

RUBENS TADEU HOCK JÚNIOR

**REGULADOR DE TENSÃO MÓVEL CONTROLADO EM
TENSÃO COM RASTREAMENTO DO PONTO DE MÍNIMA
POTÊNCIA APARENTE**

Dissertação apresentada ao Curso de
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
do Centro de Ciências Tecnológicas,
da Universidade do Estado de Santa
Catarina, como requisito parcial para a
obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Luiz
Batschauer

Coorientador: Prof. Dr. Yales Rômulo
de Novaes

JOINVILLE

2015

H685r

Hock Junior, Rubens Tadeu

Regulador de tensão móvel controlado em tensão com rastreamento do ponto de mínima potência aparente / Rubens Tadeu Hock Junior . – 2015.
197 p. : il. ; 21 cm

Orientador: Alessandro Luiz Batschauer

Bibliografia: p. 175-180

Dissertação (mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Tecnológicas, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Joinville, 2015.

1. Regulação de tensão. 2. Compensador estático de reativos. 3. DSTATCOM.
4. Rastreador do ponto de mínima potência. I. Batschauer, Alessandro Luiz. II. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD: 621.3 - 23. ed.

RUBENS TADEU HOCK JÚNIOR
REGULADOR DE TENSÃO MÓVEL CONTROLADO EM
TENSÃO COM RASTREAMENTO DO PONTO DE MÍNIMA
POTÊNCIA APARENTE

Dissertação apresentada ao Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica na área de concentração "Sistemas Eletroeletrônicos".

Banca Examinadora

Orientador:



Prof. Dr. Alessandro Luiz Batschauer
CCT/UDESC

Membros



Prof. Dr. Marcello Mezaroba
CCT/UDESC



Prof. Dr. Roger Gules
UTFPR

Joinville, SC, 24 de fevereiro de 2015.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Rubens e Salete, por proporcionarem a mim, assim como a minha irmã Daniella, a melhor educação possível dentro das suas possibilidades.

Ao professor Batschauer pela amizade, pelos ensinamentos e pela confiança no meu trabalho.

Ao professor Yales pelas contribuições de grande valia para o desenvolvimento desse projeto.

Ao professor Joselito por fornecer o código base utilizado no DSP, responsável por uma economia valiosa de tempo e esforço.

Aos professores do nPEE que contribuíram no meu desenvolvimento durante as disciplinas ministradas e pelas dúvidas sanadas.

Aos colegas do curso de pós-graduação pelas longas discussões geradas nesses dois anos e pelo companheirismo.

Aos demais integrantes do nPEE pela ajuda prestada nas diversas tarefas.

À Supplier pela ajuda material para a realização desse trabalho.

À FAPESC e à FITEJ pela contribuição na aquisição de materiais e equipamentos.

À CELESC, pela bolsa de estudos cedida e sem a qual não seria possível me ausentar para a participação em congressos.

“O máximo que você fez é o
mínimo que esperam de você”

Rubens Tadeu Hock Júnior

RESUMO

Esse trabalho apresenta um regulador de tensão móvel baseado em um compensador estático de reativos (DSTATCOM) aplicado a redes de distribuição de baixa tensão. O DSTATCOM consiste em um inversor trifásico a quatro fios conectado à rede através de um filtro de segunda ordem. A estrutura de controle é composta por três malhas de tensão de saída com amortecimento ativo e duas malhas de tensão do barramento cc. Em adição, um novo conceito de rastreamento da mínima potência (mPPT) é introduzido, forçando o DSTATCOM a operar com a mínima potência. Em certas ocasiões, isso significa nenhuma compensação. Os modelos dinâmicos do conversor são apresentados, assim como o projeto de controle. Resultados de simulação mostram a capacidade de regulação da tensão e as características do mPPT, mesmo com desequilíbrios na rede e/ou na carga e com cargas não lineares. O trabalho é concluído com a construção de um protótipo de 30 kVA e validação dos estudos através de resultados experimentais obtidos comprovam o bom funcionamento do regulador de tensão.

Palavras-chave: Regulação de tensão. Compensador estático de reativos. DSTATCOM. Rastreador do ponto de mínima potência

ABSTRACT

This paper presents a mobile voltage regulator based in a Distribution Static Synchronous Compensator (DSTATCOM) applied to low voltage distribution grids. The DSTATCOM consists in a three-phase four-wire inverter connected to the grid through a second order low pass filter. The control structure is composed of three output voltage loops with active damping and the two dc bus loops. In addition, a new concept of Minimum Power Point Tracking (mPPT) is introduced, forcing the DSTATCOM to operate with the minimum power. In certain conditions, this means no compensation. The dynamic models of the converter are presented, as well as the control design. Simulation results show the capacity of voltage regulation and the features of the mPPT, even under grid and load unbalances and nonlinear loads. This work is concluded with the construction of a 30 kVA prototype and validation through experimental results proves the proper functioning of the voltage regulator.

Key-words: Voltage regulation. Static synchronous compensator. DSTATCOM. Minimum power point tracker

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Sistema de distribuição	33
Figura 2 -	Modelo de um transformador	34
Figura 3 -	Arquitetura de uma rede real de distribuição de baixa tensão.....	36
Figura 4 -	Sistema de distribuição	37
Figura 5 -	Sistema de distribuição com o conversor conectado ao PAC	37
Figura 6 -	Circuito equivalente.....	37
Figura 7 -	Variação do ângulo de compensação em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2 \text{ pu}$, $\phi = 45^\circ$ e $V_r = 1 \text{ pu}$)....	39
Figura 8 -	Variação da potência reativa processada pelo inversor em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2 \text{ pu}$, $\phi = 45^\circ$ e $V_r = 1 \text{ pu}$)	40
Figura 9 -	Diagrama de blocos do controle por corrente	44
Figura 10 -	Diagrama de blocos do controle por tensão	45
Figura 11 -	Conversor meia ponte trifásico a quatro fios	46
Figura 12 -	Conversor NPC trifásico de três níveis	47
Figura 13 -	Conversor FC trifásico de três níveis.....	47
Figura 14 -	Conversor MMC trifásico de cinco níveis	48
Figura 15 -	Conversor CHB trifásico de cinco níveis	49
Figura 16 -	Estrutura de potência do DSTATCOM	50
Figura 17 -	Diagrama unifilar do DSTATCOM	51
Figura 18 -	Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle.....	56
Figura 19 -	Circuito monofásico	58
Figura 20 -	Tensão instantânea no ponto A.....	59
Figura 21 -	Modelo monofásico da tensão ca.....	59
Figura 22 -	Circuito monofásico equivalente	62
Figura 23 -	Circuito monofásico completo.....	66
Figura 24 -	Circuito monofásico simplificado.....	66
Figura 25 -	Diagrama de blocos completo do sistema de controle	69
Figura 26 -	Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da planta de tensão ca.....	71
Figura 27 -	Diagrama de blocos do controle de tensão ca e do amortecimento ativo	72
Figura 28 -	Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta para a malha de tensão amortecida e não amortecida, e da função de transferência em malha fechada para a malha de amortecimento.....	74

Figura 29 -	Diagrama de blocos do controle de tensão ca	74
Figura 30 -	Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão ca amortecida, do controlador de tensão ca e da função de transferência em malha aberta da tensão ca compensada	76
Figura 31 -	Diagrama de blocos do controle de tensão total do barramento cc	77
Figura 32 -	Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão total, do controlador de tensão total e da função de transferência em malha aberta da tensão total compensada	78
Figura 33 -	Diagrama de blocos do controle de tensão diferencial do barramento cc	79
Figura 34 -	Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão diferencial, do controlador de tensão diferencial e da função de transferência em malha aberta da tensão diferencial compensada	80
Figura 35 -	Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle com o mPPT	84
Figura 36 -	Diagrama de blocos completo do sistema de controle com o mPPT	85
Figura 37 -	Sistemática do mPPT	87
Figura 38 -	Pontos de mínima potência para carga nominal e carga leve respeitando os limitantes superior e inferior do mPPT ..	89
Figura 39 -	Frequência medida em uma unidade consumidora	91
Figura 40 -	Representação simplificada da obtenção do sinal para a medida da frequência da tensão do PAC	95
Figura 41 -	Diagrama funcional do DSTATCOM com a inclusão da compensação de frequência do PAC	96
Figura 42 -	Circuito de potência simulado	100
Figura 43 -	Circuito de controle simulado	101
Figura 44 -	Tensão do PAC com e sem compensação com carga pesada	102
Figura 45 -	Correntes injetadas pelo conversor com carga pesada	103
Figura 46 -	Tensões do barramento cc com carga pesada	103
Figura 47 -	Tensão do PAC com e sem compensação com carga leve ..	104
Figura 48 -	Correntes injetadas pelo conversor com carga leve	104
Figura 49 -	Formas de onda da tensão do PAC durante a desconexão de carga	105
Figura 50 -	Formas de onda da tensão do PAC durante a conexão de carga	106

Figura 51 -	Ação do controlador de tensão total durante a entrada e retirada de carga	106
Figura 52 -	Tensão do barramento cc durante a entrada e retirada de carga	107
Figura 53 -	Tensões da rede e do PAC com cargas desequilibradas	108
Figura 54 -	Correntes injetadas pelo conversor com cargas desequilibradas	108
Figura 55 -	Potência processada pelo conversor com cargas desequilibradas	109
Figura 56 -	Tensões do barramento cc com cargas desequilibradas.....	109
Figura 57 -	Ação de controle do barramento total com cargas desequilibradas	110
Figura 58 -	Retificador monofásico com filtro capacitivo	111
Figura 59 -	Tensão e corrente do retificador monofásico.....	112
Figura 60 -	Espectro harmônico da corrente do retificador monofásico.....	112
Figura 61 -	Tensões no PAC para uma carga não linear	113
Figura 62 -	Corrente no conversor para uma carga não linear	114
Figura 63 -	Corrente na carga não linear	114
Figura 64 -	Corrente na rede com carga não linear	115
Figura 65 -	Tensão do barramento cc para uma carga não linear	115
Figura 66 -	Circuito equivalente para circulação de corrente na frequência fundamental	116
Figura 67 -	Circuito equivalente para circulação de corrente nas componentes harmônicas.....	116
Figura 68 -	Formas de onda da tensão do PAC e da tensão da rede com distorção harmônica	117
Figura 69 -	Correntes injetadas pelo conversor com carga pesada e rede distorcida	118
Figura 70 -	Tensão da rede e do PAC em pu.....	119
Figura 71 -	Potência aparente das fases A, B e C para um distúrbio monofásico	120
Figura 72 -	Potência aparente das fases A, B e C para um distúrbio bifásico	121
Figura 73 -	Potência aparente das fases A, B e C para um distúrbio trifásico	121
Figura 74 -	Formas de onda da tensão do PAC e da tensão da rede com distúrbio de curta duração.....	122
Figura 75 -	Correntes injetadas pelo conversor com distúrbio de curta duração	123
Figura 76 -	Tensão do barramento total com distúrbios de curta duração	123

Figura 77 -	Formas de onda da tensão do PAC e da tensão da rede com interrupção momentânea	124
Figura 78 -	Correntes injetadas pelo conversor com interrupção momentânea	124
Figura 79 -	Tensão do barramento total com interrupção momentânea	125
Figura 80 -	Amplitude da tensão do PAC com carga pesada	126
Figura 81 -	Potência aparente processada pelo conversor com carga pesada	127
Figura 82 -	Tensão do barramento com carga pesada	127
Figura 83 -	Amplitude da tensão do PAC com carga leve.....	128
Figura 84 -	Potência aparente processada pelo conversor com carga leve.....	129
Figura 85 -	Tensão do barramento com carga leve.....	129
Figura 86 -	Amplitude da tensão do PAC com carga pesada e não linear	130
Figura 87 -	Potência aparente processada pelo conversor com carga nominal e não linear.....	130
Figura 88 -	Tensão do barramento com carga nominal e não linear	131
Figura 89 -	Amplitude da tensão do PAC com carga leve e não linear	131
Figura 90 -	Potência aparente processada pelo conversor com carga leve e não linear	132
Figura 91 -	Tensão do barramento com carga leve e não linear	132
Figura 92 -	Frequência da rede, do PAC e da referência de tensão sem a malha de frequência	133
Figura 93 -	Ângulo de compensação sem a malha de frequência	134
Figura 94 -	Tensão total do barramento cc sem a malha de frequência	134
Figura 95 -	Frequência da rede, do PAC e da referência de tensão com a malha de frequência	135
Figura 96 -	Ângulo de compensação com a malha de frequência	135
Figura 97 -	Tensão total do barramento cc com a malha de frequência	136
Figura 98 -	Frequência da rede e do PAC com a malha de frequência e variação senoidal.....	137
Figura 99 -	Ângulo de compensação com a malha de frequência e variação senoidal	137
Figura 100 -	Tensão total do barramento cc com a malha de frequência e variação senoidal.....	138
Figura 101 -	Distribuição dos circuitos do DSTATCOM.....	141
Figura 102 -	Imagem do kit TMDSDOCK28335.....	142
Figura 103 -	Protótipo implementado.....	143
Figura 104 -	Formas de onda das tensões do barramento cc durante a inicialização do regulador de tensão	145

Figura 105 - Formas de onda das tensões do PAC sem compensação e com carga leve.....	145
Figura 106 - Formas de onda das tensões do PAC com compensação e com carga leve.....	146
Figura 107 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga leve	147
Figura 108 - Formas de onda das tensões do PAC sem compensação e com carga pesada.....	148
Figura 109 - Formas de onda das tensões do PAC com compensação e com carga pesada.....	148
Figura 110 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga pesada	149
Figura 111 - Formas de onda da tensão do PAC e da corrente de compensação do conversor na fase A com carga pesada....	150
Figura 112 - Formas de onda das tensões do barramento cc durante a entrada de carga.....	151
Figura 113 - Formas de onda das tensões do PAC durante a entrada de carga	151
Figura 114 - Formas de onda das tensões do barramento cc durante a retirada de carga	152
Figura 115 - Formas de onda das tensões do PAC e corrente na fase A durante a retirada de carga.....	152
Figura 116 - Formas de onda das tensões do PAC sem compensação e com desequilíbrio de carga	153
Figura 117 - Formas de onda das tensões do PAC com compensação e com desequilíbrio de carga	154
Figura 118 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com desequilíbrio de carga	155
Figura 119 - Formas de onda das tensões do PAC sem compensação e com carga não linear.....	156
Figura 120 - Formas de onda das tensões do PAC com compensação e com carga não linear.....	156
Figura 121 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga não linear	157
Figura 122 - Formas de onda das tensões do PAC com carga leve e com o mPPT habilitado	158
Figura 123 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga leve com o mPPT habilitado.....	159
Figura 124 - Amplitude da tensão do PAC com carga leve	159
Figura 125 - Potência aparente processada pelo conversor com carga leve	160

Figura 126 - Formas de onda das tensões do PAC com carga pesada e com o mPPT habilitado.....	161
Figura 127 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga pesada e com o mPPT habilitado	161
Figura 128 - Amplitude da tensão do PAC com carga pesada	162
Figura 129 - Potência aparente processada pelo conversor com carga pesada	162
Figura 130 - Formas de onda das tensões do PAC com carga não linear e com o mPPT habilitado.....	163
Figura 131 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga não linear e com o mPPT habilitado	164
Figura 132 - Amplitude da tensão do PAC com carga não linear	164
Figura 133 - Potência aparente processada pelo conversor com carga não linear	165
Figura 134 - Frequência medida da rede	165
Figura 135 - Frequência frequência adotada para o PAC	166
Figura 136 - Ângulo de compensação com a malha de frequência	167
Figura 137 - Tensão total do barramento cc com a malha de frequência	167
Figura 138 - Exemplo da dinâmica da rotina de proteção da malha de frequência	168
Figura 139 - Variação do ângulo θ com a carga e a relação R/X_L para fator de potência 0,8 indutivo	181
Figura 140 - Variação da potência reativa processada pelo inversor (pu) com a carga e a relação R/X_L para fator de potência 0,8 indutivo	182
Figura 141 - Variação do ângulo de compensação em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 20,3^\circ$ e $V_r = 1$ pu)	183
Figura 142 - Variação da potência reativa processada pelo inversor em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 20,3^\circ$ e $V_r = 1$ pu)	184
Figura 143 - Tensão do PAC com e sem compensação com carga média e $\phi = 20,3^\circ$	185
Figura 144 - Correntes injetadas pelo conversor com carga média e $\phi = 20,3^\circ$	185
Figura 145 - Diferença entre o modelo completo e o simplificado	187
Figura 146 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão ca para três valores de resistência e indutância da rede	189

Figura 147 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão total para três valores de resistência e indutância da rede	190
Figura 148 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão diferencial para três valores de resistência e indutância da rede	191
Figura 149 - Fluxograma completo do mPPT	193

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Faixa de tensão para sistemas em 220 V de fase	30
Tabela 2 -	Parâmetros iniciais de projeto.....	51
Tabela 3 -	Parâmetros do conversor	70
Tabela 4 -	Resumo da ação do mPPT	88
Tabela 5 -	Limites para avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios.....	92
Tabela 6 -	Classificação dos distúrbios da rede	118
Tabela 7 -	Comparativo entre os parâmetros utilizados na simulação e nos ensaios	142

LISTA DE ABREVIACÕES

ANEEL

Agência Nacional de Energia Elétrica.

DSP

Digital Signal Processor.

DSTATCOM

Distribution Static Synchronous Compensator.

mPP

Minimum Power Point.

MPP

Maximum Power Point.

mPPT

Minimum Power Point Tracker.

MPPT

Maximum Power Point Tracker.

ONS

Operador Nacional do Sistema.

P&O

Perturb and Observe.

PAC

Ponto de Acoplamento de Cargas.

PLL

Phase Lock Loop.

PRODIST

Procedimentos de Distribuição.

PWM

Pulse Width Modulation.

SIN

Sistema Interligado Nacional.

