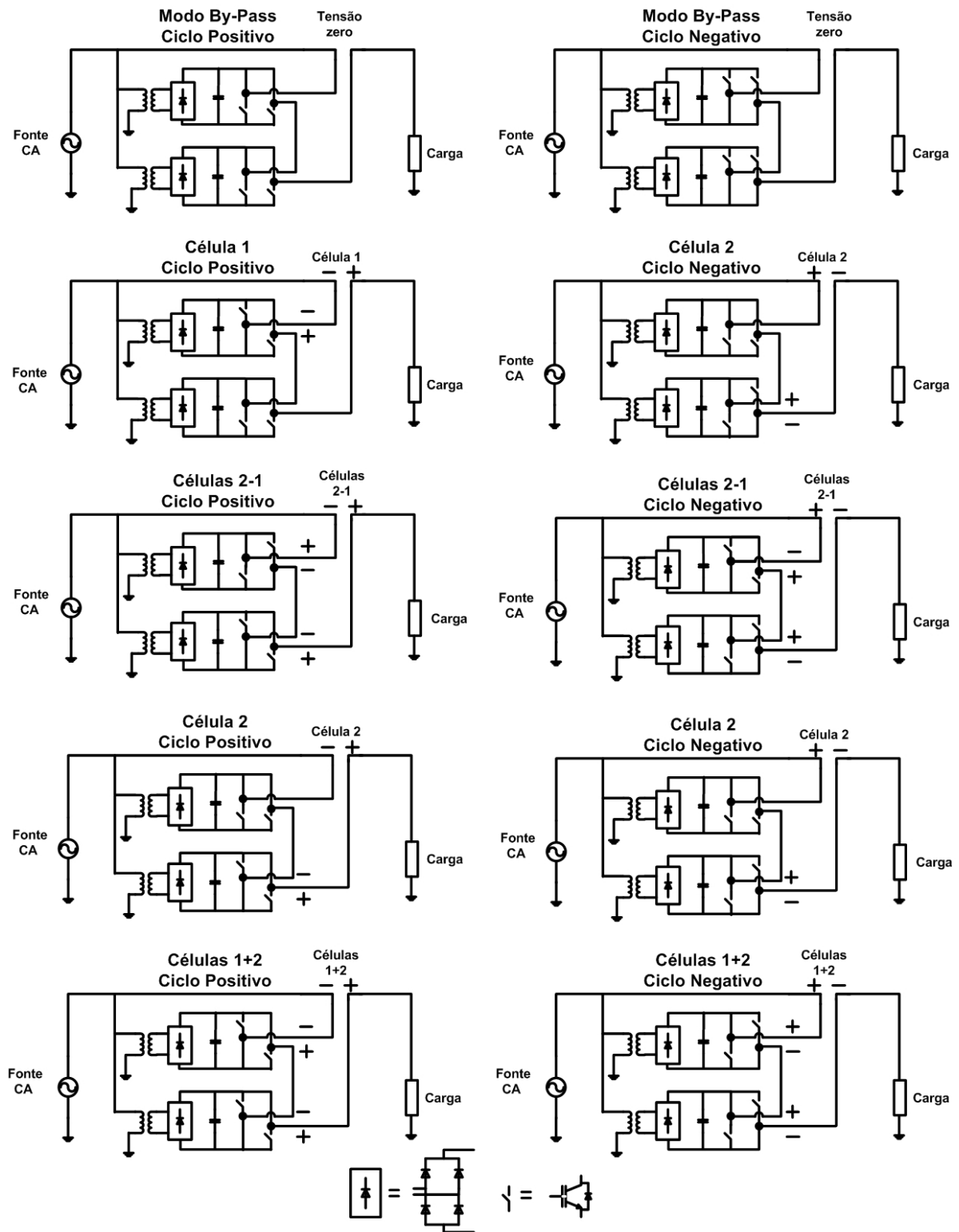


Figura 3.10: CST em Onda Quadrada - topologia multinível com células em cascata: modos de operação para duas células

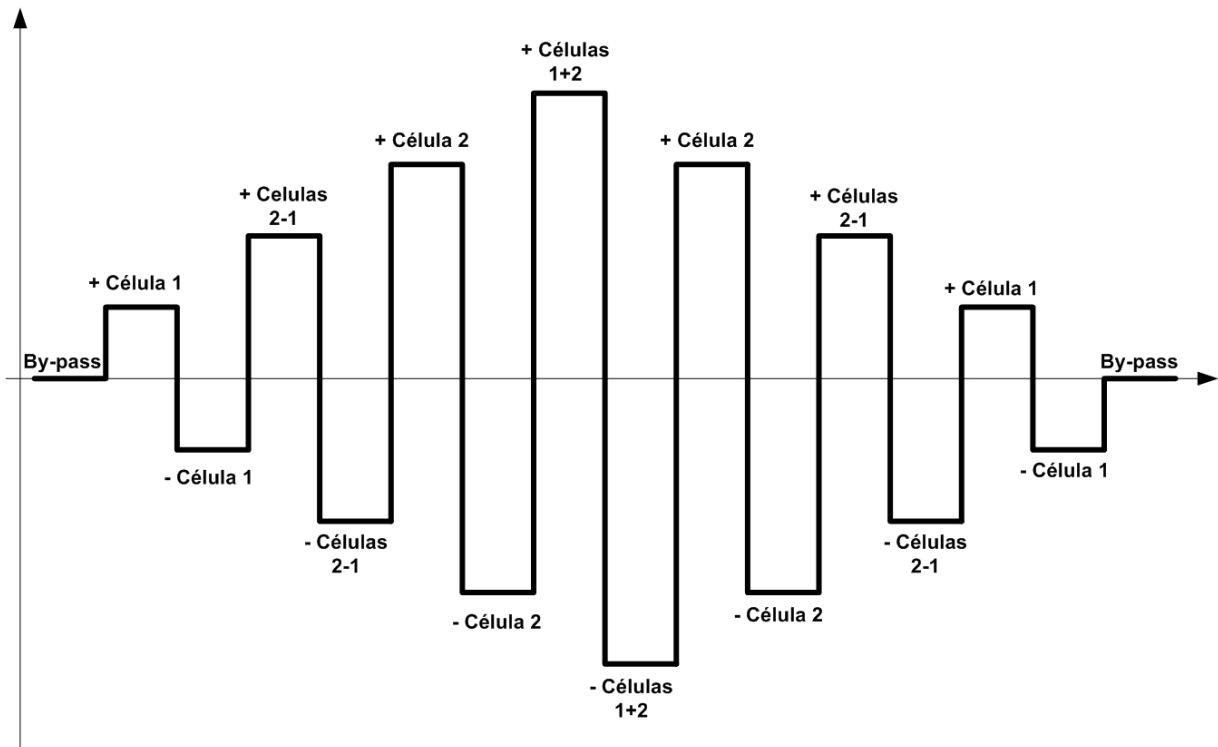


Figura 3.11: Valores de tensão disponíveis pelos modos de operação descritos na figura 3.10

a tabela 3.1 traz a relação entre os afundamentos compensados e o número de células utilizadas. Além das células 1:0,2 e 1:0,6, cada nova célula incluída tem uma relação de 1:1. Esta escolha é realizada para se ter a mesma tecnologia de componentes semicondutores (baixa tensão) em cada célula. Para fins de simplificação, cada célula, independente da sua relação de transformação, terá um custo de 1 pu. A figura 3.12 traz a correlação entre o número de células e a porcentagem de afundamentos compensados, bem como o crescimento de custo a inserção de cada nova célula. Analisando a tabela 3.1 e a figura 3.12, percebe-se que acima de 3 células, há pequenos ganhos na porcentagem de afundamentos compensados. Como exemplo, de 3 para 4 células há um ganho de 3,1% do número de afundamentos compensados, para uma aumento de 33% no custo do compensador. Um compensador com um número de células acima de 3 não teria uma boa relação custo-benefício. Entretanto, o número ideal, em termos de porcentagem de afundamentos compensados e custo, é do CST contendo duas

Tabela 3.1: Número de células versus porcentagem de afundamentos compensados

Número de células	Relações de Transformação	Faixa de Afundamento Compensada (pu)	Porcentagem de afundamentos compensados	Ganho na Porcentagem
1	1:0,2	0,75 a 0,9	41,9	41,9
2	1:0,2 + 1:0,6	0,50 a 0,9	80,5	38,6
3	1:0,2 + 1:0,6 + 1 x1:1	0,32 a 0,9	90,4	9,9
4	1:0,2 + 1:0,6 + 2 x1:1	0,24 a 0,9	93,5	3,1
5	1:0,2 + 1:0,6 + 3 x1:1	0,19 a 0,9	95,9	2,3
6	1:0,2 + 1:0,6 + 4 x1:1	0,16 a 0,9	95,9	0,0
7	1:0,2 + 1:0,6 + 5 x1:1	0,13 a 0,9	96,9	1,0
8	1:0,2 + 1:0,6 + 6 x1:1	0,12 a 0,9	96,9	0,0
9	1:0,2 + 1:0,6 + 7 x1:1	0,10 a 0,9	97,6	0,6

células. Conforme analisado anteriormente, 80% dos afundamentos mais frequentes são recuperados. O compensador miniDySC, comercializado pela empresa Soft Switch Technology, compensa afundamentos de até 50%. Este dado dá uma idéia da necessidade de mercado, sendo uma informação importante para o projeto de Compensadores Série de Tensão.

3.2.4 Topologia Multinível Através da Seleção de *Taps* do Transformador *Shunt* por Meio de Retificador Controlado

A topologia proposta desta seção é apresentada na figura 3.13. A proposta desta topologia é variar a tensão que será injetada através de um retificador controlado a tiristores. Usa-se, desta forma, apenas uma ponte em H. O nível de tensão é selecionado através de um braço de tiristores ligado a um *tap* do transformador *shunt*. Assim como a ponte-H, apenas 1 transformador *shunt* é utilizado, com o número necessário de *taps* à recuperação de tensão, conforme requisito do projeto do CST.

Os modos de operação da topologia desta seção estão ilustrados na figura 3.14. Há, basicamente, três modos de operação:

1. Modo *bypass*: injeção de tensão zero pelo conversor série, podendo ser no ciclo positivo

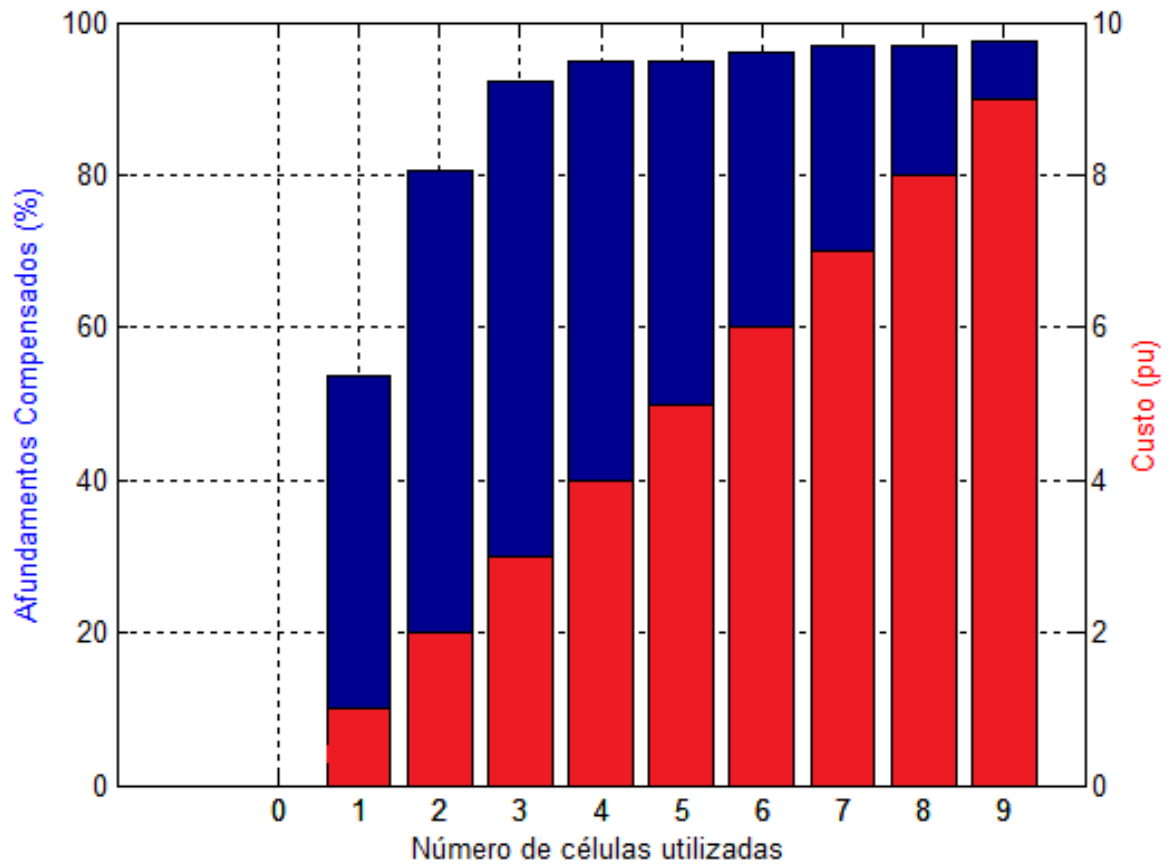


Figura 3.12: Custo e porcentagem de afundamentos compensados conforme número de células utilizadas para o CST em Onda Quadrada multinível

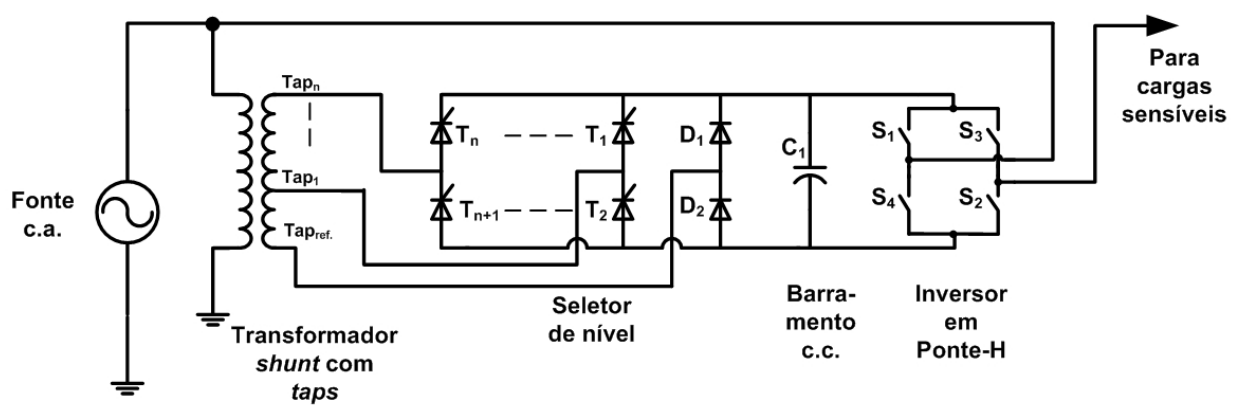


Figura 3.13: CST em Onda Quadrada - topologia multinível através da seleção de *taps* do transformador *shunt* por meio de retificador controlado

com as chaves S1 e S3 fechadas, ou no ciclo negativo, com as chaves S2 e S4 fechadas. Neste instante, o barramento c.c. fica alimentado pelo tap de menor relação de transformação, no caso, tap 1. Esta alimentação se dá pelo braço de diodos e pelo braço de tiristores ligado ao tap 1.

2. Injeção de tensão pelo tap 1: inicia-se o processo de injeção de tensão do barramento c.c. através do inversor em ponte-H. A alimentação do barramento c.c. se dá pelo tap 1: no ciclo positivo da tensão da rede c.a. de entrada, o tiristor T1 e o diodo D2 (item 70) carregam o capacitor. Já no ciclo negativo, a carga do capacitor é realizada pelo tiristor T2 e diodo D1. Em relação à injeção de tensão, no ciclo positivo as chaves S3 e S4 são fechadas enquanto no ciclo negativo, as chaves S1 e S2 permanecem fechadas.
3. Injeção de tensão pelo tap 2: o que muda em relação ao modo de injeção anterior é a alimentação do barramento c.c. Esta alimentação se dá pelo tap 2: no ciclo positivo da tensão c.a. de entrada, o tiristor T3 e diodo D2 carregam o capacitor do barramento c.c.; já no ciclo negativo, o tiristor T4 e o diodo D1 são responsáveis pela carga do capacitor. A injeção de tensão será da mesma forma descrita no modo anterior. No ciclo positivo, as chaves S3 e S4 injetam a tensão, sendo no ciclo negativo as chaves S1 e S2 se mantêm fechadas.

A principal vantagem desta proposta em relação à topologia multinível em cascata, apresentada na seção anterior, está na inserção de um novo nível de tensão. Na presente topologia, basta incluir mais um *tap* ao transformador *shunt* e um braço de tiristores. Deve-se verificar que a tensão do inversor em ponte-H seja compatível com o novo nível do barramento c.c.. Para o CST multinível em cascata, a inclusão de um novo nível implica na inserção de mais uma célula.

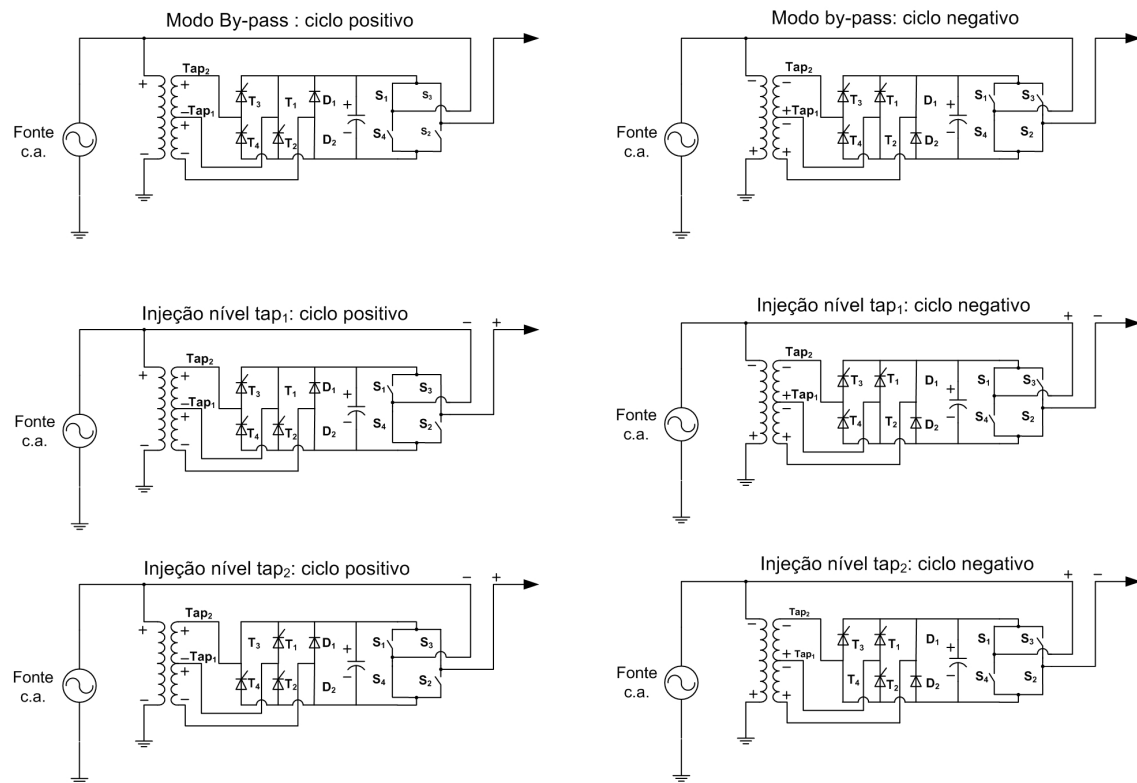


Figura 3.14: Modos de Operação do CST em Onda Quadrada - topologia multinível através da seleção de *taps* do transformador *shunt* por meio de retificador controlado.

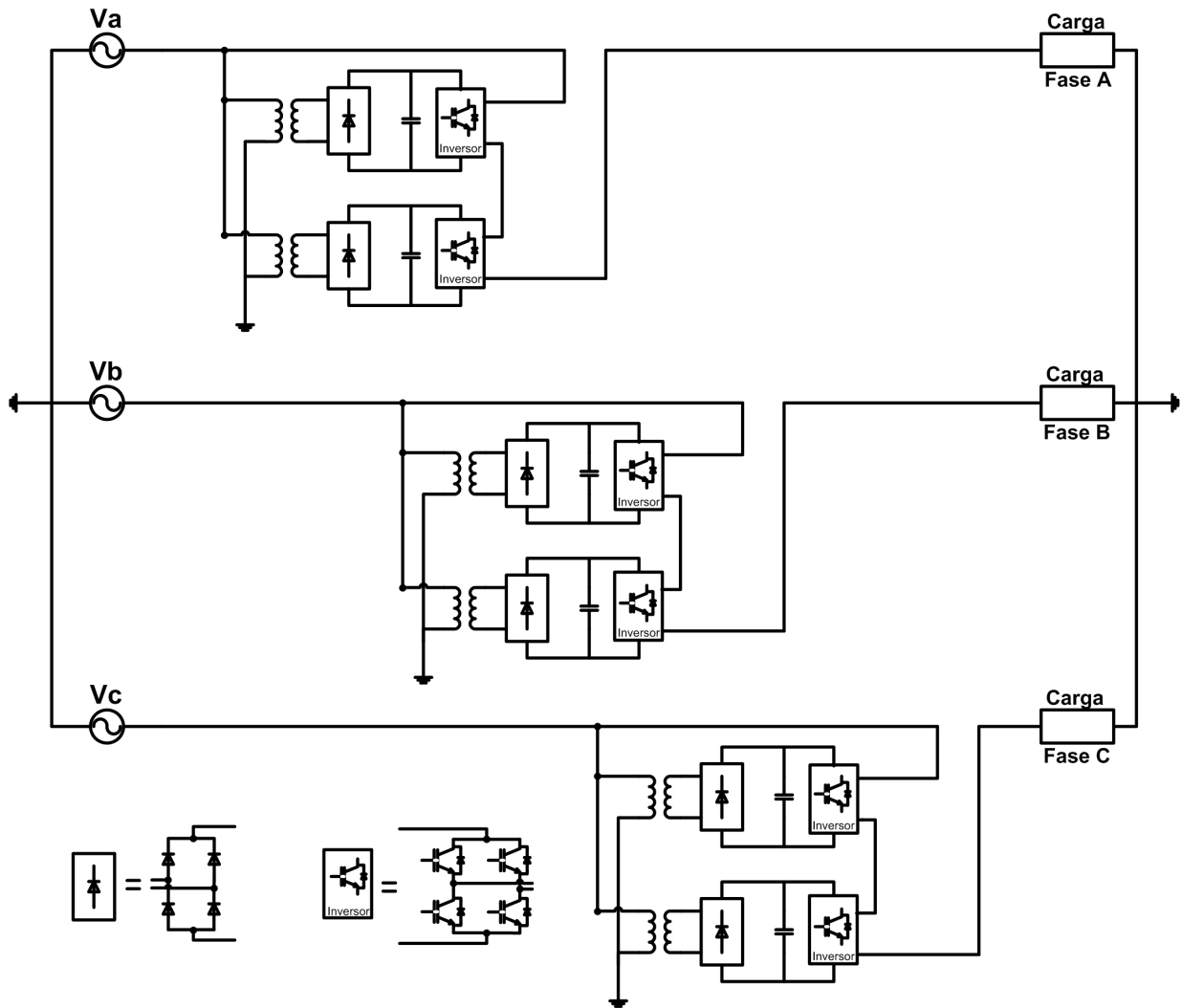


Figura 3.15: Versão trifásica do CST em onda Quadrada Multinível em Cascata

3.2.5 Topologias para o CST em Onda Quadrada Trifásico

Os CSTs em Onda Quadrada trifásico são uma versão extendida das topologias monofásicas apresentadas anteriormente, utilizando uma por fase. As figuras 3.15 e 3.16 ilustram estas versões.

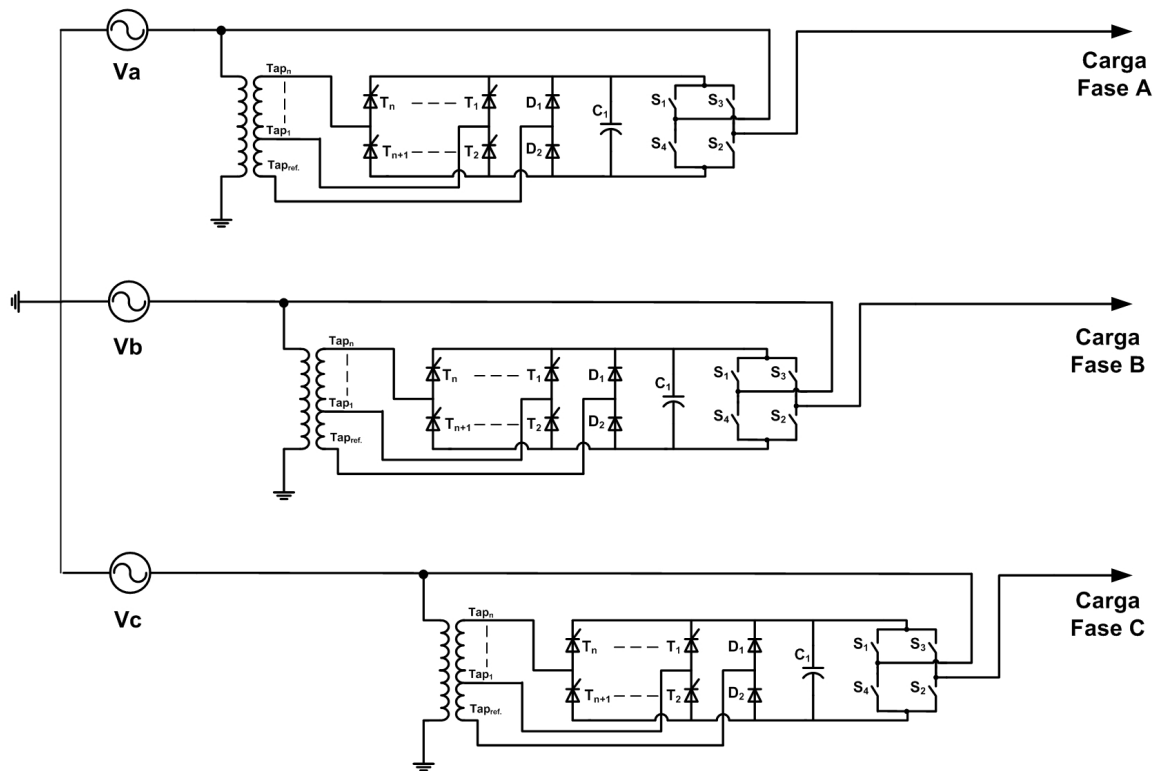


Figura 3.16: Versão trifásica do CST em onda Quadrada via Retificador Controlado e Seleção de *taps* do transformador *shunt*

3.3 Projeto do CST em Onda Quadrada

O projeto do CST em Onda Quadrada será baseado nas duas últimas topologias apresentadas anteriormente: multiníveis em compensação por degraus. Assim, os elementos de potência a serem especificados serão:

1. Transformador *shunt*
2. Ponte Retificadora
3. Barramento c.c.
4. Inversor e *Bypass*

O projeto do conversor não difere muito do CST senoidal. Nas referências [24, 17, 42, 43] há descrito em detalhes o projeto de cada elemento aqui citado. Esta seção trará um resumo acerca da filosofia de projeto de cada elemento.

3.3.1 Transformador *Shunt*

O transformador *shunt* é um dos elementos responsáveis por retirar da rede de alimentação a potência ativa necessária para a compensação série do afundamento de tensão. Entretanto, sua potência nominal não necessita possuir a potência da carga protegida [17]. A explicação para esta afirmação reside no fato de que somente será drenada potência da rede via o transformador no instante do afundamento. Como este fenômeno é de curta duração, normalmente centenas de milisegundos, é possível drenar uma potência maior que a nominal do transformador *shunt* com um pequeno aumento de temperatura. A dinâmica térmica do transformador, portanto, permite trabalhar com este componente subdimensionado comparado com a potência da carga a ser protegida. Assim, o elemento crítico passa a ser a impedância de dispersão.

A impedância de dispersão do transformador *shunt* deve ser especificada levando em conta o requisito da tensão no barramento c.c.: no instante do afundamento, a queda de tensão no transformador deve permanecer em um valor adequado para que a tensão neste barramento esteja em valores compatíveis ao projeto do compensador.

A relação de espiras é determinada pelo valor de tensão desejado a ser inserido. Para o projeto do transformador com diversos *taps*, a potência nominal é selecionada a partir do *tap* de maior relação de transformação, pois a seleção deste implica em compensação de um afundamento mais severo e que demanda, portanto, maior potência do transformador.

3.3.2 Ponte Retificadora

Para a seleção da ponte retificadora, a tensão de bloqueio das chaves semicondutores deve ser maior do que a máxima tensão a qual serão submetidos. No caso do retificador controlado, os diodos devem possuir uma tensão de bloqueio do *tap* com maior relação de transformação. Já para os braços tiristores, a tensão de bloqueio se dará conforme o *tap* ligado a cada braço. No projeto da topologia multinível em cascata, a tensão reversa será a mesma do nível injetado por cada célula.

Deve-se especificar a corrente que circulará pelos dispositivos, levando em conta a carga do capacitor do barramento c.c. e a corrente de compensação drenada pelo conversor série.

3.3.3 Barramento c.c.

Os capacitores funcionam como filtros para o barramento de corrente contínua. Estes devem ser corretamente dimensionados levando em conta que durante o afundamento irão ficar entre a rede de alimentação e a carga. Isto significa que toda a corrente de carga irá passar pelos capacitores, descarregando-os. Com a corrente de carga e o *ripple* desejado, chega-se ao valor da capacitância para cada nível. A equação 3.5 traz o cálculo para determinar a

capacitância mínima do barramento c.c..

$$C \geq \frac{I_L}{\omega * \Delta V_{dc}} \quad (3.5)$$

Existe um compromisso entre o ripple desejado no barramento c.c. de cada nível e o início da compensação. No instante anterior ao afundamento, o capacitor está carregado com um percentual da tensão em 1 pu. Durante o afundamento, o valor da tensão cai para o percentual da tensão afundada. Assim, na entrada do compensador, há uma pequena sobretensão devido a essa tensão pré-afundamento. Sobretensão, neste contexto, significa valor de tensão recuperada acima de 1,05 pu. O tempo desta sobretensão é diretamente proporcional ao valor da capacitância enquanto no ripple do barramento c.c. o comportamento é inverso: quanto maior a capacitância, menor o ripple.

Para se escolher um valor de capacitância que atenda a estes dois requisitos, torna-se necessário um estudo avaliando uma faixa de valores de capacitâncias. A figura 3.17 traz um exemplo desta relação *ripple* x tempo de descarga. Para se chegar a esta figura utilizou-se a equação 3.5 e a descarga de um circuito RC, onde R foi modelado a partir da corrente da carga protegida e a tensão injetada pelo capacitor.

Pela figura 3.17, o tempo de descarga é baixo, menor que um 1/4 de ciclo da rede para um ripple em torno de 10%. Vale ressaltar que a sobretensão não permanece porque o capacitor não possui energia armazenada para manter este acréscimo.

Outro dado importante para a seleção do capacitor que fará parte do barramento c.c. é a resistência série equivalente (ESR). Os capacitores possuem uma resistência parasita em série com sua capacitância. Haverá uma queda de tensão nesta resistência proporcional à corrente instantânea do capacitor. Como no CST em onda quadrada toda a corrente de carga passará pelo capacitor, deve-se especificar um capacitor com um valor de ESR adequado para que a queda de tensão por ele produzida não comprometa o processo de compensação do CST em

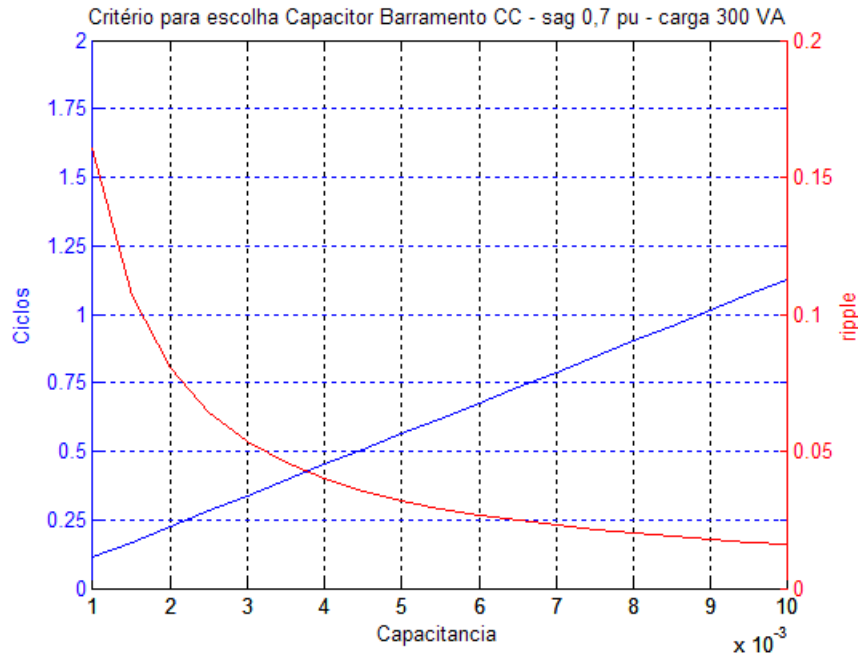


Figura 3.17: Ripple e Tempo de descarga de capacitores para um compensador de 300 VA em um afundamento de 0,7 pu

onda quadrada.