TDH

Taxa de Distorção Harmônica.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	29
1.1	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO.....	32
1.2	ARTIGOS PUBLICADOS EM CONFERÊNCIAS.....	32
2	ANÁLISE DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM O DSTATCOM	33
2.1	COMPOSIÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO.....	33
2.1.1	Transformador	34
2.1.2	Condutores.....	35
2.1.3	Cargas	35
2.2	ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DO DSTATCOM	36
2.3	EXPRESSÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA O DSTATCOM	38
2.4	CONCLUSÃO.....	41
3	COMPENSADORES DE REATIVOS.....	43
3.1	SISTEMAS DE CONTROLE EM DSTATCOM.....	43
3.1.1	Controle em corrente	43
3.1.2	Controle em tensão	45
3.2	TOPOLOGIAS EMPREGADAS EM DSTATCOM.....	46
3.3	DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	49
3.4	TOPOLOGIA EMPREGADA.....	50
3.5	PROJETO DOS ELEMENTOS DO DSTATCOM	51
3.5.1	Projeto do filtro de saída.....	52
3.5.2	Projeto da capacitância do barramento cc.....	52
3.5.3	Projeto do conversor meia ponte trifásico.....	52
3.6	CONCLUSÃO.....	53
4	SISTEMA DE CONTROLE	55
4.1	MODELAGEM MATEMÁTICA	57
4.1.1	Malha de tensão ca.....	58
4.1.2	Modelagem da planta de tensão ca	58
4.1.3	Malha de tensão do barramento cc.....	61
4.1.4	Modelagem da planta de tensão total do barramento cc	61
4.1.5	Modelagem da planta de tensão diferencial do barramento cc	65
4.2	PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE	68
4.2.1	Análise da planta de tensão ca	70
4.2.2	Amortecimento ativo	71
4.2.3	Compensador de tensão ca.....	74
4.2.4	Compensador de tensão total do barramento cc.....	76
4.2.5	Compensador de tensão diferencial do barramento cc.....	78

4.3	CONCLUSÃO	80
5	MALHA DE AMPLITUDE DE TENSÃO CA.....	83
5.1	MÉTODO PERTURBA E OBSERVA (P&O).....	86
5.2	RASTREAMENTO DO PONTO DE MÍNIMA POTÊNCIA	87
5.3	MALHA DE mPPT	88
5.4	CONCLUSÃO	89
6	MALHA DE COMPENSAÇÃO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA REDE	91
6.1	EXEMPLO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA REDE	91
6.2	RELAÇÃO ENTRE A MALHA DE TENSÃO TOTAL DO BARRAMENTO CC E A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA REDE	92
6.3	IMPACTO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA REDE NO DSTATCOM.....	93
6.4	MÉTODO PROPOSTO DE MEDIÇÃO E CORREÇÃO DA FREQUÊNCIA DO PAC.....	94
6.5	CONCLUSÃO	97
7	RESULTADOS DE SIMULAÇÃO	99
7.1	SISTEMA SIMULADO	99
7.2	COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM CARGA LINEAR .	101
7.3	COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM VARIAÇÃO DE CARGA	105
7.4	COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM DESEQUILÍBRIO DE CARGA	107
7.5	COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM CARGA NÃO LINEAR.....	110
7.5.1	Definição da carga não linear padrão.....	111
7.5.2	Análise da regulação de tensão com cargas não lineares	113
7.6	COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM TENSÃO DISTORCIDA NA REDE ELÉTRICA	116
7.7	ANÁLISE DINÂMICA SOB DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA	118
7.7.1	Distúrbio monofásico.....	119
7.7.2	Distúrbio bifásico	120
7.7.3	Distúrbio trifásico	121
7.7.4	Distúrbio de curta duração	122
7.7.5	Interrupção momentânea.....	123
7.8	AVALIAÇÃO DO mPPT	125
7.8.1	Sistema com carga pesada.....	125
7.8.2	Sistema com carga leve.....	127
7.8.3	Sistema com carga não linear.....	129
7.9	AVALIAÇÃO DA MALHA DE FREQUÊNCIA	133

7.9.1	Sistema sem a malha de frequência	133
7.9.2	Sistema com a malha de frequência	134
7.10	CONCLUSÃO	138
8	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	141
8.1	SISTEMA IMPLEMENTADO	141
8.2	SISTEMA COM CARGA LINEAR.....	144
8.3	DINÂMICA DO CONTROLE COM VARIAÇÃO DE CARGA.....	150
8.4	DINÂMICA DO CONTROLE COM DESEQUILÍBRIO DE CARGA	153
8.5	SISTEMA COM CARGA NÃO LINEAR	155
8.6	SISTEMA COM mPPT	157
8.6.1	Sistema com carga leve.....	157
8.6.2	Sistema com carga pesada	160
8.6.3	Sistema com carga não linear	162
8.7	RESULTADOS DA MALHA DE FREQUÊNCIA.....	165
8.8	CONCLUSÃO	168
9	CONCLUSÃO GERAL.....	171
10	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	175
APÊNDICE A – ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA DA REDE SOBRE O ÂNGULO DE DEFASAGEM DO CONVERSOR E A POTÊNCIA PROCESSADA		181
APÊNDICE B – ANÁLISE DO REGULADOR DE TENSÃO EM REDES RESISTIVAS		183
APÊNDICE C – ANÁLISE DA SIMPLIFICAÇÃO DO MODELO DE TENSÃO TOTAL		187
APÊNDICE D – ANÁLISE DA VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DOS CONTROLADORES		189
APÊNDICE E – FLUXOGRAMA DO MPPT.....		193
APÊNDICE F – CÓDIGO FONTE DO MPPT		195
APÊNDICE G – CÓDIGO FONTE DA MEDIÇÃO DA FREQUENCIA DO PAC		197

1 INTRODUÇÃO

Equation Section (Next)

A crescente demanda de energia elétrica traz novos desafios para o sistema elétrico de potência. Basicamente, há duas soluções possíveis para abastecer os consumidores: o aumento da geração de energia e a expansão das redes de distribuição ou o aumento da eficiência das redes já existentes.

O aumento da geração de energia geralmente traz impactos nocivos ao meio ambiente e é necessário um grande tempo para a construção e a operação de novas unidades geradoras. Além disso, o aumento da capacidade de fornecimento está ligado a grandes investimentos.

Já a eficiência do sistema elétrico está intimamente ligada ao modo de consumo de energia. Cargas que consumam energia com baixo fator de potência e com alta distorção harmônica estão entre as principais cargas que fazem circular pelo sistema elétrico de potência grandes quantidades de energia reativa, energia essa que não é aproveitada para gerar de trabalho.

Essa quantidade excessiva de energia reativa provoca o aumento da magnitude das correntes e, conseqüentemente, aumenta as perdas na transmissão.

Diante da possibilidade de falta de energia no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) iniciou uma ofensiva contra o desperdício no consumo da energia elétrica. O primeiro aspecto a ser regulamentado e duramente fiscalizado é o fator de potência mínimo, estipulado em 0,92.

Em 2008, a ANEEL criou uma série de documentos que normalizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica, o PRODIST (Procedimentos de Distribuição).

O PRODIST conta com nove módulos, distribuídos da seguinte forma:

- Módulo 1 - Introdução
- Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição
- Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição
- Módulo 4 - Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição
- Módulo 5 - Sistemas de Medição
- Módulo 6 - Informações Requeridas e Obrigações

- Módulo 7 - Cálculo de Perdas na Distribuição
- Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica
- Módulo 9 - Ressarcimento de Danos Elétricos

A ANEEL, através do módulo 8 do PRODIST, determina os valores para as faixas de classificação da tensão de fornecimento em várias faixas de tensão (ANEEL, 2001). A Tabela 1 apresenta os limites para sistemas alimentados em 380/220 V. Esses dados são encontrados no Anexo I da Seção 8.1 do PRODIST.

Tabela 1 - Faixa de tensão para sistemas em 220 V de fase

Tensão de Atendimento	Faixa de Variação de Tensão de Leitura
Adequada	$201 \text{ V} \leq \text{TL} \leq 231 \text{ V}$ ($0,914 \text{ pu} \leq \text{TL} \leq 1,05 \text{ pu}$)
Precária	$189 \text{ V} \leq \text{TL} < 201 \text{ V}$ ou $231 \text{ V} < \text{TL} \leq 233 \text{ V}$ ($0,859 \text{ pu} \leq \text{TL} < 0,914 \text{ pu}$ ou $1,05 \text{ pu} < \text{TL} \leq 1,059 \text{ pu}$)
Crítica	$\text{TL} < 189 \text{ V}$ ou $\text{TL} > 233 \text{ V}$ ($\text{TL} < 0,859$ ou $\text{TL} > 1,059 \text{ pu}$)

Fonte: produção do próprio autor

Para ser considerado um problema de qualidade de energia, a tensão de fornecimento ao consumidor deve possuir mais de 3% das leituras na faixa precária e mais de 0,5% na faixa crítica.

Quando for detectada uma classificação fora da faixa adequada, a concessionária de energia responsável pelo fornecimento a esse consumidor tem 90 dias para solucionar o problema, caso a transgressão esteja dentro da faixa precária, e somente 15 dias caso esteja dentro da faixa crítica.

Se não houver solução dentro do prazo estipulado, a concessionária de energia deve ressarcir todos os consumidores afetados conforme consta no módulo 8. O valor da compensação deverá ser creditado na fatura de energia elétrica dos consumidores referente ao mês subsequente ao término dos prazos de regularização dos níveis de tensão.

Soluções definitivas para problemas na rede muitas vezes demandam tempo para a análise da região onde há o problema de regulação de tensão, estudo de uma solução definitiva, aquisição e

instalação do equipamento escolhido. Tal processo pode demorar mais do que o tempo determinado pelo PRODIST.

Assim, surge a necessidade de um dispositivo de uso temporário capaz de corrigir o problema de regulação de tensão imediatamente, evitando que a concessionária deva ressarcir o consumidor e que ela tenha mais tempo para a adequação da infraestrutura, até que uma solução definitiva seja executada.

Para a manutenção do nível de tensão, diversos equipamentos e dispositivos vêm sendo estudados e utilizados. Um desses equipamentos é o Compensador Estático de Reativos para redes de distribuição (DSTATCOM), que atua na circulação da energia reativa no sistema para manter o valor eficaz da tensão regulado.

No capítulo 2 é feita uma análise do sistema de potência, iniciando com os elementos básicos até a inclusão do compensador. Então são obtidas as expressões que regem o fluxo de potência com a presença do compensador.

No capítulo 3 são apresentadas as principais características do controle em tensão para a compensação de reativos. Ainda é apresentada a topologia escolhida, bem como a definição dos elementos que a compõem.

O capítulo 4 inicia com a modelagem das plantas de tensão necessárias para o controle do conversor a partir dos circuitos equivalentes. Posteriormente, utilizando os modelos obtidos, os compensadores são projetados via resposta em frequência de malha aberta.

No capítulo 5 é apresentada a malha de controle da mínima potência aparente processada pelo conversor que é proposta neste trabalho. Esta estratégia se utiliza de uma técnica bem conhecida empregada em sistemas fotovoltaicos, a qual garante que, independentemente do ponto de operação e dos parâmetros da linha, o conversor estará processando a mínima potência aparente.

O capítulo 6 mostra o impacto da variação da frequência da rede elétrica sobre o sistema de controle e propõe uma solução para contornar esse problema.

No capítulo 7 são mostrados resultados de simulação do conversor diante das condições mais frequentes em redes de distribuição em baixa tensão, demonstrando a capacidade de regulação de tensão do DSTATCOM.

O capítulo 8 apresenta o protótipo implementado e uma descrição breve dos circuitos que o compõem. Após isso, são mostrados

os principais resultados dos ensaios com o protótipo, reiterando sua capacidade de regulação.

O trabalho se encerra apresentando as principais conclusões deste trabalho, analisando o projeto e o desempenho do sistema de controle proposto. Na sequência são discutidas as considerações finais do autor e algumas sugestões para o prosseguimento da pesquisa do compensador de reativos.

1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

O objetivo do estudo é desenvolver um regulador de tensão móvel capaz de:

- Compensar a queda de tensão em redes de baixa tensão com cargas não lineares e desequilibradas
- Manter a forma de onda da tensão do ponto de conexão com a rede com baixa distorção harmônica
- Operar dentro dos limites da ANEEL

Além disso, as contribuições deste trabalho são:

- O conversor opera sempre com a mínima potência aparente necessária para a regulação de tensão
- Foi adicionada uma malha para compensar os efeitos da variação da frequência da rede sobre o regulador de tensão

1.2 ARTIGOS PUBLICADOS EM CONFERÊNCIAS

Hock, Rubens Tadeu ; De Novaes, Yales Rômulo ; Batschauer, Alessandro Luiz. **A voltage regulator based in a voltage-controlled DSTATCOM with minimum power point tracker**. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Pittsburgh, 2014, p. 3694-3701.

Hock, Rubens Tadeu ; De Novaes, Yales Rômulo ; Batschauer, Alessandro Luiz . **Estrutura de controle de um regulador de tensão móvel com rastreador de mínima potência**. XX Congresso Brasileiro de Automática (CBA), Belo Horizonte, 2014. p. 3114-3121.

2 ANÁLISE DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO COM O DSTATCOM

Equation Section (Next)

Para a correta compreensão de como o DSTATCOM impacta a rede elétrica a qual ele será conectado, faz-se necessário analisar primeiro os principais elementos que compõem os sistemas de distribuição de energia em baixa tensão e como esses elementos se apresentam.

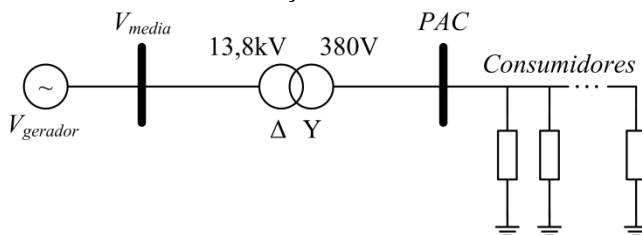
A partir dessa análise, o conversor é inserido em uma rede genérica a fim de avaliar o novo perfil de transferência de potência da unidade geradora para os consumidores.

Por fim, são obtidas as expressões matemáticas que relacionam o equilíbrio de potência ativa e a potência reativa processada pelo conversor, que é consequência direta desse equilíbrio, assim como uma análise de seus resultados.

2.1 COMPOSIÇÃO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição convencional é composto por uma rede de média tensão fornecendo energia para vários alimentadores através de transformadores abaixadores. A Figura 1 apresenta um sistema de distribuição simples constituído de um gerador em média tensão, um transformador abaixador e as unidades consumidoras alimentadas pelo gerador.

Figura 1 - Sistema de distribuição



Fonte: produção do próprio autor

Os transformadores do sistema de distribuição disponibilizam uma tensão reduzida para várias cargas conectadas ao secundário, cargas estas que possuem os mais variados perfis de corrente e potências drenadas do alimentador.

O ponto onde as cargas são conectadas ao alimentador é chamado na literatura de Ponto de Acoplamento de Cargas (PAC).

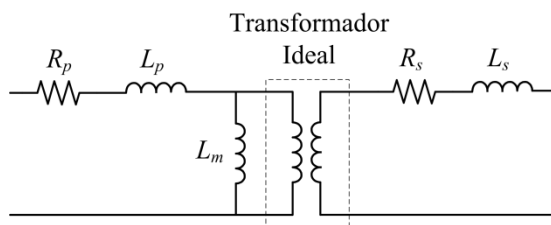
2.1.1 Transformador

Todo transformador, por melhor que seja sua construção, apresenta não idealidades. Nem todo o fluxo que enlaça um enrolamento enlaça o outro, pois a permeabilidade do núcleo não é infinita e surgem, então, fluxos dispersos nos enrolamentos cujos efeitos são representados através das indutâncias de dispersão.

Além disso, há as perdas pelas variações cíclicas do sentido do fluxo magnético (histerese) e também devido às correntes parasitas (correntes de Foucault). Assim, mesmo com o secundário em aberto, existe uma pequena corrente circulando quando o primário está energizado, denominada corrente de magnetização. O efeito dessa corrente é representado pela impedância existente em paralelo com o primário do transformador.

Com os efeitos mencionados, o transformador real pode ser representado por um circuito composto pelo transformador ideal com impedâncias associadas às perdas e circulação de reativos, conforme o circuito da Figura 2.

Figura 2 - Modelo de um transformador



Fonte: produção do próprio autor

O valor dessas grandezas geralmente é fornecido pelo fabricante do transformador, sendo possível também o projeto sob encomenda do transformador para atender os requisitos da aplicação ou do cliente. Caso os dados do transformador não estejam disponíveis, é possível determinar seus parâmetros através de ensaios (FITZGERALD; KINGSLEY JR.; UMANS, 2006).

Os efeitos de perdas e não idealidades de transformadores são comumente representados apenas por impedâncias em série com o

enrolamento secundário. Os efeitos atrelados ao primário são refletidos, ou seja, são representados por impedâncias que produzem o mesmo efeito no secundário das impedâncias reais existentes no primário. Assim, o transformador passa a ter uma representação mais simplificada, sem perda de nenhuma informação.

2.1.2 Condutores

Além das características do transformador, o valor total dos elementos que modelam as não idealidades é composto também pela resistência e pela indutância intrínseca dos condutores. Esse acréscimo pode ser predominante em análises em que o transformador esteja muito afastado da carga.

Os condutores utilizados em redes de baixa tensão possuem seção transversal pequena e suas parcelas resistivas são maiores que as parcelas indutivas.

2.1.3 Cargas

As unidades consumidoras presentes em sistema de distribuição em baixa tensão são majoritariamente compostas por residências e pequenos comércios.

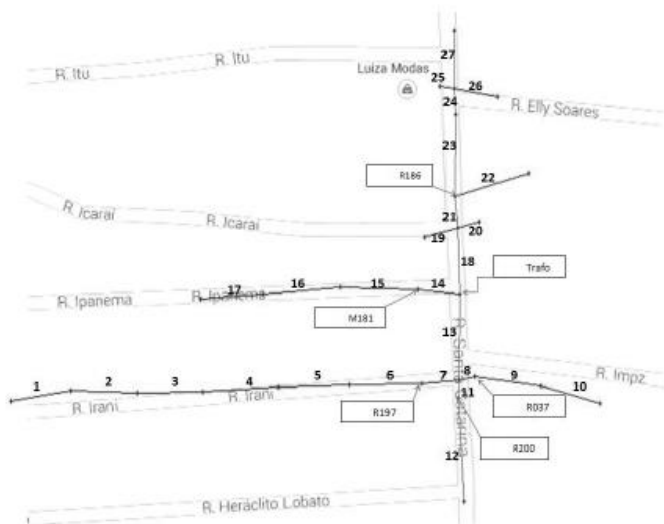
Essas unidades comumente apresentam pequena demanda de energia. Contudo, a soma das contribuições dessas unidades e a distância entre as unidades consumidoras e o transformador podem ser significativas a ponto de a tensão atingir os níveis precários de atendimento, ou até mesmo níveis críticos.

A distribuição das cargas por transformador geralmente possui um padrão radial, como mostra a Figura 3. Essa característica dificulta a utilização de uma análise global, mas a análise pode ser dividida por ramos.

No caso específico da Figura 3, o ramo que compreende os pontos 1 a 7 possui a maior impedância série e é o único que apresenta problemas na regulação de tensão.

Há de se ver que as unidades residenciais consomem correntes com distorção harmônica elevada, devido à utilização de equipamentos eletrodomésticos e eletroeletrônicos, além de aquecimento de água com controle de temperatura. Com isso, é de grande importância inserir, em futuras análises e considerações, a inclusão de circuitos com característica não linear.

Figura 3 - Arquitetura de uma rede real de distribuição de baixa tensão



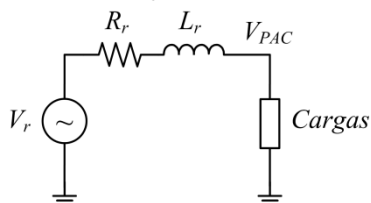
Fonte: Centrais Elétricas de Santa Catarina - CELESC

2.2 ANÁLISE DO FLUXO DE POTÊNCIA NA PRESENÇA DO DSTATCOM

O modelo utilizado do alimentador com cargas conectadas ao PAC é apresentado na Figura 4, considerando uma tensão senoidal e livre de harmônicas. Nesse sistema, o módulo e o ângulo da tensão do PAC são determinados pelas cargas e pela impedância equivalente do transformador e as potências ativa e reativa fluem do alimentador para a carga.

As “Cargas” representam a impedância equivalente vista pelo conversor de todos os consumidores que estão ligadas a partir do PAC. Já R_r e L_r representam a impedância equivalente de um ramo da rede de distribuição, compondo Z_r .

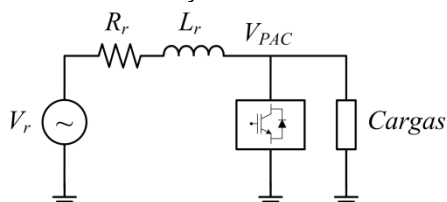
Figura 4 - Sistema de distribuição



Fonte: produção do próprio autor

A conexão do DSTATCOM ao PAC, conforme mostra a Figura 5, permite ao conversor fixar a tensão no PAC. Com isso, é possível determinar o fluxo de potência que haverá entre o alimentador e o conversor para diversos valores de impedância do transformador e perfis de cargas, sejam cargas lineares ou não lineares.

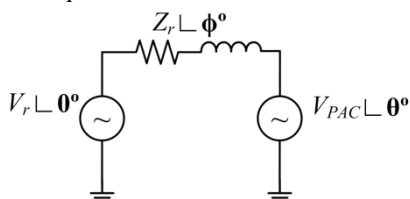
Figura 5 - Sistema de distribuição com o conversor conectado ao PAC



Fonte: produção do próprio autor

Para a análise do fluxo de potência, o conversor e as cargas são substituídas por uma fonte ideal de tensão com um ângulo definido, como mostra a Figura 6. Isso pode ser feito porque o controle de tensão do conversor mantém a tensão do PAC regulada.

Figura 6 - Circuito equivalente



Fonte: produção do próprio autor

O fluxo de potência ativa e reativa fornecida pelo alimentador pode ser demonstrado, através das relações de potência complexa e análise de circuitos, que pode ser expresso por:

$$P_r = \frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \cos(\phi) - \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\theta) + \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) \quad (2.1)$$

$$Q_r = \frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \sin(\phi) - \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\theta) - \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \quad (2.2)$$

onde ϕ representa o ângulo da impedância da rede, Z_r seu módulo e θ o ângulo da tensão no PAC.

2.3 EXPRESSÕES DO FLUXO DE POTÊNCIA PARA O DSTATCOM

O balanço de energia ativa é dado, então, atribuindo um valor nulo para a potência ativa fornecida pelo DSTATCOM. Assim, pode-se escrever:

$$P_r + P_o = 0 \quad (2.3)$$

onde P_o é a potência ativa consumida pela carga.

Substituindo (2.1) em (2.3), determina-se a equação que relaciona a potência de carga com o ângulo necessário para que o DSTATCOM não forneça ou absorva energia ativa.

$$\frac{V_r^2}{Z} \cdot \cos(\phi) - \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z} \cdot \cos(\phi) \cdot \cos(\theta) + \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z} \cdot \sin(\phi) \cdot \sin(\theta) + P_o = 0 \quad (2.4)$$

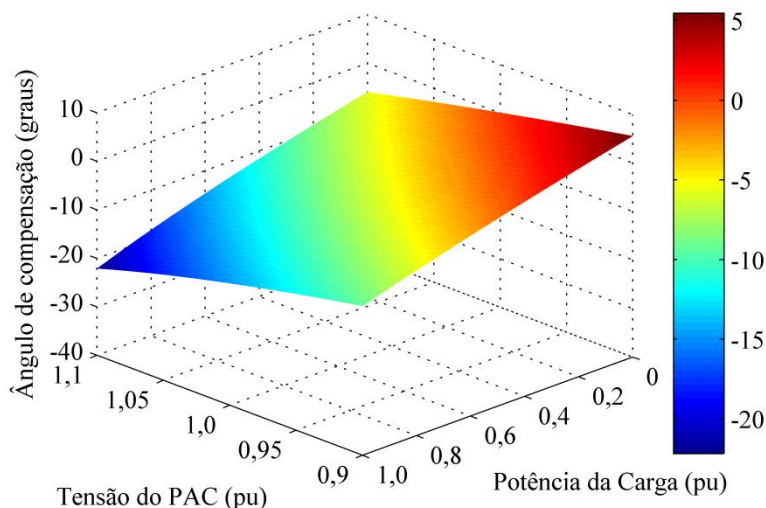
Em (2.4) verifica-se que o ângulo de carga θ possui relação com a energia ativa demandada da carga. Para uma determinada demanda de energia ativa pela carga, haverá um ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC (θ) correspondente que satisfará a equação. Variando essa potência através da variação da potência aparente e da tensão do PAC, é possível determinar o ângulo θ para vários pontos de operação do sistema de distribuição. A Figura 7 apresenta a solução de (2.4).

O balanço de energia reativa, diferentemente do balanço de energia ativa, é influenciado diretamente pelo DSTATCOM e é escrito por:

$$Q_{inv} = Q_o - Q_r \quad (2.5)$$

onde Q_{inv} é a energia reativa fornecida ou absorvida pelo DSTATCOM e Q_o a energia reativa demandada pela carga.

Figura 7 - Variação do ângulo de compensação em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2 \text{ pu}$, $\phi = 45^\circ$ e $V_r = 1 \text{ pu}$)



Fonte: produção do próprio autor

Substituindo (2.2) em (2.5), determina-se a equação que quantifica a energia reativa que o DSTATCOM deve fornecer para manter o ângulo θ encontrado anteriormente.

$$Q_{inv} = Q_o - \frac{V_r^2}{Z} \cdot \sin(\phi) + \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z} \cdot \sin(\phi) \cdot \cos(\theta) + \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z} \cdot \cos(\phi) \cdot \sin(\theta) \quad (2.6)$$

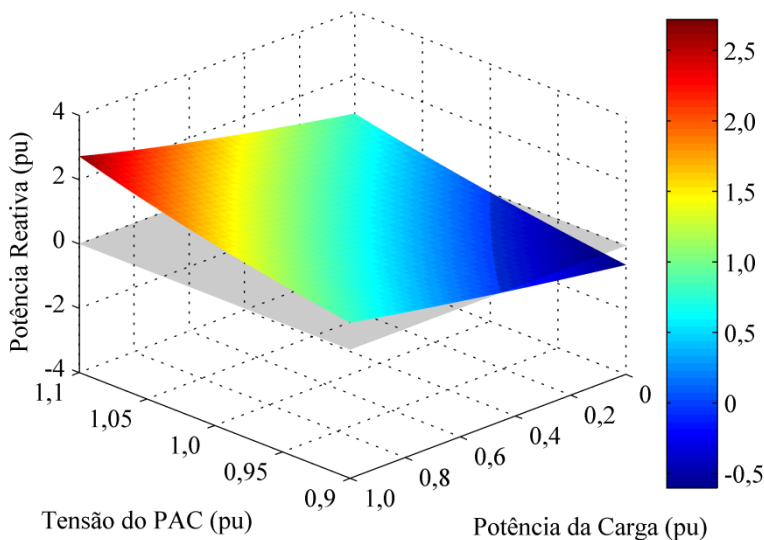
A energia reativa fornecida pela rede elétrica também depende do ângulo θ , mas o ângulo já está determinado para cada ponto de operação do DSTATCOM.

Com os valores do ângulo θ , é possível determinar a energia reativa fornecida ou absorvida pelo DSTATCOM nesses pontos de operação. A Figura 8 apresenta a solução da equação (2.6).

Com esses resultados é possível definir a potência do DSTATCOM, a qual é usualmente preferível que tenha capacidade de compensação inferior ao valor de potência nominal da rede de distribuição devido aos custos de aquisição do equipamento e também à

capacidade do transformador, que pode ser ultrapassada com sobre compensação de reativos.

Figura 8 - Variação da potência reativa processada pelo inversor em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 45^\circ$ e $V_r = 1$ pu)



Fonte: produção do próprio autor

Como se pode ver, a área correspondente é reduzida e há ainda uma região de operação do DSTATCOM em que a potência reativa é da ordem de duas vezes a potência das cargas.

Entretanto, a Figura 8 apresenta uma característica interessante: a redução da tensão do PAC provoca uma redução na potência processada pelo conversor. Além disso, há valores em que a combinação entre a tensão do PAC e a potência da carga demanda potência nula do conversor.

O Apêndice A apresenta a análise do sistema em função da potência da carga e do ângulo da impedância da rede. Nesta análise é possível verificar pontos de operação em que a compensação de reativos não é suficiente para a regulação de tensão.

2.4 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foi apresentada a análise da rede de distribuição, mostrando como se obtêm os circuitos equivalentes, seus parâmetros e a influência do compensador de reativos nessa rede.

As expressões de potência ativa e reativa da rede de distribuição com a presença do conversor mostraram que a compensação paralela demanda muita energia para pequenos incrementos no valor eficaz da tensão no PAC.

Outro fato importante é a necessidade do conversor ter, pelo menos, capacidade de compensação da ordem da máxima potência da carga do ramo ao qual foi conectado.

Uma análise mais criteriosa mostra que a potência processada aumenta com a impedância da linha, sendo que a resistência tem maior impacto perante a indutância. Fato esse que, em um caso extremo, pode impossibilitar a compensação do PAC.

Com relação à distribuição de cargas, pode-se concluir que nem todos os ramos sofrem com problemas de regulação de tensão e a inclusão do compensador de reativos em um ramo afeta pouco os ramos adjacentes.

A relação unitária entre a resistência e a reatância indutiva da rede foi escolhida como sendo igual ao apresentado em (ENDERLE, 2012) para o controle em tensão do DSTATCOM para fins de comparação entre os resultados obtidos. Essa relação foi mantida no ambiente de simulação e também nos testes experimentais.

Porém, durante as análises de redes reais verificou-se que essa relação é muito amigável ao conversor e é rara em uma rede de distribuição em baixa tensão.

Segundo os dados obtidos junto à concessionária, um cenário mais realista possui valores de R/X_L entre 2 e 3. Quanto maior for a relação R/X_L , menos eficiente se torna a compensação de tensão por reativos. Para esses casos, o regulador de tensão precisará processar mais potência reativa para promover uma mesma elevação no valor eficaz da tensão do PAC. O Apêndice B contempla a análise do conversor perante uma rede de características predominantemente resistivas, com R/X_L igual a 2,7 e impedância mantida em 0,2 pu.

3 COMPENSADORES DE REATIVOS

Equation Section (Next)

Os compensadores estáticos de reativos são conversores que processam idealmente somente energia reativa com o intuito de reduzir a queda de tensão na parcela indutiva das redes de distribuição. Estes compensadores injetam correntes senoidais em quadratura com a tensão do PAC, emulando o efeito de reatâncias capacitivas ou indutivas. Com isso, é possível controlar o fluxo de potência reativa (SINGH *et al.*, 2009).

Este capítulo apresenta as principais técnicas de compensação de reativos e as topologias mais empregadas. A partir disso, a estratégia de controle e a topologia são definidas, seguidas do projeto dos elementos de potência do conversor.

3.1 SISTEMAS DE CONTROLE EM DSTATCOM

Os compensadores estáticos de reativos possuem diversos métodos de controle, derivando de duas estratégias principais: controle em corrente e controle em tensão. Sua escolha depende do objetivo a ser alcançado e das restrições que devem ser atendidas.

Com o controle em corrente, é possível tornar as correntes na rede senoidais e em fase com a tensão, garantindo alto fator de potência, enquanto o controle de tensão protege cargas críticas de distúrbios e desequilíbrios da tensão da rede (KUMAR; MISHRA, 2013).

3.1.1 Controle em corrente

A técnica de controle em corrente baseia-se na composição de duas componentes de referência para a corrente, uma em fase com a tensão no PAC e a outra em quadratura, ou seja, defasada em 90 graus. Assim, o conversor a ser utilizado deve ter a característica de fonte de corrente.

A amplitude da primeira componente é determinada pelo controle sobre a tensão total nos capacitores do barramento do conversor. Essa componente é responsável pela reposição da energia perdida pelos elementos do conversor através da absorção de energia ativa da rede elétrica a qual o conversor está conectado. Essencialmente, o DSTATCOM processa somente potência reativa, mas, devido às perdas inerentes à operação do conversor, a absorção de uma pequena parcela de energia ativa se faz necessária. O controlador de tensão total

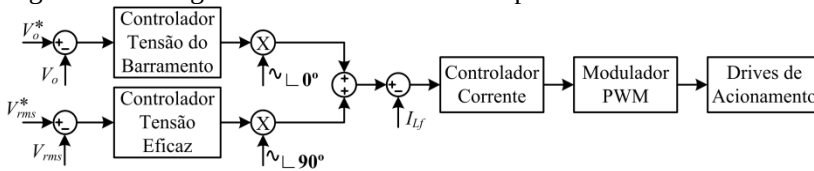
do barramento cc gera o sinal de controle que será multiplicado por um sinal em fase com a tensão no PAC.

A amplitude da segunda componente é determinada pelo controle do valor eficaz da tensão no PAC. Essa componente é responsável pela regulação do valor eficaz da tensão do PAC através da injeção de energia reativa no sistema. O controlador de tensão eficaz gera o sinal de controle que será multiplicado por um sinal defasado em 90 graus com a tensão do PAC (AGGARWAL *et al.*, 2010) (SINGH *et al.*, 2006).

A corrente de referência imposta ao controlador de corrente é, então, dada pela soma das duas componentes. A corrente resultante dessa operação é uma corrente senoidal na frequência da tensão da rede que apresenta uma defasagem em torno de 90 graus, haja visto que a parcela responsável pela energia reativa será muito superior à parcela responsável pela energia ativa.

O diagrama de blocos do controle por corrente em fase e em quadratura pode ser visto na Figura 9.

Figura 9 - Diagrama de blocos do controle por corrente



Fonte: produção do próprio autor

Em (XU; LI, 2014) é apresentado um DSTATCOM controlado em corrente utilizando o controlador PI adaptativo. O controlador é ajustado automaticamente e mantém o desempenho sempre igual à resposta desejada do sistema, independentemente da mudança do ponto de operação.

Em (JAYAPRAKASH; SINGH; KOTHARI, 2009) é apresentado o projeto de um controle digital de corrente de um DSTATCOM utilizando os mesmos princípios no plano de referência síncrono.

(PRAJAPATI; SHARMA, 2014) apresenta o controle de um DSTATCOM utilizando um controlador do tipo Fuzzy, conseguindo com isso menor esforço computacional e melhor resposta dinâmica. Já (SINGH *et al.*, 2011) utiliza redes neurais, que apesar de possuir

desempenho semelhantes a outras técnicas, é simples de implementar e tem rápida resposta transitória.

3.1.2 Controle em tensão

Essa técnica de controle baseia-se na composição de duas componentes de referência para a tensão, sendo estas a amplitude da tensão desejada no PAC e a fase do sinal senoidal. O conversor, portanto, deve possuir a característica de uma fonte de tensão.

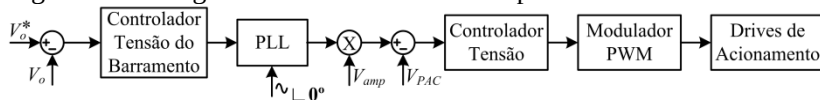
A amplitude da tensão pode ser escolhida arbitrariamente, porém a ANEEL determina valores mínimos e máximos do valor eficaz da tensão disponibilizada no PAC, além de exigir que as três fases do sistema apresentem o mesmo valor eficaz, admitindo-se 2% de diferença em sistemas de alta e média tensão (ANEEL, 2001).

A amplitude da tensão, como visto anteriormente, tem impacto direto sobre a energia reativa e pode ser necessária a limitação da amplitude da tensão para a preservação do DSTATCOM.

A fase associada à tensão de referência é dada pela comparação do valor atual da tensão do barramento cc com seu valor de referência. O controlador de tensão do barramento gera o sinal de controle que alterará a fase atual da tensão (MISHRA; GHOSH; JOSHI, 2003) (KO *et al.*, 2006). A fase da tensão no PAC é responsável pela reposição da energia perdida pelos elementos do conversor, de maneira análoga ao controle por corrente.

O controle de tensão fica, então, responsável por garantir que a tensão de referência seja devidamente imposta ao PAC. O diagrama de blocos do controle por tensão pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Diagrama de blocos do controle por tensão



Fonte: produção do próprio autor

(KUMAR; MISHRA, 2013) apresenta um DSTATCOM com a adição de indutância em série com a rede, promovendo regulação de tensão através da regulação de tensão indireta sobre o indutor externo.

Já em (KUMAR; MISHRA, 2014) é apresentado um DSTATCOM controlado em tensão que garante fator de potência unitário na tensão terminal durante a operação normal. Além disso, o

compensador injeta correntes menores que o método tradicional, reduzindo as perdas no alimentador e no conversor.

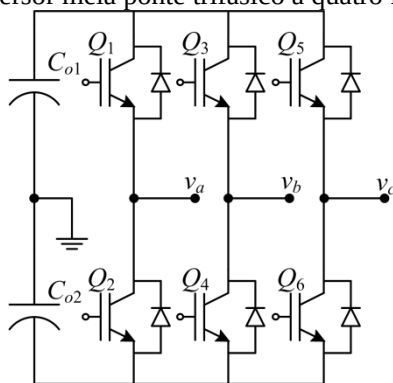
3.2 TOPOLOGIAS EMPREGADAS EM DSTATCOM

As topologias mais empregadas em DSTATCOMs foram sumarizadas em (SINGH *et al.*, 2014), sendo divididas em duas principais ramificações: conversores trifásicos a três fios e conversores trifásicos a quatro fios. A escolha de uma ramificação ou outra fica a critério do projetista, levando em consideração a rede analisada.