3.3.4 Inversor e *Bypass*

Nas topologias apresentadas, os conversores série localizados entre a fonte e a carga protegida trabalham também como chaves *bypass*. Em cada conversor, há uma seleção entre aplicação da tensão do nível ou zero de tensão. As perdas nas chaves são constantes, pois tanto no instante de *bypass* quanto no instante de injeção de potência, a corrente que passa pelas chaves é a corrente nominal da carga protegida. A modulação por ser em onda quadrada, está sempre na frequência da rede, o que confirma a imutabilidade das perdas nas duas situações.

Apesar de ter-se mostrado a possibilidade de trabalhar em *hot stand-by*, a diminuição nas perdas do conversor série pode ser realizada através da utilização de uma chave semicondutora para transpassar o conversor série na ausência de afundamentos de tensão. As perdas

nos tiristores de *bypass* são menores comparadas com as tecnologias utilizadas em inversores (IGBT e MOSFET). Outra informação a favor desta alternativa é o baixo custo do tiristor. Esta escolha faz com que as chaves do inversor possam, assim como os outros elementos do CST, trabalhar em sobrecarga, já que o tempo de atuação é pequeno. Dependendo dos componentes e tempo de atuação, é possível dispensar um sistema de refrigeração, assim como ocorreu no projeto do Di²ps [28].

3.4 Controle do Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada

A compensação por onda quadrada faz com que o chaveamento dos elementos inversores de saída ocorram na frequência da rede elétrica. A eliminação da modulação PWM elimina, por sua vez, a necessidade de utilização de microprocessadores rápidos. A injeção de onda quadrada possibilita o controle do CST para mitigação de afundamentos de tensão com uma lógica bastante simples, que pode ser implementada através de poucos elementos discretos.

A filosofia do controle do CST em onda quadrada encontra-se representada em diagramas de blocos por meio da figura 3.18. Trata-se de um controle em malha aberta (*feedforward*) onde deseja-se rejeitar a perturbação correspondente à variação da amplitude da tensão c.a. da rede de energia. O primeiro estágio se baseia no comportamento da tensão c.c. não-regulada das fontes de alimentação dos equipamentos eletrônicos descritos. Neste estágio é realizada uma estimativa da tensão c.c. não-regulada da carga eletrônica a ser protegida na ocorrência do afundamento de tensão. Esta tensão estimada segue para um circuito que seleciona qual ou quais níveis de tensão devem ser injetados. Em paralelo há um circuito que informa a polaridade da tensão c.a. de entrada. Com estes dois sinais, a informação de nível e sinal da tensão da rede, define-se o estado do inversor de saída em cada célula.

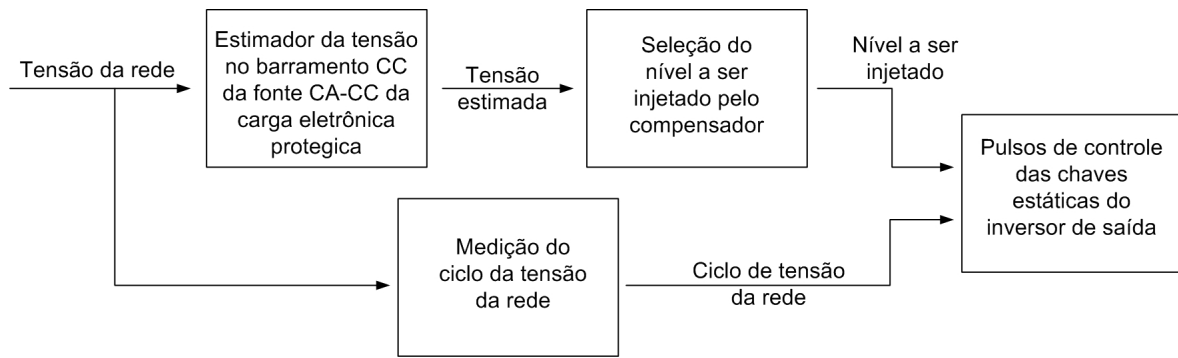


Figura 3.18: Filosofia de controle do CST em Onda quadrada

Como dito anteriormente, uma possível implementação desta estratégia de controle através de componentes discretos é ilustrada na figura 3.19. Três elementos se destacam nesta topologia: *estimador diodo-capacitor-resistor (DCR)*, *comparadores de nível* e *detector de sinal*. O *estimador DCR* fornece a amplitude do afundamento de tensão, através da detecção do valor de pico da tensão de entrada. Na ocorrência do afundamento, a tensão de entrada se torna menor que a tensão no capacitor C , fazendo com que a ponte de diodos não conduza. O capacitor descarrega pelo resistor R até que seu valor de tensão se torne igual ao valor de pico da tensão de entrada. A tensão do barramento c.c. após este transitório de descarga é, portanto, uma medida do afundamento presente. Os *comparadores de nível* realizam uma comparação entre a saída do *estimador DCR* e valores de referência para injeção de tensão correspondente a cada uma das duas células do compensador para a topologia multinível em cascata ou seleção da chave tiristor no retificador controlado. Estes valores de referência são escolhidos a partir da figura 3.8 e equações 3.3 e 3.4.

O *detector de sinal* informa aos elementos de acionamento dos inversores na saída se a tensão de entrada é positiva ou negativa. Com distorção típica de tensão (5%), esta informação ainda é válida, pois, na proteção de cargas eletrônicas, o objetivo é garantir a tensão de pico entre 0,9 e 1,05 pu nos instantes de carga do filtro capacitivo da fonte

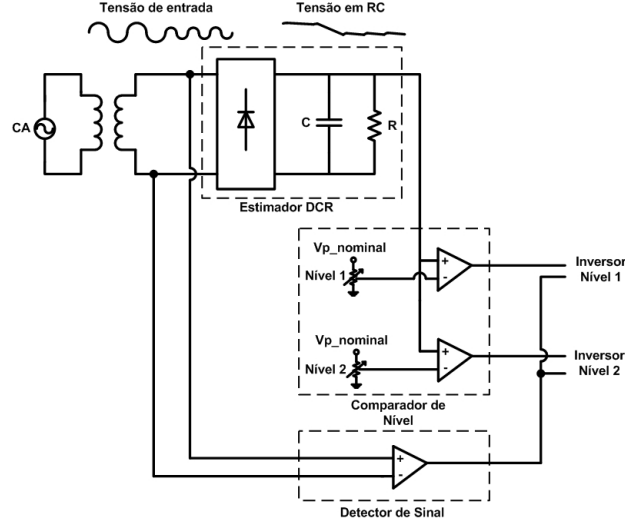


Figura 3.19: Implementação da filosofia controle da figura 3.18 por componentes discretos retificadora das cargas eletrônicas protegidas pelo CST. Este instante se dá por volta da metade do semi-ciclo da tensão de entrada. Se houver alguma oscilação na transição entre um semi-ciclo e outro, a compensação para a carga eletrônica não ficará comprometida, pois o instante de condução de corrente será no meio do semi-ciclo, momento que não ocorre variações de sinal na tensão de entrada. Em relação ao inversor, são necessários os sinais de controle vindos do *comparador de nível* e *detector de sinal* para o controle do inversor em ponte-H, porque este contém três possíveis estados (+Vd, 0, -Vd).

O tempo de resposta deste controle é dado em função da faixa de passagem do *estimador DCR*. Por se tratar de um circuito RC, admitindo que a tensão de pico na entrada da ponte de diodos seja V_o e V_p a tensão de pico no capacitor, tensão inicial no processo de descarga do mesmo, o tempo de resposta a um afundamento é dado por (equação 3.6):

$$t = -RC \cdot \ln\left(\frac{V_o}{V_p}\right) \quad (3.6)$$

Este tempo de resposta deve ser menor que um ciclo da tensão da rede (16 ms para 60 Hz), tempo mínimo de funcionamento sem compensação da tensão de entrada para equipamentos

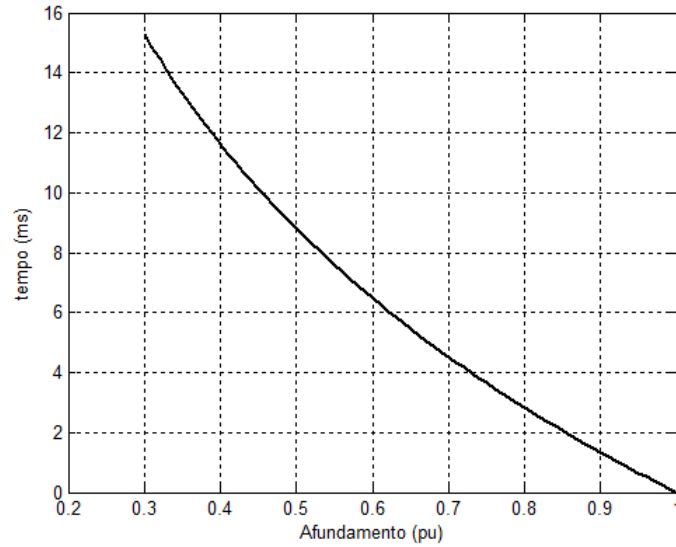


Figura 3.20: Tempo de resposta para um estimador DCR com $R=2,7k\Omega$ e $C=4,7\mu F$

eletrônicos, segundo normas internacionais [38, 39]. A figura 3.20 apresenta este tempo de resposta para um resistor de $2,7k\Omega$ e capacitor de $4,7\mu F$. Analisando a figura, o tempo de resposta aumenta com a redução da tensão residual do valor de afundamento. Para um afundamento específico bastaria diminuir o resistor ou capacitor para diminuição deste tempo, conforme equação 3.6. Entretanto, a diminuição no valor destes componentes traz uma elevação no *ripple* do *estimador DCR*. Um *ripple* elevado pode fazer com que um nível não adequado a compensação seja injetado por alguns instantes.

O circuito proposto na figura 3.19 faz com que o compensador injete tensão sempre em fase com o distúrbio da rede. Havendo um salto de fase, a injeção acompanha este salto. Para cargas eletrônicas, esta defasagem com a tensão recuperada não gera qualquer inconveniente. O foco deve ser a manutenção da tensão no barramento c.c. na entrada dos reguladores, possibilitando o seu funcionamento contínuo.

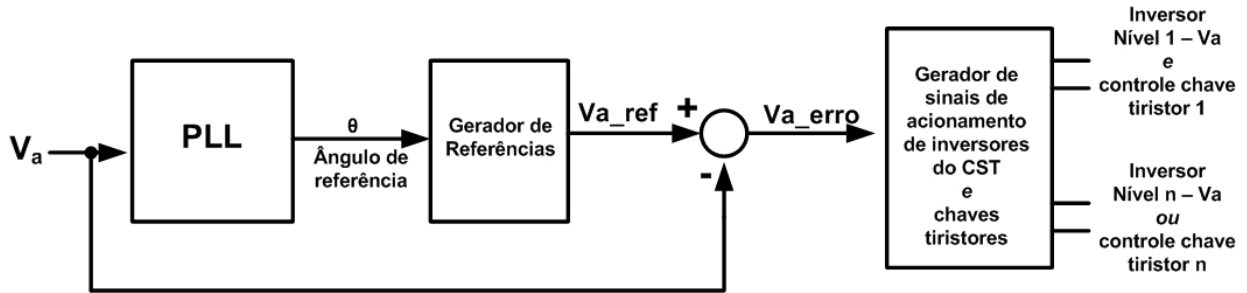


Figura 3.21: Filosofia de controle digital para o CST em Onda Quadrada

3.4.1 Implementação via Controle Digital

O controle do CST em onda quadrada via processadores digitais de sinal pode ser visualizado na figura 3.21. Em primeiro lugar é necessário a geração de tensões de referência. Esta tarefa é realizada por meio de uma PLL (*Phase Locked Loop*) e uma função senoidal. Esta tensão de referência é subtraída da tensão de entrada c.a., sendo esta tensão de erro, portanto, a tensão que deve ser injetada a fim de recuperar a tensão de entrada. Esta tensão alimenta o estágio que irá produzir os sinais de comando para o inversor e/ou chaves tiristores, dependendo da topologia a ser controlada.

Importante lembrar que em um CST em onda quadrada trifásico, a PLL a ser utilizada também toma como referência as três fases. Porém, continua-se controlando cada fase individualmente. Importante que a PLL seja imune a perturbações de tensão, para que o ângulo de referência não sofra nenhum desvio no momento da compensação. Exemplo de PLL com imunidade a perturbações de tensão pode ser encontrado em [44, 45].

3.5 Comparativo entre CST Senoidal e Onda Quadrada

A escolha entre o Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada ou Senoidal se dá por um comparativo entre as vantagens e desvantagens técnicas, mas também entre os custos

empregados na montagem de cada compensador [46].

Uma vantagem do CST senoidal em relação a onda quadrada é a utilização da modulação PWM por dois motivos: facilidade de modulação da tensão e possibilidade de compensação de outros distúrbios de qualidade de energia elétrica (QEE). O CST senoidal pode funcionar como um filtro de harmônicos de tensão, mitigar fenômenos como desequilíbrio de tensão, flicker e outros. Entretanto, há uma desvantagem no uso do PWM em sistemas de grande potência: o chaveamento em alta frequência de grandes blocos de potência geram diversos problemas de compatibilidade eletromagnética, necessitando de filtros passivos para mitigar estas ocorrências [47]. O filtro LC de saída no conversor série representa em torno de 20% do volume do equipamento final [43]. Sua retirada significa um aumento 25% na densidade total de potência.

O CST em onda quadrada, apresenta um número maior de componentes se comparado com as estruturas clássicas de CSTs senoidais. Este número maior se dá pela necessidade de modulação da tensão série a ser injetada. A mudança de modulação, de PWM para onda quadrada, tem a vantagem de ter as perdas no conversor série menores em 30% [42]. Este fato se explica pela inexistência de perdas de chaveamento.

Para um estudo comparativo em termos de custos, [43] foi utilizada como referência (projeto 2, especificado no citado artigo). Neste, é apresentado o custo de um CST senoidal trifásico de 300kVA, 440V. A capacidade de mitigação de afundamentos vai até 50% de tensão remanescente. Preferiu-se projetar um compensador monofásico de menor potência e tensão, 15kVA, 220V, mas ainda mitigando afundamentos de até 50%. Esta escolha se deu pela maior gama de componentes disponíveis para consulta de preços, realizada em sites especializados [48]. O percentual que cada parte integrante representa no custo do CST senoidal foi utilizada conforme descrito no projeto 2 de [43]. Projetaram-se também dois CSTs em onda quadrada que atingissem os mesmos requisitos (afundamentos com 50% de

tensão): topologia multinível em cascata e topologia com retificador controlado. Em relação à topologia multinível em cascata, apenas duas células são necessárias para cobrir a faixa de afundamentos especificada: 1:0,2 e 1:0,6. Para a topologia com retificador controlado, necessário um transformados com taps 1:0,2, 1:0,4, 1:0,6 e 1:0,8. Cada parte integrante, assim como seu projeto, é detalhado ao longo desta seção. Os custos de cada projeto são mostrados na tabela 3.2, lembrando que a base 1 pu é a mesma nos três projetos e significa o custo total do CST senoidal.

Todos os projetos, ao invés de trabalharem em *hot stand-by*, ou seja, injeção de tensão zero na ausência de afundamento, utilizarão uma chave de *bypass*, que consiste em dois tiristores em anti-paralelo. Como o projeto desta chave depende da carga, nos três compensadores são utilizados os mesmos tiristores, tendo, portanto, os mesmos custos. Estes, desta forma, não entrarão no custo final.

Chaves do inversor

Para o projeto desta chaves é necessário especificar a corrente que por ela circulará, bem como a tensão reversa máxima. A corrente, em qualquer dos três projetos, será a mesma, sendo esta a corrente de carga, aproximadamente 70A. A tensão reversa máxima no CST senoidal será de 311V. Utilizando IGBTs, a família disponível com estes níveis de corrente e tensão são módulos de 70A e 600V.

No caso das células do conversor em onda quadrada, topologia multinível em cascata, para a célula com transformador de relação de transformação 1:0,2, a tensão máxima reversa é de 62V. Com relação 1:0,6, a tensão máxima reversa 187V. Estes valores fazem com que, ao invés de utilizar IGBTs, podem-se utilizar Mosfets com tensão reversa de 200V e 400V. Esta escolha tem um impacto direto no custo final do equipamento. Já para a topologia com retificador controlado, em situação normal sem distúrbio, a menor relação de transformação será selecionada 1:0,2, sendo a tensão no barramento c.c. igual a 62V. Quando seleciona-se a

maior relação de transformação, 1:0,8, o afundamento possui um valor de $110V_{rms}$, sendo a situação de maior tensão presente no barramento c.c.. Esta tensão é igual $155V_{cc}$. Portanto, é possível utilizar chaves com tensão reversa de 400V.

Conforme [43], o módulo IGBT representa 0,38 pu do custo final do equipamento. Após consulta em sites de venda de componentes eletrônicos, módulos Mosfet com tensão de 100V e 200V custam 30% e 50%, respectivamente, em relação ao IGBT de mesma corrente e tensão 600V. Assim, apesar do número de chaves ser o dobro, o custo final das chaves do inversor para o CST em onda quadrada - topologia multinível em cascata é 80% do valor do IGBT, ficando portanto em 0,30 pu. O custo das chaves na topologia com retificador controlado é de 50%, no valor de 0,19 pu.

Gate Driver

Para o custo do *gate driver*, utilizou-se uma relação constante entre o preço dos dispositivos de potência e o número de seus respectivos *gate drivers*. Esta opção se justifica uma vez que os MOSFETs utilizados na topologia em cascata operam em tensões mais baixas, o que amplia significativamente o número de soluções para a implementação dos *gate drivers*. Como resultado, o custo total associado aos *gate drivers* permanece constante e igual a 0,1 pu. Para a topologia com retificador controlado, o custo é de 0,05 pu.

Transformador shunt

No projeto do CST senoidal, o transformador utilizado tem relação de 1:1. A potência que cada módulo irá entregar será proporcional à sua relação de transformação. Logo, 0,2 e 0,6 pu para as duas células do CST em onda quadrada - topologia em cascata e 0,8 pu para a topologia com retificador controlado. Em termos de custo, o transformador com 0,2 pu custa 55%, 0,6 pu 68% e 0,8 85% em relação ao transformador 1:1. O custo final ficará em 123%, 0,16 pu para o CST em onda quadrada multinível em cascata e 0,11 pu para a topologia com retificador controlado.

Capacitor

Para a seleção do capacitor, basta usar a equação 3.5. Considerando 5% de ripple no barramento c.c., quanto menor a tensão no capacitor, maior será seu valor. Na célula com relação de transformação 1:0,2, o valor da capacitância será 5 vezes maior que a capacitância do CST senoidal (relação 1:1), enquanto a célula com 1:0,6 será 1,7 vezes maior. Porém, apesar da diferença no valor da capacitância, as tensões nos capacitores serão menores, o que impacta significativamente no preço final deste componente. Agregando estas duas informações, o preço do capacitor da célula 1:0,2 é 53% e da célula 1:0,6 78% do preço de referência do capacitor do CST senoidal. Para a topologia com retificador controlado, deve-se usar o mesmo valor de capacitância da célula 1:0,2 da topologia em cascata, mas a tensão utilizada será maior, conforme descrito na seleção das chaves de inversores. O custo, portanto, do CST em onda quadrada - topologia em cascata para seus capacitores será de 0,08 pu (0,06 pu para CST senoidal). A topologia com retificador controlado terá um custo que será 180% comparado com o custo do CST senoidal, sendo este valor 0,11 pu.

Retificadores

A especificação deste componente se dá pela corrente direta e tensão reversa máxima, assim como as chaves do inversor. Na topologia escolhida para o projeto dos três conversores, a potência a ser injetada é retirada da própria rede. Assim, a corrente que circulará por estes componentes será a corrente da carga elétrica protegida mais a corrente necessária para o carregamento do capacitor. Nos três projetos, a corrente será praticamente a mesma. Assim, o que diferencia será a tensão reversa que cada componente irá suportar. Entretanto, a diferença de preço na faixa de tensão considerada (100V a 400V) para um mesmo valor de corrente é insignificante. Assim, por ter o dobro de chaves retificadoras, o retificador do CST em onda quadrada terá um custo duas vezes maior (0,8 pu) em relação ao retificador do CST senoidal (0,4 pu). Apesar da topologia com retificador controlado utilizar tiristores, o custo

destes é muito semelhante aos diodos, justificando o mesmo preço para os dois projetos do CST em onda quadrada, visto que nos dois utilizam-se 8 chaves retificadoras.

Filtro Senoidal

O custo do filtro senoidal existirá apenas no CST senoidal, sendo este valor de 0,06 pu.

Dissipador

O uso do dissipador é dispensável no inversor de saída. Entretanto, se faz necessário na chave de bypass. Como esta chave é igual para todas as topologias, pois seu projeto depende da carga protegida, o custo do dissipador é passado para todas as topologias, sendo 0,12 pu.

Barramento e Miscelânea

Este item retrata custos de construção e acessórios na construção do protótipo. Por haver pouco detalhes na referência consultada [43], preferiu-se, para fins de comparação final, considerar o custo igual em todos os projetos.

Custo final

O custo final do projetos foi 1,0 pu para o CST senoidal, conforme indicado no início desta análise, 0,95 pu para o CST em onda quadrada - topologia multinível em cascata, e 0,77 pu para o CST em onda quadrada - topologia com retificador controlado. A tabela 3.2 e a figura 3.22 traz o custo dos elementos de cada CST, sintetizando as informações anteriormente discutidas.

3.6 Conclusões

Este capítulo apresentou topologias para o Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada. Quatro foram abordadas, sendo elas: Topologia com conversor c.c.-c.c. isolado de alta frequência (com ou sem armazenamento de energia), topologia multinível em cascata e topologia com retificador controlado para seleção de *taps* de transformador. A topologia

Tabela 3.2: Custo comparativo entre módulos monofásicos

	CST	Número de Componentes	Custo
Chaves do Inversor	Sen.	4xIGBTs (70A/600V)	0,38 pu
	Ond. Quad. Cascata	4xMosfets(70A/100V) + 4xMosfets (70A/200V)	0,30 pu
	Ond. Quad. Ret. Cont.	4xMosfet(70A/200V)	0,19 pu
Gate Driver	Sen.	1	0,10 pu
	Ond. Quad. Cascata	2	0,10 pu
	Ond. Quad. Ret. Cont.	1	0,05 pu
Transformador	Sen.	1	0,13 pu
	Ond. Quad. Cascata	2	0,16 pu
	Ond. Quad. Ret. Cont.	1	0,11 pu
Capacitor	Sen.	1	0,06 pu
	Ond. Quad. Cascata	2	0,08 pu
	Ond. Quad. Ret. Cont.	1	0,11 pu
Retificador	Sen.	4	0,04 pu
	Ond. Quad. Cascata	8	0,08 pu
	Ond. Quad. Ret. Cont.	8	0,08 pu
Filtro Senoidal	Sen.	1	0,06 pu
	Ond. Quad. Cascata	-	-
	Ond. Quad. Ret. Cont.	-	-
Dissipador	Sen.	1	0,11 pu
	Ond. Quad. Cascata	1	0,11 pu
	Ond. Quad. Ret. Cont.	1	0,11 pu
Barr. e Miscel.	Sen.	1	0,12 pu
	Ond. Quad. Cascata	1	0,12 pu
	Ond. Quad. Ret. Cont.	1	0,12 pu
Custo Final	Sen.	1,0 pu	
	Ond. Quad. Cascata	0,95 pu	
	Ond. Quad. Ret. Cont.	0,77 pu	

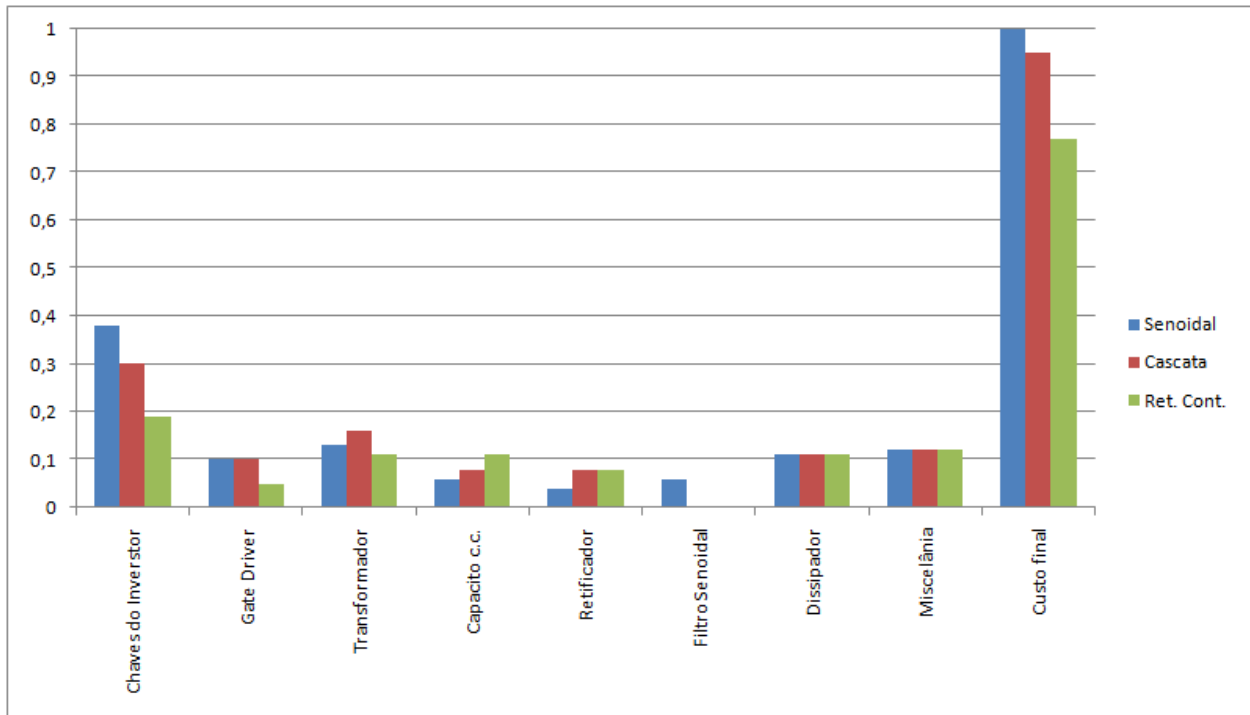


Figura 3.22: Custo comparativo entre módulos monofásicos

com conversor c.c.-c.c. isolado de alta frequência com armazenamento de energia é a única encontrada na literatura sobre o CST em onda quadrada. Uma modificação desta topologia, retirando energia da própria rede, foi proposta, dispensando o uso de elementos armazenadores de energia. Duas outras topologias para o CST em onda quadrada foram propostas: topologia multinível em cascata e topologia com retificador controlado para seleção de *taps* de transformador.

De todas as topologias apresentadas a que se mostra mais vantajosa, em termos de simplicidade e custo, é a topologia com retificador controlado para seleção de *taps* de transformador. Um estudo comparativo de custos entre um CST senoidal, onda quadrada em cascata e onda quadrada com retificador controlado, mostrou que, tomando como base o CST senoidal, a topologia em onda quadrada multinível em cascata possui um custo de 95% enquanto a topologia com retificador controlado tem um custo de 77%. Importante destacar

que, apesar de aqui não realizado, há uma aumento na densidade de potência do conversor, se utilizado modulação em onda quadrada, constituindo mais um argumento favorável a escolha desta solução.

A favor do CST senoidal, por possuir uma modulação PWM, há a possibilidade de mitigar vários fenômenos de QEE relacionados a tensão. Entretanto, se o objetivo for mitigação de afundamentos de tensão em cargas eletrônicas, o CST em onda quadrada se mostrou o mais adequado. O foco em cargas eletrônicas se torna o principal, por serem estas cargas as mais sensíveis em ambientes industriais. Processos elétricos com alguma conversão mecânica e/ou térmica podem ser protegidos através da desensibilização de elementos de proteção a eles conectados [22]. Para cargas eletrônicas, é necessária a utilização de um dispositivo de mitigação de afundamentos, sendo o CST em onda quadrada um equipamento bastante competitivo em termos de custo e eficácia.

O próximo capítulo traz resultados experimentais do CST em onda quadrada protegendo cargas eletrônicas de afundamentos de tensão.

Capítulo 4

Simulações e Resultados Experimentais

No capítulo anterior, o Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada foi apresentado, com algumas propostas topológicas. Neste capítulo, algumas simulações são mostradas, relativas à utilização do CST em onda quadrada para mitigação de afundamentos de tensão em cargas elétricas representativas de ambientes industriais. Protótipos das topologias de CST em onda quadrada foram montados, sendo apresentados os resultados experimentais coletados. Montaram-se as topologias multinível em cascata, monofásico e trifásico, e também a topologia multinível com retificador controlado para seleção de taps do transformador shunt. Os resultados demonstram a eficácia do CST em onda quadrada na mitigação de afundamentos de tensão.

4.1 Cargas Protegidas pelo Compensador Série de Tensão em Onda Quadrada

A compensação em onda quadrada levanta algumas indagações acerca da eficiência da compensação para as cargas elétricas, visto que seus projetos consideram uma forma de onda senoidal sem harmônicos. Dois argumentos, a priori, justificam o uso da compensação em onda quadrada:

1. A alimentação para algumas cargas pode ser em tensão não-senoidal e ainda assim garantir seu correto funcionamento. Exemplo deste tipo de carga é a eletrônica com retificador e capacitor no seu circuito de entrada;
2. Por ser um fenômeno de curta duração, a compensação em onda quadrada não mitigaria por completo os efeitos em algumas cargas mas pelo menos os reduziria. Exemplo desta hipótese refere-se à cargas rotativas onde o efeito mais comum é a ação dos elementos de proteção, no momento do afundamento, devido à transitórios de corrente muito altos. A diminuição destes transitórios pode ser realizada através da compensação em onda quadrada.

No capítulo anterior, discutiu-se a mitigação do afundamento de tensão através da injeção de tensão em onda quadrada em cargas eletrônicas com estágio de entrada formado por ponte retificadora e filtro capacitivo. Na próxima seção serão mostradas simulações da mitigação de afundamentos em cargas eletrônicas monofásicas e trifásicas (representando o inversor de frequência). Também serão incluídas simulações em máquinas rotativas e contadores.

Ao final deste capítulo, resultados experimentais do CST em onda quadrada nas topologias multinível em cascata e multinível com retificador controlado são mostrados, comprovando a eficácia da compensação série de tensão em onda quadrada.

4.2 Simulações

4.2.1 Cargas Eletrônicas

Utilizando o software Matlab Simulink, implementou-se um CST em onda quadrada. A topologia implementada foi a multinível em cascata. Poderia-se ter utilizado qualquer uma dentre as topologias propostas no capítulo anterior, já que os resultados, do ponto de vista da carga protegida, são os mesmos. O compensador implementado utilizou os componentes descritos na tabela 4.1. A carga em teste a ser protegida é uma carga eletrônica, modelada por um circuito retificador, capacitor e resistor. A potência e tensão escolhidas (300VA e 127V) foram assim pensadas visando a representação de uma fonte típica de PLC ou computador. Na especificação dos componentes do compensador, o transformador escolhido tem uma indutância de dispersão de 2% e resistência de 3,5%. Para os capacitores do barramento c.c., o ripple de cada nível teve um valor mínimo para que a forma de onda fornecida à carga protegida conseguisse manter o pico de tensão recuperado no instante de carregamento do capacitor da fonte retificada. Este valor foi de 2%.

O CST multinível possuía duas células com níveis diferentes (1:0,2 e 1:0,6 pu). Três afundamentos foram simulados para exemplificar a inserção do nível 1, nível 2 e a soma dos dois. As figuras 4.1 a 4.6 trazem os resultados obtidos. Os afundamentos foram de 0,8, 0,7 e 0,6 pu com duração de 150 ms. O circuito de controle utilizado foi o mesmo proposto com elementos analógicos (figura 3.19).