Tanto os conversores trifásicos a três fios quanto a quatro fios possuem duas subdivisões: isolados e não isolados. Os conversores não isolados são conectados diretamente à rede de distribuição, enquanto os isolados são conectados à rede por intermédio de transformadores, permitindo uma vasta gama de conexões graças a diferentes configurações dos transformadores, como transformadores zig-zag, estrela/triângulo, estrela/hexágono e transformadores conectados em T.

Todos os exemplos citados utilizam como base o conversor em ponte, possuindo de dois a quatro braços com barramento simples ou barramento dividido. A Figura 11 apresenta um conversor meia ponte trifásico a quatro fios.

Figura 11 - Conversor meia ponte trifásico a quatro fios

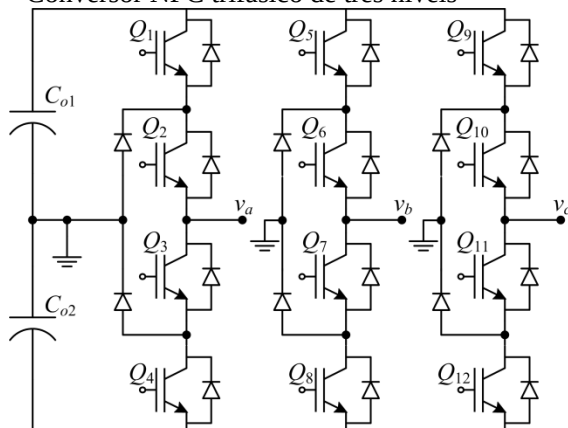


Fonte: produção do próprio autor

Além das estruturas convencionais, conversores de três níveis vêm sendo utilizados em DSTATCOMs conectados a redes de distribuição em baixa tensão, como o conversor com diodos de

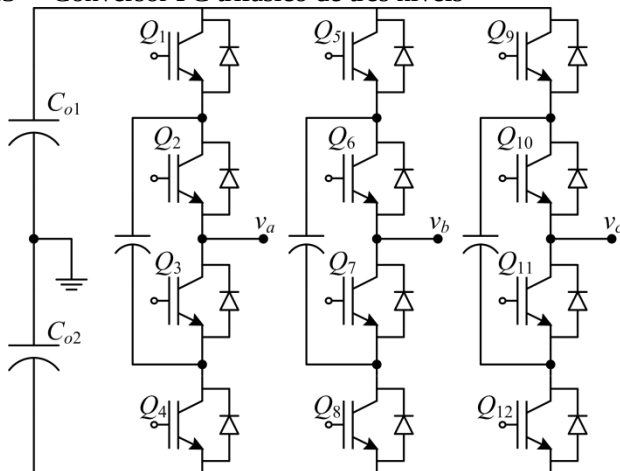
grampeamento (NPC – Neutral Point Clamped), apresentado em (CHEN *et al.*, 2013) e (SAEEDIFARD; NIKKHAJOEI; IRAVANI, 2007), e o conversor com capacitores de grampeamento (FC – Flying Capacitors), apresentado em (SHUKLA; GHOSH; JOSHI, 2007). A Figura 12 mostra o conversor NPC trifásico de três níveis, enquanto a Figura 13 mostra o conversor FC trifásico de três níveis.

Figura 12 - Conversor NPC trifásico de três níveis



Fonte: produção do próprio autor

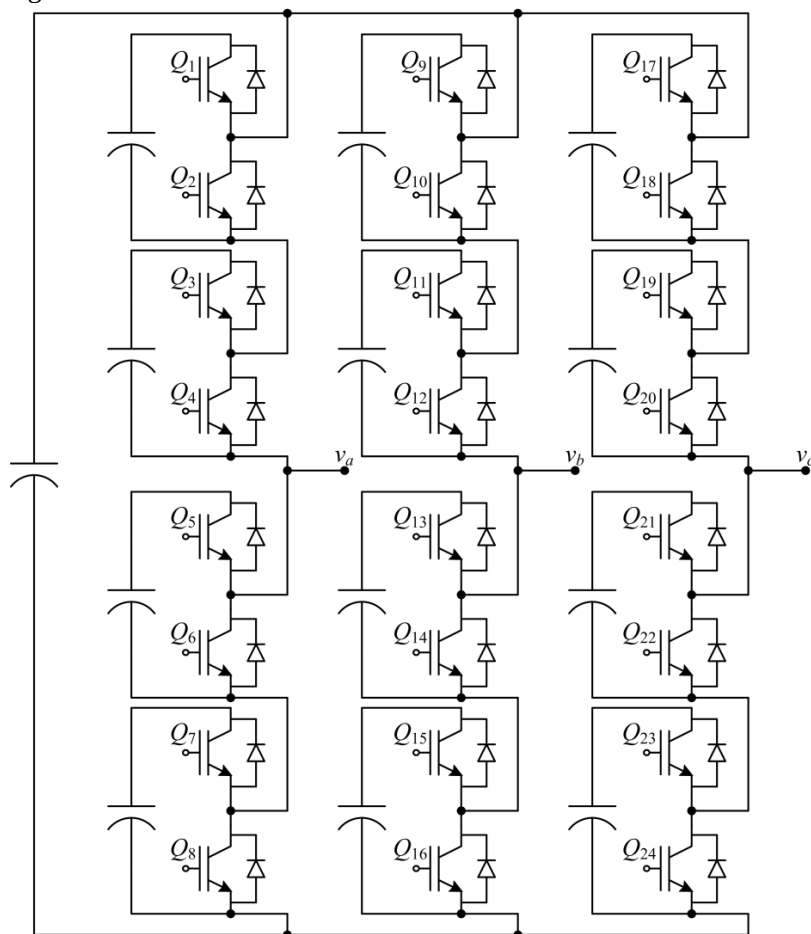
Figura 13 - Conversor FC trifásico de três níveis



Fonte: produção do próprio autor

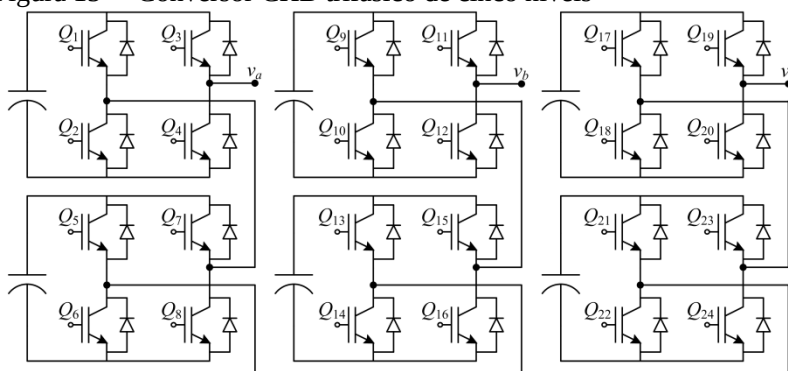
Para aplicações em média tensão, estruturas multiníveis dominam na questão de conexão direta à rede de energia, como o conversor modular multinível (MMC – Modular Multilevel Converter), apresentado em (DU; LIU, 2013), e o conversor cascata (CHB – Cascade H-Bridge), apresentado em (MARZOUGHI; NEYSHABOURI; IMANEINI, 2014). A Figura 14 mostra o conversor MMC trifásico de cinco níveis e a Figura 15 apresenta o conversor CHB trifásico de cinco níveis.

Figura 14 - Conversor MMC trifásico de cinco níveis



Fonte: produção do próprio autor

Figura 15 - Conversor CHB trifásico de cinco níveis



Fonte: produção do próprio autor

3.3 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

O sistema de controle adotado é o controle de tensão, pois apresenta melhor característica dinâmica de regulação de tensão.

Em DSTATCOMs controlados em tensão, a tensão do PAC é a tensão de saída do conversor e o DSTATCOM pode manter o PAC controlado independentemente de desequilíbrios na rede ou na carga. A rede elétrica fica responsável pela operação e manutenção do DSTATCOM (LEDWICH; GHOSH, 2002). Essa manutenção se refere à energia necessária para repor as perdas intrínsecas ao conversor.

Assim, o problema de regulação pode ser encarado como um problema de controle (ENDERLE, 2012).

Com uma estrutura de controle adequada, o impacto de mudanças de carga pode ser rapidamente mitigado, evitando uma variação significativa no valor eficaz das tensões no PAC, pois o controle de tensão proporciona à carga uma tensão imune a transitórios de tensão provenientes, por exemplo, de variações bruscas na carga e também ondulação de tensão oriunda do sistema de média tensão.

A forma de onda da tensão do PAC, sendo controlada pelo DSTATCOM, possuirá sempre um formato senoidal com baixa distorção harmônica, mesmo com a presença de cargas não lineares. Com isso, o conversor provê melhora na qualidade da forma de onda de forma natural, sem a necessidade de inclusão de uma malha de controle específica.

Em contra partida, a corrente processada pelo conversor será uma consequência do sistema a qual está conectado. Dessa forma, é possível que o conversor venha a processar, durante transitórios, correntes de pico elevadas, acima do valor nominal de corrente.

Outro ponto negativo é a operação do conversor, fortemente afetada pelos parâmetros da rede (KUMAR; MISHRA, 2013), principalmente a indutância da linha.

3.4 TOPOLOGIA EMPREGADA

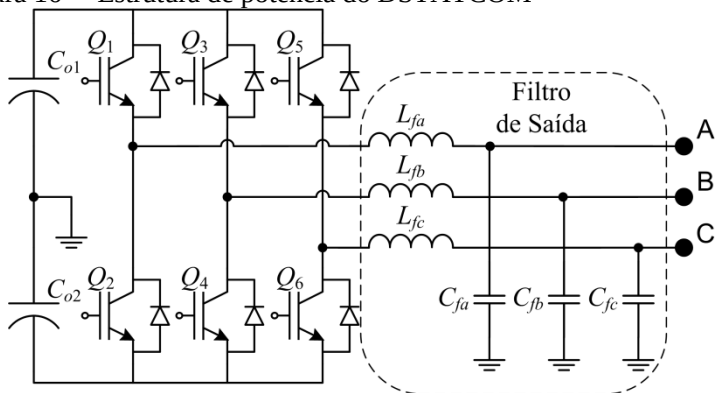
Dentre diversas topologias possíveis de serem empregadas em sistemas conectados à rede elétrica, escolheu-se o conversor meia ponte trifásico a quatro fios, mostrado na Figura 16.

Essa estrutura de potência é simples, de fácil operação e permite a operação independente de cada fase, uma característica interessante quando se trata de sistemas trifásicos desequilibrados.

Para reduzir o conteúdo harmônico gerado pela comutação dos interruptores do conversor, um filtro LC é incluído entre o conversor e o PAC.

A conexão do ponto central do barramento cc ao condutor neutro faz a estrutura de potência necessitar, além da regulação da tensão do barramento cc, a manutenção da igualdade das tensões dos capacitores.

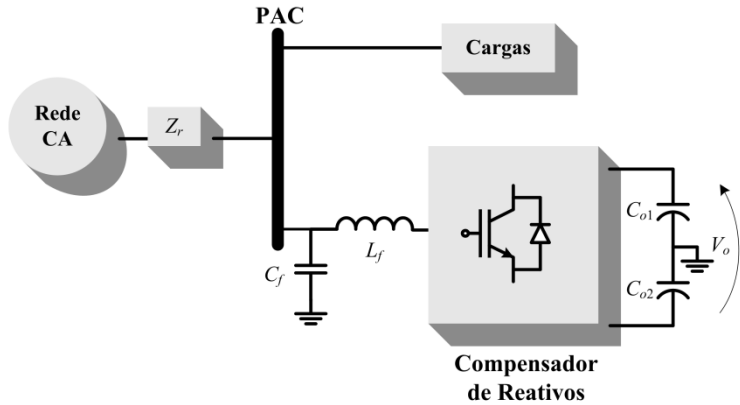
Figura 16 - Estrutura de potência do DSTATCOM



Fonte: produção do próprio autor

Conhecendo a topologia, o DSTATCOM é conectado à rede elétrica, conforme mostra a Figura 17.

Figura 17 - Diagrama unifilar do DSTATCOM



Fonte: produção do próprio autor

3.5 PROJETO DOS ELEMENTOS DO DSTATCOM

Para o projeto dos elementos que compõem o DSTATCOM, é necessário definir os parâmetros iniciais. Os parâmetros adotados são apresentados na Tabela 2. Como o projeto da estrutura de potência não é o foco principal desse trabalho, apenas os resultados obtidos serão apresentados, sendo omitidos os cálculos e as considerações adotadas.

Tabela 2 - Parâmetros iniciais de projeto

Potência nominal do DSTATCOM	S_o	30 kVA
Tensão do barramento cc	V_o	800 V
Tensão eficaz de fase	V_r	220 V
Frequência da rede	f_r	60 Hz
Frequência de comutação	f_s	20 kHz
Frequência de ressonância do filtro	f_{res}	1 kHz
Ondulação de corrente no indutor	ΔI_L	30%
Ondulação de tensão no capacitor do barramento cc	ΔV_o	5%

Fonte: produção do próprio autor

3.5.1 Projeto do filtro de saída

A metodologia de projeto do filtro LC de saída do conversor é apresentada em (DOS SANTOS, 2012). As equações para o cálculo dos componentes do filtro LC são apresentadas abaixo:

$$L_f = \frac{V_o}{4 \cdot f_s \cdot \Delta I_L} \quad (3.1)$$

$$C_f = \frac{1}{(2 \cdot \pi \cdot f_{res})^2 \cdot L_f} \quad (3.2)$$

Aplicando os parâmetros listados na Tabela 2 em (3.1) e (3.2), obtêm-se os seguintes valores:

$$L_f = 518 \mu\text{H} \quad (3.3)$$

$$C_f = 48 \mu\text{F} \quad (3.4)$$

O filtro de saída é composto, então, por quatro indutores IT-560, fabricados pela Magmattec, e um capacitor B32322 50 μF /400 Vac, fabricado pela EPCOS por fase.

3.5.2 Projeto da capacitância do barramento cc

O projeto da capacitância do barramento cc é apresentado em (SOUZA, 1998). A equação que determina a capacitância mínima é dada pela equação (3.5).

$$C_{o1} = C_{o2} \geq \frac{S_o}{3 \cdot \pi \cdot f_r \cdot V_o \cdot \Delta V_o} \quad (3.5)$$

Aplicando os parâmetros de projeto em (3.5), obtêm-se os valores dos capacitores do barramento cc:

$$C_{o1} = C_{o2} \geq 1600 \mu\text{F} \quad (3.6)$$

Entretanto, pelo critério de corrente eficaz nesses capacitores, são associados em paralelo três capacitores B43875 4700 μF /450 V, fabricados pela EPCOS.

3.5.3 Projeto do conversor meia ponte trifásico

Para a especificação dos semicondutores do conversor meia ponte trifásico, é preciso calcular os valores médio e eficaz das correntes nos interruptores e nos diodos. A metodologia pode ser encontrada em (SPERB, 2007).

O módulo escolhido foi 2MBI300U4H-120, fabricado pela Fuji Electric, contendo dois interruptores com diodos em anti paralelo.

Após a definição do semicondutor, é preciso realizar o cálculo térmico do conversor com os interruptores escolhidos. O projeto resultou na escolha do dissipador P16 300 mm, fabricado pela Semikron, com ventilação forçada de uma turbina D2E133-AM47, fabricada pela EMB-PAPST.

3.6 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram apresentadas as principais características do DSTATCOM controlado em tensão, a topologia empregada e o resultado do projeto dos elementos de potência do conversor.

O controle em corrente é a estratégia mais empregada em compensadores de reativos, já que permite autopreservação do conversor de potência em transitórios da rede.

O controle em tensão traz algumas desvantagens no que diz respeito à implementação, pois a sua proteção é mais complexa e sofre com variações bruscas na corrente.

O conversor emprega uma topologia bem disseminada, assim como seu projeto. O conversor teve a necessidade de utilizar interruptores de maior capacidade devido às perdas na comutação, visto que a frequência de comutação é relativamente alta para a potência em questão.

4 SISTEMA DE CONTROLE

Equation Section (Next)

A estrutura de potência necessita ser associada a um sistema de controle adequado para que ela possa ter êxito na regulação de tensão do PAC.

O sistema de controle do inversor deve ser capaz de atender as seguintes especificações: as tensões de saída sintetizadas pelo conversor devem ser senoidais e com baixa distorção harmônica, regular a tensão total do barramento cc e evitar desequilíbrios de tensão sobre os capacitores que compõem o barramento cc.

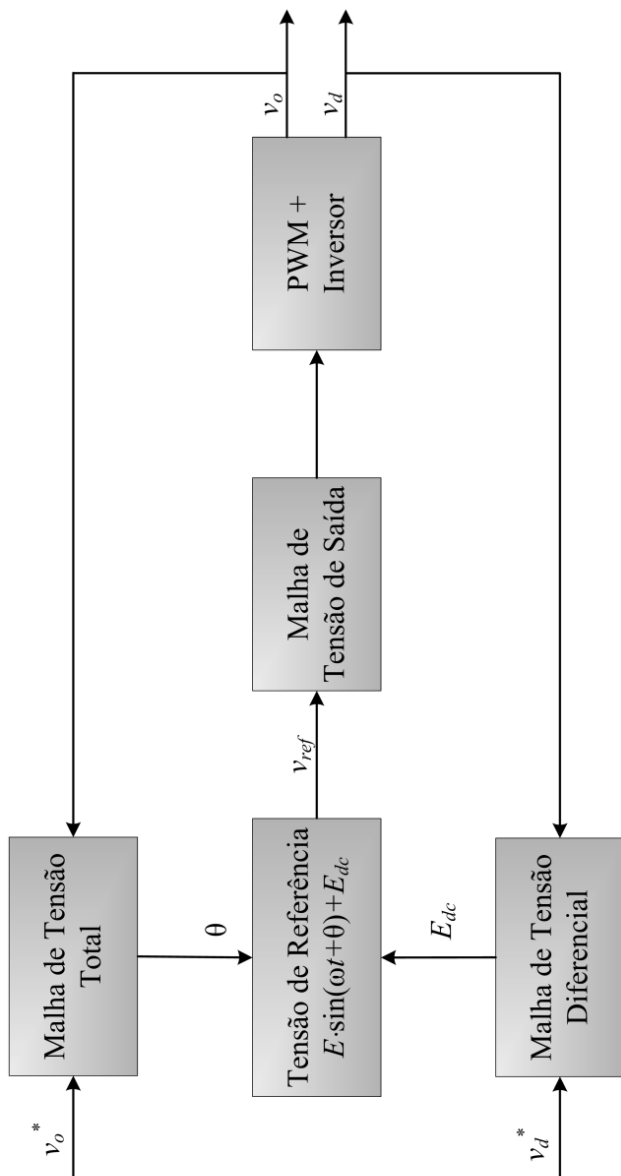
A estrutura de controle do DSTATCOM deve, então, operar com três malhas de controle distintas, constituídas de uma malha de tensão ca, uma malha de tensão total e uma malha de tensão diferencial do barramento cc. Por se tratar de um conversor trifásico, a malha de tensão ca é triplicada, existindo uma malha para cada fase do sistema. A Figura 18 apresenta o diagrama de blocos simplificado do sistema de controle do DSTATCOM.

A malha de tensão de saída é uma malha composta por uma malha de amortecimento ativo e uma malha de síntese da referência da tensão ca (v_{ref}). A malha de amortecimento atenua o pico de ressonância do filtro LCL equivalente do DSTATCOM, que surge da combinação entre o filtro LC do conversor e a indutância da rede. Essa malha atua monitorando a tensão sobre os capacitores do filtro LCL equivalente, compensando sua dinâmica e o sinal de controle dessa malha é subtraído do sinal de controle da malha de tensão ca. Essa malha tem como função retirar qualquer dinâmica de ressonância que estaria prestes a aparecer sobre a tensão nos capacitores.

A malha de tensão ca é responsável pela síntese de uma tensão adequada sobre os capacitores, ponto esse conectado ao PAC. Essa malha é extremamente rápida, em torno de um quarto da frequência de comutação dos interruptores, e é influenciada pela dinâmica da malha de amortecimento.

A malha de tensão total do barramento cc monitora a tensão total do barramento cc e atua sobre a fase (θ) da tensão sintetizada pela malha de tensão ca. Essa malha é projetada para ser mais lenta que a ondulação natural do barramento cc, com frequência de cruzamento por zero girando em torno de 30 Hz a 60 Hz.

Figura 18 - Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle



Fonte: produção do próprio autor

A malha de tensão diferencial é a malha responsável pelo equilíbrio das tensões do barramento cc. Essa é a malha mais lenta do sistema, em torno de alguns Hertz. Dessa maneira, não há influência entre as outras duas malhas. A malha de tensão diferencial monitora a diferença entre as tensões dos capacitores do barramento cc e atua no sistema através da inserção de um pequeno nível médio na tensão (E_{dc}), fazendo com que um capacitor receba mais energia que o outro, levando-os ao equilíbrio.

O bloco de tensão de referência recebe os sinais de ângulo e nível médio dos controladores de tensão do barramento cc e gera três sinais trifásicos equilibrados, defasados em 120 graus e de amplitude E .

Diante do exposto, esse capítulo apresenta a estrutura de controle proposta para o inversor trifásico com filtro LCL equivalente a quatro fios. Serão apresentados também os modelos matemáticos necessários para os projetos dos compensadores das malhas de controle e, por fim, é apresentado um exemplo de projeto para o sistema de controle proposto.

4.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

A modelagem foi realizada buscando as funções de transferência que representam o comportamento dinâmico do inversor trifásico. Os modelos dinâmicos obtidos nesta seção são necessários para os projetos dos compensadores das três malhas de tensão ca e das duas malhas de tensão cc que compõem o sistema de controle. Analisando a Figura 25, verifica-se que as funções de transferência necessárias para o projeto dos compensadores são:

- $G_{vac}(s)$ – função de transferência que expressa a relação entre a variação da tensão de saída e a variação da razão cíclica;
- $G_{vo}(s)$ – função de transferência que expressa a relação entre a variação da tensão total do barramento cc e variação do ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC;
- $G_{vd}(s)$ – função de transferência que expressa a relação entre a variação da tensão diferencial do barramento cc e variação da tensão no PAC.

4.1.1 Malha de tensão ca

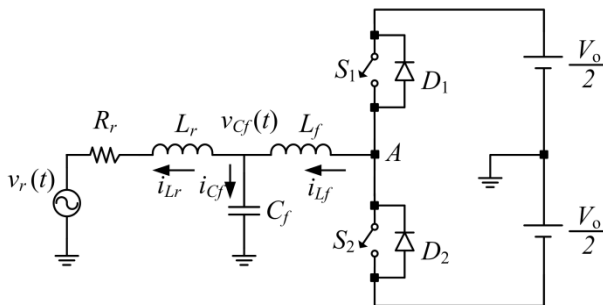
A técnica de controle utilizada para o controle das tensões de saída do conversor se baseia na variação da largura de pulso do comando dos interruptores (PWM). Através do monitoramento das tensões dos capacitores do filtro de saída, o controle força a tensão de saída a seguir a referência senoidal.

As referências para as tensões de saída são geradas a partir de circuitos PLL, onde as referências são sincronizadas com as tensões do PAC. Os sinais provenientes dos circuitos PLL podem ser considerados sinais puramente senoidais, pois possuem distorção harmônica quase nula.

4.1.2 Modelagem da planta de tensão ca

O circuito do inversor trifásico com ponto médio pode ser representado por um circuito monofásico, conforme apresentado na Figura 19. O barramento é dividido e o ponto médio é conectado ao ponto de neutro do sistema. Desta forma, cada fase pode ser analisada separadamente e o resultado obtido para uma fase pode ser estendido para as demais fases.

Figura 19 - Circuito monofásico



Fonte: produção do próprio autor

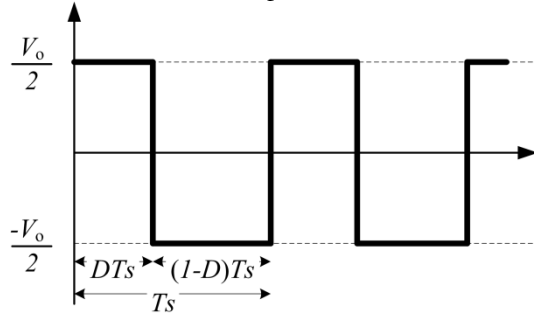
O comportamento da comutação dos interruptores produz um nível de tensão no ponto A que pode ser modelado como uma fonte de tensão com valor igual à média de tensão em um período de comutação. A Figura 20 apresenta a tensão no ponto A do circuito equivalente do inversor trifásico. Essa técnica de modelagem é conhecida como técnica por valores médios instantâneos.

O valor médio da tensão para um período de comutação no ponto A é dado por:

$$v_{in}(t) = V_o \left(d(t) - \frac{1}{2} \right) \quad (4.1)$$

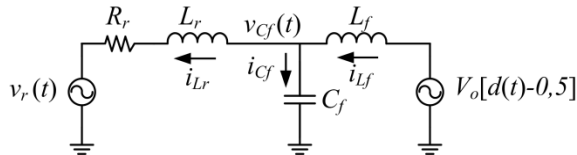
O circuito da Figura 19 pode, então, ser reescrito conforme a Figura 21.

Figura 20 - Tensão instantânea no ponto A



Fonte: produção do próprio autor

Figura 21 - Modelo monofásico da tensão ca



Fonte: produção do próprio autor

O modelo dinâmico a ser utilizado é obtido através da substituição dos valores de $i_{Lr}(t)$, $i_{Lf}(t)$, $v_{Cf}(t)$ e $v_r(t)$ por seus valores médios em um período de comutação, sendo estes representados respectivamente por $\langle i_{Lr}(t) \rangle$, $\langle i_{Lf}(t) \rangle$, $\langle v_{Cf}(t) \rangle$ e $\langle v_r(t) \rangle$. Considerando que $d(t)$ é a razão cíclica do interruptor S_1 , pode-se obter o seguinte modelo médio para descrever a variação temporal da tensão de saída do conversor:

$$k_{vd3} \cdot \frac{d^3 \langle v_{Cf}(t) \rangle}{dt^3} + k_{vd2} \cdot \frac{d^2 \langle v_{Cf}(t) \rangle}{dt^2} + k_{vd1} \cdot \frac{d \langle v_{Cf}(t) \rangle}{dt} + k_{vd0} \cdot \langle v_{Cf}(t) \rangle =$$

$$= L_f \cdot \frac{d\langle v_r(t) \rangle}{dt} + L_r \cdot V_o \cdot \frac{d\left[d(t) - \frac{1}{2}\right]}{dt} + R_r \cdot V_o \cdot \left[d(t) - \frac{1}{2}\right] \quad (4.2)$$

onde:

$$k_{vd3} = L_f \cdot L_r \cdot C_f \quad (4.3)$$

$$k_{vd2} = R_r \cdot L_f \cdot C_f \quad (4.4)$$

$$k_{vd1} = L_f + L_r \quad (4.5)$$

$$k_{vd0} = R_r \quad (4.6)$$

Uma vez que a frequência de comutação é significativamente maior que a frequência fundamental da rede elétrica, pode-se considerar que a tensão de entrada $v_r(t)$ é constante em um período de comutação. Então, aplicando-se pequena perturbação na razão cíclica e surgindo uma perturbação tensão no capacitor do filtro de saída, representados respectivamente por $\hat{d}(t)$ e $\hat{v}_{Cf}(t)$, tem-se:

$$\langle v_{Cf}(t) \rangle = V_{Cf} + \hat{v}_{Cf}(t) \quad (4.7)$$

$$\langle v_r(t) \rangle = V_r \quad (4.8)$$

$$d(t) = D + \hat{d}(t) \quad (4.9)$$

onde:

$$|V_{Cf}| \gg |\hat{v}_{Cf}(t)| \quad (4.10)$$

$$|D| \gg |\hat{d}(t)| \quad (4.11)$$

Substituindo (4.7), (4.8) e (4.9) em (4.2), e considerando-se que as perturbações apresentam amplitudes muito menores que seus valores quiescentes, condições essas definidas em (4.10) e (4.11), obtém-se a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} & k_{vd3} \cdot \frac{d^3[V_{Cf} + \hat{v}_{Cf}(t)]}{dt^3} + k_{vd2} \cdot \frac{d^2[V_{Cf} + \hat{v}_{Cf}(t)]}{dt^2} \\ & + k_{vd1} \cdot \frac{d[V_{Cf} + \hat{v}_{Cf}(t)]}{dt} + k_{vd0} \cdot [V_{Cfa} + \hat{v}_{Cfa}(t)] = L_{fa} \cdot \frac{dV_r}{dt} + \\ & L_r \cdot V_o \cdot \frac{d\left[D + \hat{d}(t) - \frac{1}{2}\right]}{dt} + R_r \cdot V_o \cdot \left[D + \hat{d}(t) - \frac{1}{2}\right] \end{aligned} \quad (4.12)$$

Para obter o modelo ca da planta de tensão de saída, desprezam-se os componentes cc da equação (4.12) e obtêm-se:

$$k_{vd3} \cdot \frac{d^3 \hat{v}_{Cfa}(t)}{dt^3} + k_{vd2} \cdot \frac{d^2 \hat{v}_{Cfa}(t)}{dt^2} + k_{vd1} \cdot \frac{d \hat{v}_{Cfa}(t)}{dt} + k_{vd0} \cdot \hat{v}_{Cfa}(t) = L_r \cdot V_o \cdot \frac{d \hat{d}(t)}{dt} + R_r \cdot V_o \cdot \hat{d}(t) \quad (4.13)$$

Aplicando Laplace com condições iniciais nulas na equação (4.13), obtêm-se a função de transferência que relaciona a tensão no capacitor de saída C_f e a razão cíclica d , dada pela equação (4.14).

$$G_{vac}(s) = \frac{v_{Cf}(s)}{d(s)} = \frac{s \cdot V_o \cdot L_r + V_o \cdot R_r}{s^3 \cdot k_{vd3} + s^2 \cdot k_{vd2} + s \cdot k_{vd1} + k_{vd0}} \quad (4.14)$$

4.1.3 Malha de tensão do barramento cc

A técnica de controle utilizada para o controle da tensão do barramento cc do conversor realiza a regulação através da variação do ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão de saída imposta pelo controle de tensão ca do conversor ao PAC. Com o monitoramento das tensões de cada capacitor do barramento, o controle age sobre a tensão total do barramento de forma a que ela siga a referência determinada e que a tensão diferencial seja nula.

O controlador de tensão total do barramento atua sobre o sistema aplicando uma pequena defasagem nos sinais de referência gerados pelos circuitos de PLL, enquanto o controlador de tensão diferencial do barramento cc atua na inserção um nível médio na referência de tensão. Esse nível médio faz com que a energia drenada por um capacitor seja maior que a energia drenada pelo outro capacitor, havendo, assim, a compensação do desequilíbrio das tensões.

4.1.4 Modelagem da planta de tensão total do barramento cc

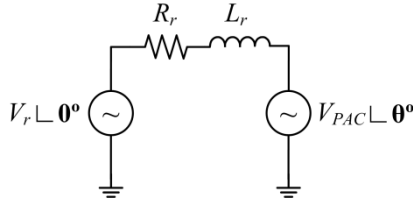
Para o projeto do compensador da malha de tensão total é necessário determinar um modelo matemático que descreva o comportamento dinâmico da tensão total do barramento cc a partir do ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão no PAC (ENDERLE, 2012).

O modelo matemático é obtido através do balanço de potência entre a rede e o conversor. A regulação da tensão do barramento cc do

DSTATCOM depende da pequena parcela de potência ativa drenada da rede pelo conversor. Essa energia pode ser determinada pela análise do fluxo de potência entre a tensão da rede e a tensão imposta ao PAC pelo conversor.

Para a obtenção desse modelo utilizou-se o circuito monofásico apresentado na Figura 22. O conversor pode ser substituído por uma fonte de tensão controlada conectada a rede através da sua impedância equivalente. Isso é possível devido a malha de tensão ca ser significativamente mais rápida que a malha de tensão total do barramento cc e garantir uma tensão senoidal regulada no PAC. Para efeitos de modelagem, a carga conectada ao PAC foi desconsiderada.

Figura 22 - Circuito monofásico equivalente



Fonte: produção do próprio autor

Pelo balanço de potência, tem-se que a soma entre a potência absorvida pelo barramento cc (p_C) e a potência demandada da rede (p_{inv}) deve ser nula. Assim, a expressão do balanço de energia pode ser escrita como:

$$p_{inv} + p_C = 0 \quad (4.15)$$

A potência ativa que circula entre as duas fontes de tensão do modelo da Figura 22 foi determinada na Seção 1 e a equação que rege esse fluxo de potência está reescrita abaixo.

$$p_{inv} = k_{p1} - k_{p2} \cdot \cos(\theta) + k_{p3} \cdot \sin(\theta) \quad (4.16)$$

onde:

$$k_{p1} = \frac{V_r^2}{Z_r} \cdot \cos(\phi) \quad (4.17)$$

$$k_{p2} = \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \cos(\phi) \quad (4.18)$$

$$k_{p3} = \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{Z_r} \cdot \sin(\phi) \quad (4.19)$$

O controle, para regular o nível de tensão nos capacitores do barramento, deve atuar sobre a defasagem angular entre as duas tensões (rede e do PAC), mas na equação (4.16) não é possível obter uma expressão que relaciona linearmente a potência ativa e o ângulo de defasagem θ .

Um modelo simplificado pode ser obtido desprezando-se a resistência R_r da rede. Dessa maneira, (4.16) pode ser escrita como:

$$p_{inv} = k_{p4} \cdot \sin(\theta) \quad (4.20)$$

onde:

$$k_{p4} = \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{\omega \cdot L_r} \quad (4.21)$$

O termo $\sin(\theta)$ pode ser aproximado por θ enquanto o ângulo permanecer pequeno. A análise dessa aproximação é debatida no Apêndice C. Dessa forma tem-se:

$$\sin(\theta) \cong \theta \quad (4.22)$$

Substituindo (4.22) em (4.20) tem-se:

$$p_{inv} = k_{p4} \cdot \theta \quad (4.23)$$

Então, aplicando uma pequena perturbação no ângulo de defasagem θ e surgindo uma perturbação na potência ativa demandada pelo conversor, representados respectivamente por $\hat{\theta}(s)$ e $\hat{p}_{inv}(s)$, tem-se:

$$p_{inv} = P_{inv} + \hat{p}_{inv}(s) \quad (4.24)$$

$$\theta = \Theta + \hat{\theta}(s) \quad (4.25)$$

onde:

$$|P_{inv}| \gg |\hat{p}_{inv}(s)| \quad (4.26)$$

$$|\Theta| \gg |\hat{\theta}(s)| \quad (4.27)$$

Substituindo (4.24) e (4.25) em (4.23), e considerando-se que as perturbações apresentam amplitudes muito menores que seus valores

quiescentes, condições essas definidas em (4.26) e (4.27), obtém-se a seguinte expressão:

$$P_{inv} + \hat{p}_{inv}(s) = k_{p4} \cdot [\Theta + \hat{\theta}(s)] \quad (4.28)$$

Considerando os termos de primeira ordem e desprezando os demais termos, tem-se a expressão que relaciona a variação da potência ativa absorvida com a variação do ângulo de defasagem θ .

$$\frac{\hat{p}_{inv}(s)}{\hat{\theta}(s)} = \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{\omega \cdot L_r} \quad (4.29)$$

Como o sistema a ser modelado é originalmente trifásico e a análise desenvolvida foi realizada a partir de um circuito monofásico, faz-se necessário inserir um termo de correção. Considerando que cada fase drenará o mesmo valor de potencia ativa, a expressão (4.29) se torna:

$$\frac{\hat{p}_{inv}(s)}{\hat{\theta}(s)} = 3 \cdot \frac{V_r \cdot V_{PAC}}{\omega \cdot L_r} \quad (4.30)$$

Tendo a expressão (4.30) em mãos, é necessário determinar a relação entre a potência ativa absorvida pelo conversor e a tensão nos capacitores.