Analisando os resultados obtidos na simulação, consegue-se recuperar a forma de onda dentro dos limites especificados em norma para alimentação de entrada: basta observar que a tensão c.c. na carga ficou entre as marcas 0,9 e 1,05 pu [38, 39]. Para o afundamento de 0,8 pu (figura 4.1) apenas o nível 0,2 pu injetou tensão enquanto que no afundamento 0,7 pu (figura 4.3) o nível utilizado foi 0,6 pu. Já no afundamento 0,6 pu (figura 4.5) a soma dos

Tabela 4.1: Componentes utilizados na simulação

Componente	Valor
Rede de tensão	Tensão: $127 V_{rms}$ Frequência: 60 Hz
Transformador Primário	Potência: 60 VA (0.2 pu da carga) Indutância de dispersão: 0,02 pu Resistência série: 0,035 pu Indutância de magnetização: 500 pu
Transformador secundário nível 1	Relação de transformação: 1:0.2 Indutância de dispersão: 0,02 pu Resistência série: 0,035 pu Indutância de magnetização: 500 pu
Capacitor barramento CC nível 1	2200 uF
Transformador terciário nível 2	Relação de transformação: 1:0.6 Indutância de dispersão: 0,02 pu Resistência série: 0,035 pu Indutância de magnetização: 500 pu
Capacitor barramento CC nível 1	1000 uF
Carga	Fonte retificada RC de 300 VA (sem transformador) $C = 2700 \text{ uF}$ $R = 105 \Omega$ Ripple = 3%

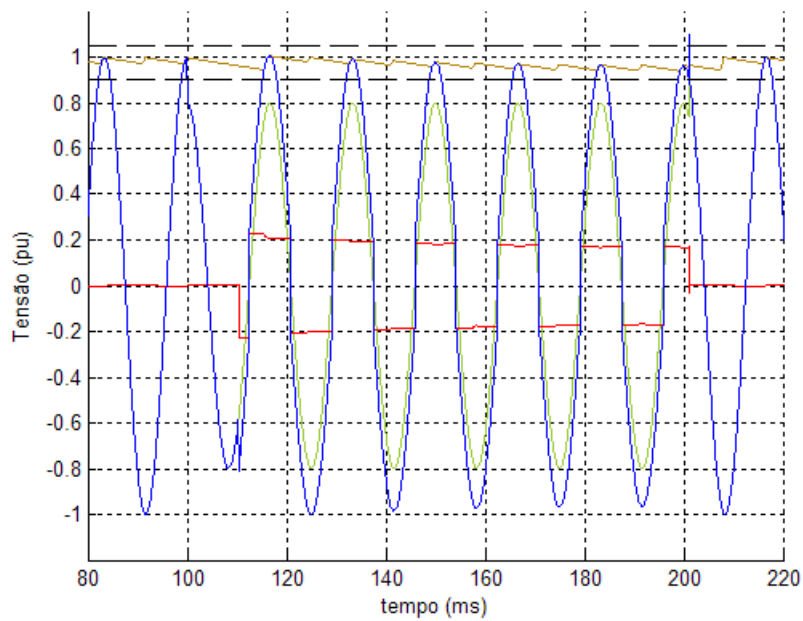


Figura 4.1: Tensões para Afundamento de 0,8 pu: Azul - onda na entrada da carga protegida; Vermelho - Onda injetada proveniente do restaurador; Verde - onda proveniente da rede de alimentação; Marrom - Tensão do barramento CC da carga protegida; Preto tracejado - referência 1,05 pu e 0,9 pu

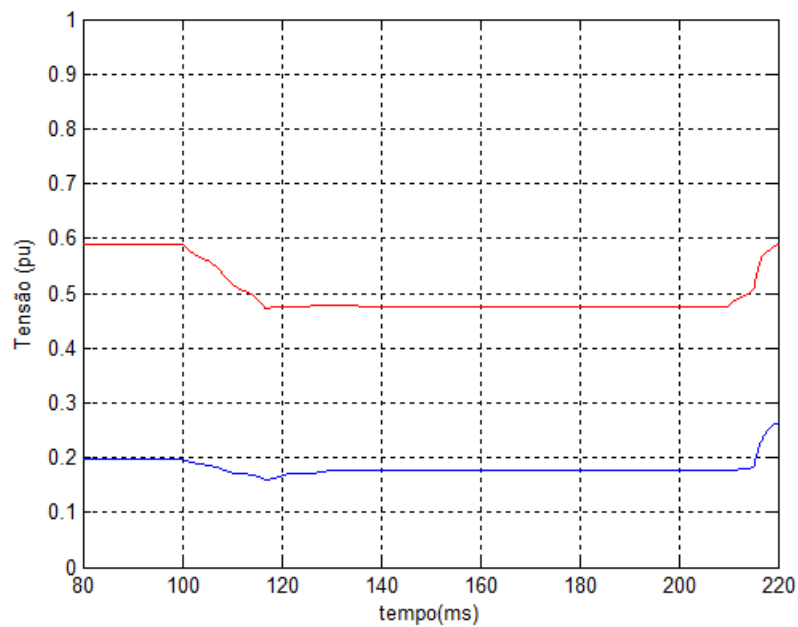


Figura 4.2: Tensões nos barramento CC de cada nível do restaurador para Afundamento de 0,8 pu: Nível 1 (0,2 pu - azul); Nível 2 (0,6 pu - vermelho)

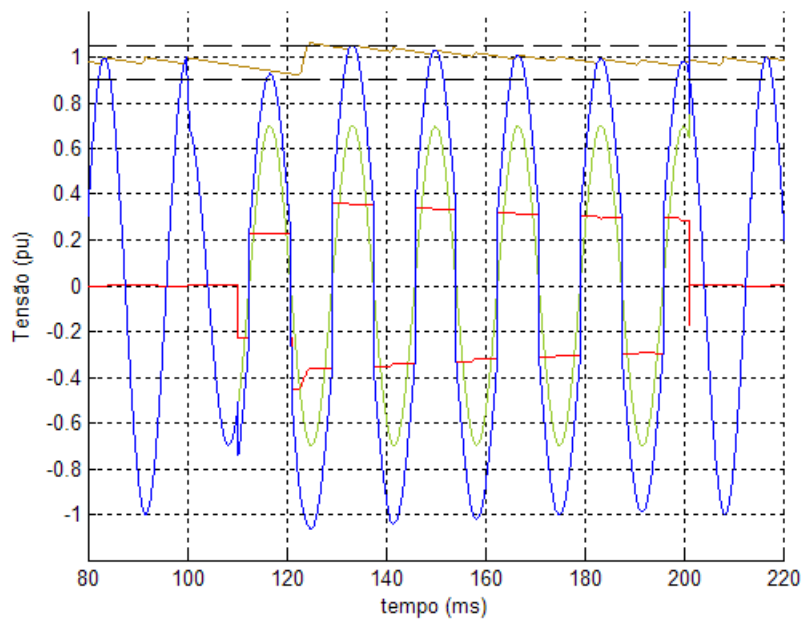


Figura 4.3: Tensões para Afundamento de 0,7 pu: Azul - onda na entrada da carga protegida; Vermelho - Onda injetada proveniente do restaurador; Verde - onda proveniente da rede de alimentação; Marrom - Tensão do barramento CC da carga protegida; Preto tracejado - referência 1,05 pu e 0,9 pu

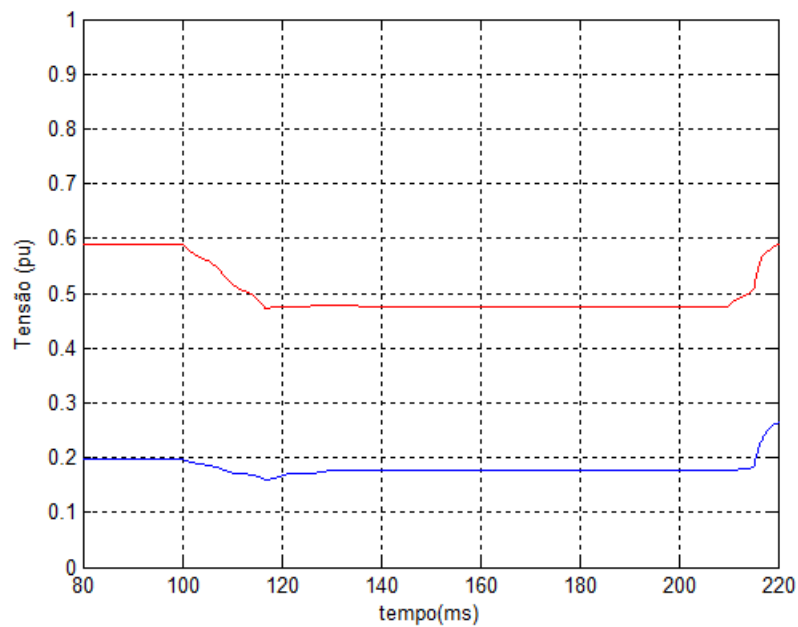


Figura 4.4: Tensões nos barramento CC de cada nível do restaurador para Afundamento de 0,7 pu: Nível 1 (0,2 pu - azul); Nível 2 (0,6 pu - vermelho)

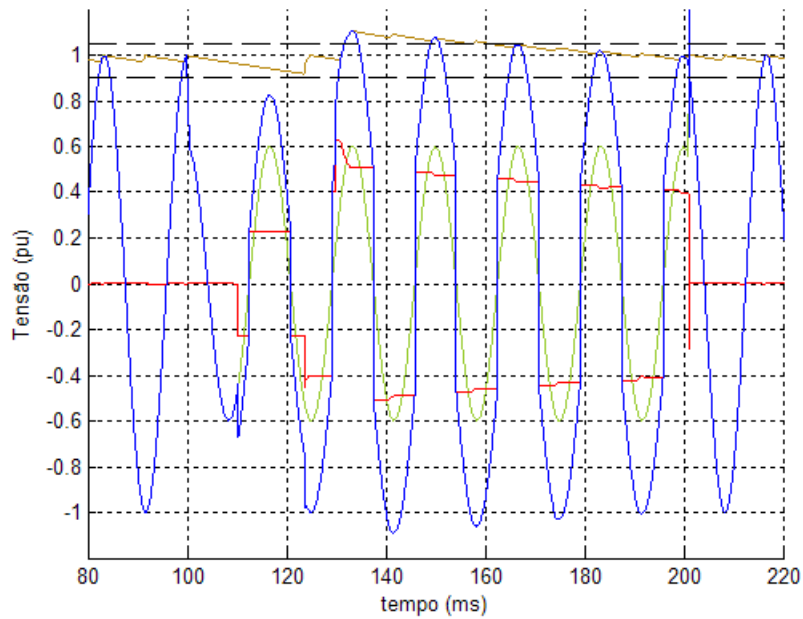


Figura 4.5: Tensões para Afundamento de 0,6 pu: Azul - onda na entrada da carga protegida; Vermelho - Onda injetada proveniente do restaurador; Verde - onda proveniente da rede de alimentação; Marrom - Tensão do barramento CC da carga protegida; Preto tracejado - referência 1,05 pu e 0,9 pu

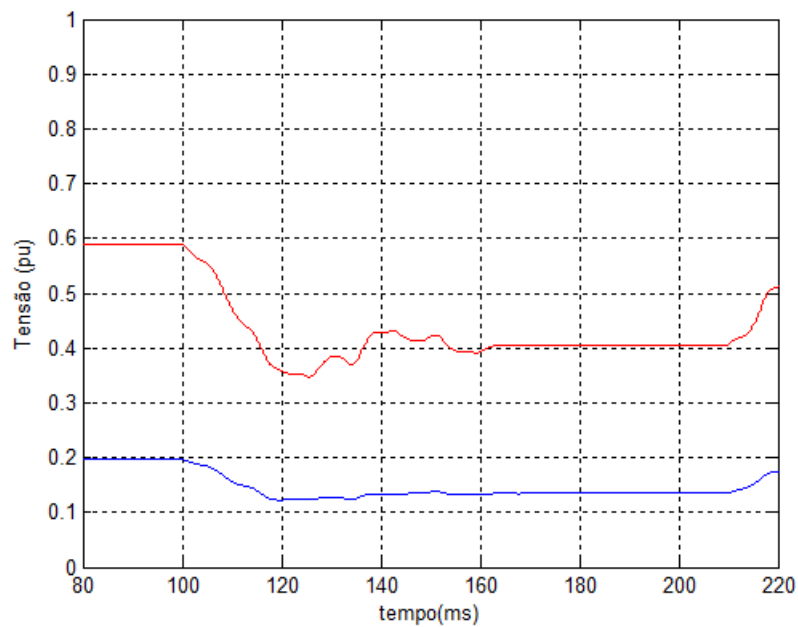


Figura 4.6: Tensões nos barramento CC de cada nível do restaurador para Afundamento de 0,6 pu: Nível 1 (0,2 pu - azul); Nível 2 (0,6 pu - vermelho)

dois níveis (0,8 pu) foi necessária para a restauração da tensão. As figuras onde é mostrada a tensão nos capacitores de cada nível injetado indicam a seletividade entre uma célula ou outra e ainda as duas (figuras 4.2, 4.4 e 4.6). Apenas na recuperação no afundamento 0,6 pu houve uma pequena sobretensão que ainda assim não seria prejudicial ao equipamento protegido. Nota-se uma pequena oscilação na onda quadrada injetada. Esta oscilação é explicada pela descarga nos capacitores do barramento c.c., o que foi detalha nas figuras 4.2, 4.4 e 4.6.

Para a proteção de uma carga eletrônica trifásica, necessário três compensadores em onda quadrada, um por fase. A topologia do CST simulado foi apresentada na figura 3.15. Neste contexto, o exemplo de carga trifásica eletrônica é o inversor de frequência.

Os fabricantes de inversores de frequência incorporam em seus produtos uma característica chamada *ride-through*, ilustrada na figura 4.7. A finalidade da função *ride-through* é fazer com que o inversor mantenha o motor girando durante o distúrbio da rede, sem interrupção. A energia necessária para a manutenção do conjunto rotativo em funcionamento é obtida da energia cinética do motor através da desaceleração do mesmo. No retorno da rede, o motor é reacelerado para a velocidade definida pela referência anteriormente programada [7]. Conforme indicação da própria figura, esta técnica funciona apenas se tensão no capacitor do barramento c.c. estiver acima de 0,75 pu. Se assim não ocorrer, o inversor irá se desligar.

O objetivo do CST trifásico é fazer com que o motor não sofra nenhum distúrbio proveniente do afundamento de tensão. Para isto, basta que a tensão do barramento c.c. do inversor de frequência esteja sempre dentre os limites 0,9 e 1,05 pu. Mantendo o barramento c.c. nos limites especificados, o inversor continua funcionando normalmente e não será necessário a desaceleração do motor acionado, conforme indicado na figura 4.7. Simulou-se, portanto, o CST em onda quadrada trifásico protegendo um retificador trifásico e circuito RC. A carga

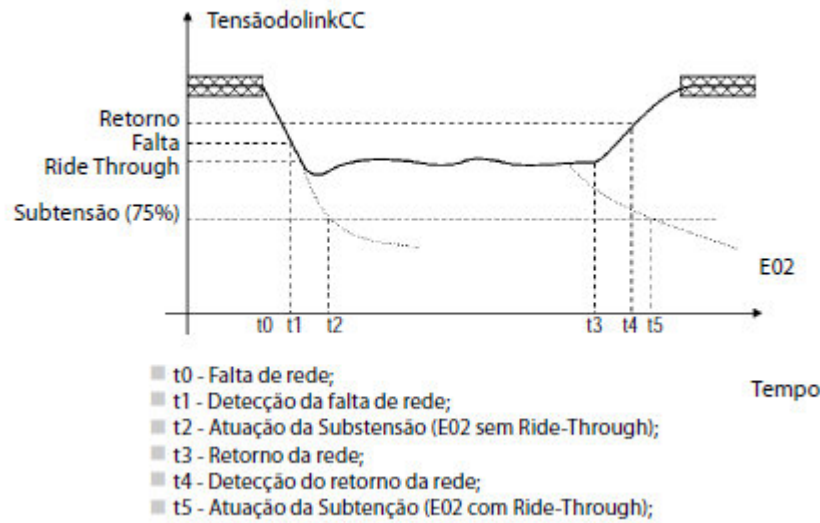


Figura 4.7: Ride-Through de Inversores de Frequencia [7]

continuou sendo de 300VA. Os resultados desta simulação podem ser vistos nas figuras 4.8 a 4.16 com a seguinte legenda: azul - tensão no barramento c.c. da carga trifásica; pontilhados pretos: níveis 0,9 e 1,05 pu; marrom tracejado - tensão Vab proveniente da fonte; marrom contínuo - tensão Vab compensada; vermelho tracejado - tensão Vbc proveniente da fonte; vermelho contínuo - tensão Vbc compensada; verde tracejado - tensão Vca proveniente da fonte; verde contínuo - tensão Vca compensada.

As figuras 4.8 a 4.16 mostram a recuperação do barramento c.c. da carga trifásica eletrônica para três distintos afundamentos: trifásico, monofásico e bifásico com salto da fase. Para cada um destes foram testados três afundamentos: 0,8, 0,7 e 0,6 pu da mesma forma realizada para o compensador monofásico. Utilizando a mesma estrutura do compensador monofásico, dentre as compensações simuladas, a única ressalva fica para o afundamento bifásico C: há uma pequena sobretensão em 0,7 e 0,6 pu devido ao segundo nível do compensador (0,6 pu). Esta sobretensão ocorre devido à energia armazenada no capacitor, cessando após a descarga da energia acumulada.

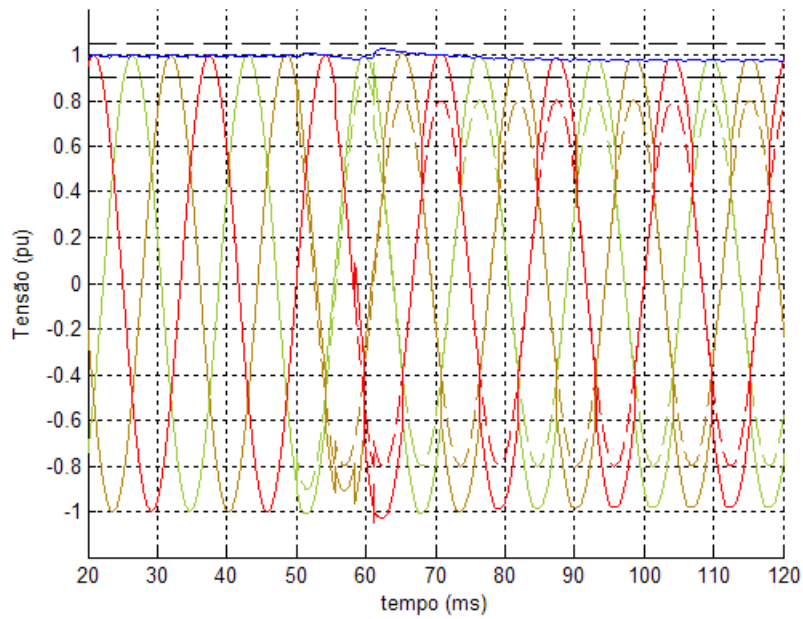


Figura 4.8: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento trifásico A - 0,8 pu

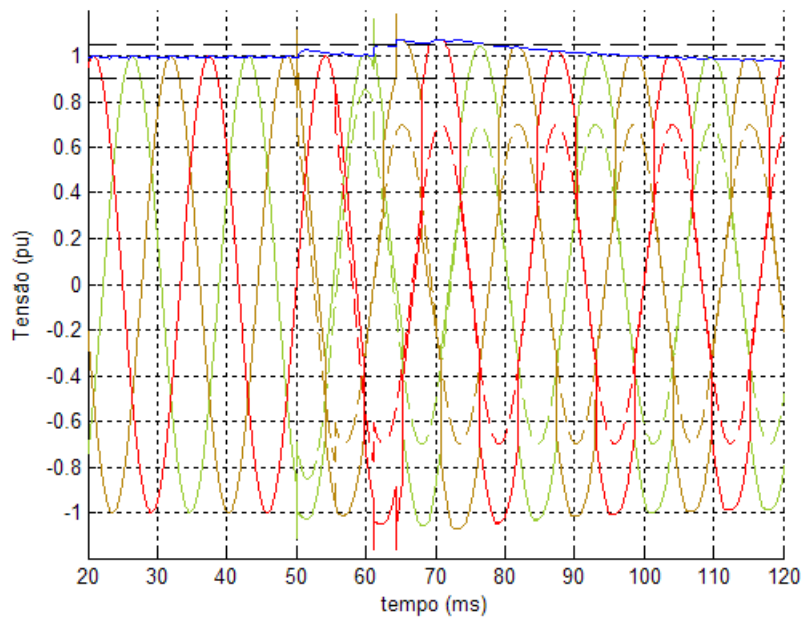


Figura 4.9: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento trifásico A - 0,7 pu

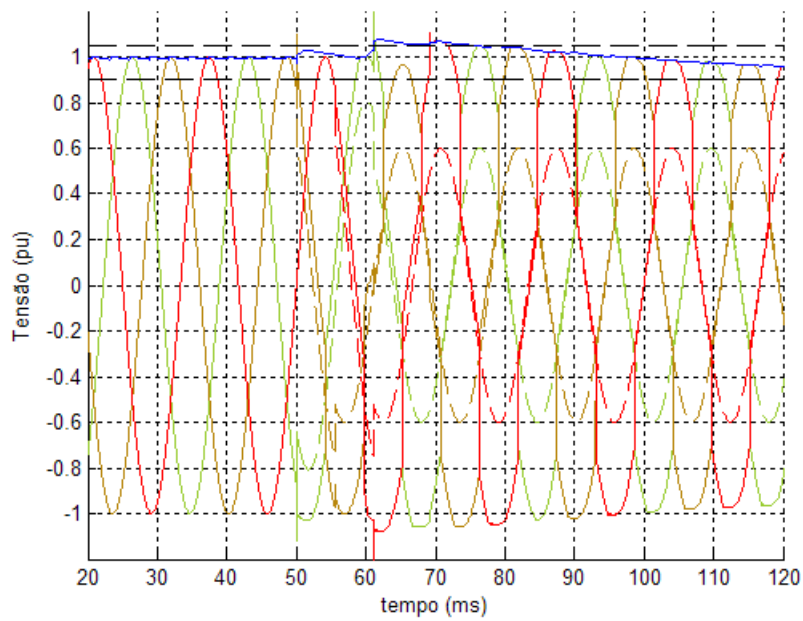


Figura 4.10: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento trifásico A - 0,6 pu

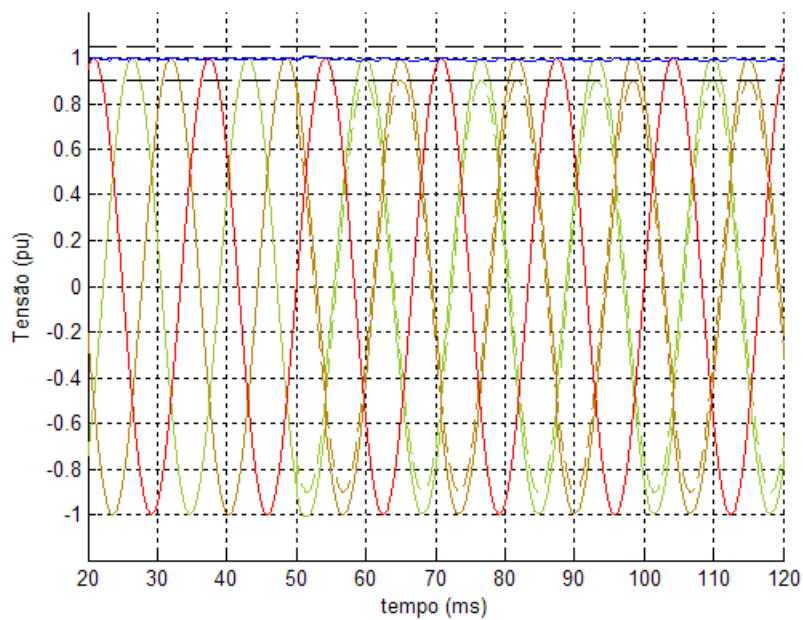


Figura 4.11: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento monofásico B - 0,8 pu

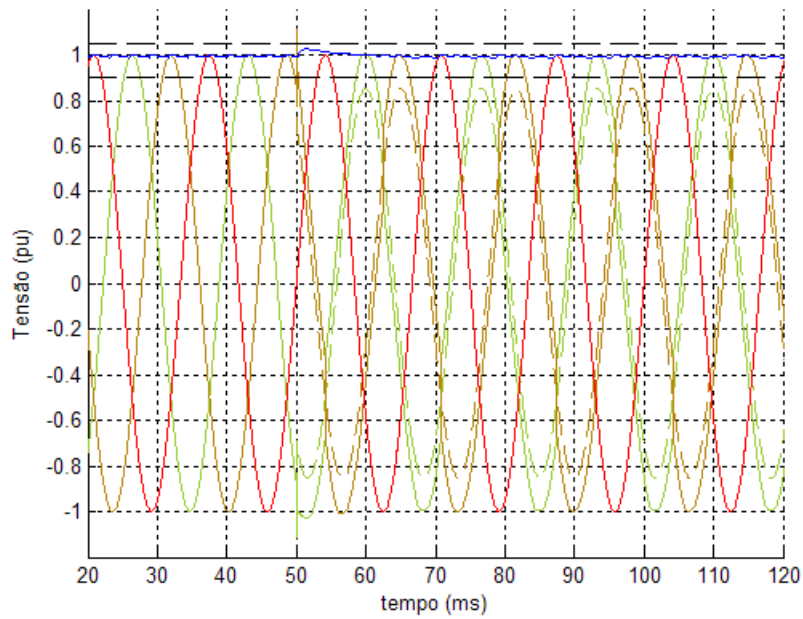


Figura 4.12: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento monofásico B - 0,7 pu

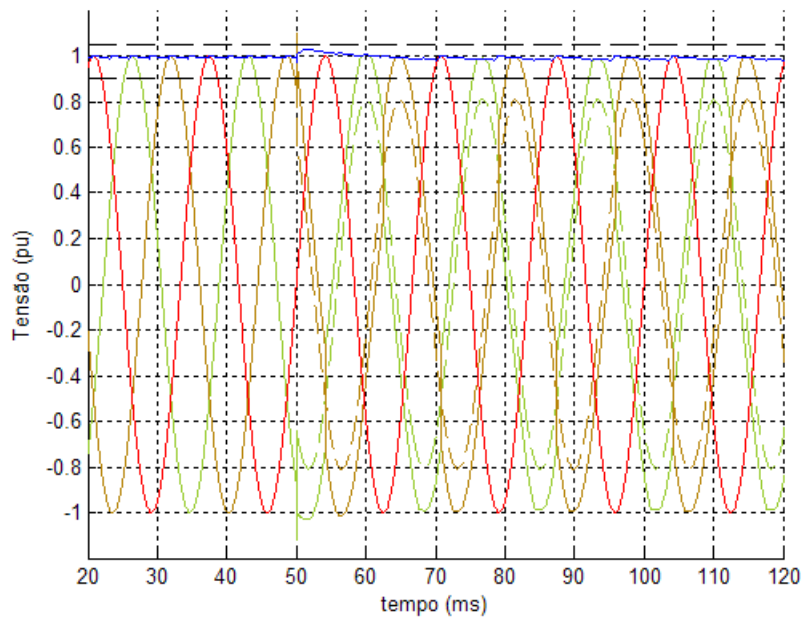


Figura 4.13: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento monofásico B - 0,6 pu

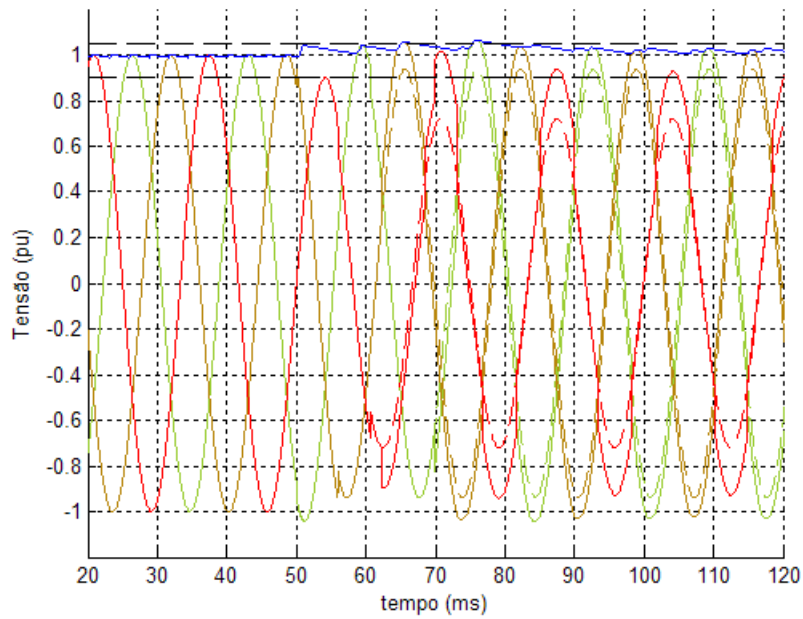


Figura 4.14: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento bifásico C - 0,8 pu

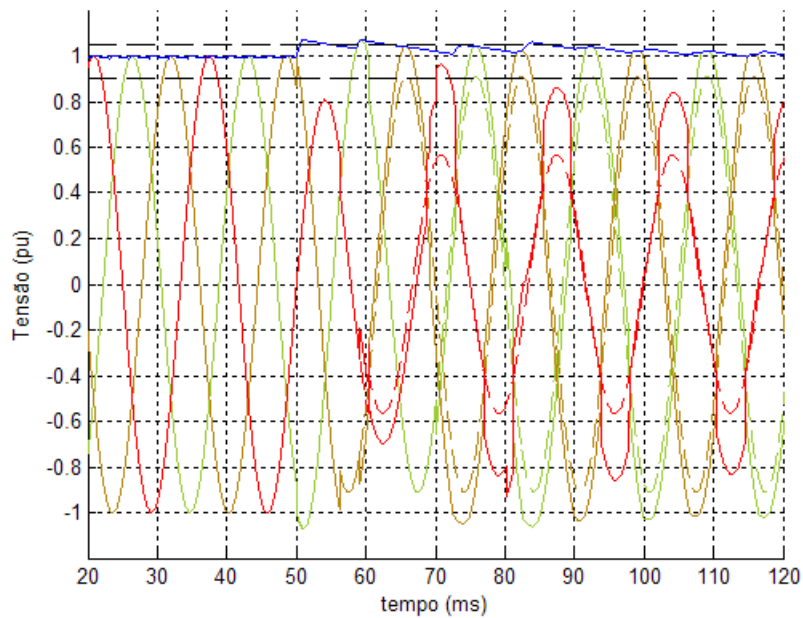


Figura 4.15: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento bifásico C - 0,7 pu

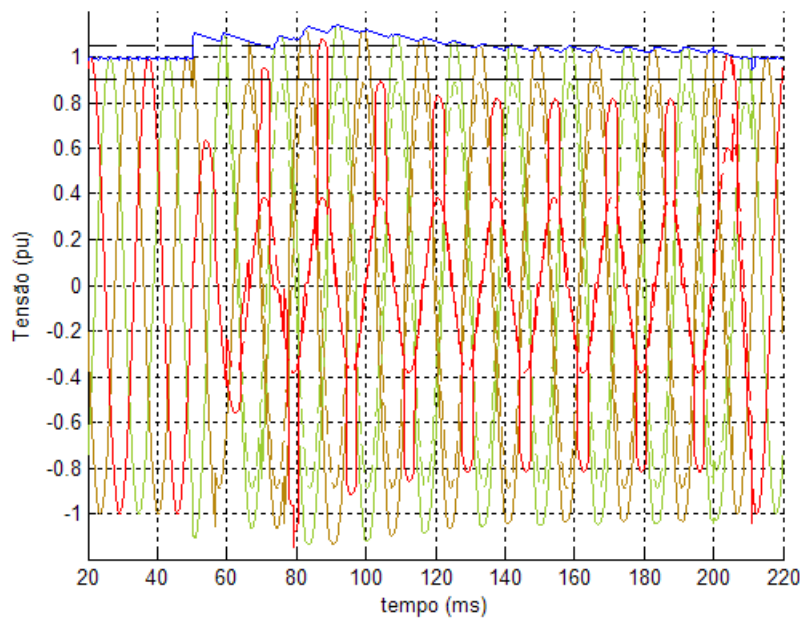


Figura 4.16: Compensador série em onda quadrada Trifásico - Afundamento bifásico C - 0,6 pu

4.2.2 Contatores

Para simulação dos contatores, o modelo dinâmico descrito em [18, 49, 50] foi utilizado. Com este modelo, aplicou-se um afundamento de tensão ao contator protegido e não protegido pelo CST em onda quadrada. Os dados utilizados para simulação encontram-se na tabela 4.2 e foram retirados de [51]. A figura 4.17 mostra o afundamento de tensão, a corrente e força eletromagnética do contator. O afundamento de tensão aplicado foi de 0,6 pu. Tanto a corrente quanto a força eletromagnética decresceram no intervalo na qual o contator foi submetido ao afundamento. O objetivo do CST em onda quadrada será manter a corrente e força eletromagnética, no mínimo, com os mesmos valores em condições nominais, ou seja, sem distúrbios de tensão. Alcançado tal objetivo, este fato significa a imobilidade da parte mecânica durante o afundamento. A figura 4.18 apresenta as mesmas curvas da figura 4.17. Nesta simulação, a tensão teve seu valor de pico recuperado. Há um aumento na corrente e força magnética pois a tensão recuperada tem um valor eficaz acima do nominal. Aumento

Tabela 4.2: Dados do contator usado nas simulações

x_o	3mm
K	5000 N/m
μ_r	2000
M	70 g
D	4 N.s/m
l_c	8 cm
A	121 mm ³

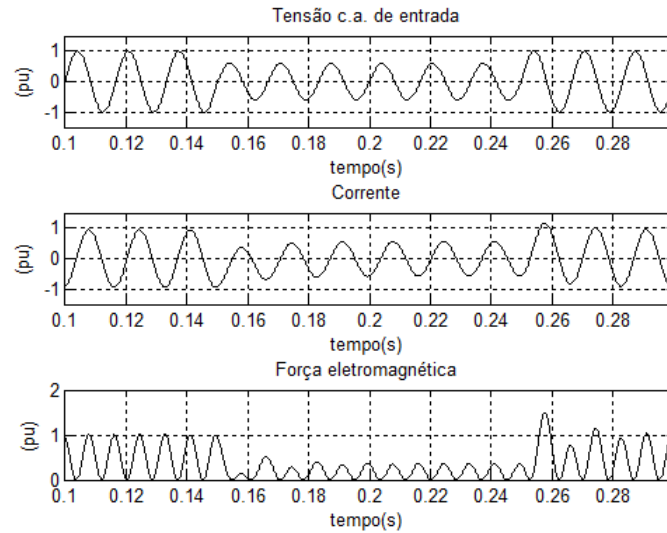


Figura 4.17: Contator submetido a um afundamento de tensão de 0,6 pu. Sem CST em Onda Quadrada

na força magnética significa uma pressão maior entre a parte móvel do contator e a parede do mesmo. Os contatos continuaram selados, mantendo a continuidade do processo acionado pelo contator.

Uma segunda simulação do CST em onda quadrada foi executada. Neste segundo momento, buscou-se a recuperação do valor eficaz *rms* da tensão, ou seja, o resultado da soma das tensões senoidal e quadrada deveria ter o mesmo valor *rms* da tensão senoidal com valores nominais. O resultado pode ser visto na figura 4.19. Neste momento, tanto a corrente quanto a força eletromagnética permanecem em torno de seus valores nominais, mostrando que esta estratégia de recuperação (valor rms da tensão) deve ser utilizada no caso de contadores.

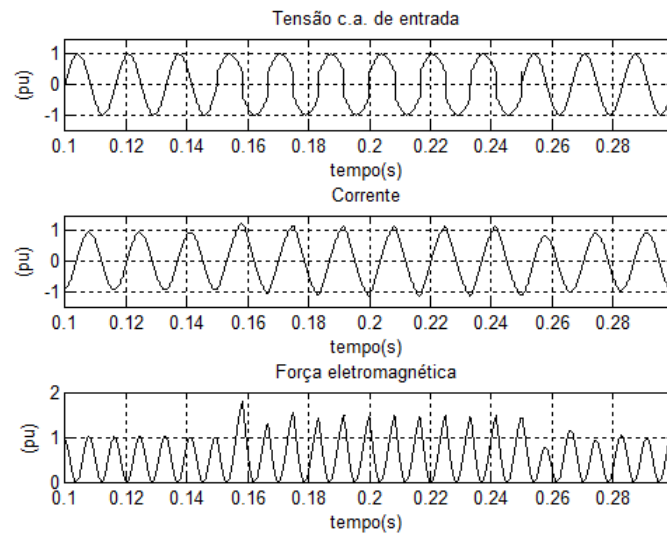


Figura 4.18: Contator submetido a um afundamento de tensão de 0,6 pu. Com CST em Onda Quadrada: recuperação do pico da tensão

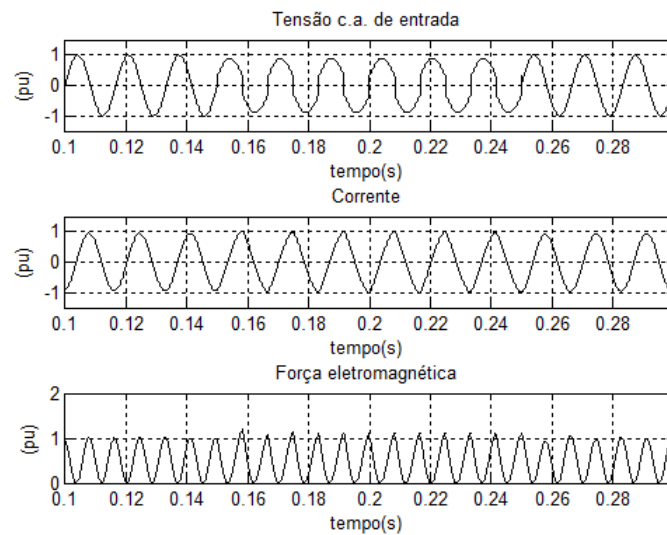


Figura 4.19: Contator submetido a um afundamento de tensão de 0,6 pu. Com CST em Onda Quadrada: recuperação do valor rms da tensão

4.2.3 Máquinas Rotativas

Apesar de não serem as cargas mais críticas e susceptíveis a um afundamento de tensão, no momento de ocorrência do distúrbio de tensão, podem ocorrer transitórios de corrente que sensibilizem os dispositivos de proteção. Ainda que todos ajustes de desensibilização tenham sido realizados, é possível haver afundamentos que ainda provoquem o acionamento de relés de sobrecorrente e/ou subtensão. Esta seção mostra ser possível diminuir os transitórios de corrente com o CST em onda quadrada. Para tal, algumas máquinas rotativas foram simuladas, na presença ou não do CST. Os seguintes acionamentos foram simulados:

- Motores de indução trifásicos alimentados em frequência fixa
- Motores de corrente contínua acionados por retificadores controlados

Motores de Indução Trifásicos Alimentados em Frequência Fixa

Motores de indução alimentados em frequência fixa quando submetidos a um afundamento de tensão apresentam uma oscilação no torque e uma pequena diminuição na velocidade. Porém, estes efeitos para a carga acionada não são tão relevantes visto que, por ser uma carga mecânica acionada por um motor sem qualquer tipo de controle, esta admite algumas oscilações ao longo do tempo. Exemplo destas cargas são bombas hidráulicas: não há nenhum prejuízo ao fluido bombeado caso ocorra uma pequena oscilação na velocidade de seu transporte.

Entretanto, os prejuízos decorrentes do afundamento de tensão advém das características elétricas dos motores de indução: há um aumento na corrente, seja pelo desequilíbrio entre as fases durante o afundamento ou no reestabelecimento da tensão nominal devido à recuperação de intensidade do campo magnético no entreferro. Estes fenômenos são sintetizados a seguir [52, 53, 22]:

- Afundamentos profundos levam a oscilações de torque no início do afundamento e no retorno da tensão pré-afundamento. Estas oscilações podem ocasionar danos ao motor e paradas no processo devido à atuação de dispositivos de proteção de sobrecorrente [52, 53].
- Quando a tensão retorna aos valores pré-distúrbio, o campo magnético do entreferro deve ser "recriado" aos valores nominais de operação. Em alguns sistemas de acionamento, este evento pode durar 100 ms, ao mesmo tempo em que o motor continua desacelerando. Esta desaceleração pode se tornar um problema em acionamentos onde a carga mecânica aumentou ao longo dos anos. Enquanto no passado estes mesmos afundamentos não eram considerados problemas, o processo acionado pode agora não suportar a queda na velocidade devido à dinâmica lenta de recuperação do campo magnético do entreferro.
- No instante de recuperação de tensão do afundamento, é requerida uma grande corrente ao motor. Esta corrente tem por objetivo recuperar o campo magnético no entreferro e depois reacelerar o motor. Este transitório pode causar um segundo afundamento com uma duração de 1 segundo ou mais, podendo sensibilizar os relés de subtensão ou sobrecorrente.

De posse dos fenômenos anteriormente descritos, a proteção do motor de indução para afundamentos de tensão visa evitar um grande transitório de corrente para que seus dispositivos de proteção não sejam sensibilizados.

O motor de indução trifásico é projetado para receber uma alimentação por tensões senoidais equilibradas. A compensação de tensão por onda quadrada possui uma distorção, o que implica em uma oscilação no torque do motor. Entretanto, como este fenômeno não é crítico para as cargas mecânicas acionadas, o objetivo da compensação será a diminuição do

transitório de corrente durante o afundamento.

Para se estudar esta compensação, foi utilizado o motor de indução descrito na referência [54]. Escolheram-se três afundamentos característicos: monofásico (tipo B), bifásico sem salto de fase (tipo E) e bifásico com salto de fase (tipo C) [22]. Escolheram-se afundamentos desequilibrados por serem mais comuns e também mais críticos para o motor de indução. Os resultados a serem apresentadas são referentes às correntes eficazes e torque do MIT sem e com compensação por onda quadrada em cada tipo de afundamento. Todos os afundamentos foram de 0,7 pu e 500 ms. Os parâmetros do MIT simulado são:

- MIT, 230V, 5HP, 1750 rpm
- $r_s = 0.531\Omega$
- $r_r = 0.408\Omega$
- $L_{ls} = L_{lr} = 2,52mH$
- $L_m = 84,7mH$
- $J = 0.1kg.m^2$

As figuras 4.20 a 4.25 mostram os efeitos na corrente e no torque da máquina de indução para os afundamentos B, C e E, sem e com a compensação de tensão em onda quadrada. A filosofia de mitigação foi a mesma para as cargas eletrônicas: recuperação do pico de tensão em fase com a tensão faltante. Esta estratégia não apresentou grande melhora para os afundamentos bifásicos. Há duas explicações para tal fato: as ondas fundamentais das tensões estão desequilibradas e no caso da falta com salto de fase, esta defasagem não foi eliminada. A figura 4.26 mostra o espectro de frequência para as fases de tensão compensadas em onda quadrada para os dois tipos de afundamento bifásico. Considerando o valor da onda

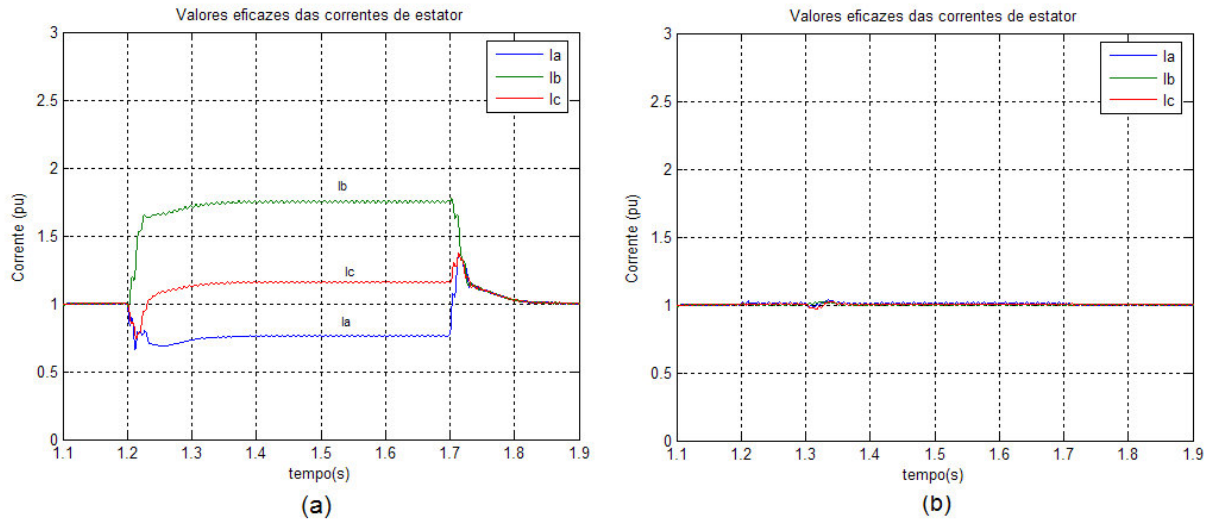


Figura 4.20: Correntes do MIT frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação.

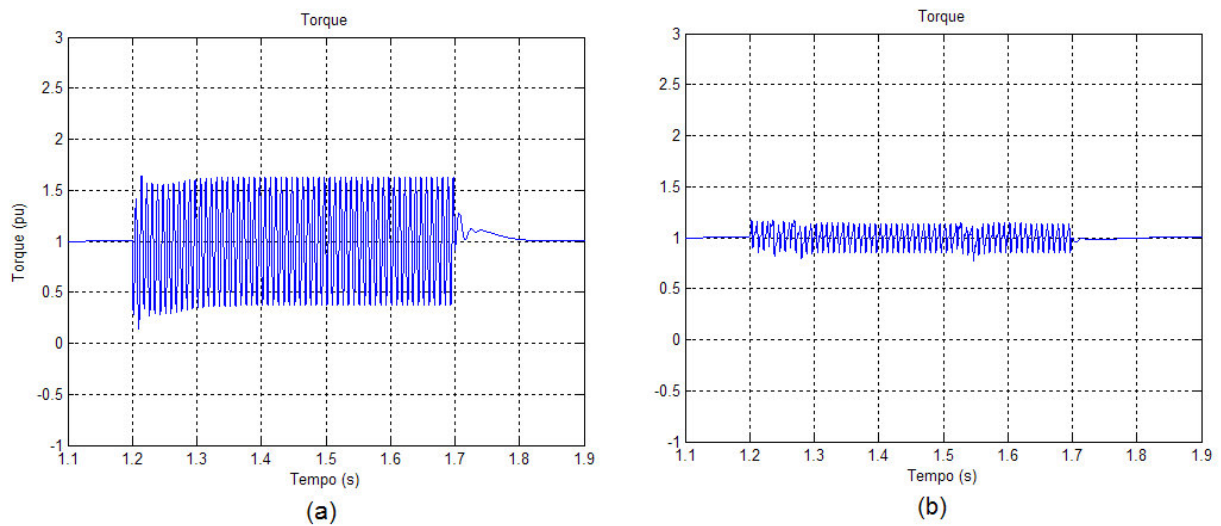


Figura 4.21: Torque do MIT frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação.

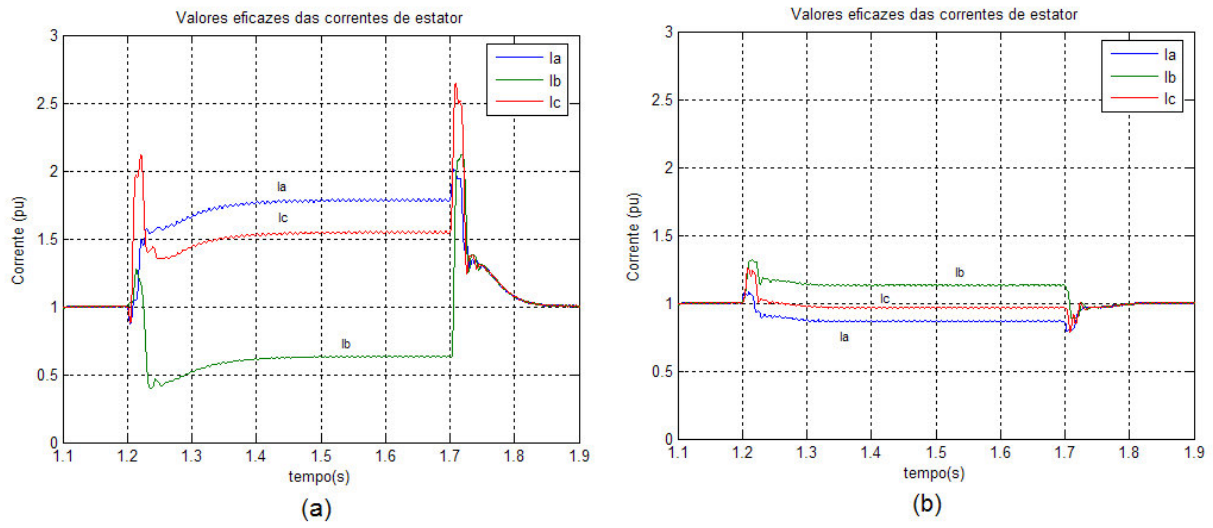


Figura 4.22: Correntes do MIT frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação.

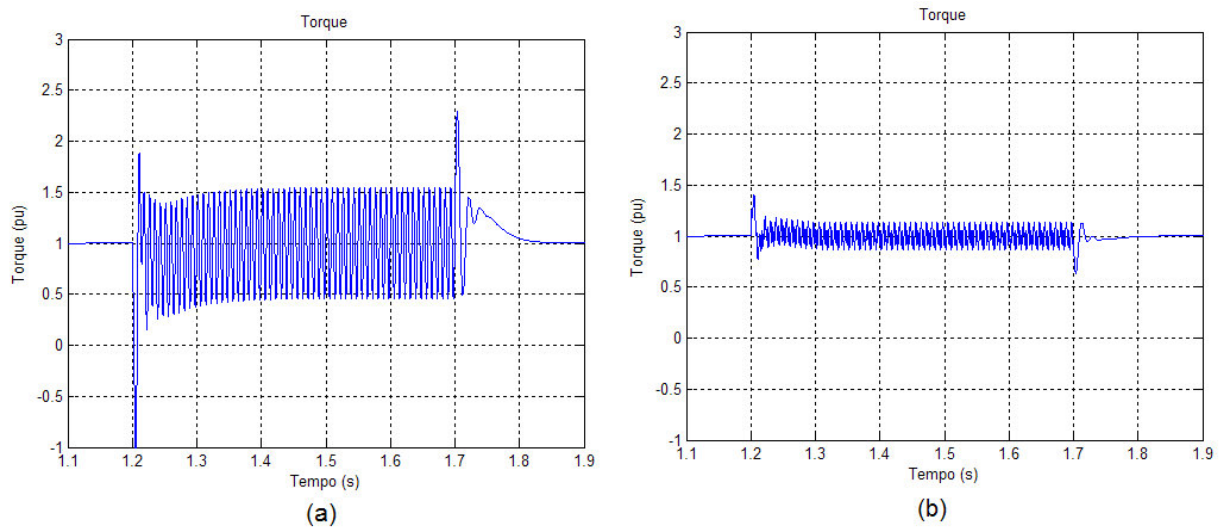


Figura 4.23: Torque do MIT frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação.

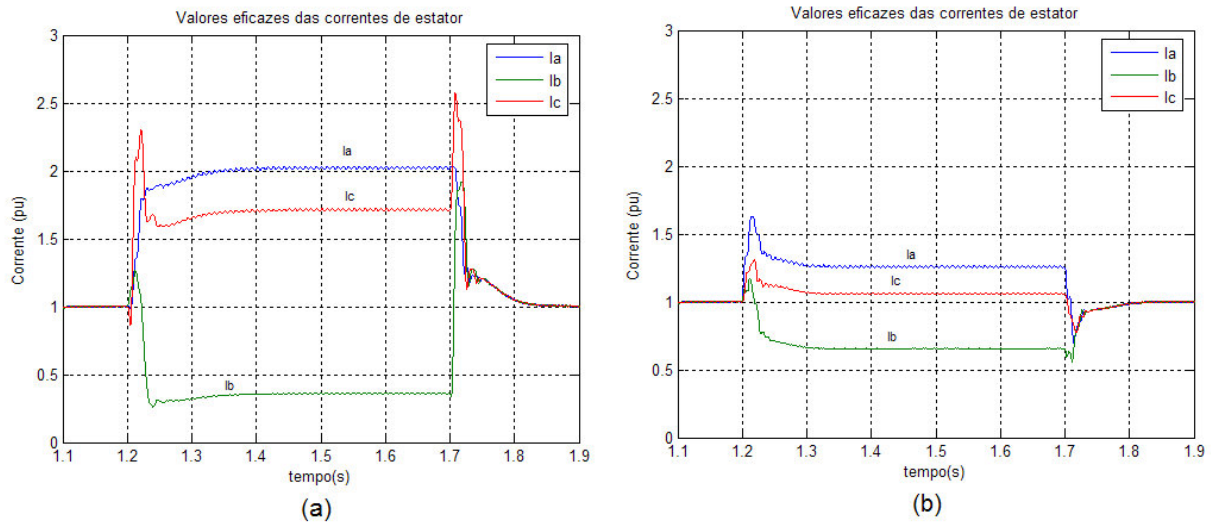


Figura 4.24: Correntes do MIT frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação.

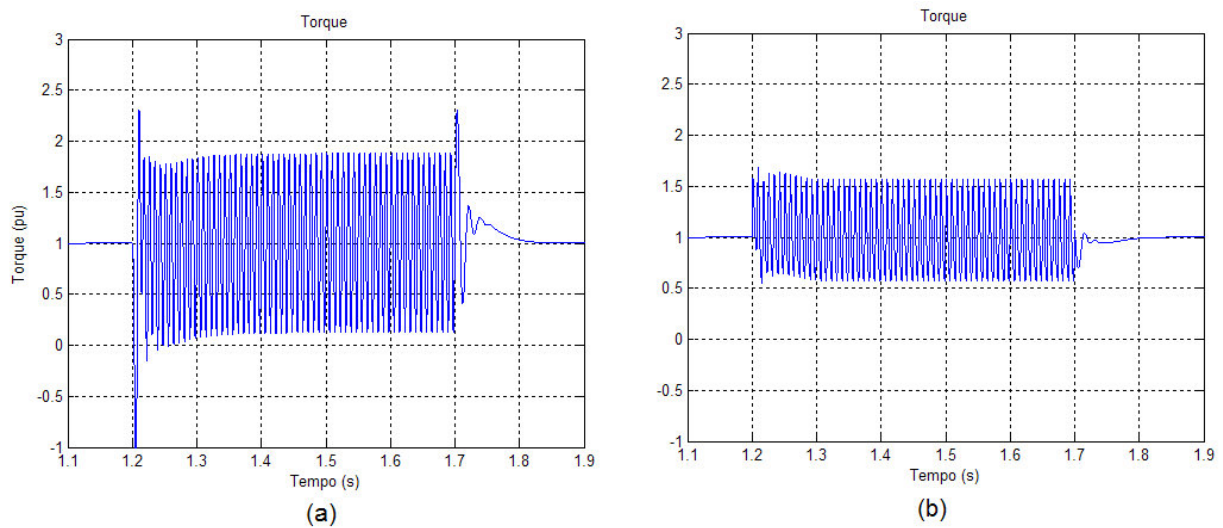


Figura 4.25: Torque do MIT frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação.

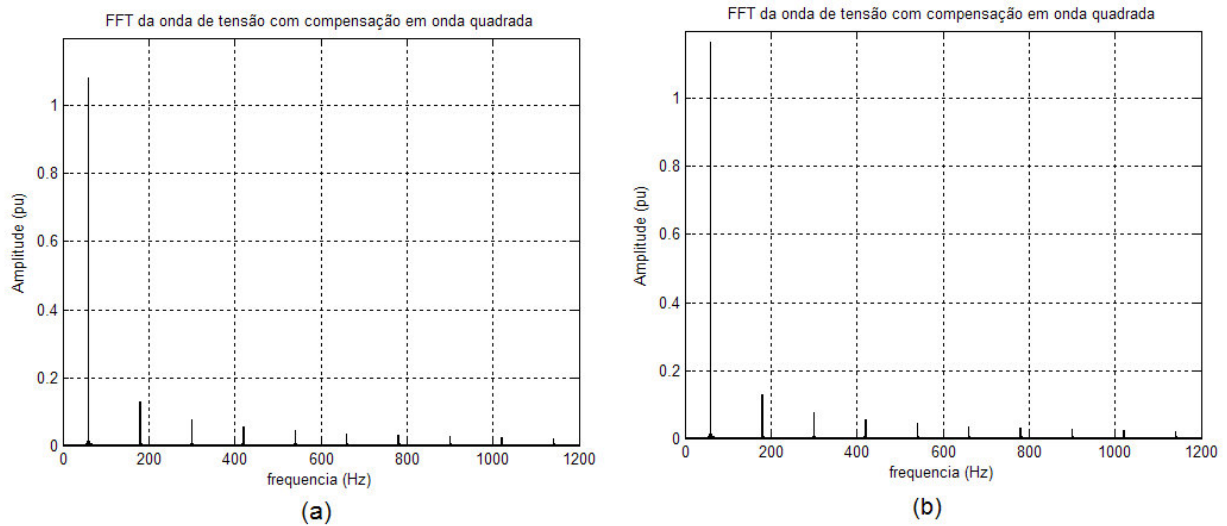


Figura 4.26: FFT das fases compensadas em onda quadrada: (a) bifásico sem salto de fase (tipo E) e (b) bifásico com salto de fase (tipo C)

fundamental, seu valor está acima de 1 pu, comprovando o desequilíbrio em relação a fase que não sofreu afundamento.

Com a análise do espectro de frequência, uma outra alternativa para o controle da compensação em onda quadrada foi utilizada: através da modulação em largura de pulso, a onda quadrada a ser somada teria a sua componente fundamental exatamente o módulo e fase necessário para recuperação da componente fundamental da onda de tensão pré-afundamento. Novas simulações foram conduzidas e os resultados se encontram nas figuras 4.27 e 4.28. As figuras apresentam o equilíbrio alcançado com esta estratégia de compensação para as correntes e ainda conseguiu-se diminuir significativamente a oscilação no torque. Assim, a compensação em onda quadrada pode ser utilizada para a compensação do MIT desde que combinada com uma modulação em largura de pulso e eliminação do salto de fase.

Motores de Corrente Contínua Alimentados por Retificadores Controlados

Uma carga elétrica ainda muito utilizada no meio industrial, embora em menor número que os motores de indução trifásicos, é o motor de corrente contínua. Sua utilização no passado

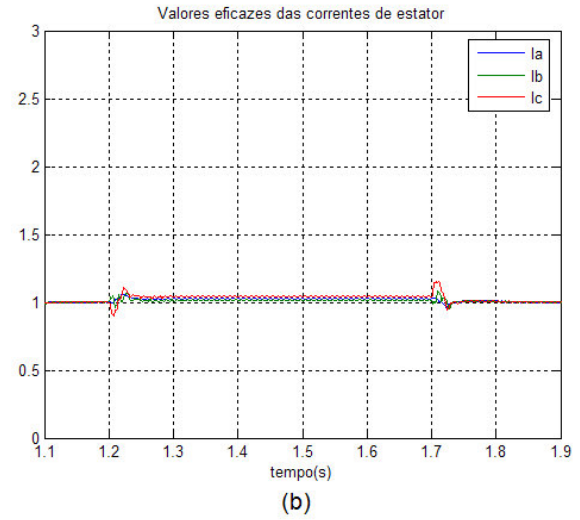
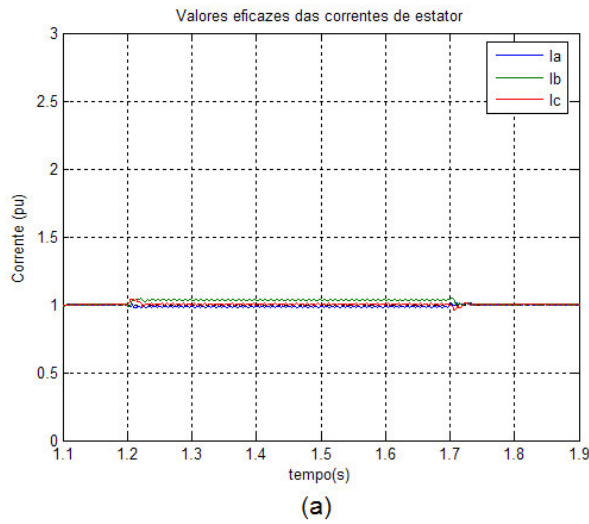


Figura 4.27: Correntes eficazes do MIT com compensadas em onda quadrada recuperando a componente fundamental da onda de tensão: (a) bifásico sem salto de fase (tipo E) e (b) bifásico com salto de fase (tipo C)

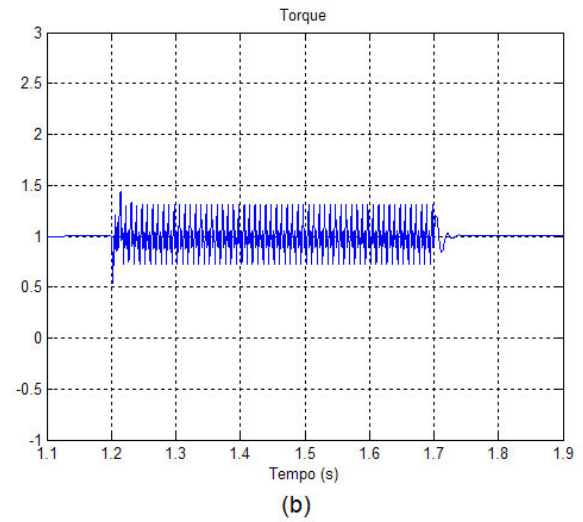
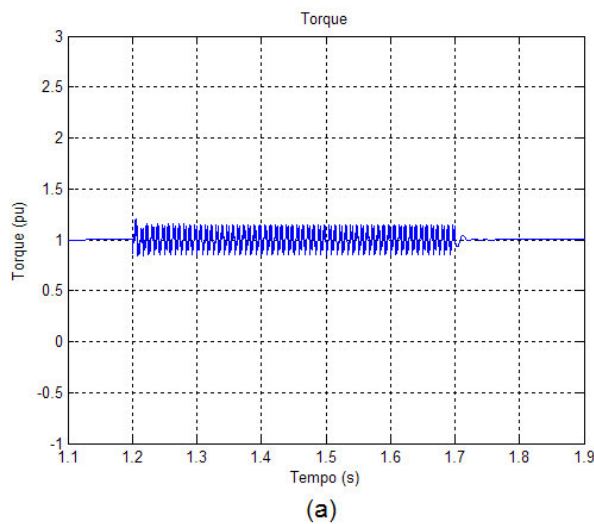


Figura 4.28: Torque do MIT com compensadas em onda quadrada recuperando a fundamental da onda de tensão: (a) bifásico sem salto de fase (tipo E) e (b) bifásico com salto de fase (tipo C)

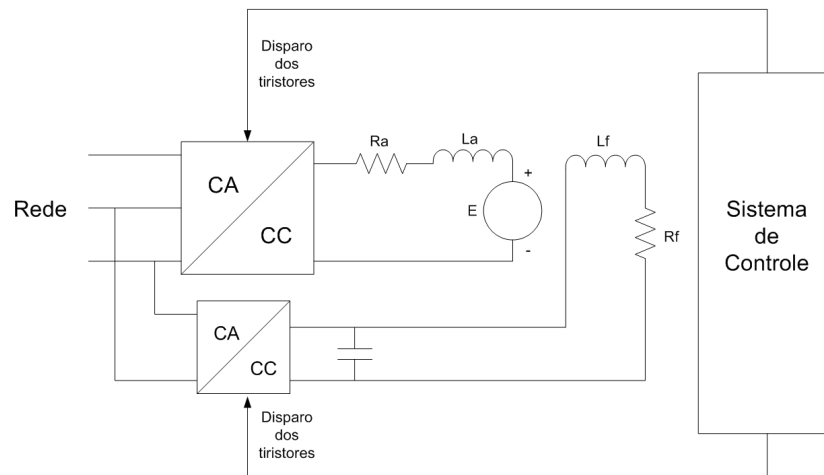


Figura 4.29: Motor de Corrente Contínua alimentado por retificador controlado

era muito difundida pela facilidade de controle do torque e rotação. Este controle é realizado através de uma ponte retificadora trifásica formada por tiristores no circuito de armadura ficando o circuito de campo alimentado por uma ponte de diodos monofásica, conforme figura 4.29.

Antes de quaisquer estudos por simulação, um problema surge quando se propõe a mitigação do afundamento de tensão pela injeção de tensão em onda quadrada. Pode-se encontrar no controle destas máquinas, um PLL sincronizado com a passagem pelo zero da tensão de entrada [22]. Quando há um afundamento com salto de fase, se ocorrer na fase utilizada como referência, o controle não irá disparar os tiristores adequadamente fazendo com a tensão média para o MCC seja diferente do pretendido. Assim, a solução para este problema seria recuperar a forma de onda senoidal através de um compensador série com inversor PWM e filtro de saída senoidal, ou ainda implementar um PLL com rejeição à distúrbios [44, 55].

Ainda com o problema no disparo dos tiristores, resolveu-se investigar a dinâmica do MCC com a compensação em onda quadrada durante o afundamento de tensão. O motor de corrente contínua utilizado foi de 5 HP, 240V, 1750 rpm com os seguintes parâmetros

elétricos e mecânicos:

- $R_f = 240\Omega$
- $L_f = 120H$
- $R_a = 0.6\Omega$
- $L_a = 12mH$
- $J = 0,05kg.m^2$
- $B = 0N.m.s$

As figuras 4.30 a 4.39 trazem os resultados encontrados para a dinâmica do MCC no afundamento monofásico (tipo B), bifásico sem salto de fase (tipo C) e bifásico com salto de fase (tipo C), todos em 0,7 pu, duração de 500 ms e início em 7s. O circuito de campo foi alimentado pela fase A sendo então que apenas no afundamento monofásico houve mudança na tensão deste circuito. Por tal motivo a corrente de campo somente apareceu para o afundamento tipo B.

Analisando as figuras, há uma diminuição no transitório das correntes de armadura, torque e rotação quando utilizado o compensador em onda quadrada. Entretanto, comparado com os resultados apresentados para o MIT, a diminuição nos transitórios não foram tão significativas. Os transitórios mencionados, principalmente o de corrente, poderiam sensibilizar os dispositivos de proteção. Não se pode afirmar que, para o MCC com a tensão compensada, os dispositivos de proteção não seriam acionados. Portanto, a compensação em onda quadrada para o MCC não se mostra uma alternativa tão eficaz quanto o foi para o MIT. Numa primeira análise, sem dados experimentais, afirma-se que o motor de corrente contínua alimentado por retificador controlado necessita de compensação por onda senoidal.