Considera-se que a energia ativa absorvida pelo conversor é toda transferida para os capacitores do barramento cc. Sabe-se que a energia armazenada em um capacitor é dada por:

$$E_C = \frac{C_{oeq} \cdot v_o^2}{2} \quad (4.31)$$

e a energia absorvida tem a seguinte relação com a potência:

$$E_C = \int p_C \cdot dt \quad (4.32)$$

Igualando (4.31) e (4.32) tem-se:

$$\int p_C \cdot dt = \frac{C_{oeq} \cdot v_o^2}{2} \quad (4.33)$$

Aplicando uma pequena perturbação na tensão do barramento cc e surgindo uma perturbação na potência ativa, representados respectivamente por $\hat{v}_o(s)$ e $\hat{p}_C(s)$, tem-se:

$$p_C = P_C + \hat{p}_C(s) \quad (4.34)$$

$$v_o = V_o + \hat{v}_o(s) \quad (4.35)$$

onde:

$$|P_C| \gg |\hat{p}_C(s)| \quad (4.36)$$

$$|V_o| \gg |\hat{v}_o(s)| \quad (4.37)$$

Substituindo (4.34) e (4.35) em (4.33), e considerando-se que as perturbações apresentam amplitudes muito menores que seus valores quiescentes, condições essas definidas em (4.36) e (4.37), obtém-se a seguinte expressão:

$$\frac{P_C + \hat{p}_C(s)}{s} = \frac{C_{oeq}}{2} \cdot [V_o + \hat{v}_o(s)]^2 \quad (4.38)$$

Expandindo (4.38), e tomando apenas os termos lineares, chega-se a expressão que relaciona a variação da tensão nos capacitores com a variação de potência ativa.

$$\frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{p}_C(s)} = \frac{1}{s \cdot C_{oeq} \cdot V_o} \quad (4.39)$$

As expressões que relacionam a potência drenada pelo conversor e a potência armazenada no barramento cc são aplicadas em (4.15) e, com isso, é obtido o modelo dinâmico que relaciona a tensão do barramento com a variação do ângulo de defasagem entre as tensões como segue.

$$G_{vo}(s) = \frac{\hat{v}_{cc}(s)}{\hat{\theta}(s)} = -\frac{3 \cdot V_r \cdot V_{PAC}}{s \cdot \omega \cdot L_r \cdot C_{oeq} \cdot V_o} \quad (4.40)$$

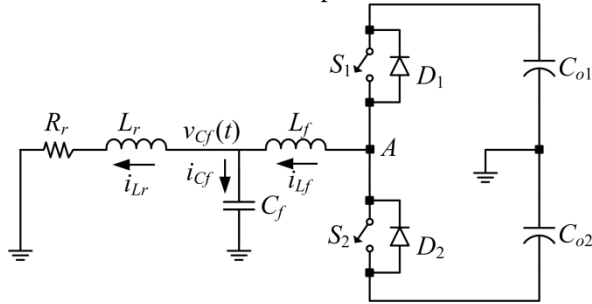
4.1.5 Modelagem da planta de tensão diferencial do barramento cc

O modelo dinâmico a ser utilizado na malha de controle diferencial deve relacionar a tensão diferencial entre as tensões dos capacitores do barramento cc e a tensão no PAC.

O circuito completo para a análise da tensão diferencial pode ser visto na Figura 23. Na análise cc do circuito, a fonte de tensão da rede, v_{ra} , é removida do circuito.

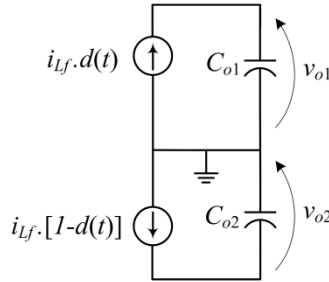
Já o circuito simplificado apresentado na Figura 24 pode ser utilizado para modelar a malha de tensão diferencial, pois a tensão no PAC é controlada pela malha interna de tensão ca e o ângulo controlado pela malha de tensão total do barramento cc, implicando no consumo conhecido de corrente em regime permanente.

Figura 23 - Circuito monofásico completo



Fonte: produção do próprio autor

Figura 24 - Circuito monofásico simplificado



Fonte: produção do próprio autor

Esse fato pode ser visto na Figura 23, onde a corrente i_{L_f} é totalmente definida com o controle da tensão no PAC. Além disso, a malha de tensão diferencial é significativamente mais lenta que a malha de tensão ca e é mais lenta que a malha de tensão total do barramento cc. Sendo assim, substitui-se a fonte de tensão da rede, o filtro LC e os interruptores, por duas fontes de corrente controladas i_{L_f} .

O circuito equivalente monofásico representado na Figura 24 pode ser utilizado por se tratar de um conversor PWM a quatro fios, sendo assim cada fase pode ser analisada independentemente. Através da análise de malha do circuito, obtêm-se as seguintes equações:

$$v_{o1}(t) = \frac{1}{s \cdot C_o} \cdot i_{L_f}(t) \cdot d(t) \quad (4.41)$$

$$v_{o2}(t) = \frac{1}{s \cdot C_o} \cdot i_{Lf}(t) \cdot [d(t) - 1] \quad (4.42)$$

Aplicando a transformada de Laplace:

$$v_{o1}(s) = \frac{1}{s \cdot C_o} \cdot i_{Lf}(s) \cdot D \quad (4.43)$$

$$v_{o2}(s) = \frac{1}{s \cdot C_o} \cdot i_{Lf}(s) \cdot (D - 1) \quad (4.44)$$

Definindo a tensão diferencial como:

$$v_d(s) = v_{o1}(s) - v_{o2}(s) \quad (4.45)$$

Substituindo as expressões (4.43) e (4.44) na expressão (4.45), tem-se que:

$$v_d(s) = \frac{1}{s \cdot C_o} \cdot i_{Lf}(s) \quad (4.46)$$

A corrente i_{Lf} , obtida através da Figura 23, é dada por:

$$i_{Lf}(s) = v_{Cf}(s) \cdot \frac{s^2 \cdot L_r \cdot C_f + s \cdot R_r \cdot C_f + 1}{s \cdot L_r + R_r} \quad (4.47)$$

Aplicando (4.47) em (4.46) obtém-se a função de transferência que relaciona a tensão diferencial com a tensão no capacitor do filtro:

$$\frac{v_d(s)}{v_{Cf}(s)} = \frac{s^2 \cdot L_r \cdot C_f + s \cdot R_r \cdot C_f + 1}{s^2 \cdot L_r \cdot C_o + s \cdot R_r \cdot C_o} \quad (4.48)$$

Considerando que cada fase aplicará o mesmo valor de tensão contínua, a expressão (4.48) se torna:

$$\frac{v_d(s)}{v_{Cf}(s)} = 3 \cdot \frac{s^2 \cdot L_r \cdot C_f + s \cdot R_r \cdot C_f + 1}{s^2 \cdot L_r \cdot C_o + s \cdot R_r \cdot C_o} \quad (4.49)$$

Um modelo simplificado pode ser obtido desprezando as dinâmicas mais rápidas do polo e dos zeros do modelo completo, resultando na expressão (4.50).

$$G_{vd}(s) = \frac{v_d(s)}{v_{Cf}(s)} = \frac{3}{s \cdot R_r \cdot C_o} \quad (4.50)$$

4.2 PROJETO DO SISTEMA DE CONTROLE

Com os modelos matemáticos que descrevem o comportamento das variáveis de interesse em relação às variáveis de controle já determinados, o projeto dos compensadores pode ser realizado. Os compensadores tem a função de alterar o comportamento estático e dinâmico dos sistemas modelados e forçá-los a atender todas as especificações de projeto.

A Figura 25 apresenta o diagrama de blocos completo do sistema de controle do DSTATCOM, mostrando os ganhos envolvidos no projeto dos controladores e evidenciando cada malha de controle e seus respectivos compensadores.

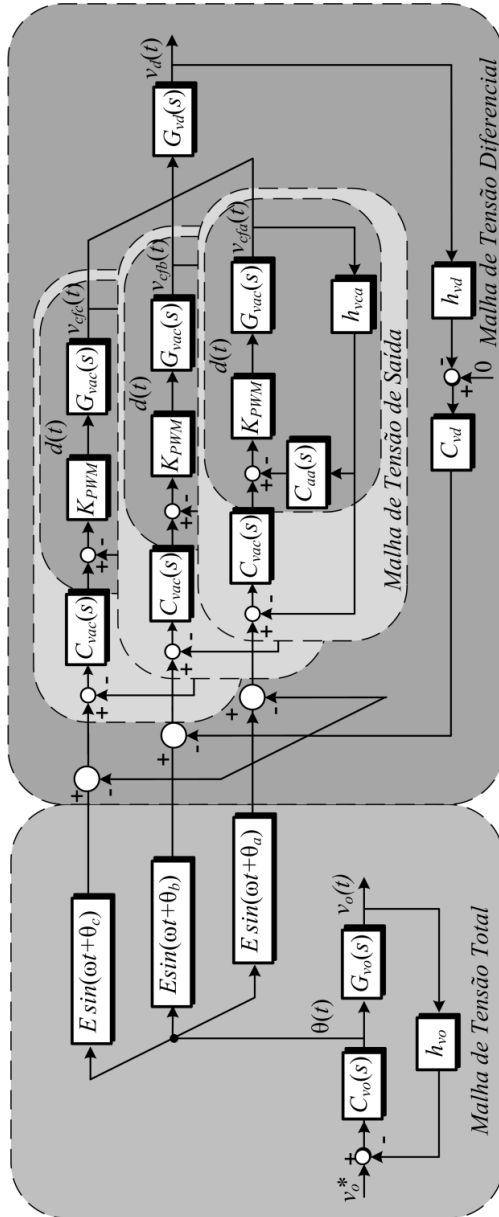
A metodologia de projeto utilizada é baseada na metodologia de resposta em frequência, onde o ganho e a fase do sistema são analisados em função da frequência.

De acordo com a metodologia de projeto para sistemas contínuos no plano s , os requisitos de projeto que garantem a estabilidade e boa resposta dinâmica são (OGATA, 2003) (BARBI, 2007):

- Margem de fase entre 30° e 90° ;
- A inclinação da curva de ganho para o sistema em laço aberto na passagem por 0 dB deve ser de -20 dB/década;
- Erro estático nulo a entrada ao degrau;
- A frequência de cruzamento da curva de ganho para a função de transferência em malha aberta deve ser pelo menos quatro vezes menor do que a frequência de comutação;

Nesse capítulo será apresentado o projeto dos compensadores que compõem o sistema de controle mostrado na Figura 25, baseado nos parâmetros mostrados na Tabela 3. Os parâmetros da rede de distribuição são iguais aos parâmetros utilizados na análise do fluxo de potência no Capítulo 2, ou seja, impedância de 0,2 pu e relação R/X_L unitária.

Figura 25 - Diagrama de blocos completo do sistema de controle



Fonte: produção do próprio autor

Tabela 3 - Parâmetros do conversor

Potência nominal do DSTATCOM	30 kVA
Tensão do barramento cc	800 V
Tensão eficaz de entrada	220 V
Frequência da rede	60 Hz
Frequência de comutação	20 kHz
Capacitância do filtro LC	50 μ F
Indutância no lado da rede	1,82 mH
Resistência no lado da rede	0,685 Ω
Indutância no lado do conversor	560 μ H
Capacitância equivalente do barramento cc	3,5 mF
Ganho do sensor de tensão do barramento cc	1/101
Ganho do sensor de tensão ca de entrada	1/101
Ganho do modulador PWM	1/20

Fonte: produção do próprio autor

4.2.1 Análise da planta de tensão ca

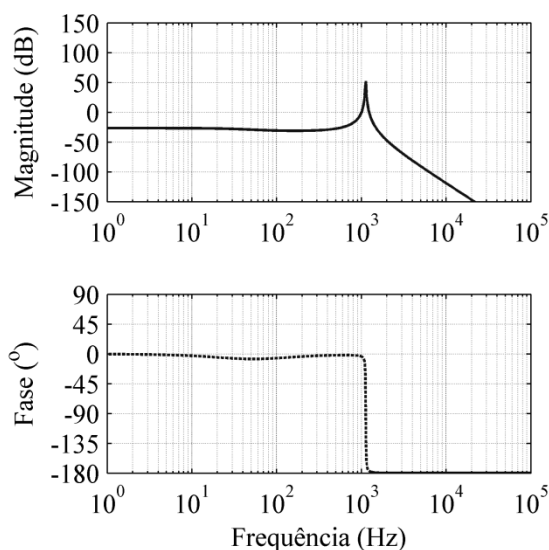
O modelo obtido para a planta de tensão ca possui um zero e três polos, sendo dois polos complexo conjugados. Utilizando os parâmetros do conversor, há a sobreposição do zero com o polo real em torno de 60 Hz, enquanto predominam os dois polos complexos conjugados em 1,17 kHz. A Figura 26 apresenta a resposta em frequência em malha aberta da planta de tensão ca.

A resposta em frequência da planta de tensão ca, com os valores adotados, equivale a uma resposta de segunda ordem.

É válido ressaltar que o regulador de tensão pode ser conectado a qualquer rede de distribuição tendo, portanto, a mais diversa combinação de resistência e indutância equivalente na rede.

Como o pico de ressonância e a queda abrupta da fase da planta de tensão ca trazem dificuldades para o projeto do controlador de tensão ca, é adicionada ao sistema de controle uma malha responsável pelo amortecimento do pico de ressonância da planta de tensão ca.

Figura 26 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da planta de tensão ca



Fonte: produção do próprio autor

4.2.2 Amortecimento ativo

No presente caso, o DSTATCOM possui um indutor e um capacitor de filtro para a atenuação dos harmônicos. Entretanto, devido à característica da rede ser indutiva, o sistema resultante visto pelo conversor passa a ser um sistema com dois indutores e um capacitor, formando um filtro LCL equivalente.

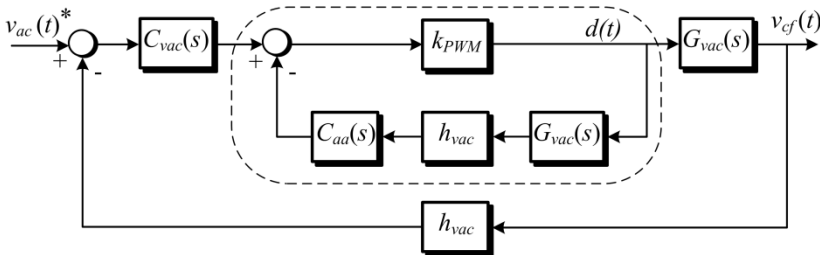
O filtro LCL é do tipo passa-baixa de terceira ordem que, em comparação aos filtros L e LC, apresenta boa atenuação dos harmônicos próximos à frequência de comutação, obtidos com menores valores de indutância, ocasionando na redução do volume dos indutores do filtro de entrada do conversor. No entanto, devido à interação entre os elementos armazenadores de energia que compõem o filtro LCL e as próprias impedâncias do sistema de alimentação, o filtro LCL apresenta a ocorrência do fenômeno de ressonância. A ressonância do filtro LCL poderá fazer com que o sistema torne-se instável ou opere em uma região próxima à instabilidade (NISHIOKA, 2011).

Dessa forma, é utilizada uma técnica de amortecimento da ressonância do filtro LCL equivalente a fim de fazer com o sistema se torne estável em qualquer ponto de operação, mesmo com variações paramétricas.

A técnica de amortecimento ativo empregada, apresentada em (NISHIOKA, 2011), é realizada através da utilização de um compensador em avanço aplicado à leitura de tensão do PAC. O sinal resultante é aplicado no sinal de saída do compensador de tensão ca, conforme pode ser visualizado na Figura 27.

A malha de amortecimento influencia a malha de tensão ca pelo fato dela ser interna à malha de tensão ca. Assim, faz-se necessário primeiro o projeto do compensador de amortecimento.

Figura 27 - Diagrama de blocos do controle de tensão ca e do amortecimento ativo



Fonte: produção do próprio autor

A estrutura do compensador em avanço para a malha de amortecimento é composta por um ganho, um polo e um zero. A equação (4.51) apresenta sua função de transferência.

$$C_{aa} = k_{aa} \cdot \frac{T_d \cdot s + 1}{\beta \cdot T_d \cdot s + 1} \quad (4.51)$$

onde k_{aa} é o ganho do compensador β é uma constante calculada a partir do máximo avanço de fase especificado para o compensador. O valor de β para que se tenha um ângulo de avanço deverá ser maior que zero e menor que um, ou seja, frequência do zero menor que a frequência do polo. A constante β é definida como:

$$\beta = \frac{1 - \sin(\varphi_{\max})}{1 + \sin(\varphi_{\max})} \quad (4.52)$$

O parâmetro T_d é calculado a partir da frequência em que ocorre o máximo ângulo de avanço e β , dado por:

$$T_d = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\max} \cdot \sqrt{\beta}} \quad (4.53)$$

Em (NISHIOKA, 2011) é apresentada uma avaliação da influência de cada parâmetro do compensador em avanço. Com base nessa avaliação, optou-se por utilizar um compensador em avanço com dois estágios idênticos, cada um com ângulo de avanço de 60° , ganho do compensador igual a 7,07 e a frequência na qual ocorre o máximo avanço é definida como sendo igual à frequência de ressonância do filtro LCL equivalente.

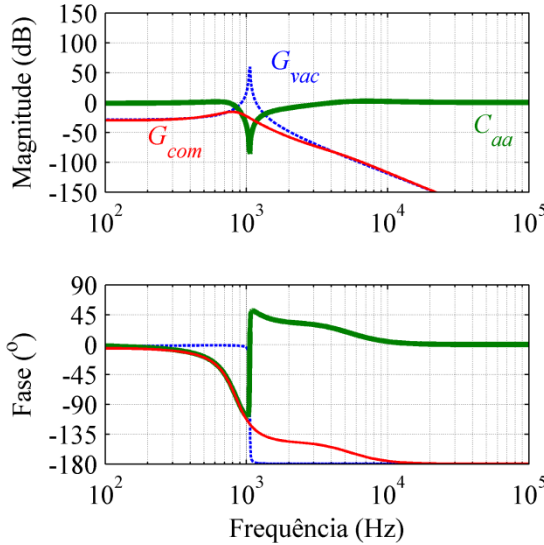
Utilizando os valores mencionados acima, obteve-se o seguinte compensador em avanço:

$$C_{aa}(s) = 50 \cdot \frac{(s + 1.768)^2}{(s + 24.620)^2} \quad (4.54)$$

A Figura 28 apresenta o diagrama de Bode contendo a resposta em frequência da malha fechada de amortecimento e do controlador de amortecimento.

Observa-se que o efeito da realimentação com o controlador em avanço produz um entalhe (notch) na mesma frequência em que foi projetado para ter o máximo ângulo de avanço.

Figura 28 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta para a malha de tensão amortecida e não amortecida, e da função de transferência em malha fechada para a malha de amortecimento

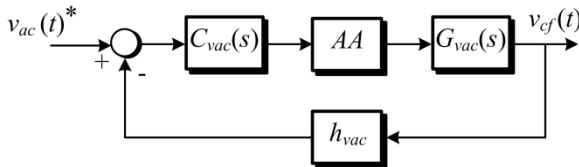


Fonte: produção do próprio autor

4.2.3 Compensador de tensão ca

Para o projeto do compensador de tensão ca, a malha interna de amortecimento é substituída por sua dinâmica em malha fechada, representada pelo bloco AA. O diagrama de blocos que representa a malha de controle de tensão ca é mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Diagrama de blocos do controle de tensão ca



Fonte: produção do próprio autor

O compensador escolhido para compor a malha de tensão ca do DSTATCOM é um compensador do tipo proporcional integral derivativo.

A equação (4.55) apresenta sua função de transferência do controlador.

$$C_{pid}(s) = k_{pid} \cdot \frac{(s + z_{pid1}) \cdot (s + z_{pid2})}{s \cdot (s + p_{pid})} \quad (4.55)$$

onde k_{pid} é o ganho do compensador, z_{pid1} e z_{pid2} são as posições dos zeros e p_{pid} é a posição do polo do compensador, ambos em rad/s.