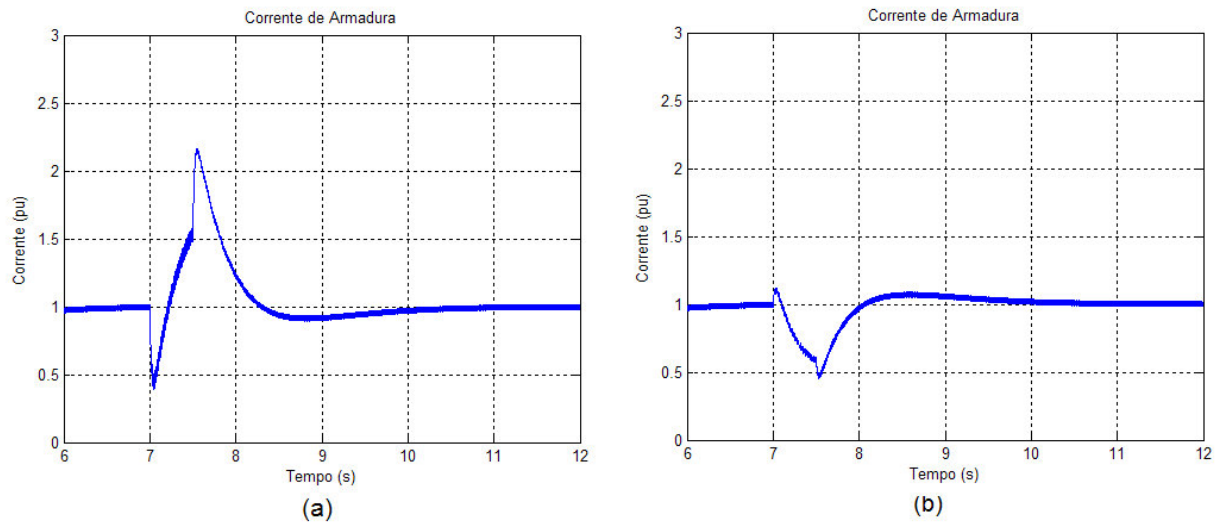


Figura 4.30: Corrente de armadura do MCC frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação

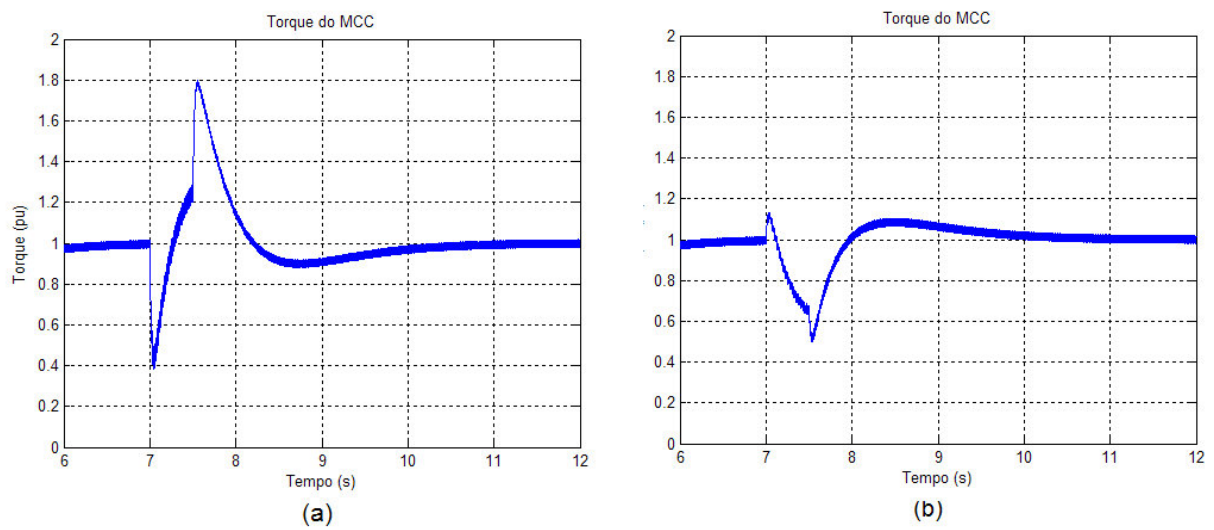


Figura 4.31: Torque do MCC frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação.

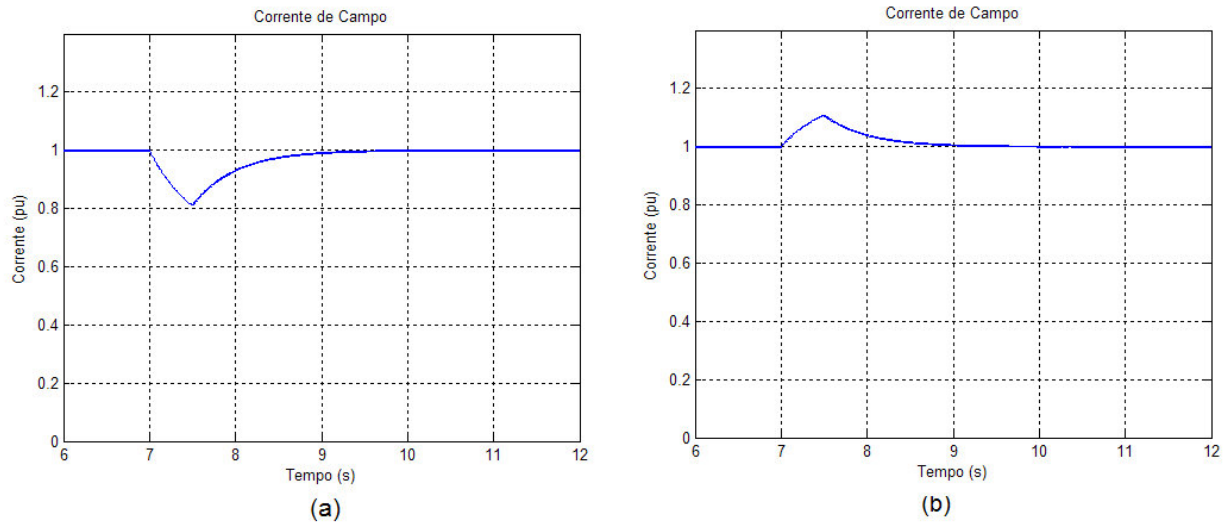


Figura 4.32: Corrente de campo do MCC frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação

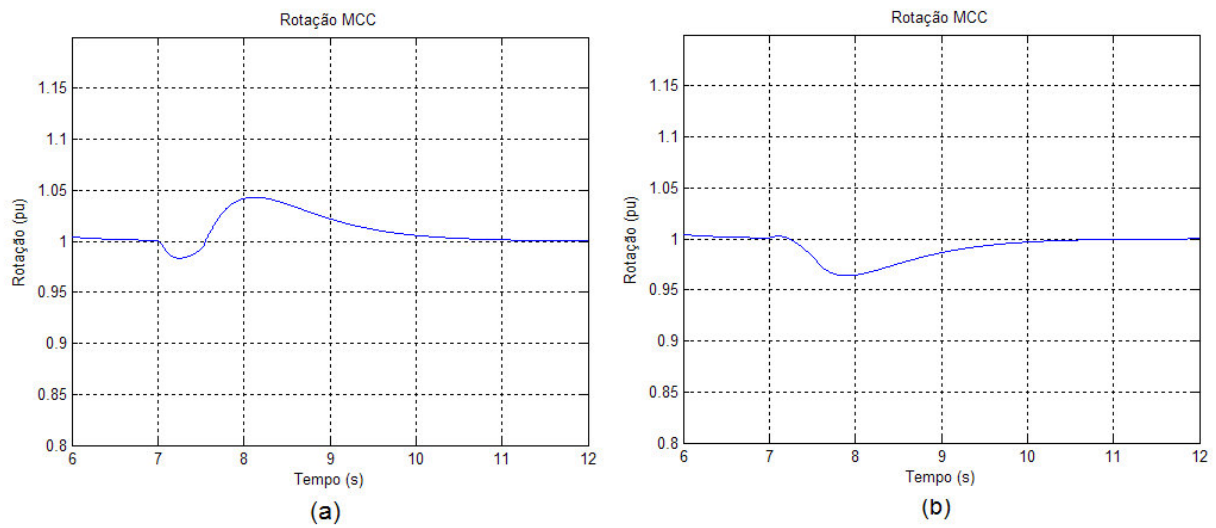


Figura 4.33: Rotação do MCC frente ao afundamento monofásico B: (a) sem compensação e (b) com compensação.

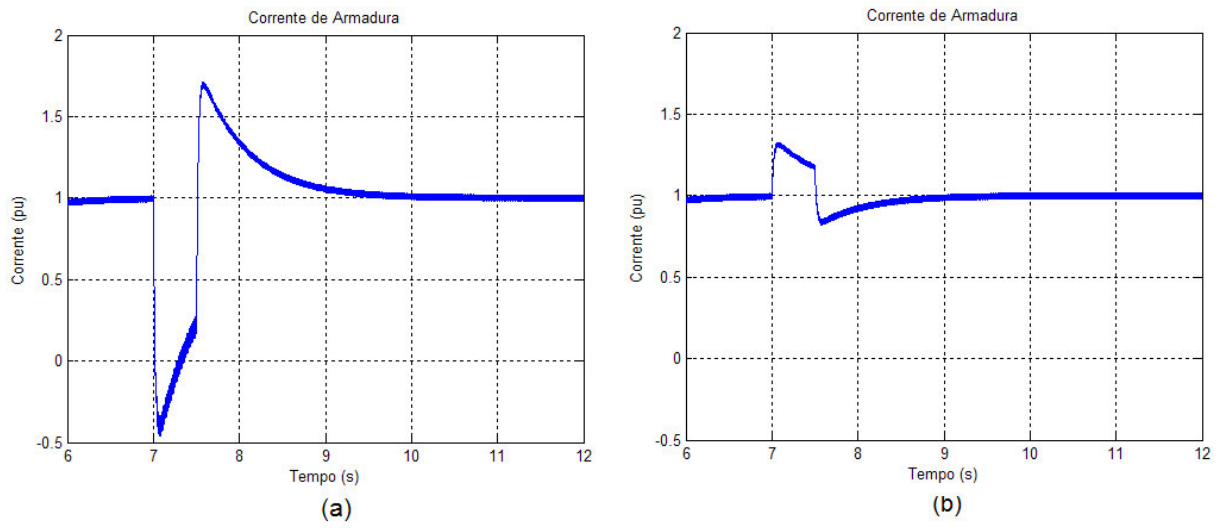


Figura 4.34: Corrente de armadura do MCC frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação

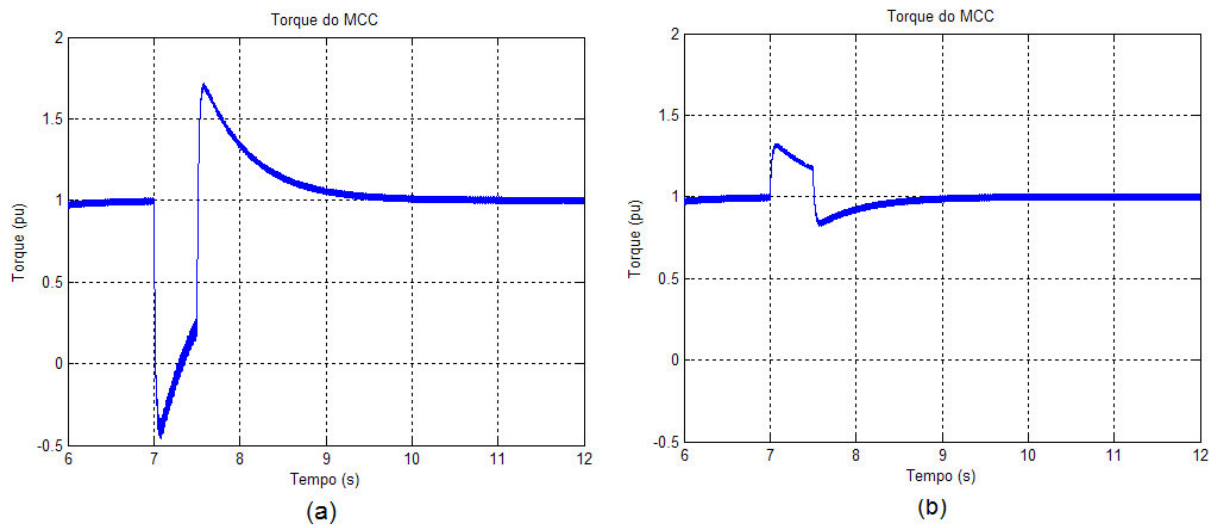


Figura 4.35: Torque do MCC frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação

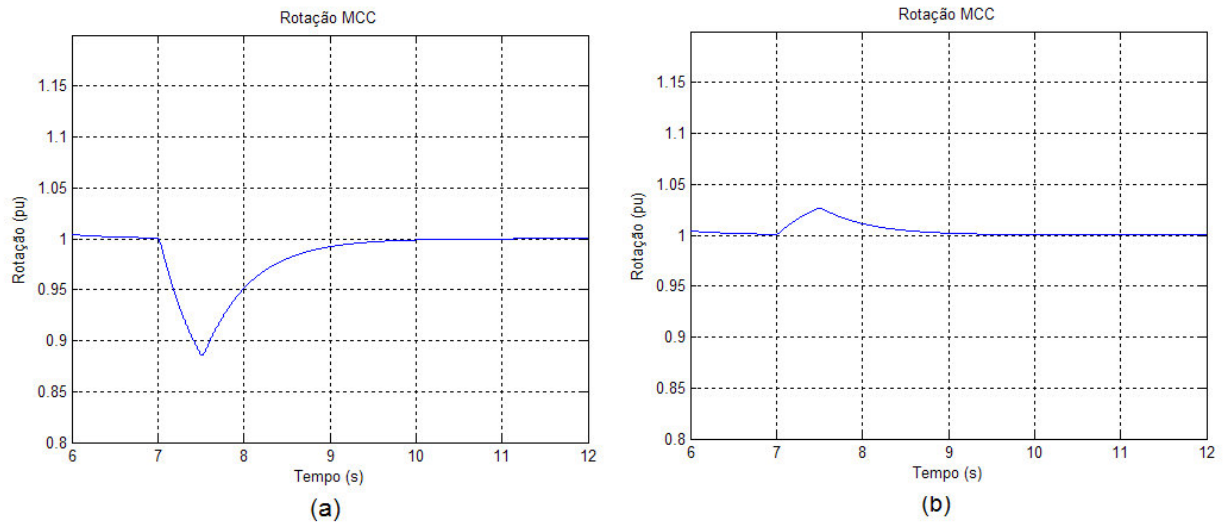


Figura 4.36: Rotação do MCC frente ao afundamento bifásico E sem salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação

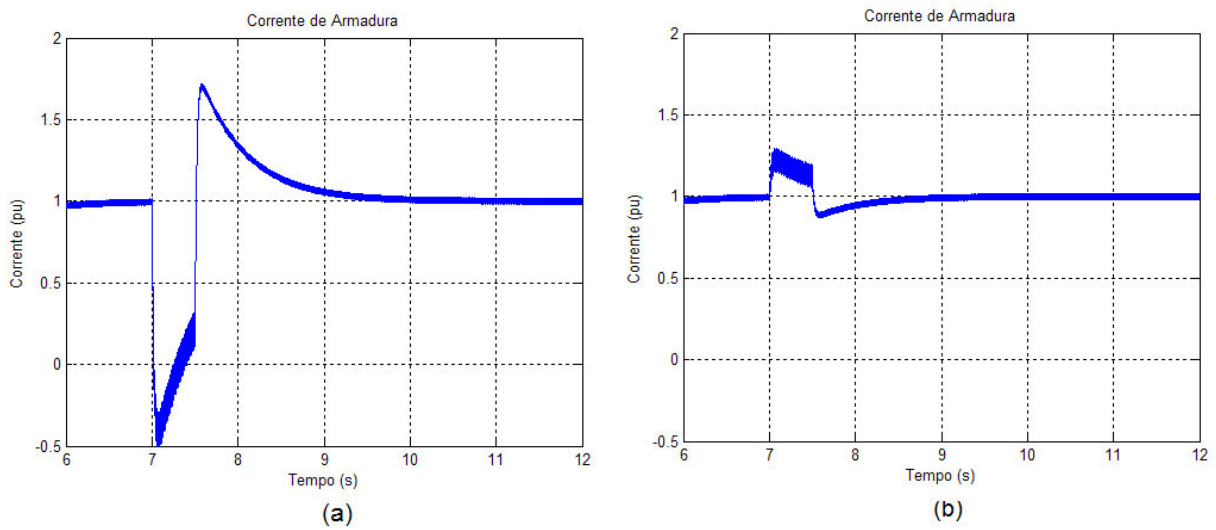


Figura 4.37: Corrente de armadura do MCC frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação

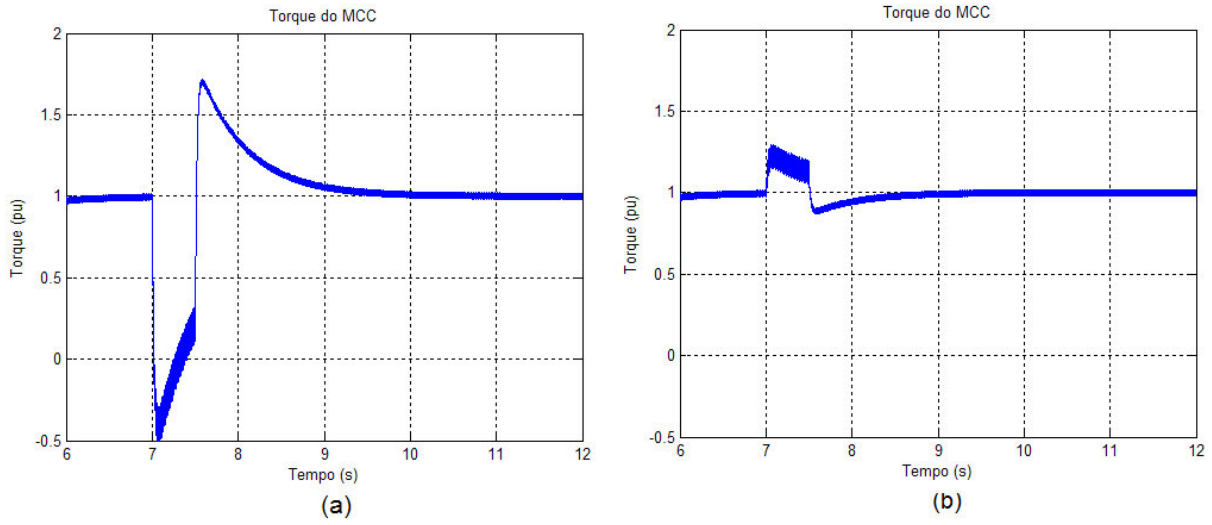


Figura 4.38: Torque do MCC frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação

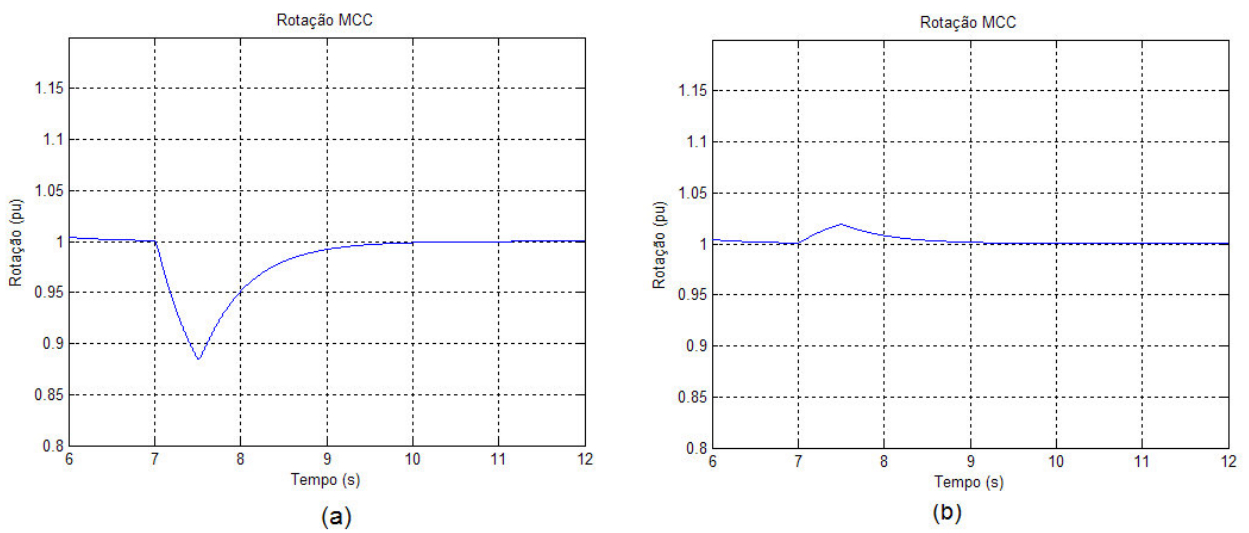


Figura 4.39: Rotação do MCC frente ao afundamento bifásico C com salto de fase: (a) sem compensação e (b) com compensação

Tabela 4.3: Componentes utilizados para montagem do Compensador série em Onda Quadrada

Componente	Valor
Transformador	Relação de Transformação - 1:0.2 Potência: 100 VA.
Capacitor	$C = 470 \mu F$
Módulo inversor	LMD18200
Estimador DRC	$R=5,6k\Omega$ and $C=4,7\mu F$
Comparadores	Lm311

4.3 Resultados Experimentais

4.3.1 Topologia Multinível em Cascata

A fim de testar a compensação série em onda quadrada, um restaurador de tensão foi montado com a topologia multinível em cascata, apresentada na figura 3.7. O compensador montado foi realizado com os componentes listados na tabela 4.3. Na parte de potência, foram montados dois níveis idênticos de 0,2 pu de compensação. Como existiam dois níveis de mesmo valor, o controle foi realizado de tal forma que se usaria um nível ou os dois em conjunto. O controle usado foi o controle descrito com componentes analógicos (figura 3.19). O CST foi testado protegendo um computador e um CLP. No apêndice A é mostrado o projeto do gerador de afundamento utilizado para execução dos testes.

Computador 1

O computador 1 possui processador Pentium 4, 3,2 GHz, 512Mb, HD 80Gb e fonte ATX Maxtor STRM380211AS de 450W. Nos testes de afundamento, este PC mostrou que suporta afundamentos de até 72%, independente da duração. Abaixo deste valor de afundamento, a suportabilidade da máquina passa a ser de apenas 1 ciclo de duração. Seu teste de susceptibilidade é descrito no apêndice A. O nome computador 1 foi escolhido pois neste mesmo

apêndice há um teste de susceptibilidade para um segundo computador, denominado computador 2.

Para testes do compensador com dois níveis distintos, foi necessário uma mudança no controle. Pela figura 3.8, 0,2 pu deveria compensar afundamentos de até 0,75 pu. Porém, como a sensibilidade do computador iniciava-se em 0,7 pu, o controle foi alterado para que um nível compensasse afundamentos de até 0,65 pu e abaixo disso dois níveis. Este controle foi feito num primeiro instante. Em um segundo teste, colocou-se controle padrão: 1 nível para afundamentos de até 0,75 pu e 2 níveis para afundamentos abaixo deste valor.

As figuras 4.40 a 4.45 mostram os resultados obtidos para proteção do computador 1. Antes de analisar as figuras, é importante mencionar que nas legendas há uma curva chamada *corrente do processador*. Esta medição foi coletada a partir do cabo de alimentação conectado à placa mãe responsável por fornecer 3,3V. Utilizou-se um alicate amperímetro para a coleta dos dados desta curva. Utilizando apenas 1 nível (0,2 pu), o compensador conseguiu aumentar a suportabilidade do computador que era de 0,7 pu para 0,65 pu. Já com dois níveis (0,4 pu) a suportabilidade foi para 0,58 pu. Como o compensador fornecia níveis individuais baixos para a sensibilidade do computador testado, decidiu-se utilizar os dois níveis para o primeiro ponto de desligamento do computador, a fim de melhor análise e visualização das formas de onda. Assim, as figuras 4.40 e 4.41 mostram o afundamento de 0,7 pu sendo compensado com apenas um nível, enquanto as figuras 4.42 a 4.45 mostram a compensação com dois níveis. Na maior parte das figuras foram apresentadas a tensão da rede, a tensão compensada, o barramento c.c. do computador e a corrente de seu processador.

Dois afundamentos foram aqui mostrados: 0,7 pu e 0,58 pu devido ao primeiro ser o afundamento inicial de desligamento do computador enquanto o segundo representa o limite de compensação para o CST montado. O tempo de duração dos afundamentos foi sempre de 100 ms. Nota-se, em todas as figuras, que o tempo de resposta do compensador foi de 0,5

ciclo. Apesar do tempo maior em relação aos compensadores série de mercado, que fornecem tempos de respostas na ordem de 1 ms, ainda assim consegue-se compensar o afundamento sem ocorrência de desligamento do computador. Este fato ocorre pois a energia armazenada no capacitor do barramento c.c. da fonte de alimentação consegue manter o funcionamento por até um ciclo. Esta característica (suportabilidade de 1 ciclo) é recomendação de algumas normas [39, 38].

As figuras apresentadas mostram que, para este computador, basta recuperar a onda em 0,7 pu de pico para protegê-lo do afundamento. Projetando um compensador que mitigue afundamentos de 0,5 pu e recupere o pico entre 0,9 e 1,05 fará com que, para esta carga, a suportabilidade a afundamentos, protegida pelo compensador, vá até 0,4 pu (pensando em nível de compensação de 0,75 pu).

As figuras 4.46 e 4.47 trazem detalhes do funcionamento do compensador: enquanto na primeiro é mostrado a onda injetada e a tensão no estimador RC, a segunda figura citada mostra o barramento c.c. do nível 1 do compensador. Na figura 4.46 é possível observar que enquanto a tensão no estimador RC não cai abaixo de um determinado valor, a compensação não é inicializada. Este atraso ocorre por cerca de 0,5 ciclo. Este fato é confirmado na figura 4.47 observando a tensão no capacitor do barramento CC do nível 1: somente há uma queda em seu valor após 0,5 ciclo, instante de início da compensação.

4.3.2 PLC 1 - Siemens

O CST em onda quadrada foi testado para a proteção do CLP Siemens, modelo Simatic SS 101U. Este CLP possui 20 entradas e 12 saídas em relé. Sua curva de susceptibilidade é detalhada no apêndice A. A figura 4.48 traz a curva de suportabilidade sem e com o compensador. Analisando a figura, há uma significativa melhoria na suportabilidade do PLC:

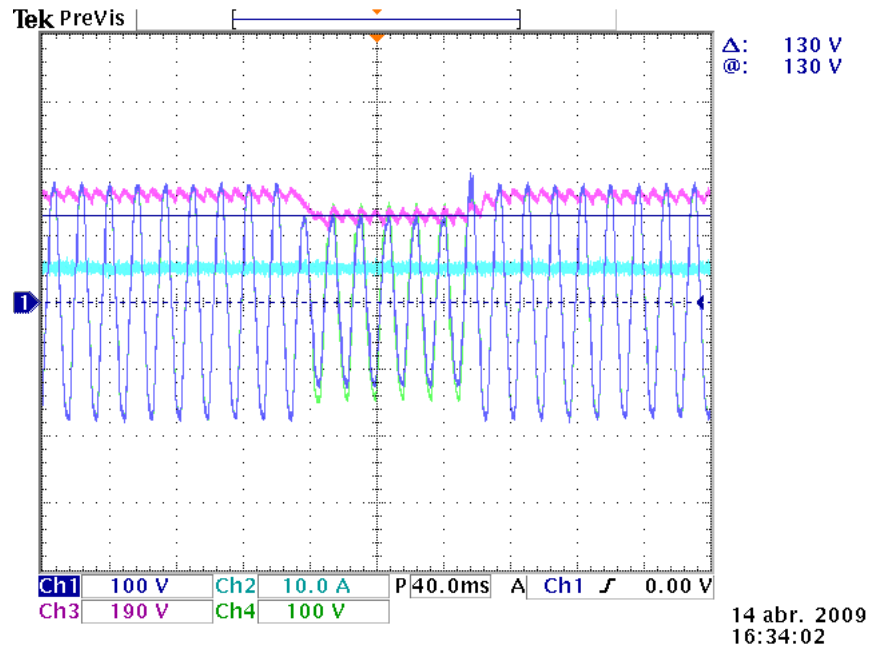


Figura 4.40: Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 1 nível: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador

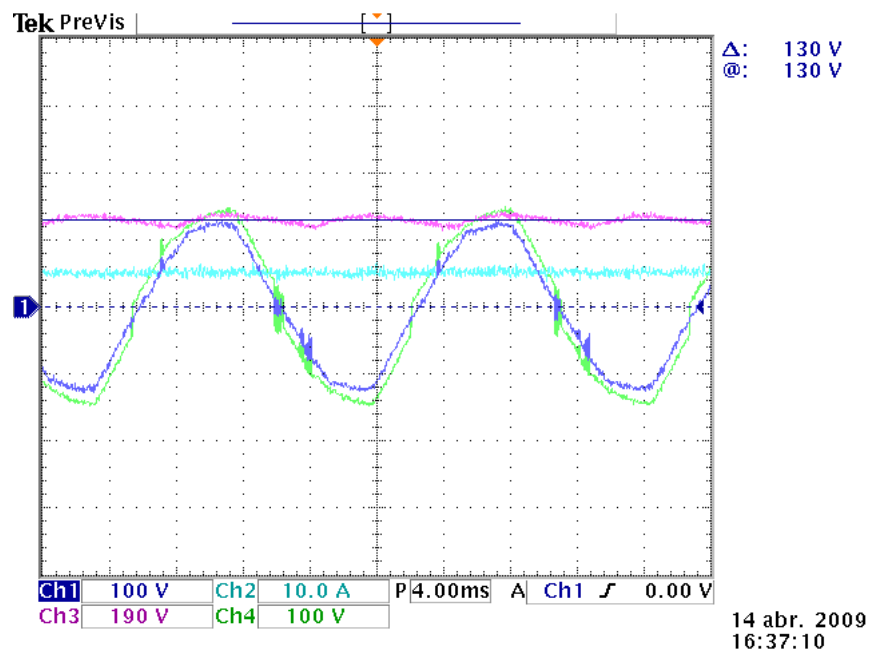


Figura 4.41: Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 1 nível em 2 ciclos no instante de compensação: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente do processador

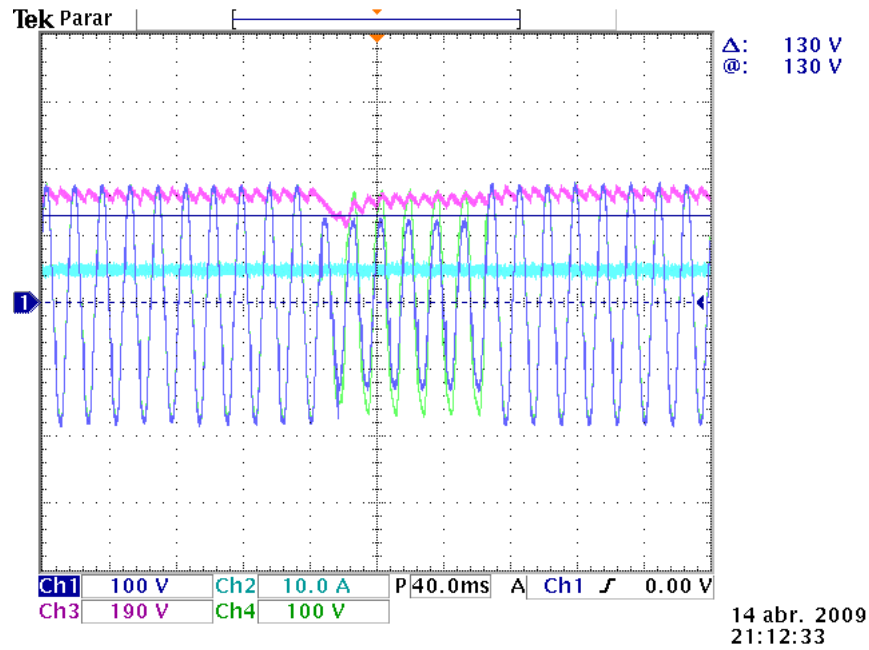


Figura 4.42: Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 2 níveis: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador

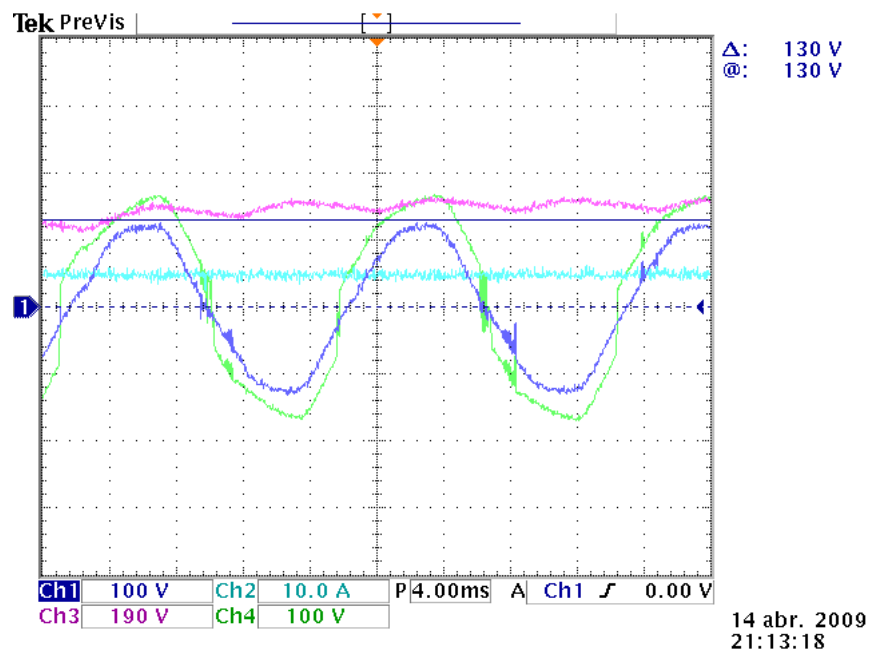


Figura 4.43: Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 2 níveis: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador

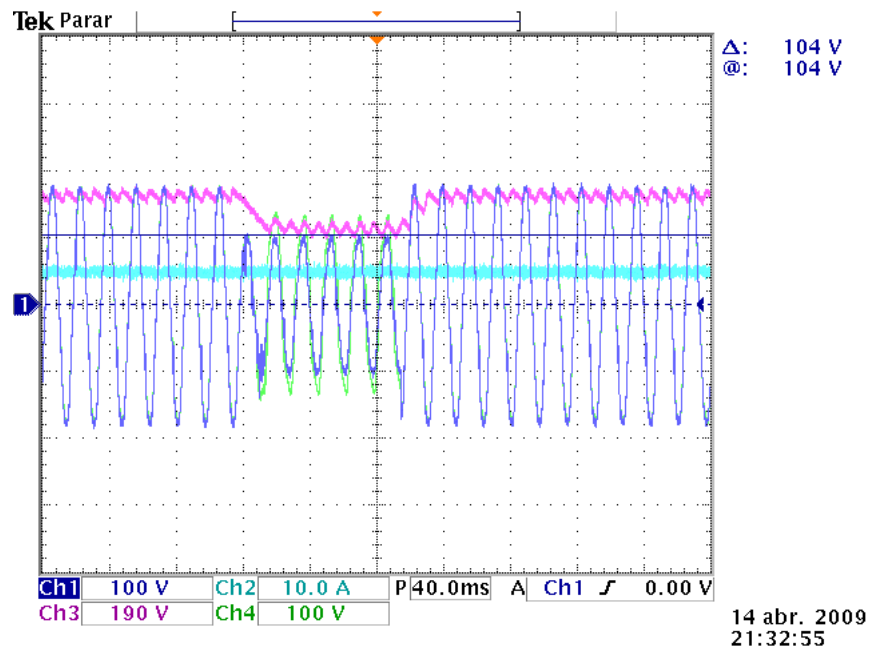


Figura 4.44: Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,58 pu compensando com 2 níveis em 2 ciclos no instante de compensação: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador

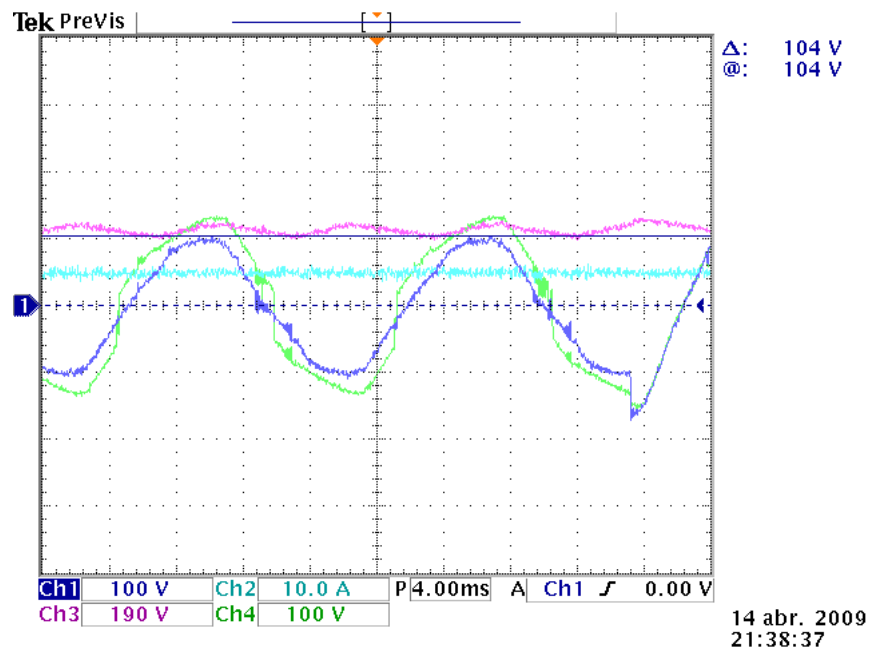


Figura 4.45: Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,58 pu compensando com 2 níveis em 2 ciclos no instante de compensação: Azul escuro - tensão da rede; verde - onda compensada; rosa - barramento c.c. do computador 1; azul claro - corrente de processador

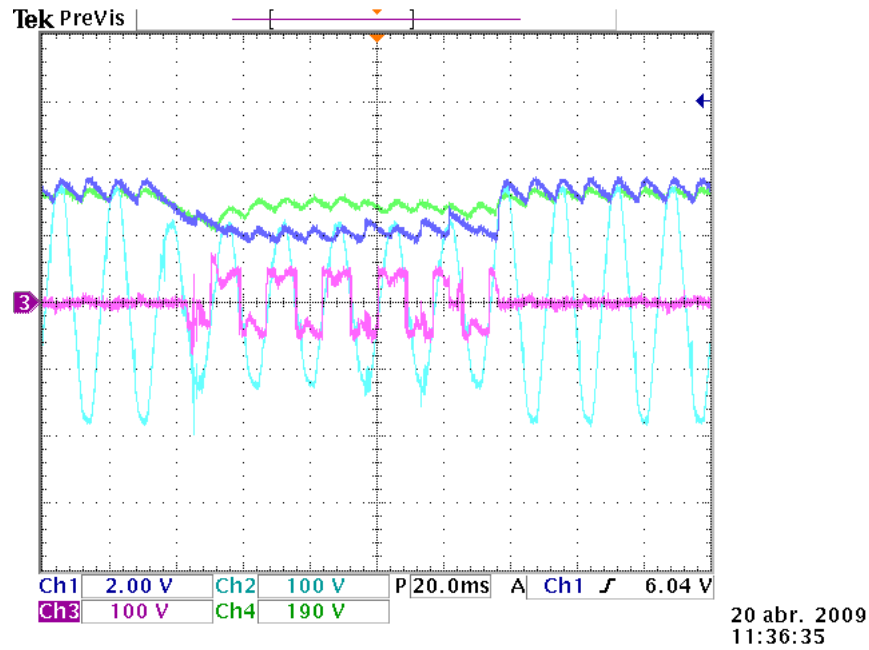


Figura 4.46: Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,58 pu compensando com 2 níveis: detalhes do controle. Azul claro - tensão da rede; Azul escuro - tensão no estimador RC; Rosa - onda injetada em série; Verde - barramento c.c. do computador 1

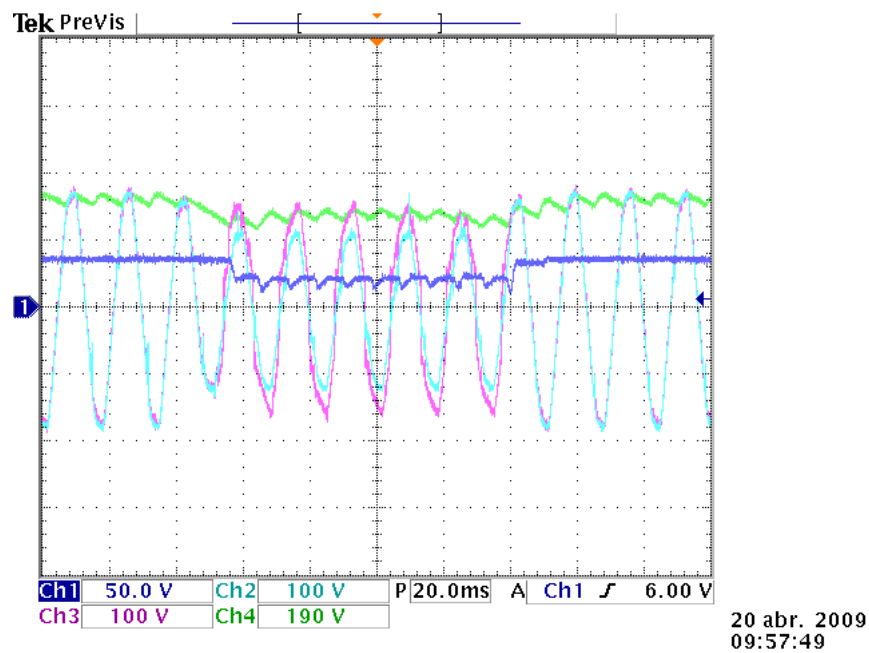


Figura 4.47: Compensador Série em Onda Quadrada - afundamento 0,7 pu compensando com 2 níveis: detalhes do barramento CC. Azul claro - tensão da rede; Azul escuro - tensão no capacitor nível 1; Rosa - onda compensada; Verde - barramento c.c. do computador 1

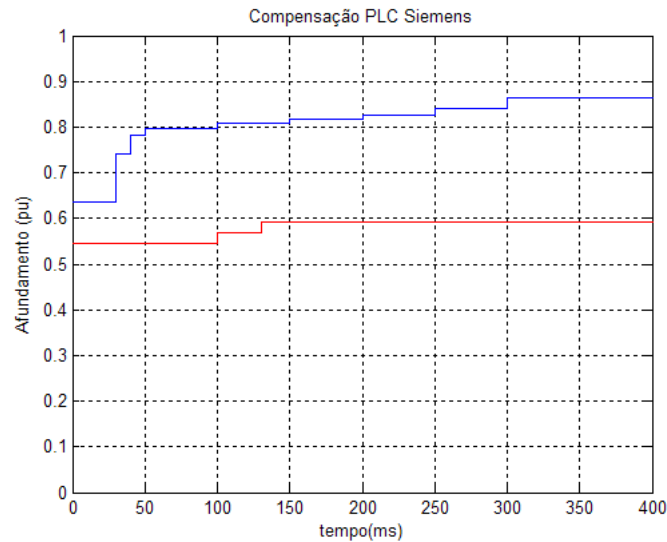


Figura 4.48: Compensador Série em Onda Quadrada - compensação PLC Siemens: azul - sem compensação; vermelho - com compensação

passou a suportar qualquer afundamento até 0,59 pu ante apenas 0,86 pu sem o compensador. Na figura percebe-se que, na curva de susceptibilidade com o compensador, de 0 a 100 ms o afundamento suportável ficou em 0,54 pu. Este limite se deve ao compensador: como o módulo inversor era alimentado pelo barramento c.c. de cada nível, abaixo deste afundamento, as tensões nos barramentos ficavam muito baixas, desligando o módulo.

4.3.3 Topologia Multinível com Retificador Controlado para Seleção de *Taps* do Transformador *Shunt*

Um CST em onda quadrada com mudança eletrônica de taps foi montado. Utilizou-se apenas dois níveis de tensão, tendo o CST um transformador *shunt* com dois *taps*, o retificador controlado com duas chaves tiristores e um braço de diodos. Os componentes utilizados estão listados na tabela 4.4. A figura 4.49 ilustra o protótipo montado. Para o controle, utilizou-se a mesma estratégia e componentes da seção passada, ou seja, componentes discretos. A figura 4.50 mostra as tensões de entrada, compensada e injetada. A tensão compensada é

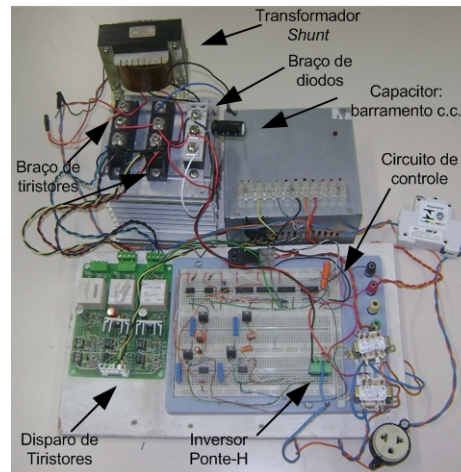


Figura 4.49: Protótipo do CST em Onda Quadrada - Topologia Multinível com Retificador Controlado para Seleção de *Taps* do transformador *Shunt*

Tabela 4.4: Componentes utilizados para montagem do CST em Onda Quadrada - Topologia multinível com retificador controlado

Componente	Especificação
Trafo <i>shunt</i>	Relações de transformação 1:0,075 e 1:0,15
Chave tiristor	AEGIS A3LI90TT4L
Braço de diodos	Siemens 95A12N
Barramento c.c.	Capacitor 1000 μF /63V
Inversor Ponte-H	Polulu 15A IRF7682PB

formada pela soma da tensão de entrada e da tensão em onda quadrada injetada. A figura 4.51 mostra o chaveamento que ocorre no barramento c.c.. A chave tiristor conectada ao enrolamento com a menor transformação de tensão se desliga, enquanto a outra chave tiristor entra em funcionamento, alimentando o barramento c.c. com uma tensão de maior valor. Esta mudança também pode ser visualizada pela medição da corrente do tiristor conectada ao *tap* de maior relação de transformação.

Importante mencionar que, durante o afundamento mostrado na figura 4.51, foi selecionada a maior relação de transformação devido ao valor da tensão residual. Se o afundamento fosse menos severo (maior tensão residual), a mudança de taps não ocorreria, já que o controle foi projetado para que, na ausência de afundamentos, a menor relação de transformação

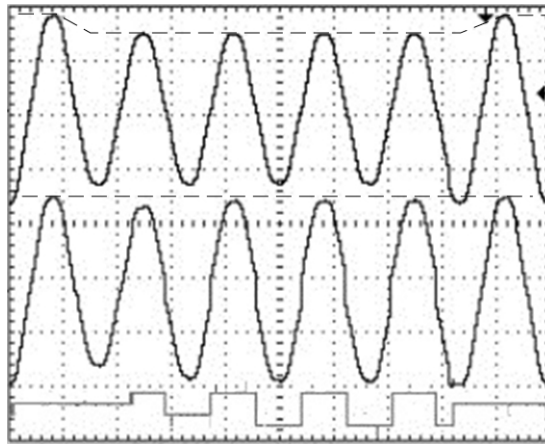


Figura 4.50: CST em onda quadrada com retificador controlado. Tensão de entrada (com afundamento), tensão compensada e tensão injetada em onda quadrada (escala: 50V/div)

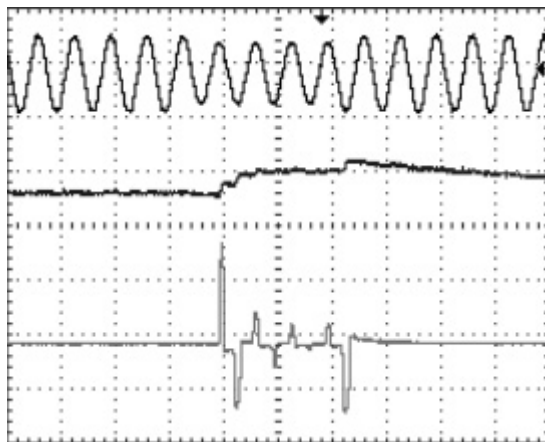


Figura 4.51: CST em onda quadrada com retificador controlado. Tensão de entrada (com afundamento), tensão barramento c.c. e corrente no capacitor advinda do *tap* com maior relação de transformação (escala: sinal 1:100V/div 2:20V/div 3:3A/div)

esteja selecionada. Preferiu-se apresentar este resultado, para que a comutação no barramento c.c. fosse visualizada. Para o protótipo mostrado, o controle foi ajustado para seleção da maior relação de transformação em tensões menores que 0,8 pu (tensão remanescente). Acima deste valor, a relação 1:0,075 seria utilizada.

4.3.4 Topologia Multinível em Cascata - Trifásico

Um CST em onda quadrada - topologia multinível em cascata, em uma versão trifásica, foi montado. Em cada fase, utilizaram-se quatro células idênticas, sendo que cada uma continha um trafo de 1:0,2 e um inversor em ponte-H LMD18200, o mesmo inversor utilizado na versão monofásica. Em relação ao controle, utilizou-se um DSP para este fim. A placa de controle foi a UPCC-2812 [56] onde o processador empregado é o DSP TMS320F2812 da *Texas Instruments*. A filosofia de controle digital, apresentada em 3.21, é estendida para uma versão trifásica, mostrada na figura 4.52. As figuras 4.53, 4.54 e 4.55 apresentam o protótipo montado.

A figura 4.56 mostra as curvas coletadas por meio do conversor digital-analógico (DAC) da placa UPCC-2812. Nesta figura, há o ângulo de referência, a tensão V_a medida na entrada, a tensão V_a de referência fornecida pelo ângulo da PLL e a tensão de erro. A situação mostrada refere-se a um instante de afundamento de tensão. As figuras 4.57 e 4.58 mostram um afundamento trifásico desequilibrado, sem e com compensação do CST em onda quadrada. Há ainda um quarto sinal, coletado na placa de controle, que mostra o instante de entrada do CST. Com o monitoramento da tensão de erro, a injeção ocorre sempre que a tensão de erro se tornar maior que 0,1 pu. Este valor significa que a tensão de entrada está em um patamar menor que 0,9 pu. A figura 4.59 traz a descarga do barramento c.c. em um nível de tensão aplicado, no caso, fase A.

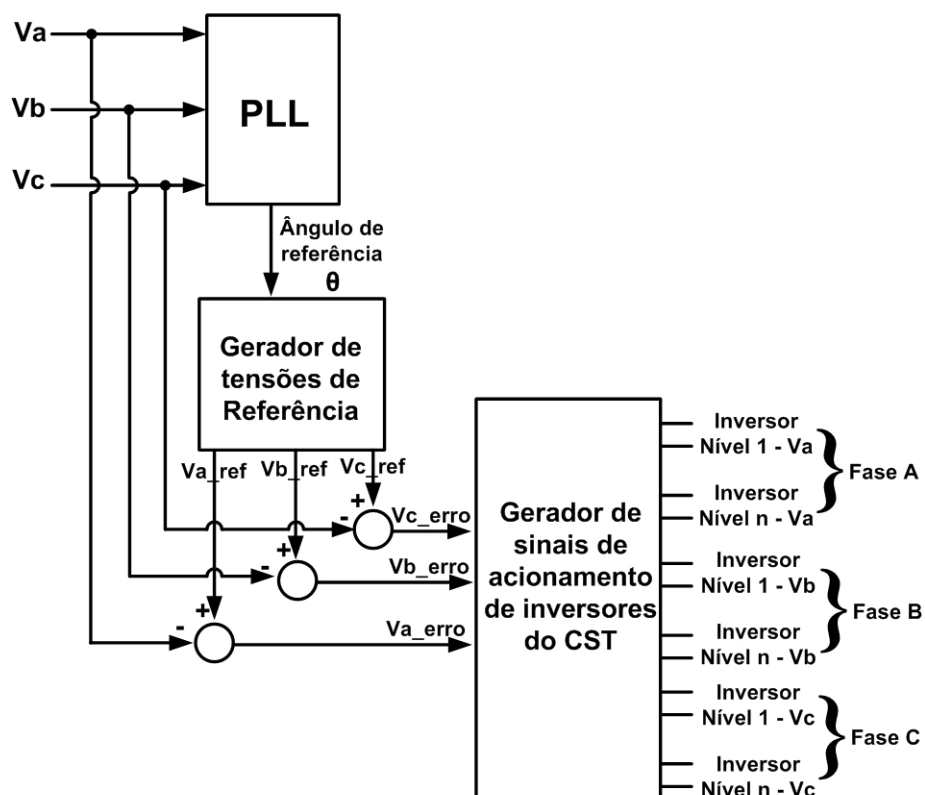


Figura 4.52: Controle Digital do CST em onda quadrada trifásico

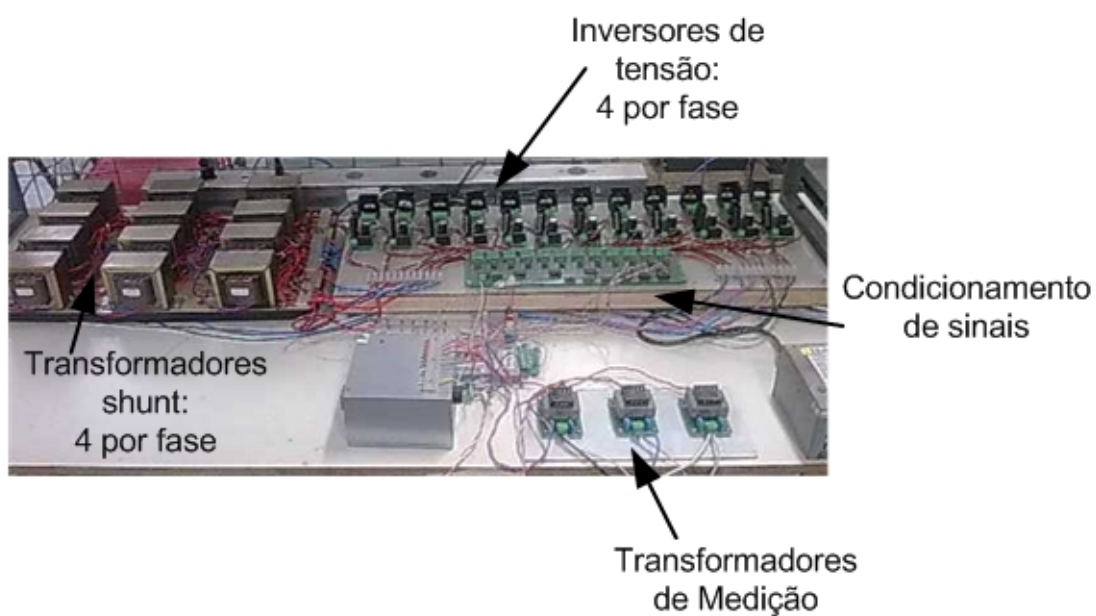


Figura 4.53: Protótipo do CST em Onda Quadrada - topologia Multinível em Cascata - Trifásico



Figura 4.54: Detalhe Protótipo do CST em Ona Quadrada - topologia Multinível em Cascata
- Trifásico - Inversores de Frequência e Condicionamento de sinais (demultiplexador)



Figura 4.55: Detalhe Protótipo do CST em Ona Quadrada - topologia Multinível em Cascata
- Trifásico - Transformadores *Shunt*

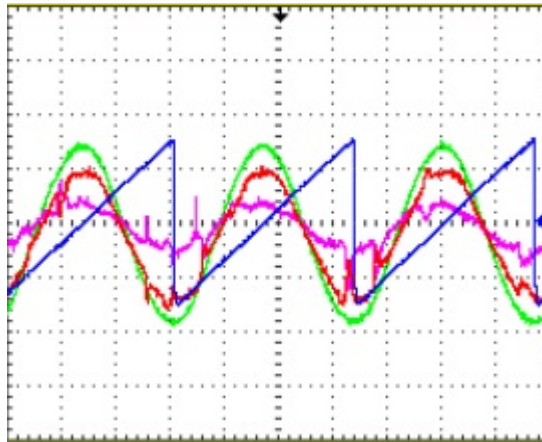


Figura 4.56: Sinais PLL. Azul: ângulo de referência (2V/div)); Vermelho: Tensão V_a de entrada (50V/div)); Verde: Tensão V_a de referência (50V/div); Rosa: Tensão de erro (50V/div)

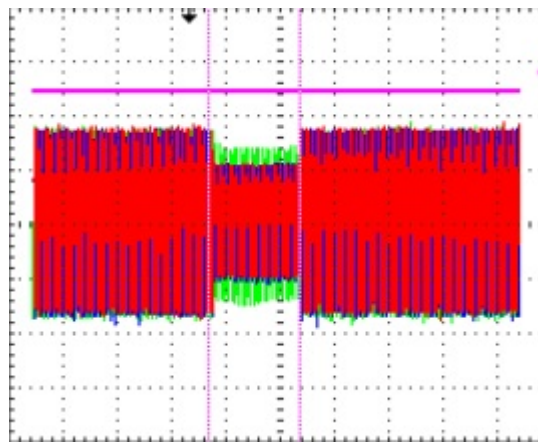


Figura 4.57: Afundamento Trifásico desequilibrado - sem compensação: $V_a=63\%$, $V_b=63\%$ e $V_c=82\%$. Vermelho: V_a (50V/div); Azul (atrás vermelho): V_b (50V/div); Verde: V_c ; Rosa (50V/div): Sinal de entrada do CST (5V/div)

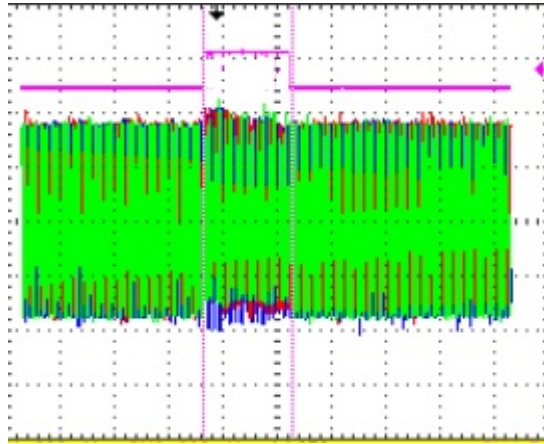


Figura 4.58: Afundamento Trifásico desequilibrado - com compensação: $V_a=63\%$, $V_b=63\%$ e $V_c=82\%$. Vermelho: V_a (50V/div); Azul (atrás vermelho): V_b (50V/div); Verde: V_c (50V/div); Rosa: Sinal de entrada do CST (5V/div)

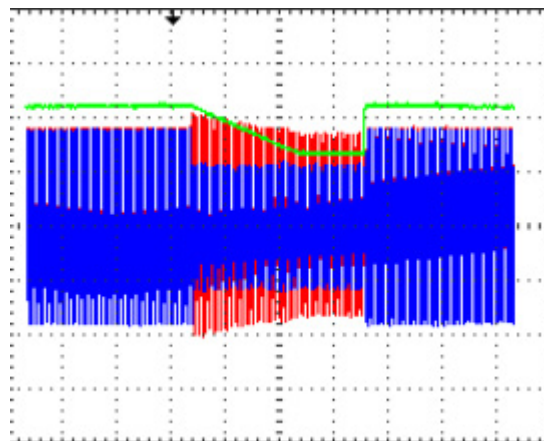


Figura 4.59: Detalhes do Afundamento Trifásico desequilibrado - com compensação: $V_a=63\%$, $V_b=63\%$ e $V_c=82\%$. Vermelho: V_a recuperada (50V/div); Azul V_a de entrada (50V/div); Verde: Tensão no barramento CC de um nível (20V/div)

4.4 Conclusões

Este capítulo apresentou simulações e resultados experimentais de CST em onda quadrada. Por meio de simulações, foi possível visualizar que a compensação por tensão em onda quadrada para mitigação de afundamentos de tensão é eficaz para cargas eletrônicas e motores de indução. Importante ressaltar que, em um ambiente industrial, as cargas mais sensíveis são eletrônicas. Portanto, ao invés de um grande CST, basta utilizar unidades de menor potência compensando em onda quadrada que, após uma seleção adequada das cargas mais sensíveis, a proteção destas implica na proteção de todo o processo industrial.

Um protótipo de CST em onda quadrada foi posto em prova para proteção de um microcomputador e um PLC. No caso do microcomputador, a susceptibilidade melhorou 20% enquanto no caso do CLP protegido, houve uma melhora de 30%. Estes números foram adquiridos com o CST montado a partir de componentes disponíveis no laboratório. Pode-se melhorar a proteção aumentando o nível de tensão utilizado nos protótipos. Há de se concluir que a compensação série de tensão em onda quadrada é eficaz e constitui-se em uma excelente alternativa ao CST senoidal, havendo uma diminuição em termos de complexidade e custo.

O CST em onda quadrada foi analisado para a mitigação de afundamentos de tensão. Porém, pode-se também utilizá-lo para proteção de outros distúrbios de QEE. O capítulo seguinte apresenta o CST multinível em cascata solucionando o desequilíbrio de tensão. A topologia do transformador *shunt* com mudança eletrônica de *taps* é usada para aumento do *ride-through* de inversores de frequência.

Capítulo 5

Uso do CST em Onda Quadrada para Mitigação de Desequilíbrios de Tensão

Até o presente momento, a principal aplicação do CST em Onda Quadrada almejou a mitigação de afundamentos de tensão. Isto se justifica por ser este um dos problemas mais frequentes encontrados no ambiente industrial. Entretanto, o CST em Onda Quadrada não se limita a esta aplicação. Este capítulo aborda a utilização do CST em onda quadrada na mitigação de desequilíbrios de tensão, hoje em dia realizada através de transformador com tap variável (LTC - Linear Tap Changer). São mostradas análises da forma de onda resultante após a compensação por onda quadrada em termos de índice de desequilíbrio e distorção de tensão.

5.1 Desequilíbrio de tensão

Importante problema de qualidade de energia elétrica que afeta os consumidores é o desequilíbrio de tensão. A fim de contabilizar este fenômeno, *NEMA* (*National Electrical*

Manufacturers Association) [57] usa um indicador de desequilíbrio demonstrado na equação 5.1. IEEE [58] utiliza do mesmo índice.

$$\%Desequilíbrio = \frac{\text{Maximo desvio em relacao a media das tensoes de linha}}{\text{Media das tensoes de linha}} \times 100\% \quad (5.1)$$

IEC [59] e PRODIST [14] utilizam um índice que indica a razão entre a tensão de sequência negativa com a tensão de sequência positiva (equação 5.2). A este índice, Prodist o nomeia *Fator de Desequilíbrio* (FD). Em inglês, o mesmo índice é chamado de *Voltage Unbalance Factor* (VUF).

$$\%FD = \frac{V_2}{V_1} \times 100\% \quad (5.2)$$

Um cálculo alternativo à equação 5.2 é fornecido por 5.3.

$$\%FD = 100\% \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (5.3)$$

sendo β definido em 5.4.

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (5.4)$$

Para eliminação deste fenômeno, utiliza-se um regulador de tensão formado por um transformador com várias *taps* selecionados via um motor elétrico [60]. Como principal vantagem, representa numa solução de baixo custo. Por outro lado, duas importantes limitações restringem seu uso em algumas situações:

- Resposta dinâmica lenta;
- Para tensões desbalanceadas com salto de fase, reguladores de tensão convencionais não garantem que os índices advindos das normas de regulação de tensão sejam sempre alcançados.

Estas limitações podem ser superadas através da utilização do Compensador Série de Tensão. O CST em onda quadrada teria, em princípio, uma limitação na compensação por inserir um onda quadrada com conteúdo harmônico e assim a tensão resultante possuir uma distorção harmônica de tensão (DHT) alta. Entretanto, como o desequilíbrio de tensão possui seus valores entre 0,9 e 1,05 pu, a tensão em onda quadrada a ser inserida é baixa, sendo que a tensão resultante ficaria com um espectro harmônico também baixo [61, 62]. A próxima seção avalia a compensação em amplitude, compensação realizada pelo regulador de tensão via transformador e LTC, mostrando seu limite em compensar desequilíbrios com salto de fase. Em uma outra seção, desequilíbrios compensados via onda quadrada serão estudados, mostrando os índices finais de desequilíbrio e distorção harmônica para a tensão resultante.

5.1.1 Compensação por Amplitude

Várias técnicas de mitigação são utilizadas para o desequilíbrio de tensão. Além de intervenções na rede do sistema elétrico, um equipamento bastante utilizado é o transformador regulador de tensão LTC. Ele é baseado na compensação por amplitude através da mudança de *taps* do transformador, tendo um passo de 0,625%, podendo regular entre -10% e +10% de tensão remanescente na fase [60]. Os taps são selecionados por um motor o que significa um tempo de resposta na ordem de segundos. A tensão de saída deste dispositivo é basicamente a tensão de entrada multiplicada por um ganho. Se na tensão de entrada houver um salto de fase, a tensão de saída também o terá, limitando a efetividade deste regulador em tensões desequilibradas.

Compensação por amplitude é suficiente quando não há salto de fase. Entretanto quando este ocorre, a compensação por amplitude recupera a amplitude da tensão de sequência positiva mas não elimina a componente de sequência negativa. Este cenário pode ser visualizado

através da figura 5.1. Assumindo um distúrbio monofásico (por exemplo, fase B), a figura 5.1 mostra a tensão compensada resultante da compensação por amplitude: possui o mesmo salto de fase da fase B. A diferença entre a tensão nominal e a tensão compensada leva a uma componente de sequência negativa não-nula. A amplitude deste último fasor depende do ângulo α . Verifica-se que para ângulos α maiores que 3,4 graus, a compensação em amplitude obtém componentes de sequência negativa maiores que os índices de desequilíbrio permitem. A figura 5.1 também mostra a compensação ideal. Como esperado, a tensão de compensação não está mais em fase com a tensão da fase B desbalanceada.

Para demonstrar o salto de fase que faz com que a compensação por amplitude ser torne inapropriada, um grupo de tensões desequilibradas, apenas com o ângulo da fase B defasado de α graus, é tomado como referência:

$$V_a = V_o \cos(\omega t) \quad (5.5)$$

$$V_b = V_o \cos(\omega t - 120^\circ + \alpha) \quad (5.6)$$

$$V_c = V_o \cos(\omega t + 120^\circ) \quad (5.7)$$

Calculando as sequências positiva e negativa, por meio da teoria de componentes simétrica, as equações 5.8 e 5.9 são obtidas:

$$V_1 = \frac{V_o}{3} \sqrt{5 + 4\cos(\alpha)} \quad (5.8)$$

$$V_2 = \frac{\sqrt{2}V_o}{3} \sqrt{1 - \cos(\alpha)} \quad (5.9)$$

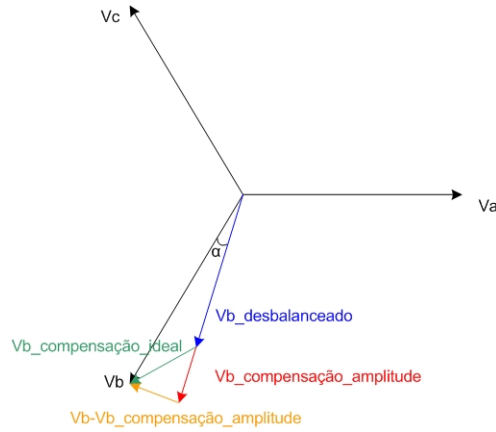


Figura 5.1: Diagrama fasores - Compensação por Amplitude

Para que o ângulo α fique dentro do limite de 2%, indicado por [59], a solução para $V_2/V_1 \cdot 100\% > 2\%$ é $\alpha = 3,4^\circ$.

5.1.2 CST em Onda Quadrada para Mitigação de Desequilíbrios de Tensão

A versão monofásica para o CST em Onda Quadrada com o objetivo de eliminar o desequilíbrio de tensão é mostrada na figura 5.2. Para a versão trifásica, basta replicar esta topologia em todas as fases. Trata-se da topologia multinível em cascata com as seguintes relações de transformação: 1:0,01, 1:0,02, 1:0,04 e 1:0,08. Estas relações foram escolhidas para que o compensador tivesse degraus de 0,01 pu ou 1% e variasse de -0,15 a +0,15 pu. Como a estrutura é multinível em cascata, é possível, além da onda quadrada, injetar uma onda quase-senoidal. A fim de testar esta solução, alguns desequilíbrios foram compensados por algumas formas de onda, descritas a seguir:

- *Senoidal* (compensação por amplitude): Tensão senoidal somada a tensão em distúrbio recuperando a tensão de pico. A tensão injetada possui o mesmo salto de fase da tensão

em distúrbio, se assim ocorrer.