O polo na origem desse compensador fornece ao sistema elevado ganho em baixas frequências, enquanto o polo em alta frequência auxilia na rejeição de ruídos. O zero é posicionado após a frequência de cruzamento para que nessa frequência a função de transferência da tensão ca possua inclinação de -20dB/década, conforme (OGATA, 2003) e (BARBI, 2007).

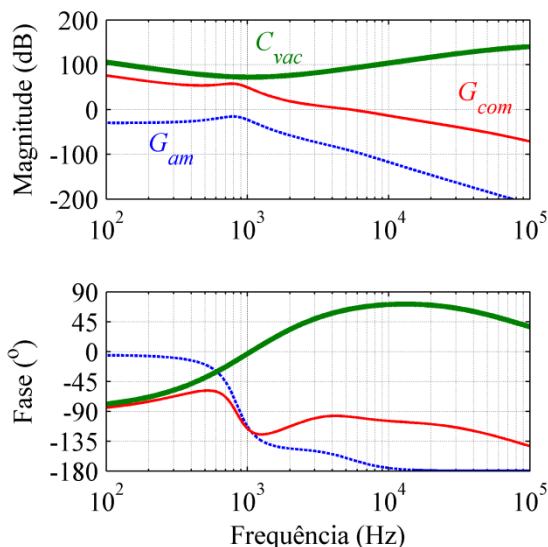
Para o compensador de tensão ca, os zeros foram alocados em 1,05 kHz e o polo foi posicionado em uma frequência quatro vezes maior do que a frequência de comutação.

O compensador obtido é dado pela equação (4.56). A frequência de cruzamento obtida com esse compensador foi de 5,3 kHz com uma margem de fase de 81,8°.

$$C_{vac}(s) = 1420 \cdot \frac{(s + 6.580)^2}{s \cdot (s + 502.000)} \quad (4.56)$$

A Figura 30 apresenta o diagrama de Bode contendo a resposta em frequência da malha aberta da tensão ca não compensada, do controlador de tensão ca e a da tensão ca compensada.

Figura 30 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão ca amortecida, do controlador de tensão ca e da função de transferência em malha aberta da tensão ca compensada



Fonte: produção do próprio autor

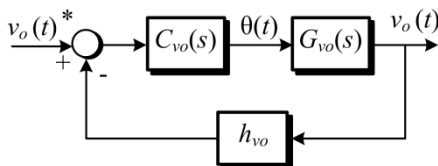
4.2.4 Compensador de tensão total do barramento cc

A malha de tensão total do barramento cc deve ser suficientemente mais lenta do que a malha de tensão ca para que a dinâmica da malha da tensão total não distorça a forma de onda da tensão de referência e também mais lenta que a mínima frequência de ondulação do barramento cc. Caso a malha de tensão total do barramento cc tiver banda passante próxima à oscilação de tensão do barramento cc, a ação de controle do compensador apresentará oscilações que, dentro de um ciclo da rede, aumenta e diminui a frequência do sinal de referência para a malha de tensão ca, provocando distorções e degradação da qualidade da tensão sintetizada no PAC.

Usualmente, determina-se que a frequência de cruzamento da malha de tensão total seja no máximo um décimo da frequência natural de ondulação intrínseca a cada topologia.

A Figura 31 mostra o diagrama de blocos que representa a malha de tensão total do barramento cc.

Figura 31 - Diagrama de blocos do controle de tensão total do barramento cc



Fonte: produção do próprio autor

O compensador escolhido para compor a malha de tensão total do barramento cc é um compensador do tipo proporcional integral com a adição de um polo em alta frequência para dar ao sistema as mesmas características de alto ganho em baixas frequências e grande atenuação em altas frequências.

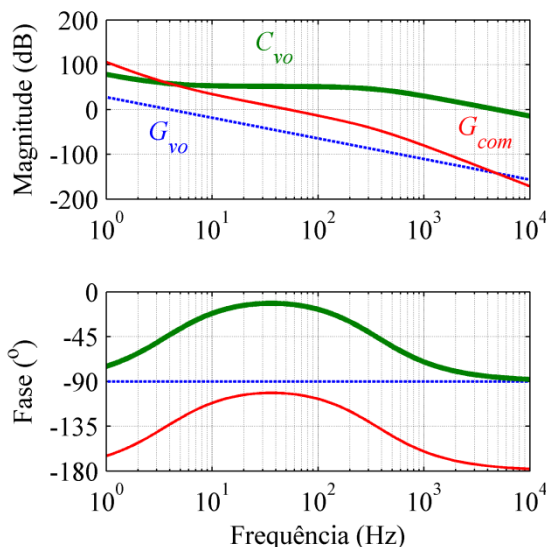
Para o compensador de tensão total do barramento cc, o zero foi alocado em 1 Hz e o polo foi posicionado em 15 Hz. O compensador obtido é dado pela equação (4.57).

$$C_{vo}(s) = 15.000 \cdot \frac{s + 23}{s \cdot (s + 2260)} \quad (4.57)$$

A frequência de cruzamento obtida com esse compensador foi de 52,1 Hz com uma margem de fase de 77,7°.

A Figura 32 apresenta o diagrama de Bode contendo a resposta em frequência da malha aberta da tensão ca não compensada, do controlador de tensão ca e a da tensão ca compensada.

Figura 32 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão total, do controlador de tensão total e da função de transferência em malha aberta da tensão total compensada



Fonte: produção do próprio autor

4.2.5 Compensador de tensão diferencial do barramento cc

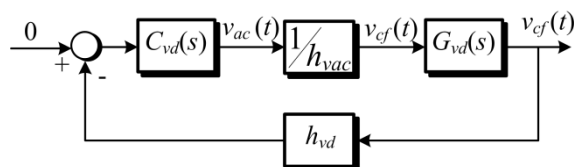
A malha de controle da tensão diferencial terá ação direta sobre a malha de tensão ca inserindo um pequeno nível contínuo na referência de tensão. Essa malha engloba toda a malha de tensão ca e ela deve ser considerada no projeto do controlador de tensão diferencial.

A malha de tensão diferencial é projetada para ser significativamente mais lenta que a malha de tensão ca, evitando a interação entre as duas malhas. A dinâmica da malha de tensão ca pode, então, ser substituída por um ganho igual ao inverso do ganho do sensor de tensão ca.

A Figura 33 mostra o diagrama de blocos que representa a malha de tensão total do barramento cc.

O compensador escolhido para compor a malha de tensão diferencial do barramento cc é um compensador do tipo proporcional integral com a adição de um polo em alta frequência.

Figura 33 - Diagrama de blocos do controle de tensão diferencial do barramento cc



Fonte: produção do próprio autor

Para o compensador de tensão diferencial do barramento cc, o zero foi alocado em 0,09 Hz e o polo foi posicionado em 6,46 Hz. O compensador obtido é dado pela equação (4.58).

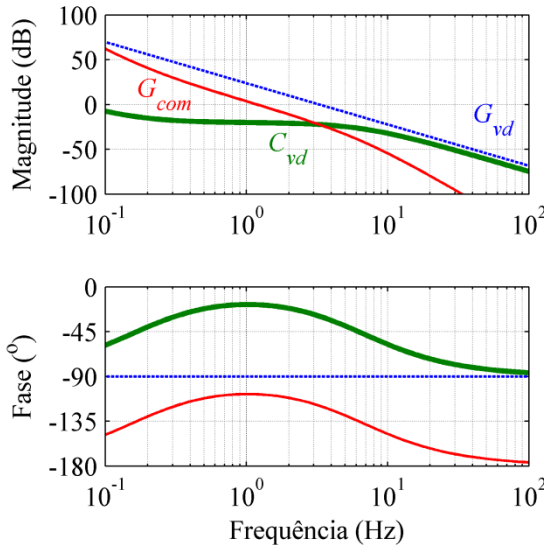
$$C_{vd}(s) = 15 \cdot \frac{s+1}{s \cdot (s+41)} \quad (4.58)$$

A frequência de cruzamento obtida com esse compensador foi de 1,19 Hz com uma margem de fase de 72,1°.

A Figura 34 apresenta o diagrama de Bode contendo a resposta em frequência da malha aberta da tensão ca não compensada, do controlador de tensão ca e a da tensão ca compensada.

O Apêndice D apresenta a análise de variação paramétrica dos controladores projetados.

Figura 34 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão diferencial, do controlador de tensão diferencial e da função de transferência em malha aberta da tensão diferencial compensada



Fonte: produção do próprio autor

4.3 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram obtidos os modelos dinâmicos que descrevem o comportamento do conversor e o projeto dos compensadores, que forçam o sistema a se comportar conforme as especificações adotadas.

A inclusão de um compensador para promover o amortecimento ativo do pico de ressonância que surge no modelo de tensão ca não é estritamente necessária. Entretanto, o amortecimento ativo proporciona um acréscimo na estabilidade do sistema, o que se torna importante quando o conversor passa a ser conectado a qualquer rede de distribuição, podendo apresentar as mais diversas combinações de parâmetros da rede.

Em outras palavras, o amortecimento ativo altera não somente o diagrama de módulo, mas também o diagrama de fase e essa alteração promove um acréscimo na fase perto do cruzamento por zero do sistema

compensado, aumentando então a margem de fase. Dessa forma, ao projetar o compensador de tensão ca, não haverá frequências em que a margem de fase seja negativa e, por conseguinte, o sistema será estável em qualquer frequência de cruzamento.

A estratégia de amortecimento ativo se mostrou melhor que o esperado, pois foi uma adaptação de (NISHIOKA, 2011), em que essa estratégia não interagia com a rede e a estratégia utilizada é o controle em corrente de um retificador. Além disso, o sistema de controle ficou mais compacto, facilitando a visualização, e não foi necessária a inclusão de sensores de tensão adicionais, já que foram utilizados os sensores que eram requeridos para o controle de tensão ca.

Dentre todas as malhas, é de longe a tensão total do barramento cc que deve ter maior atenção, pois é a malha de maior não linearidade e maior dificuldade de sintonia. A própria implementação analógica não é fácil, o que foi tentado através de moduladores em fase (PM). Esse tipo de modulador PM aumenta a amplitude do sinal de saída conforme o ângulo de compensação aumenta. Isso acarreta problemas quando essa referência é o sinal que será sintetizado no PAC.

A necessidade de a malha de tensão total possuir frequência de cruzamento por 0 dB tão elevada se deve ao fato de que a capacitância equivalente do barramento é baixa para essa aplicação (116 $\mu\text{F}/\text{kVA}$), o que faz que haja uma grande e rápida elevação de tensão durante os transitórios. Outros trabalhos (ENDERLE, 2012) utilizam mais capacitância por unidade de potência (4,7 mF/kVA), o que acarreta em conversores mais volumosos, mais suscetíveis à falhas e mais caros.

Caso a malha possua frequência de cruzamento em frequências comumente escolhidas para essa aplicação, perto de 6 Hz, durante desconexões de carga a tensão do barramento ultrapassará a tensão máxima permitida sobre os capacitores do barramento cc.

Já a consideração feita na modelagem da planta de tensão diferencial do barramento cc no que diz respeito a corrente i_{Lf} apresentou resultados além das expectativas, já que em validações realizadas e omitidas nesse trabalho, o modelo final apresentou elevado grau de fidelidade em relação ao sistema real, seja com o modelo completo seja com o modelo simplificado.

5 MALHA DE AMPLITUDE DE TENSÃO CA

Equation Section (Next)

Até então, a amplitude de tensão imposta ao PAC era definida como sendo a tensão nominal do sistema, o que é comumente adotado na literatura (MISHRA; GHOSH; JOSHI, 2003) (KUMAR; MISHRA, 2013). Nesse valor, os esforços de potência do conversor são bem definidos e puderam ser vistos na Figura 8. Entretanto, a ANEEL permite que a tensão oscile dentro de uma faixa, denominada como faixa de tensão de atendimento adequada, vista anteriormente na Tabela 1.

Expandindo a análise feita no Capítulo 2, verifica-se que a diminuição do valor eficaz da tensão do PAC implica na redução da energia reativa processada pelo conversor. Dessa forma, sempre haverá um ponto de operação, mesmo que seja no limite mínimo e máximo permitido pela ANEEL, em que o conversor processa sua potência mínima.

Além disso, há situações onde a carga e a rede são tais que naturalmente a tensão no PAC está dentro dos limites, dispensando a presença do compensador. Sendo dispensável, o conversor pode se abster da compensação.

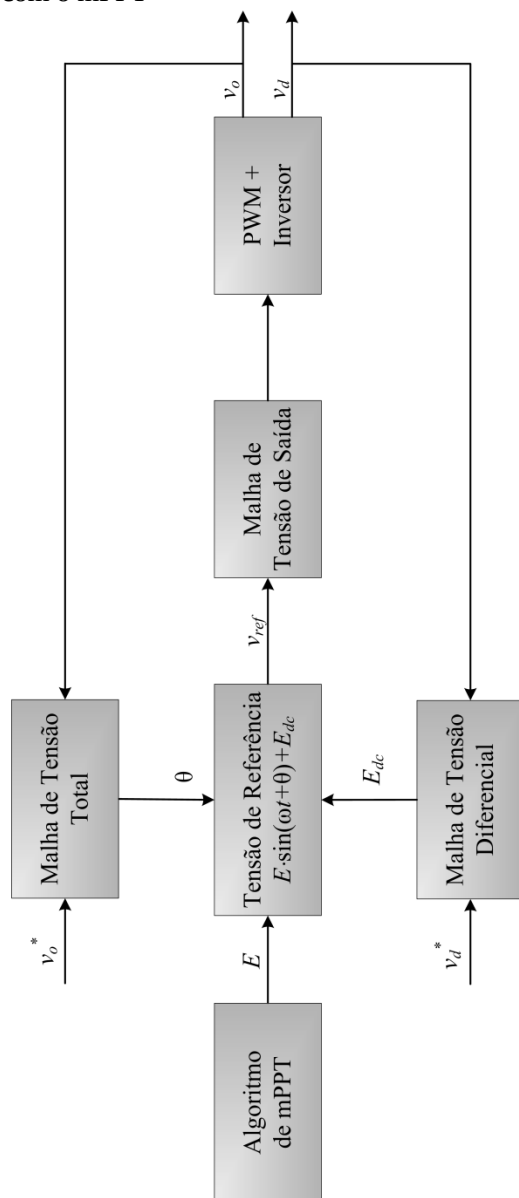
O conversor operando com mínima potência apresentará valores eficazes menores de corrente e, por consequência, menos perdas nos componentes. A redução dos valores de eficazes de corrente produz também um aumento na vida útil do conversor.

Com a adição de uma malha externa, responsável pela determinação das amplitudes de tensão nas três fases do PAC, é possível minimizar os esforços de potência do conversor, além de garantir que essa amplitude não deixe a faixa de atendimento adequada, conforme mostram a Figura 35 e Figura 36.

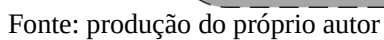
Para tanto, é necessário medir as grandezas elétricas para que seja possível calcular a potência processada pelo DSTATCOM e, com bases nessas informações, atuar sobre o sistema.

Algoritmos semelhantes a essa necessidade são aqueles utilizados em fontes renováveis de energia, especialmente energia solar, buscando o ponto de máxima potência (MPP). Dentre esses algoritmos é escolhido o algoritmo Perturba e Observa (P&O), devido à fácil implementação e boa rastreabilidade.

Figura 35 - Diagrama de blocos simplificado do sistema de controle com o mPPT



Fonte: produção do próprio autor



5.1 MÉTODO PERTURBA E OBSERVA (P&O)

Os métodos de rastreamento do ponto de máxima potência (MPPT) variam conforme a complexidade, os sensores requeridos, velocidade de convergência, custo, eficiência, entre outros (AL-DIAB; SOURKOUNIS, 2010) (ESRAM; CHAPMAN, 2007).

Dentre os inúmeros sistemas que buscam o ponto de máxima potência (MPP), o método P&O é o método mais utilizado, pois possui implementação simples e baixo esforço computacional, é preciso, não necessita de ajustes periódicos e necessita de apenas dois sensores. Entretanto, esse método apresenta baixa resposta transiente, oscilações em regime permanente e é considerado relativamente lento (ESRAM; CHAPMAN, 2007) (ANSARI *et al.*, 2009) (JAIN; AGARWAL, 2007) (DE BRITO *et al.*, 2013) (FARANDA; LEVA; MAUGERI, 2008).

O método P&O consiste em aplicar pequenas perturbações na tensão imposta ao sistema e, com isso, verificar a variação produzida por essa perturbação na potência extraída do sistema.

Se a variação da potência for positiva, ou seja, a potência extraída do sistema estiver aumentando, a próxima variação será no mesmo sentido atual. Caso contrário, a próxima variação se dará no sentido oposto.

O processo se repete periodicamente, seguindo um período de amostragem conhecido, até o MPP ser atingido. O sistema oscila, então, em torno do MPP, sendo que essa oscilação pode ser minimizada com a redução da amplitude da perturbação. Entretanto, uma menor perturbação acarreta na redução da velocidade do MPPT. Uma solução para essa situação conflitante é aplicar uma perturbação com amplitude variável (ESRAM; CHAPMAN, 2007).

Embora de fácil implementação, o método P&O tem algumas deficiências (ANSARI *et al.*, 2009):

- O sistema não opera sempre no MPP devido às pequenas perturbações.
- O sistema pode operar sempre em um modo oscilatório, mesmo em regime permanente.
- O sistema pode falhar em rastrear o MPP em situações de mudanças bruscas e sucessivas.

Apesar disso, a simplicidade do método e a aplicação na qual será empregado compensam as deficiências desta técnica, já que a principal intenção deste trabalho é a comprovação da eficácia do emprego de uma malha de mPPT em sistemas de regulação de tensão.

Existem dois parâmetros a serem definidos na técnica de P&O. O primeiro parâmetro é o período de amostragem, que é o intervalo em que a tensão e a corrente são amostradas e a referência de tensão é determinada. O tempo de amostragem deve ser escolhido como sendo maior que o tempo de estabilização do sistema, evitando instabilidades do algoritmo do MPPT.

O segundo parâmetro é o tamanho da perturbação. Escolhendo uma perturbação elevada provê um rápido rastreamento, mas há uma grande oscilação em torno do MPP. Perturbações pequenas definem um lento rastreamento, porém com pequenas oscilações (AZEVEDO *et al.*, 2008).

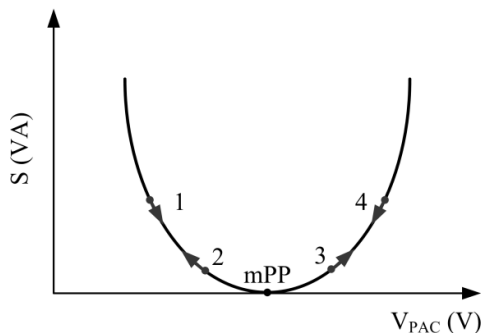
5.2 RASTREAMENTO DO PONTO DE MÍNIMA POTÊNCIA

A estratégia de minimização da potência do conversor baseia-se no método P&O, porém ele é adaptado para buscar o ponto de mínima potência (mPP) processada pelo conversor.