- *Onda Quadrada I* (compensação por amplitude): Tensão em onda quadrada somada em fase à tensão em distúrbio recuperando a tensão de pico. A tensão injetada possui o mesmo salto de fase da tensão em distúrbio, se assim ocorrer.
- *Onda Quadrada II* (compensação por amplitude): Tensão em onda quadrada somada em fase à tensão em distúrbio recuperando a magnitude da componente fundamental. A tensão injetada possui o mesmo salto de fase da tensão em distúrbio, se assim ocorrer.
- *Onda Quadrada III* (Compensação por amplitude e fase): Tensão em onda quadrada somada à tensão em distúrbio recuperando a magnitude e fase da componente fundamental.
- *Quase-senoidal I* (Compensação por amplitude e fase): Tensão Quase-Senoidal somada à tensão em distúrbio para recuperar a magnitude e fase da componente fundamental. A tensão injetada é modulada iniciando da célula com menor relação de transformação (1:0,01).
- *Quase-senoidal II* (Compensação por amplitude e fase): Tensão Quase-Senoidal somada à tensão em distúrbio para recuperar a magnitude e fase da componente fundamental. A tensão injetada é modulada iniciando da célula com maior relação de transformação (1:0,08).

Para melhor visualização destas formas de onda injetadas, as figuras 5.3 e 5.4 exemplificam a inserção destas formas de onda. Na primeira figura, há todas formas de onda descritas anteriormente, enquanto a segunda diferencia as formas *quase-senoidal I* e *quase-senoidal II*.

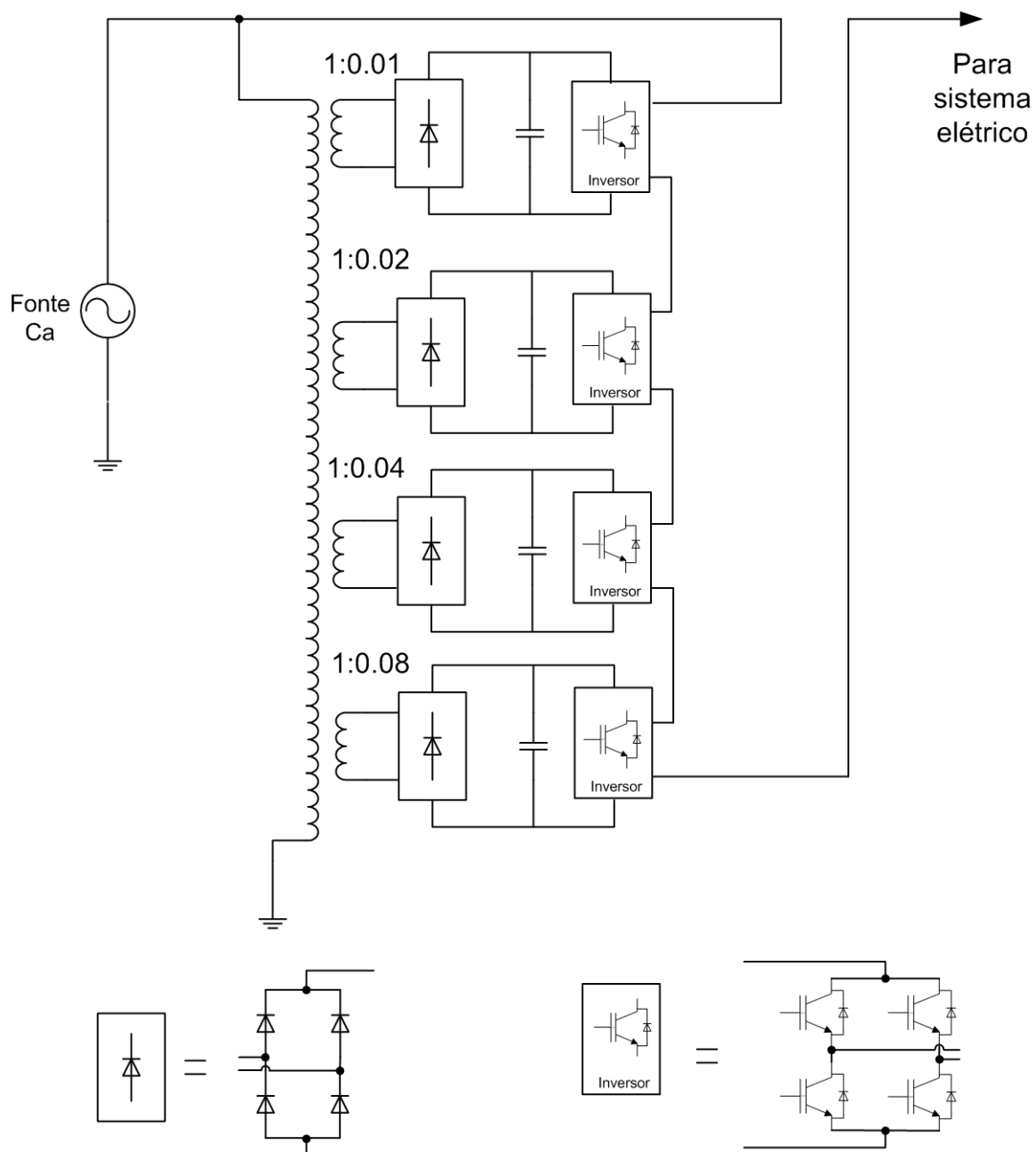


Figura 5.2: CST em Onda Quadrada para mitigação de desequilíbrio de tensão - versão monofásica

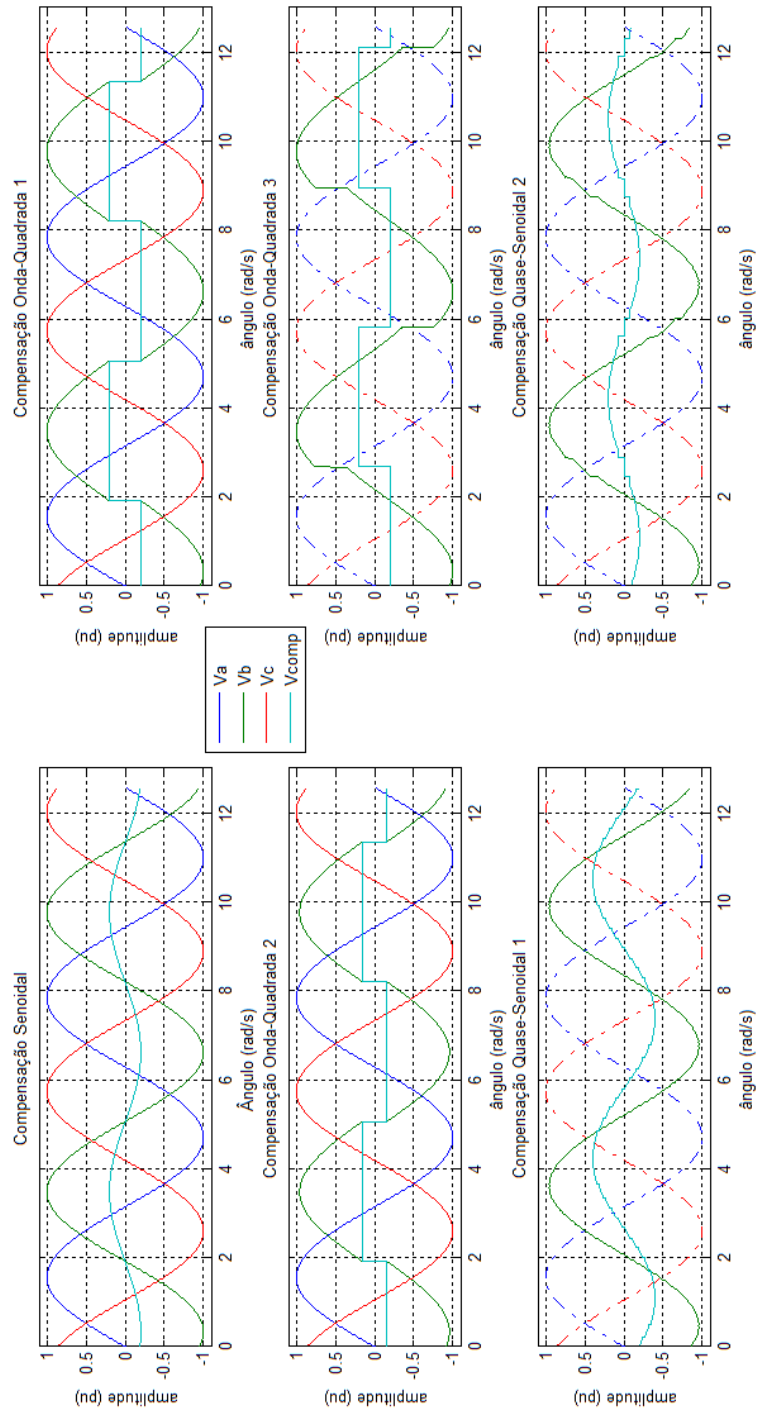


Figura 5.3: Formas de onda para teste do CST em Onda Quadrada

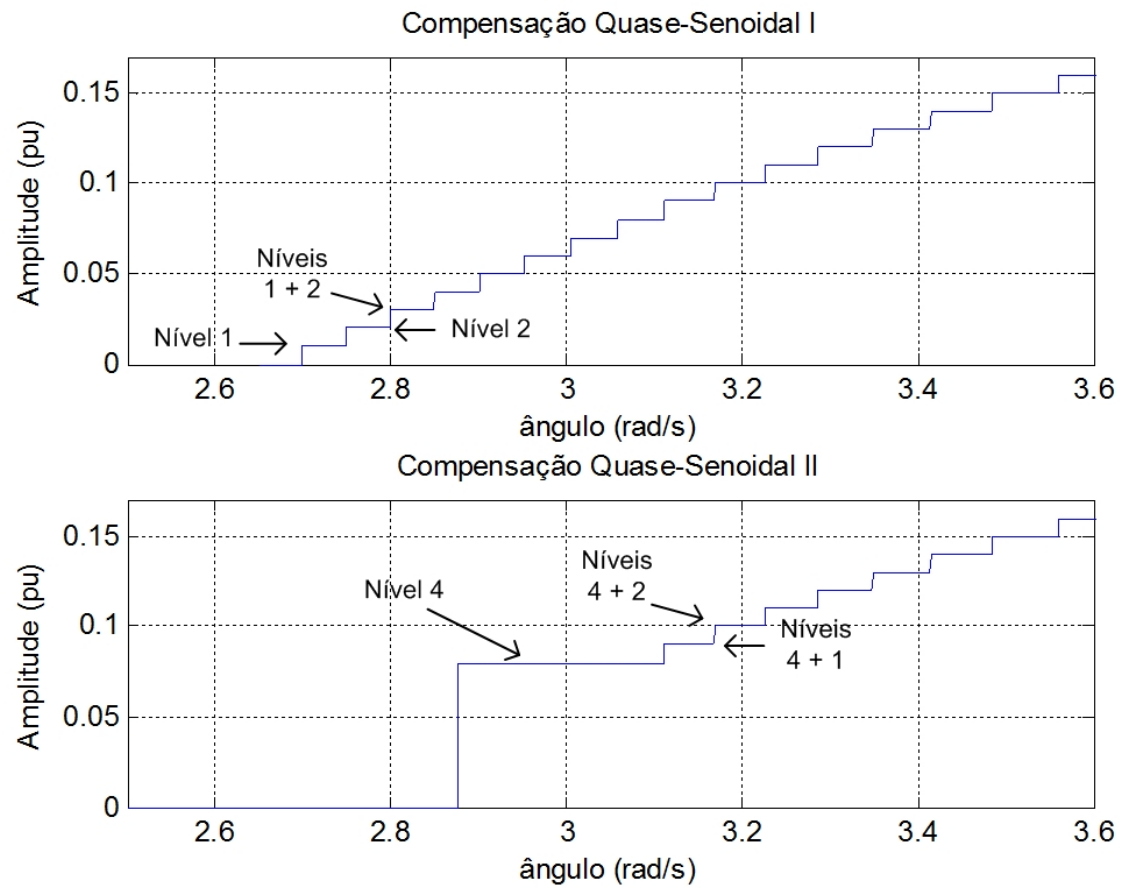


Figura 5.4: Diferença na modulação entre as formas de onda *Quase-Senoidal I* e *Quase-Senoidal II*

Tabela 5.1: Desequilíbrios de tensão compensados por tensões senoidal e quadrada

	Va(pu)	Vb(pu)	Vc(pu)	Sem Compensação		Compensação Senoidal		Compensacao Onda-Quad. I			Compensacao Onda-Quad. II			Compensacao Onda-Quad. III		
				NEMA	IEC	NEMA	IEC	NEMA	IEC	THD	NEMA	IEC	THD	NEMA	IEC	THD
1	1,0/0°	0,9/0°	1,0/0°	3,42	3,41	0	0	0,94	0,96	5,99	0,03	0,04	4,83	0,03	0,04	4,83
2	1,0/0°	0,9/0°	0,95/0°	2,64	3,04	0	0	0,7	0,83	5,99	0,02	0,03	4,83	0,02	0,03	4,83
3	0,92/0°	0,9/0°	0,95/0°	1,45	1,58	0	0	0,37	0,43	5,99	0,01	0,03	4,83	0,01	0,03	4,83
4	1,0/0°	0,95/0°	0,95/0°	1,73	1,72	0	0	0,45	0,46	3,04	0	0,01	2,42	0	0,01	2,42
5	1,0/0°	0,9/5°	0,95/0°	4,21	4,48	2,55	2,91	2,97	3,08	5,99	2,53	2,91	4,83	0,05	0,05	6,28
6	1,0/0°	0,9/5°	0,95/10°	7,52	7,82	4,85	4,92	4,12	4,17	5,99	4,83	4,88	4,83	0,05	0,05	8,56
7	1,1/0°	0,9/0°	0,95/0°	6,01	6,11	0	0	1,52	1,63	6,33	0,04	0,03	4,84	0,04	0,03	4,84
8	1,0/0°	0,9/5°	0,95/0°	4,36	4,69	2,55	2,91	4,02	4,23	6,33	2,51	2,88	4,84	0,02	0,03	6,28

Tabela 5.2: Desequilíbrios de tensão compensados por tensões senoidal e quase-senoidal

	Va(pu)	Vb(pu)	Vc(pu)	Sem Compensação		Compensação Senoidal		Compensacao Quase-Sen. I			Compensacao Quase-Sen. II		
				NEMA	IEC	NEMA	IEC	NEMA	IEC	THD	NEMA	IEC	THD
1	1,0/0°	0,9/0°	1,0/0°	3,42	3,41	0	0	0,67	0,67	0,46	0,47	0,47	2,89
2	1,0/0°	0,9/0°	0,95/0°	2,64	3,04	0	0	0,53	0,58	0,46	0,38	0,4	2,89
3	0,92/0°	0,9/0°	0,95/0°	1,45	1,58	0	0	0,31	0,31	0,46	0,16	0,19	2,89
4	1,0/0°	0,95/0°	0,95/0°	1,73	1,72	0	0	0,32	0,33	0,44	0,23	0,23	1,44
5	1,0/0°	0,9/5°	0,95/0°	4,21	4,48	2,55	2,91	0,66	0,68	0,47	0,34	0,37	2,36
6	1,0/0°	0,9/5°	0,95/10°	7,52	7,82	4,85	4,92	1,34	1,40	0,48	1,26	1,34	2,36
7	1,1/0°	0,9/0°	0,95/0°	6,01	6,11	0	0	1,14	1,20	0,46	0,99	1,03	2,89
8	1,0/0°	0,9/5°	0,95/0°	4,36	4,69	2,55	2,91	0,71	0,81	0,47	0,68	0,77	2,36

As simulações de alguns cenários de desequilíbrio com as compensações citadas anteriormente, foram realizadas utilizando o programa *MatLab*. Nas tabelas 5.1 e 5.2, os resultados de desequilíbrios de tensão compensados foram reproduzidos. Diferentes valores de amplitude e fase para as tensões foram testados. As tensões foram descritas com sua amplitude e fase relativos aos valores nominais. Por exemplo, $V_b = 0,9/+10^\circ$ significa que a amplitude é de 0,9 pu e o salto de fase foi de $+10^\circ$ comparado com a tensão nominal V_b ($1/-120^\circ$). Portanto, a fase final foi de -110° . Para cada tipo de compensação, os indicadores de desequilíbrio NEMA e IEC foram calculados. Há também a DHT da tensão mais desequilibrada. Tensão mais desequilibrada significa a tensão com a maior diferença de amplitude comparada ao valor nominal.

Analisando a tabela 5.1, a compensação por onda quadrada é adequada para desequilíbrios de tensão sem salto de fase: nos cenários 1 a 4, a compensação por onda quadrada I teve um índice NEMA médio de 0,62% enquanto que para o IEC foi de 0,68%. Nestes cenários, os índices de desequilíbrio alcançados atendem aos requisitos das respectivas normas ($NEMA < 3\%$ e $IEC < 2\%$). As compensações por onda quadrada II e III obtiveram os mesmos resultados quando não há salto de fase. Os índices NEMA e IEC alcançados foram muito baixos, próximo a 0%. Em relação à DHT, há de se considerar seu valor na fase mais desequilibrada (fase B): onda-quadrada I foi de 5,99% enquanto para onda-quadrada II e III o índice foi, 4,83%. Vê-se portanto que a onda quadrada I em desequilíbrios sem salto de fase ultrapassa o recomendado pelos indicadores de qualidade de energia sendo que onda quadrada II e III chegam às DHTs próximas dos limites recomendados ($DHT < 6\%$ [14] e $DHT < 5\%$ [63] para tensões abaixo de 69 kV).

A conclusão geral acerca da compensação em onda quadrada é que ela consegue compensar tensões desequilibradas sem salto de fase mas que pode chegar a ultrapassar limites de DHT. Os cenários de desequilíbrio 5 e 6 possuem saltos de fases nas tensões das fases B e

C. Apenas a onda quadrada III conseguiu mitigar o desequilíbrio com uma tensão altamente distorcida (6,28% e 8,56%).

Os cenários 7 e 8 possuem uma sobretensão de 10% na fase A. No cenário 7 não há salto de fase, o que significa que a compensação por onda quadrada possui índices em conformidade. Já no cenário 8 com salto de fase, apenas a onda quadrada III respeita os indicadores NEMA e IEC. Mais uma vez, um ponto negativo a utilização desta forma de onda de compensação foi uma tensão com alta DHT (6,28%).

O primeiro grupo de análises foi feito com a compensação em onda quadrada devido a sua simplicidade de geração e injeção. Avaliando a tensão quase-senoidal, esta se mostrou, como esperado, ser a melhor solução para o compensador série multinível: mitiga o desequilíbrio com uma tensão de boa qualidade. Compensação quase-senoidal I é superior à II em relação a DHT sendo um pouco inferior nos índices de desequilíbrio, mas ainda respeitando os limites impostos pelas normas referenciadas. Como exemplo, para o cenário 6, a quase-senoidal I obteve índice IEC de 1,40% com uma DHT de 0,48% enquanto a quase-senoidal II teve o índice IEC de 1,34% e DHT de 2,36%.

5.2 Conclusões

Este capítulo apresentou uma nova aplicação para o compensador série em onda quadrada: mitigação de desequilíbrio de tensão utilizando a topologia multinível em cascata. A principal vantagem na topologia apresentada para a mitigação de desequilíbrios de tensão está no uso de componentes de baixa tensão em redes de média tensão. Isto é possível devido as relações de transformação dos transformadores *shunt* serem baixas (1:0,01 pu a 1:0,08 pu).

Avaliou-se a forma da onda de tensão a ser inserida: quadrada ou quase-senoidal, formas de onda possíveis de serem sintetizadas com o compensador série de tensão multinível em

cascata. Três possibilidades de injeção de onda quadrada foram consideradas: 1) inserção em fase com a tensão desequilibrada a fim de recuperar seu valor de pico; 2) inserção em fase com a tensão desequilibrada para recuperação do valor nominal da tensão na frequência fundamental; 3) inserção defasada em relação à tensão desequilibrada para recuperação da amplitude e fase da tensão na frequência fundamental. Sem salto de fase na tensão desequilibrada, as três possibilidades mitigam o desequilíbrio de tensão, com uma tensão final altamente distorcida, da ordem de 6% de DHT. Para desequilíbrios com salto de fase, apenas a 3ª possibilidade consegue reequilibrar as tensões, porém com o mesmo custo de qualidade da energia: alto DHT.

Em relação à inserção da tensão quase-senoidal, duas possibilidades: 1) tensão sintetizada inicialmente da célula de maior relação de transformação da estrutura multinível; 2) tensão sintetizada inicialmente da célula de maior relação de transformação da estrutura multinível. Ambos levam à recuperação da tensão na frequência fundamental, tanto em termos de amplitude como de fase. Neste caso, para os cenários de desequilíbrio testados, ou seja, com ou sem salto de fase tensões abaixo e acima de 1 pu, as duas possibilidades conseguiram levar o indicadores de desequilíbrio de tensão para valores abaixo dos limites estabelecidos pela NEMA e IEC com uma onda de alta qualidade, em torno de 0,5% de DHT.

Assim, com as avaliações realizadas, conclui-se que para mitigação de tensões desequilibradas com baixa distorção harmônica de tensão, é recomendado a utilização da tensão quase-senoidal.

Capítulo 6

Conclusões e Propostas de Continuidade

Este capítulo tem como finalidade apresentar as principais conclusões a respeito da tese sobre a utilização do CST em onda quadrada. Além disto, necessário um indicativo de continuidade de trabalho, visto haver alguns pontos que necessitam de maiores estudos.

A pesquisa de Compensadores Série de Tensão é realizada há, mais ou menos, 15 anos. Várias topologias foram propostas. A maioria sintetizava a onda a ser injetada através da modulação por largura de pulso, em alta frequência. Entretanto, no projeto de conversores de potência, parte especial é dedicada para as perdas de chaveamento. Seguindo com esta análise, uma topologia que havia sido pouco explorada (apenas uma referência), foi a injeção por tensão em onda quadrada. Com esta escolha, as perdas por chaveamento seriam minimizadas e o filtro de saída eliminado. Porém, duas questões deveriam ser respondidas:

1. Se o uso de injeção de tensão em onda quadrada mitiga afundamentos;
2. Qual o ganho, em termos de custo e funcionalidade, comparado com o CST convencional.

O uso da injeção em onda quadrada causa certa desconfiança quando levado em conta argumentos como piora da distorção harmônica de tensão. Entretanto, o afundamento de tensão é um fenômeno de curta duração (centenas de milisegundos). O foco da proteção de cargas elétricas é fazer com que estas permaneçam continuamente ligadas para não afetar o processo produtivo no qual estão inseridas. Se a onda de tensão, neste curto intervalo de tempo, estiver muito distorcida mas ainda assim conseguir proteger a carga, a distorção harmônica pouco importará neste momento. Assim, a melhor forma de mitigação é a solução de menor custo possível.

Esta tese teve como objetivo trazer resposta a estas questões. Em primeiro lugar, provou-se que a injeção de tensão por onda quadrada soluciona o problema do afundamento de tensão, principalmente para cargas eletrônicas, as mais sensíveis em um ambiente industrial. Dentre as topologias propostas neste trabalho, conseguiram-se economias na estimativa de custos de 5% e 23%, comparados com a solução convencional. Outro resultado obtido foi que, utilizando onda quadrada no compensador série de tensão, é possível controlar o mesmo com um simples circuito analógico, formado por comparadores.

Além deste uso para a mitigação de afundamentos de tensão, prosseguiu-se a investigação a fim de eliminar desequilíbrios de tensão através da compensação em onda quadrada. Através da topologia multinível em cascata, percebeu-se que a compensação por meio da onda quadrada elimina os desequilíbrios, mas com conteúdo harmônico alto. Como este problema de qualidade de energia é um problema de regime permanente, necessário foi investigar a síntese de uma outra forma de onda, ainda em baixa frequência: a quase-senoidal. Nesta, há a mitigação dos desequilíbrios de tensão com uma baixa distorção harmônica, da ordem de 0,5%.

6.1 Propostas de continuidade

Alguns estudos aqui apresentados foram realizados apenas em simulação. Sendo assim, necessário montagem de protótipos para avaliação de algumas propostas. Será possível, portanto, coletar resultados experimentais para comprovação da mitigação de desequilíbrios de tensão utilizando tensão em onda quadrada.

O D^2ips , na parte de injeção de tensão, é constituído por 3 inversores monofásicos, com transformadores shunt, barramento c.c. e filtro de saída. Propõe-se a troca de uma topologia monofásica por uma com retificador controlado e transformador com *taps*, além da injeção em onda quadrada. Será possível, com esta mudança, uma avaliação comparativa entre as topologias convencional e onda quadrada, em termos de desempenho e volume, fator que merece maior consideração.

Há uma tendência de miniaturização das soluções em engenharia para ganho de espaço. Portanto, cabe uma avaliação do uso de transformadores *shunt* de alta frequência para compactação do CST em onda quadrada, em termos de viabilidade econômica e ganho de densidade de potência.

Algumas cargas protegidas pelo CST em onda quadrada devem ser analisadas por meio de testes experimentais, tais como contadores, inversores de frequência e máquinas rotativas.

Apêndice A

Gerador de Afundamento

Para os testes de compensação e estudo de susceptibilidade das cargas elétricas, montou-se um gerador de afundamento. Consiste na comutação entre duas fontes de tensão, uma nominal e outra de menor tensão, conforme descrito em IEEE 1346-1998 [64]. A figura A.1 apresenta a estrutura utilizada no gerador.

Para o controle de tempo, foi utilizado um microcontrolador PIC16F877A. Este elemento em conjunto com um gerador de pulsos envia o trem de pulsos para a chave 1 que conduz a tensão nominal até que o usuário aperte um botão, tendo previamente escolhido o tempo de afundamento desejado, para se aplicar a tensão de menor valor. Assim, é cortado o trem de pulsos da chave 1 e aplicado na chave 2 da fonte de tensão menor até o término do afundamento, voltando à condução da chave 1. O tempo pode ser variado entre 0 e 999 ms.

A chave estática 1 somente permite a condução da chave estática 2 quando sua tensão e corrente vão a zero. No instante em que ocorre o fim do tempo de geração de afundamento, a chave estática 1 corta a chave estática 2 por comutação forçada. Esta mesma concepção é apresentada em [65]. O varivolt utilizado é de 5 kVA e as chaves estáticas eram módulos tiristores Semikron SKKT 57. As figuras A.2, A.3 e A.4 mostram o gerador de afundamento montado.

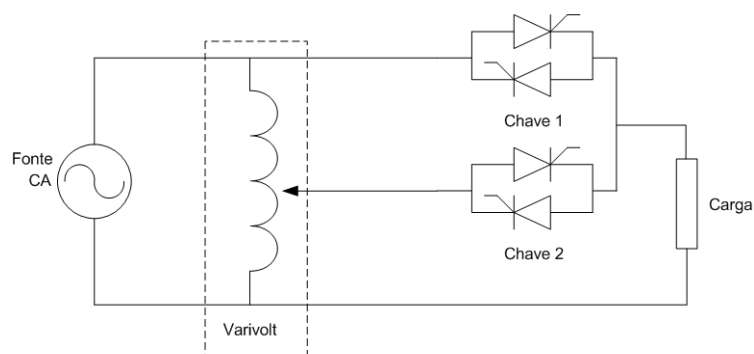


Figura A.1: Gerador de Afundamento - versão monofásica



Figura A.2: Gerador de Afundamento

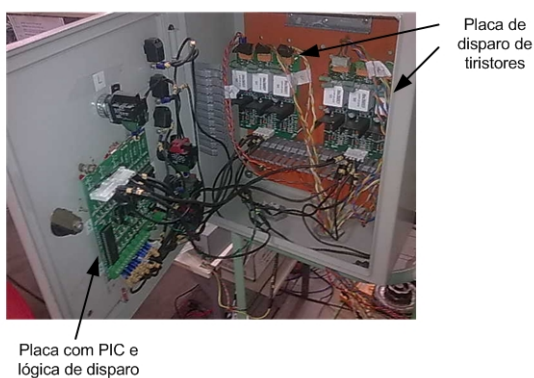


Figura A.3: Gerador de Afundamento: placa com PIC e lógica de disparo, e placa de disparo de tiristores

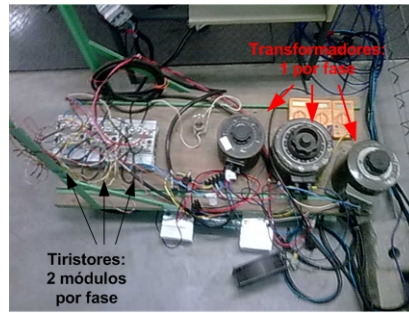


Figura A.4: Gerador de Afundamento: Tiristores e transformadores monofásicos

A.1 Curvas de Susceptibilidade

De posse do gerador de afundamento, algumas cargas foram testadas: dois computadores, dois CLPs e um contator. Os resultados são mostrados a seguir.

A.1.1 Computador 1

O computador 1 possui as seguintes características: Pentium 4, 3,2 GHz, 512Mb, HD 80Gb e fonte ATX Maxtor STRM380211AS de 450W. Os testes de afundamento mostraram que este PC suporta até 72% de afundamento para qualquer duração. Abaixo deste valor de afundamento, a suportabilidade da máquina passa a ser de apenas 1 ciclo de duração. As figuras A.5 e A.6 mostram as formas de onda da fonte de tensão ATX do microcomputador submetida a dois afundamentos: 0,7 pu e 0,4 pu.

Nas figuras, visualiza-se a onda de tensão de entrada com afundamento, tensão esta proveniente do gerador de afundamento, a tensão do barramento de corrente contínua e a corrente de alimentação do processador. Esta corrente foi coletada através de um alicate amperímetro no cabo de alimentação de 3,3V da placa mãe. Após o início do afundamento, entre 1 ciclo e 1,5 ciclo a fonte consegue ainda suprir a potência necessário ao computador. Após isto, há um reset no mesmo, conforme visualizado na queda abrupta da corrente no processador.

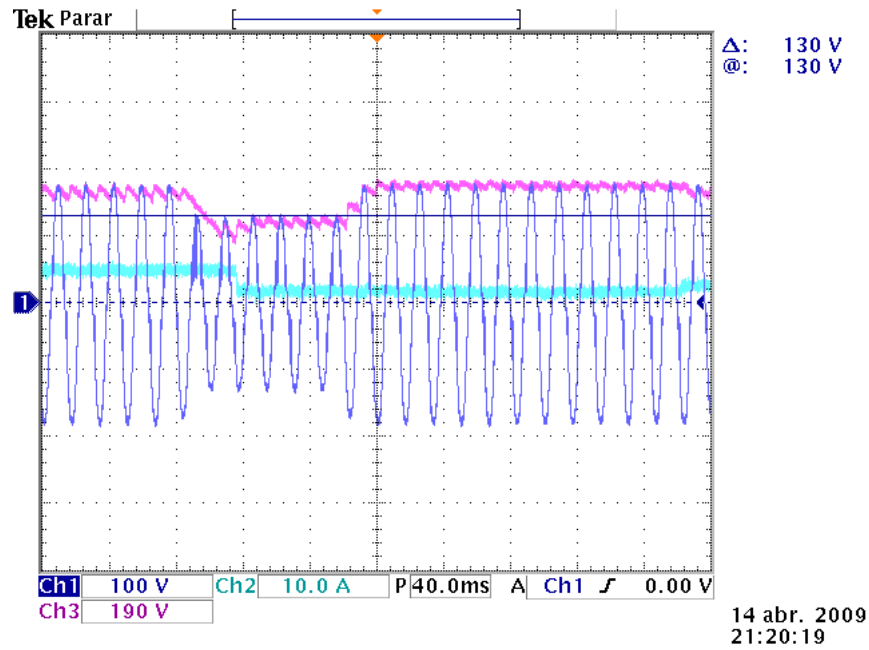


Figura A.5: Computador 1 submetido a 0,7 pu da afundamento - Azul escuro: Onda de tensão de entrada; Rosa: Barramento CC da fonte ATX do PC; Azul claro: corrente de alimentação do processador

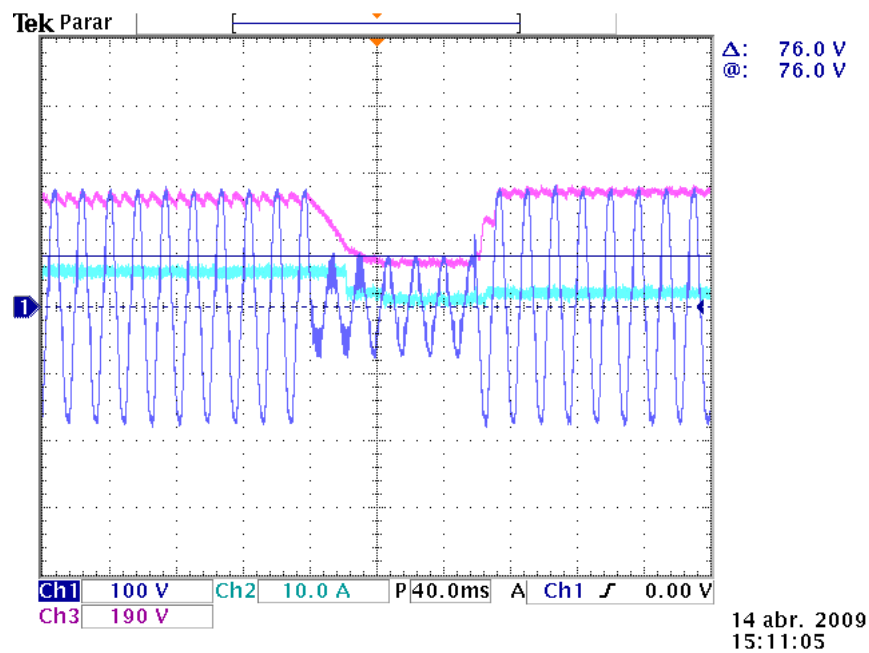


Figura A.6: Computador 1 submetido a 0,4 pu da afundamento - Azul escuro: Onda de tensão de entrada; Rosa: Barramento CC da fonte ATX do PC; Azul claro: corrente de alimentação do processador

A.1.2 Computador 2

O segundo computador testado foi um Pentium 4, 1,6 GHz, 256MB e HD de 40Gb. A fonte era também de 450W, marca Di Quan modelo LC-8460BTX. Neste PC, a suportabilidade foi até 40%, independente da duração do afundamento. Abaixo deste valor a duração da susceptibilidade fica entre 5,5 ciclos e 6 ciclos.

A.1.3 PLC 1

O primeiro PLC testado foi uma máquina da Siemens, modelo Simatic SS 101U. O modelo testado possui 20 entradas e 12 saídas em relé. Sua alimentação era em 220V. A figura A.7 apresenta a sensibilidade deste PLC para três situações de funcionamento do PLC:

1. Todas saídas fechadas
2. Metade das saídas fechadas
3. 1 saída fechada

O efeito que o afundamento provocou foi um repique nos relés de saída: eles abriam e fechavam. Como era de se esperar, a situação com todas as saídas fechadas é a mais susceptível ao afundamento de tensão: seu religamento iniciava com um afundamento de 0,86 pu com duração de 300ms até 0,63 pu em 40 ms. Dentre a grande parte dos afundamentos, com profundidades até 0,6 pu, pode-se afirmar que a probabilidade deste CLP desligar é muito grande.

A.1.4 PLC 2

O segundo PLC submetido ao gerador de afundamento era da fabricante WEG, modelo Clic 02 - CLW 02/10HR-A. Este modelo possui 6 entradas e 4 saídas em relé. É um CLP

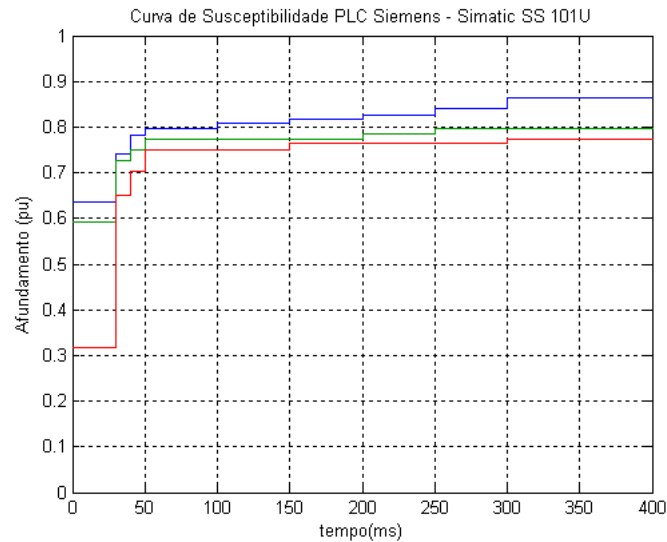


Figura A.7: Curva de susceptibilidade PLC Siemens: Azul - Todas saídas fechadas; Verde - metade das saídas fechadas; Vermelho - 1 saída fechada

de pequeno porte, sendo o de menor tamanho dentro a gama comercializada pela WEG. É chamado também de relé programável. Os testes de afundamento foram realizados com todas as saídas acionadas, visto que a diferença de consumo de corrente com nenhuma ou todas saídas fechadas é de apenas 5 mA ante um consumo nominal de 90 mA. Sua alimentação é bivolt podendo ter uma variação entre 85-264 Vca. A figura A.8 traz a curva de susceptibilidade deste PLC. Foram executadas dois testes: com alimentação em 127V e 220V.

Na figura A.8 além dos resultados das diferentes tensões de alimentação, dois gráficos são apresentados: um em que o eixo y foi indicado pela tensão eficaz de alimentação e outro gráfico em que o eixo y está em valores pu em relação à tensão de alimentação. Os dois foram apresentados porque o valor absoluto de tensão em que o PLC abre suas saídas é o mesmo, variando os tempos conforme o valor da tensão de alimentação. Assim, em valores pu, vê-se que a susceptibilidade em 220V é muito baixa, sendo que o CLP, alimentado neste valor, dificilmente sofrerá algo dentre os afundamentos mais comuns. A explicação desta diferença está na energia armazenada no capacitor da fonte c.a.-c.c. de entrada do CLP

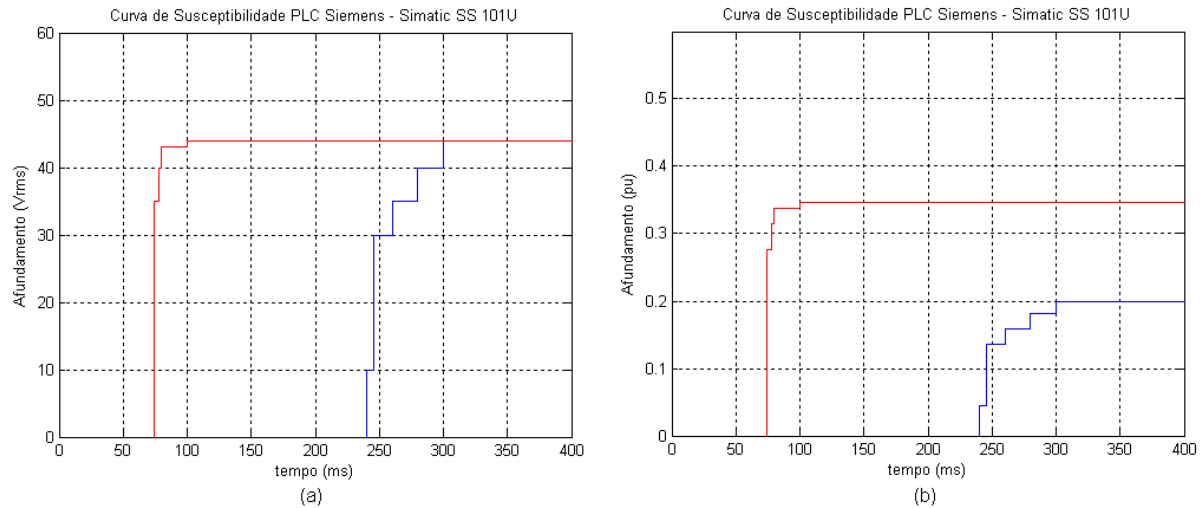


Figura A.8: Curva de susceptibilidade PLC WEG: (a) eixo y em Valor eficaz de tensão (Vrms) e (b) eixo y em valor pu de tensão; Azul - alimentação em 220 V; Vermelho - alimentação em 127 V

sendo maior quando alimentado em 220 V. Estes gráficos também servem para confirmar recomendações em equipamentos eletrônicos bivolt: para diminuir a susceptibilidade basta trocar a alimentação de 127V para 220V. O efeito do afundamento neste CLP é o mesmo citado no CLP 1: repique no relé de saída.

A.1.5 Contator

O contator testado foi o 3TFF4211-0A da Siemens. Sua alimentação é em 220V. Nos testes realizados, até 0,6 pu não há efeito algum. A partir deste valor, ouve-se a bobina do contator repicando sem entretanto abrí-la. Somente a partir de 0,52 pu, dependendo do tempo de aplicação, há uma abertura do contator, voltando a fechá-lo no retorno da tensão. Para a construção da curva de susceptibilidade considerou-se apenas os instantes em que o contator abria. A figura A.9 apresenta os resultados obtidos.

Várias referências mostram resultados bastante parecidos com os apresentados em [22] e [66]. O contator testado mostrou não ser tão sensível ao afundamento, apesar de não

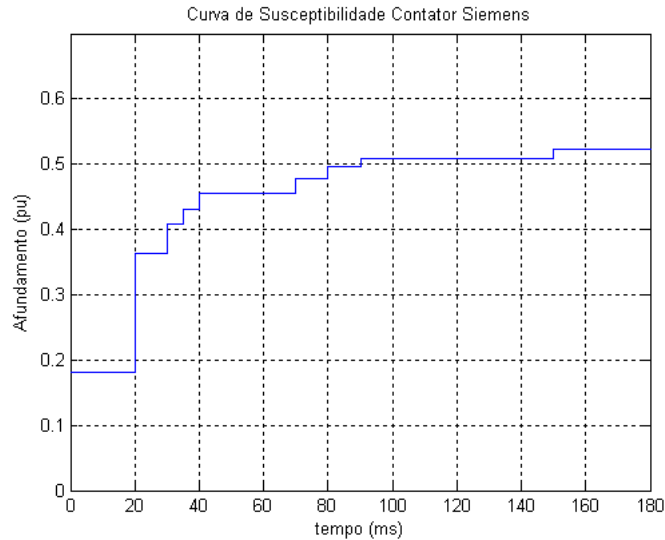


Figura A.9: Curva de susceptibilidade Contator Siemens

trabalhar sozinho em um sistema de acionamento. Pode, muitas vezes, ser acionado por um CLP sensível.

A.2 Testes em Equipamentos de Proteção a Afundamento de Tensão

Com o objetivo de conhecer o funcionamento e testar os equipamentos vendidos comercialmente como solução para proteção à variações de tensão, principalmente de microcomputadores, dois estabilizadores de tensão e dois nobreaks foram testados visando a proteção do computador 1.

A.2.1 Estabilizador de tensão

Os estabilizadores de tensão são constituídos por um transformador com dois *taps* diferentes comutando quando seu sistema de controle percebe alguma alteração no rede de alimentação. São vendidos como equipamentos indispensáveis para o funcionamento do microcomputador

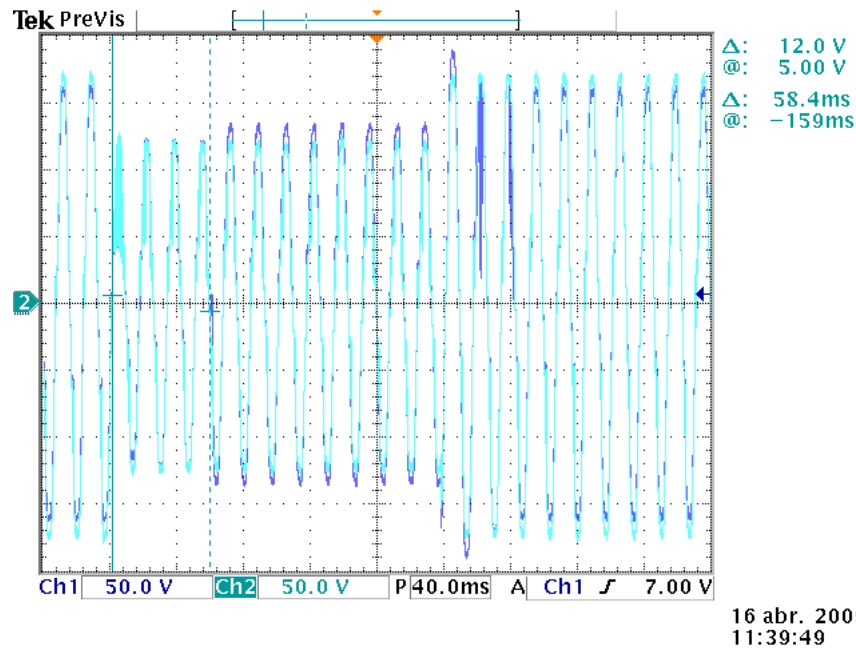


Figura A.10: Funcionamento estabilizador ForceLine: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída

sendo que alguns afirmam proteger contra subtensões, termo utilizado por diversas marcas.

Dois modelos foram testados: Forceline (modelo evolution II M-921 300VA) e SMS (modelo uRE 1.5s 115v 300VA). O teste foi submeter o computador 1 à afundamentos de tensão protegido pelos estabilizadores de tensão.

O estabilizador Forceline não modificou a susceptibilidade do micro enquanto o estabilizador SMS piorou: subiu a sensibilidade de 0,7 pu para 0,78 pu de sensibilidade. As figuras A.10 e A.11 mostram o funcionamento dos estabilizadores na presença do afundamento de tensão. Nas figuras percebe-se um tempo em torno de 50 ms da comutação entre um *tap* e outro do transformador. Porém, o acréscimo não é suficiente para proteção do computador à afundamentos, além do tempo de aplicação deste acréscimo ser maior que a suportabilidade do computador investigado.

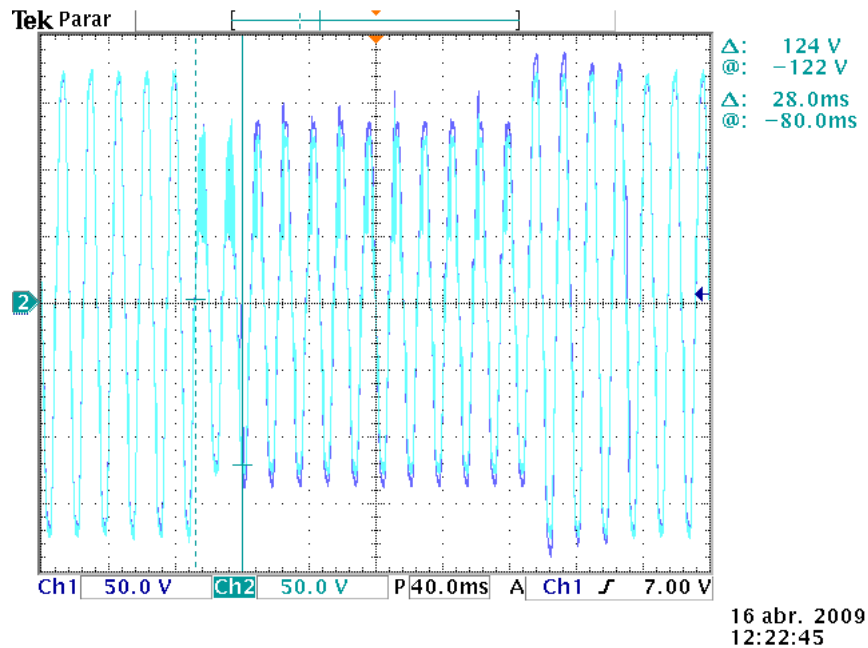


Figura A.11: Funcionamento estabilizador SMS: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída

A.2.2 Nobreak 1

O nobreak 1 era da marca SMS, modelo Net Station uST600SFX115RMS de 600 VA. Do manual do usuário, no capítulo 4 - *Características gerais*, alguns itens são aqui transcritos:

1. *Nobreak interativo e com regulação on-line, saída estabilizada mesmo durante o fornecimento de energia através de bateria;*
2. *Proteção contra subtensão e sobretensão de rede elétrica. Na ocorrência destes eventos o nobreak passa a operar em modo bateria;*

O teste realizado no nobreak foi o mesmo para os estabilizadores: proteção do computador

1. As figuras A.12 a A.14 trazem os resultados deste teste. Os afundamentos aplicados foram de 0,30, 0,55 e 0,63 pu.

As figuras ilustram o funcionamento do nobreak. Até 0,6 pu, o nobreak funciona como um estabilizador. A figura A.14 ilustra esta fato: a forma de onda na saída é senoidal e há

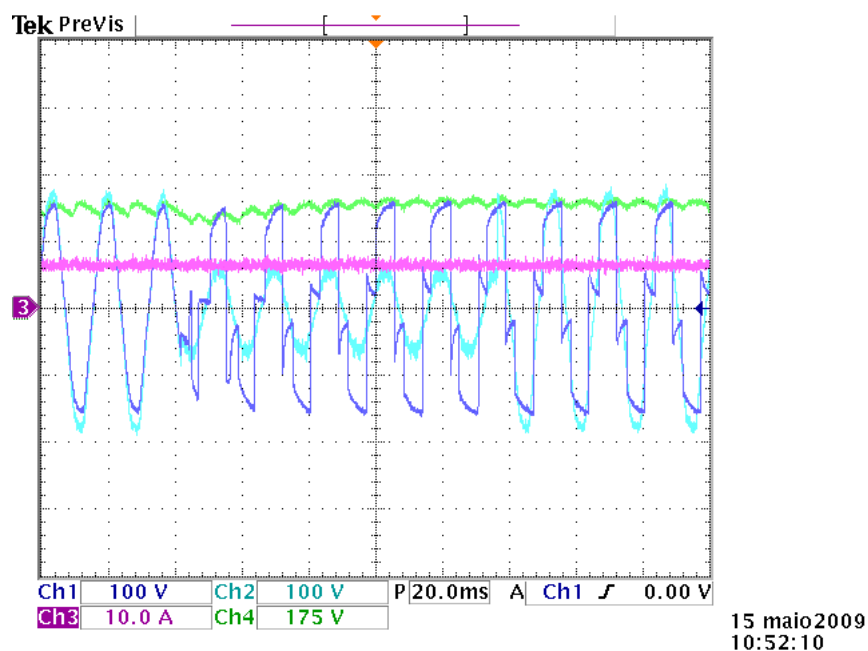


Figura A.12: Nobreak SMS submetido a afundamento de 0,30 pu: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída; rosa - corrente do precessador; verde - tensão barramento CC

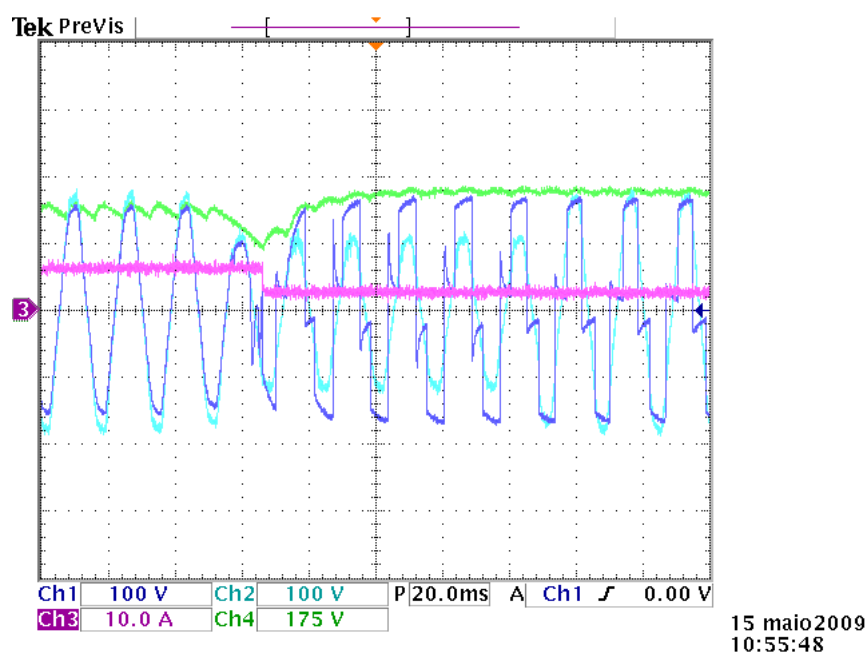


Figura A.13: Nobreak SMS submetido a afundamento de 0,55 pu: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída; rosa - corrente do precessador; verde - tensão barramento CC

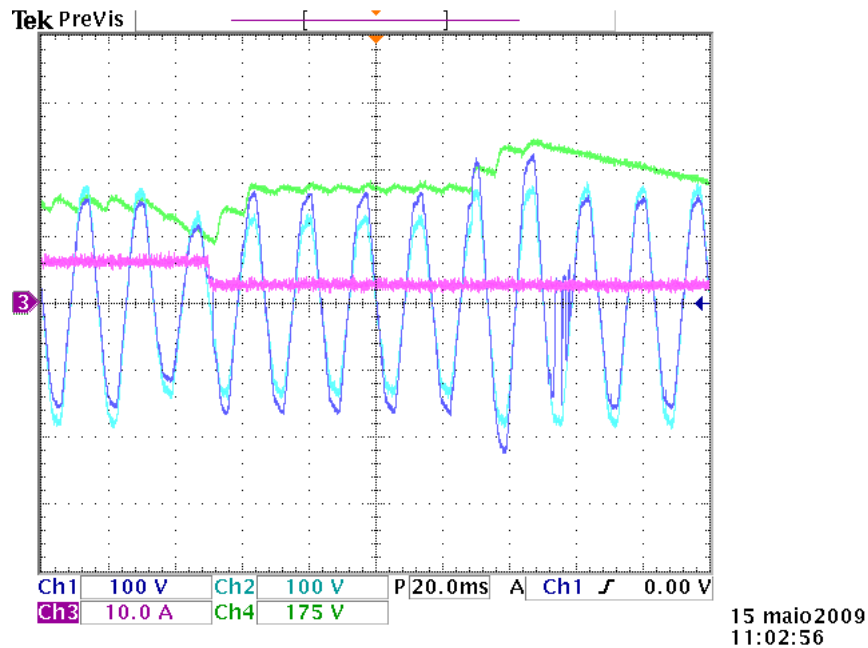


Figura A.14: Nobreak SMS submetido a afundamento de 0,63 pu: azul claro - tensão de entrada; azul escuro - tensão de saída; rosa - corrente do processador; verde - tensão barramento CC

uma sobretensão fornecida ao computador na volta ao valor nominal na tensão de entrada. Este transitório de comutação entre o tap dos transformadores é insuficiente para proteção do microcomputador, fenômeno também observado nos estabilizadores analisados. Destacando mais uma vez, o reset do PC é visualizado pelo decaimento na corrente do processador.

Outra característica observada é que a função nobreak, ou seja, fornecimento de tensão a partir da bateria, somente ocorre para afundamentos abaixo de 0,6 pu. Este fenômeno pode ser observado na figura A.13. Porém, o transitório de entrada da tensão fornecida pelo nobreak não é suficiente para proteger o computador.

Somente abaixo de 0,4 pu é que o aparelho da SMS consegue proteger o PC. A figura A.12 apresenta esta conclusão: para um afundamento de 0,3 pu o computador não resetou.

Outra importante observação é que a forma de onda na saída é quadrada, consegue proteger o microcomputador, desde que sua entrada se dê em um tempo adequado. Este fato corrobora a tentativa em se construir um restaurador de tensão em onda quadrada para

proteção de cargas eletrônicas.

A.2.3 Nobreak 2

O Nobreak 2 testado era da marca Engetron, modelo SEN 610 de 600 VA. Neste caso, para qualquer afundamento, o nobreak protegeu o computador 1.

Referências Bibliográficas

- [1] T. Jimichi, H. Fujita, and H. Akagi. A dynamic voltage restorer equipped with a high-frequency isolated dc-dc converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 47, No. 1, January/February 2011.
- [2] S. M. Hietpas and M. Naden. Automatic voltage regulator using an ac voltage - voltage converter. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 4, pages 2881-2885, jan. 2000.
- [3] O. C. Montero-Hernández and P. N. Enjeti. Application of a boost ac-ac converter to compensate for voltage sags in electric power distribution systems. *IEEE PESC - Power Electronics Specialists Conference*, vol. 1, pages 470-475, jun. 2000.
- [4] A. Prasai, N. Kelkar, and D. Divan. Zero energy storage voltage sag correctors for industrial applications. *PESC - Power Electronics Specialists Conference, 2007*, pages 3086-3091, 17-21 June 2007.
- [5] S. Lee, H. Cha, and B.M. Han. A new single-phase voltage sag/swell compensator using direct power conversion. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, september, 2009, San Jose, CA - USA.

- [6] K.W.E Cheng et alli. Investigation of voltage dip restorer using squarewave inverter. *30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, pp. 204-208, 2004.
- [7] Weg Automação S.A. *CFW 09 - Inversores de Frequência*. Weg, 2007.
- [8] W.E. Brumsickle, R. S. Scheneider, G. A. Luckjiff, D. M. Divan, and M. F. McGranaghan. Dynamic sag correctors: Cost-effective industrial power line conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, january/february 2001.
- [9] M. F. McGranaghan, D. R. Mueller, and M. J. Samotyj. Voltage sags in industrial systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 29, no. 2, pp 397-403, march/april 1993.
- [10] D. Hongfa, G. Jun, and D. Xianzhong. New concepts of dynamic voltage restoration for three-phase distribution systems. *Power Engineering Society Summer Meeting*, vol. 3, pp 1427-1432, 2000.
- [11] J. J. A. Leitão and L. B. Reis. Avaliação econômica das perdas por distúrbios na rede básica. *V Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica*, vol. 2, pp. 495-502, 2003.
- [12] C. H. N. Magalhães, M. R. Gouveia, F. A. T. Silva, C. M. V. Tahan, and L. G. C. A. Filho. Avaliação do custo social de interrupção do fornecimento de energia elétrica do lado da demanda do estado de são paulo. *XVI Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica*, outubro, 2001.
- [13] IEEE std. 1159-1995. Ieee recommended practice for monitoring electric power quality. 1995.

- [14] Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - prodist. 16/12/2008.
- [15] A. L. L. Filho, M. A. de Oliveira, and M. G. S. Pinto. Ferramenta computacional para quantificação e qualificação do desequilíbrio de tensão. *VI SBQEE - Seminário Brasileiro de Qualidade da Energia Elétrica*, 2005.
- [16] N.H. Woodley, L. Morgan, and A. Sundaram. Experience with an inverter-based dynamic voltage restorer. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 14, no. 3, july 1999.
- [17] S. M. Silva and B. J. C. Filho. Component-minimized voltage sag compensators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 2, pages 883-889, 2002.
- [18] S. M. Silva, A. B. Marques, and E. F. M. Sato e M. F. Braga. Dispositivo para proteção de contadores contra as variações momentâneas de tensão: Aplicação e estudo de confiabilidade. *III PCIC BR - Petroleum and Chemical Industry Conference Brasil*, 15 e 16 de setembro de 2010 - Rio de Janeiro - RJ.
- [19] SoftSwitching Technologies. <http://www.softswitch.com>. acessado em 28/01/2009.
- [20] J. Y. Chan, J. V. Milanovic, and A. Delahunty. Risk-based assessment of financial losses due to voltage sag. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 26, no. 2, april 2011.
- [21] Z. Ding, Y. Zhu, and C. Chen. Economic loss assessment of voltage sags. *China International Conference on Electricity Distribution*, 2010.
- [22] M.H.J. Bollen. *Understanding Power Quality Problems: Voltage Sags and Interruptions*. IEEE Press, 1999.
- [23] S. E. da Silveira. *Restauradores Dinâmicos de Tensão em Sistemas com Baixa Capacidade de Curto Circuito*. Dissertação de mestrado - PPGEE/UFGM, 2005.

- [24] S. M. Silva. *Estudo e Projeto de um Restaurador Dinâmico de Tensão*. Dissertação de mestrado - PPGEE/UFMG, 2000.
- [25] L. M. L. Starling, F. D. Oliveira, S. M. Magalhães, and B. J. Cardoso Filho. Operation of a dynamic voltage restorers without zero sequence compensation capability. *9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, october, 2010, São Paulo, SP - Brasil.
- [26] X. Lei, D. Retzmann, and M. Weinhold. Improvement of power quality with advanced power electronic equipment. *IEEE Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, pages 437-442, april 2000.
- [27] Vectek Electronics. <http://www.vectek.co.nz>. acessado em 29/01/2009.
- [28] S. M. Silva. *Análise e Implementação de um Restaurador Dinâmico de Tensão*. Tese de Doutorado - PPGEE/UFMG, 2003.
- [29] R. S. Schneider and W. S. Brumsickle. Patent no. us 7,920,392 b2. *United States Patent*, april 5, 2011.
- [30] J. G. Nielsen and F. Blaabjerg. A detailed comparison of system topologies for dynamic voltage restorers. *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, No. 5, September/October 2005.
- [31] P.C. Lo et alli. Multilevel dynamic voltage restorer. *IEEE Power Electronics Letters*, vol. 2, pages 125-130, dec. 2004.
- [32] M. Becker and T. Mouton. Transformerless series dip/sag compensation with ultracapacitors using a new multilevel boost dc-to-ac topology. *IEEE PESC - Power Electronics Specialists Conference*, pages 2257-2263, une. 2005.

- [33] Power Quality Solutions Inc. <http://www.pqsi.com/cvts.html>. acessado em 11/12/2008.
- [34] A. R. R. R. Moreira, W. D. Caetano, I. A. Pires, and A. V. da Silva. Compensador série de tensão em onda quadrada com conversor c.c.-c.c. de alta frequência. *e-xacta Revista Científica do Departamento de Ciências Exatas e Tecnologia do Uni-BH*, vol. 4, n.1, 2011.
- [35] I. A. Pires and B. J. Cardoso Filho. Cost effective voltage sag mitigation using square-wave series compensators. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, september, 2009, San Jose, CA - USA.
- [36] I. A. Pires and B. J. Cardoso Filho. Compensadores série de tensão. *Confereência Brasileira de Qualidade de Energia Elétrica*, agosto, 2009.
- [37] I. A. Pires, B. J. Cardoso Filho, and S. M. Silva. Compensador série de tensão em onda quadrada para mitigação de afundamentos de tensão. *Revista da Sociedade Brasileira de Automática*, 2011.
- [38] ANSI C84.1. *Electric Power Systems and Equipment Voltage Ratings (60 Hz)*. Ansi, 2006.
- [39] IEEE std 1250. *IEEE Guide for service to equipment sensitive to momentary voltage disturbances*. IEEE, 1995.
- [40] L. V. Kolev. *Interval methods for Circuit Analysis*. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 1993, 1993.
- [41] Eletric Power Research Institute (EPRI). Distribution system power quality assesment: Phase ii. voltage sags and interruption analysis. *IEEE Industrial Application Society 52nd Petroleum and Chemical Industrial Conference*, Knoxville, TN, USA, 2005.

- [42] B. M. Lopes. *Compensadores Série de Baixa Tensão: Topologias, Técnicas de Projeto e Viabilidade Econômica*. Dissertação de mestrado - PPGEE/UFGM, 2006.
- [43] B. M. Lopes et alli. Dispositivos estáticos de compensação série de baixa tensão com transformador shunt: Custos versus funcionalidade. *Eletrônica de Potência*, vol. 11, no 1, março de 2006.
- [44] L. N. Arruda et alli. Pll structures for utility connected systems. *Thirty-Sixth IAS Annual Meeting Industry Applications Conference*, 30 setembro 2001.
- [45] S. M. Silva et alli. Performance evaluation of pll algorithms for single-phase grid-connected systems. *IEEE Industrial Application Society Annual Meeting*, 2004.
- [46] I. A. Pires, B. J. Cardoso Filho, and S. M. Silva. Design aspects of a square-wave series voltage compensator. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 2011.
- [47] F. Mihalic and D. Kos. Reduced conductive emi in switched mode dc/dc power converters without emi filters: Pwm versus randomized pwm. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 6, november 2006.
- [48] Farnell Newark. <http://www.farnell.com>. acessado em 13/04/2010.
- [49] S.W. Jeong, G.J. Lee, and J.H. Gim. The study on the characteristics of operating limits of ac contactor during voltage sag. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Asia and Pacific*, 2009.
- [50] H. Shareef et. alli. Experimental investigation of ac contactor ride through capability during voltage sag. *9th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 16-19 May 2010.

- [51] P. C. Krause et alli. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems*. Wiley InterScience, 2nd edition - 2002.
- [52] J.C. Gomez, M.M. Morcos, C. Reineri, and G. CAmpetelli. Induction motor behavior under short interruptions and voltage sags. *IEEE Power Engineering Review*, pages 11-15,feb 2001.
- [53] L. Guasch, F. Córcoles, and J. Pedra. Effects of symmetrical and unsymmetrical voltage sags on induction machines. *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 19, issue 2, pages 774-782 ,april 2004.
- [54] D. W. Novotny and T. A. Lipo. *Vector Control and Dynamics of AC Drives*. Oxford University Press, 1996.
- [55] F. Hassan and R. Critchley. Pll structures for utility connected systems. *14th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2010*.
- [56] High Power Engineering. www.hpeonline.com.br. acessado em 15/04/2011.
- [57] National Electrical Manufacturers Association. *Motors and Generators - MG 1*. NEMA, 2006.
- [58] IEEE std 112. *IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators*. IEEE, 2004.
- [59] International Electrotechnical Commission. *Effects on Unbalanced Voltages on the Performance of Induction Motors*. IEC, 2002.
- [60] W. H. Kersting. The modeling and application of step voltage regulators. *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 2009.

- [61] I. A. Pires, B. J. Cardoso Filho, and J. C. de Oliveira. A series voltage regulator based on quasi-sinusoidal waveform to achieve smart-grid requirements. *Industrial Application Society Annual Meeting*, 2010.
- [62] I. A. Pires, B. J. Cardoso Filho, and J. C. de Oliveira. Uma proposta para a compensação de desequilíbrios em redes elétricas via conversores multiníveis com injeção série de tensão. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2010.
- [63] IEEE std 519. *IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. IEEE, 1992.
- [64] IEEE std. 1346-1998. Ieee recommended practice for evaluating electric power system compatibility with electronic process equipment. 1998.
- [65] Y. Ma and G.G. Karady. A single-phase voltage sag generator for testing electrical equipments. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition 2008*, pp. 1-5, 21-24 April 2008.
- [66] S. Hardi, I. Daut, and M. Irwanto. Testing of contactors under voltage sag and non-sinusoidal voltage conditions. *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon2010)*, Nov 29 - Dec 1, 2010.