A Figura 37 traz um exemplo de minimização, juntamente com a lógica de implementação.

Como a potência ativa que o DSTATCOM processa é bem inferior à potência reativa, opta-se pela minimização da potência aparente do conversor. Além disso, o uso da potência aparente para a minimização leva em conta também o conteúdo harmônico que o conversor processará na presença de cargas não lineares e/ou com a rede de distribuição poluída.

Figura 37 - Sistemática do mPPT



Fonte: produção do próprio autor

Quando o conversor está operando à esquerda do mPP e a tensão é incrementada (ponto 1), há a diminuição da potência aparente processada pelo conversor. Como esse sentido leva o conversor ao mPP, a amplitude deve ser incrementada no mesmo sentido atual. Entretanto, se a tensão é decrementada (ponto 2), o módulo aumenta e o sistema está divergindo do mPP. Nessa situação, o sentido de incremento deve ser o oposto do sentido atual.

Analogamente, quando o conversor operar à direita do mPP, um acréscimo de tensão leva o sistema à divergência (ponto 3) e seu sentido deve ser invertido, assim como um decréscimo traz o sistema ao mPP (ponto 4) e seu sentido deve ser mantido.

Com base nessas características, a Tabela 4 resume a ação de controle a ser tomada frente aos quatro possíveis pontos de operação.

Tabela 4 - Resumo da ação do mPPT

Sentido da potência aparente	Sentido da amplitude de tensão	Ponto de operação	Ação a ser tomada
aumentando	aumentando	3	decrementar
	diminuindo	2	incrementar
diminuindo	aumentando	1	incrementar
	diminuindo	4	decrementar

Fonte: produção do próprio autor

O Apêndice E traz o fluxograma completo do mPPT e o Apêndice F traz o código implementado no simulador.

5.3 MALHA DE mPPT

A malha de amplitude do PAC deve lidar com os limitantes que a ANEEL determina. Com isso, o mPP não necessariamente é o ponto quando o conversor não processa potência aparente.

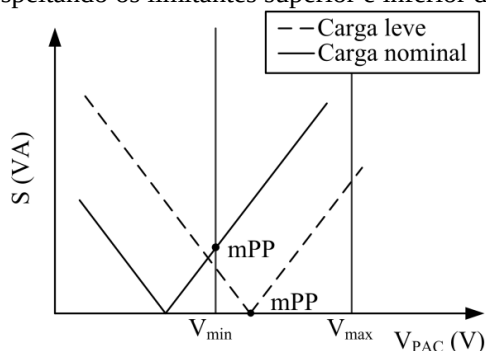
Para o algoritmo de mPPT foram arbitrados como limitantes 0,94 pu e 1,04 pu.

Na situação prática, as curvas que melhor representam a relação entre a potência aparente processada pelo conversor e a tensão do PAC são apresentadas na Figura 38, uma curva para carga pesada e uma curva para carga leve.

Quando a rede possuir carga pesada, a tensão do PAC que faz com que o conversor venha a processar potências próximas à zero é menor que o limite imposto pela malha de amplitude. Sendo assim, o algoritmo de mPPT rastreará o mPP, mas esbarrará no valor da tensão mínima permitida ao PAC. Dessa forma, o mPP será o ponto em que a tensão do PAC é mínima.

Na condição de carga leve, a tensão do PAC para a potência do conversor ser zero estará entre os limites. Agora o mPPT rastreará o mPP e se manterá nele.

Figura 38 - Pontos de mínima potência para carga nominal e carga leve respeitando os limitantes superior e inferior do mPPT



Fonte: produção do próprio autor

5.4 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foi apresentada uma malha de controle responsável pela amplitude da tensão do PAC com o intuito de reduzir da potência aparente processada pelo conversor utilizando como base a técnica de perturba e observa (P&O).

O método P&O se adapta bem à necessidade, porém há o inconveniente da oscilação em torno do ponto de mínima potência.

Uma característica que torna o P&O atraente é a existência de somente um ponto de mínimo, sempre quando a potência aparente é zero. Sendo assim, não há possibilidade de o algoritmo atingir um mínimo local.

Deve-se deixar claro que o método para minimizar a potência processada pelo conversor não se restringe somente ao algoritmo de

mPPT ou à técnica de P&O, muito menos a utilização em DSTATCOMs controlados em tensão.

Para aplicar a malha de amplitude em DSTATCOMs controlados em corrente, basta inserir a malha de tensão do PAC antes da malha de regulação do valor eficaz da tensão do PAC. Ela gerará a referência da componente em quadratura da corrente a ser injetada no PAC.

6 MALHA DE COMPENSAÇÃO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA REDE

Equation Section (Next)

A frequência da rede possui um controle rígido por parte do Operador Nacional do Sistema (ONS). Apesar disso, a frequência da rede apresenta variação em torno da frequência nominal do sistema devido às variações de carga.

A maioria dos sistemas e das cargas convive bem com essa variação e não apresentam anomalias em sua operação. Entretanto, o DSTATCOM controlado em tensão é impactado e, dependendo da proporção/duração, as variações podem inviabilizar sua operação, levando à sua desconexão.

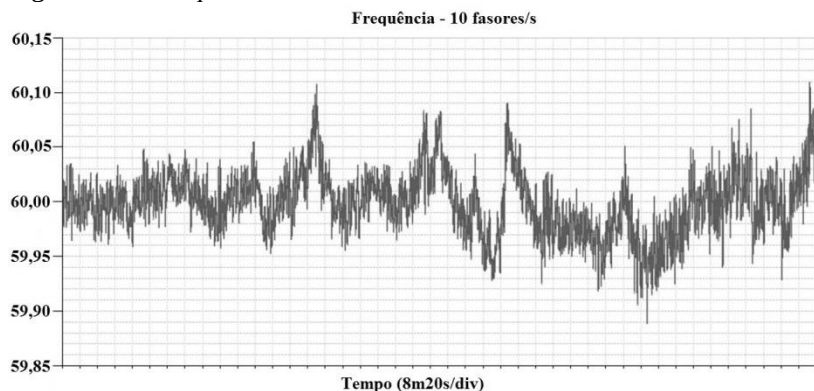
Com base no exposto, este capítulo se destina à análise da variação da frequência da rede sobre o conversor e a uma proposta para minimizar esse impacto ao conversor e, assim, evitar contínuos desligamentos do regulador de tensão.

6.1 EXEMPLO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA REDE

A variação da frequência da rede não segue um padrão definido. A frequência do sistema aumenta quando há desconexões de carga e diminui quando há conexões.

Para exemplificar, a Figura 39 apresenta a frequência medida em uma unidade consumidora no dia 17 de novembro de 2014.

Figura 39 - Frequência medida em uma unidade consumidora



Fonte: Adaptado de Projeto MedFasee, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2014

Nesse exemplo, a frequência da rede varia significativamente e apresenta valores mínimo e máximo de 59,93 Hz e 60,07 Hz, respectivamente. O fato de a média ser 60 Hz não é suficiente para garantir a manutenção da regulação de tensão durante todo o tempo em que o conversor estiver conectado a uma rede de distribuição.

O ONS, através do Módulo 2.8 dos procedimentos de rede, determina a máxima duração de desvios de frequências durante distúrbios no Sistema Interligado Nacional (SIN), apresentada na Tabela 5 (ONS, 2009).

Tabela 5 - Limites para avaliação qualitativa do desempenho da frequência durante distúrbios

Desempenho	Tempo acumulado máximo de exposição a desvios de frequência
$f > 66,0 \text{ Hz}$	0 s
$63,5 \text{ Hz} < f \leq 66,0 \text{ Hz}$	30 s
$62,0 \text{ Hz} < f \leq 63,5 \text{ Hz}$	150 s
$60,5 \text{ Hz} < f \leq 62,0 \text{ Hz}$	270 s
$58,5 \text{ Hz} \leq f < 59,5 \text{ Hz}$	390 s
$57,5 \text{ Hz} \leq f < 58,5 \text{ Hz}$	45 s
$56,5 \text{ Hz} \leq f < 57,5 \text{ Hz}$	15 s
$f < 56,5 \text{ Hz}$	0 s

Fonte: (ONS, 2009)

6.2 RELAÇÃO ENTRE A MALHA DE TENSÃO TOTAL DO BARRAMENTO CC E A VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA REDE

Como visto anteriormente, a tensão de referência para a malha de tensão ca é gerada a partir de três sinais. Entre esses sinais está a informação do ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC.

Desconsiderando, para melhor compreensão, a influência das demais malhas, a tensão de referência é dada como:

$$v_{ref} = \sin(\omega_{ref} \cdot t + \theta) \quad (6.1)$$

A frequência do sinal de referência, ω_{ref} , é geralmente adotada como sendo o valor nominal da frequência da rede elétrica. Sob

condições de operação sem variações de frequência da rede, pode-se dizer que a frequência do PAC, ω_{PAC} , possui o mesmo valor da frequência de referência.

$$\omega_{ref} = \omega_{PAC} \quad (6.2)$$

Durante as variações da frequência da rede, o equilíbrio de energia do barramento cc é alterado. Para restabelecê-lo, é necessário que a frequência do PAC se mantenha igual à frequência da rede elétrica, ω_r . Para tanto, o compensador de tensão total modifica o ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC. Isso significa que o compensador apresentará ação de controle variável no tempo, e não mais constante. Dessa forma, o ângulo de compensação pode ser escrito como:

$$\theta = \Theta + \theta(t) \quad (6.3)$$

onde Θ representa o valor constante e $\theta(t)$ a parcela variável do ângulo de compensação. Substituindo (6.3) em (6.1), a tensão de referência é reescrita como:

$$v_{ref} = \sin\left\{\left[\omega_{ref} + \theta(t)\right]t + \Theta\right\} \quad (6.4)$$

Note que, agora, a frequência da tensão de referência é alterada pela variação no tempo do ângulo de compensação, já que a frequência é a derivada do ângulo, embora ω_{ref} se mantenha constante. Assim, a frequência da tensão de referência resultante de (6.4) passa a ser a frequência do PAC, ω_{PAC} , conforme (6.5).

$$v_{ref} = \sin(\omega_{PAC} \cdot t + \Theta) \quad (6.5)$$

onde ω_{PAC} passa a ser composto pela variação do ângulo de compensação, definido como:

$$\omega_{PAC} = \omega_{ref} + \theta(t) \quad (6.6)$$

6.3 IMPACTO DA VARIAÇÃO DA FREQUÊNCIA DA REDE NO DSTATCOM

A análise completa foi desenvolvida por (ENDERLE, 2012) e suas principais conclusões serão expostas e discutidas a seguir.

A variação da frequência da rede resulta em duas implicações ao conversor: o erro de regime estático na tensão total do barramento cc e as ações de controle em forma de rampa.

A primeira delas não traz malefícios ao conversor, visto que é possível minimizar o erro estático com o ganho em baixa frequência do compensador de tensão total. Além disso, pequenos erros estáticos não comprometem a qualidade da forma de onda sintetizada pelo conversor.

Já a ação de controle em forma de rampa tem uma consequência importante ao sistema de controle: o compensador de tensão total, sendo implementado via circuitos analógicos, apresenta limites bem definidos para a ação de controle. Caso ele tenda a ultrapassar esses limites, a ação de controle é mantida no seu valor máximo ou mínimo e, com isso, perde-se a capacidade de controle sobre a tensão do barramento.

Se a diferença entre as frequências for positiva, o compensador atingirá o ângulo mínimo e, como consequência, o barramento será descarregado. Sendo assim, a forma de onda da tensão do PAC começará a ser prejudicada e o conversor deverá ser desconectado da rede.

Quando a diferença for negativa, o compensador atingirá o ângulo máximo e haverá uma elevação de tensão no barramento. Nesse caso, o conversor será desconectado da rede para a preservação dos seus componentes.

6.4 MÉTODO PROPOSTO DE MEDIÇÃO E CORREÇÃO DA FREQUÊNCIA DO PAC

O regulador de tensão será conectado em pontos de redes de distribuição distantes do transformador que alimenta o ramal. Sendo assim, utilizar a informação da frequência e fase da tensão do transformador, extraída através de sensores e circuitos PLL, se torna uma tarefa economicamente inviável.

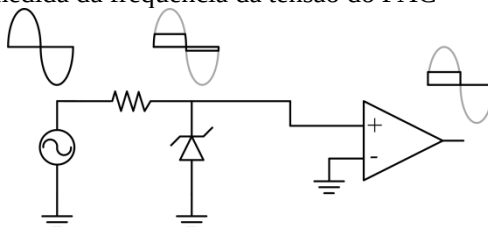
O método proposto para a compensação da variação da frequência se utiliza de uma característica da malha de tensão total do barramento cc: quando o compensador de tensão total estiver compensando a diferença de frequência, a tensão no PAC possuirá a mesma frequência da rede elétrica.

Sendo assim, medindo a frequência da tensão que o conversor impõe ao PAC, ω_{PAC} , é possível saber o valor da frequência da rede. Atualizando a frequência do sinal de referência ω_{ref} periodicamente, é possível mitigar o impacto da variação da frequência no sistema de controle.

A ideia é, então, anular a influência do termo $\theta(t)$ em (6.6), mantendo somente a parcela constante Θ .

Para a medição da frequência da tensão do PAC é utilizado o circuito representado pela Figura 40. O sinal da tensão do PAC é grampeado através de um diodo zener e comparado com zero. O sinal resultante é compatível com os níveis de tensão de uma porta IO do DSP.

Figura 40 - Representação simplificada da obtenção do sinal para a medida da frequência da tensão do PAC



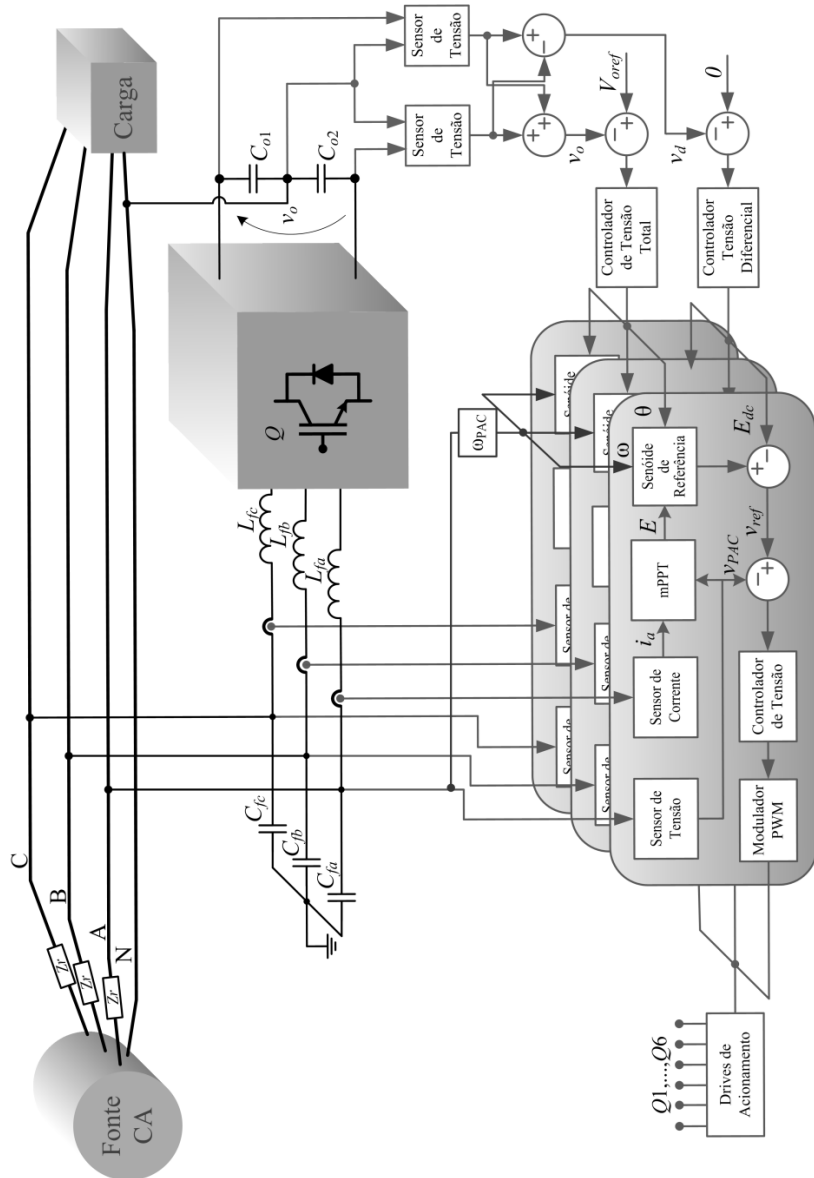
Fonte: produção do próprio autor

A partir da contagem do período de tempo em que o sinal está em nível lógico alto ou baixo é extraída a informação desejada. Essa informação alimenta a rotina de geração das referências em intervalos de 100 ms. A frequência anterior é imediatamente substituída pela frequência medida.

A Figura 41 apresenta o diagrama geral do DSTATCOM com a compensação de frequência. As demais funções de cada malha de controle permanecem inalteradas.

O Apêndice G traz o código implementado no DSP responsável pela leitura do sinal e pelo cálculo da frequência.

Figura 41 - Diagrama funcional do DSTATCOM com a inclusão da compensação de frequência do PAC



Fonte: produção do próprio autor

6.5 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foi apresentado um método para a minimização do impacto da variação da frequência da rede sobre o conversor.

Esse método auxilia na manutenção da capacidade de regulação de tensão do DSTATCOM, pois a tensão do barramento se manterá dentro dos limites de operação.

O método empregado é extremamente simples e pode ser realizado utilizando o modo captura (CAPTURE) presente na maioria dos micro controladores encontrados no mercado.

Evidentemente, esse método não possui o mesmo desempenho em comparação a utilização de circuitos PLL utilizando como base a tensão da rede, mas cumpre com seu propósito.

7 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Equation Section (Next)

O DSTATCOM será conectado a uma rede onde a carga possuirá perfis de carga distintos. A potência consumida da rede pelas cargas apresenta variações significativas durante o dia, durante a semana e também nos meses do ano.

Para a verificação das características do DSTATCOM, simulações numéricas foram realizadas com as principais condições de carga existentes em sistemas de distribuição reais: cargas lineares equilibradas e desequilibradas, cargas não lineares, além de distúrbios de tensão na rede.

Por fim, a malha de amplitude de tensão ca será habilitada, comprovando suas características na redução da potência processada pelo conversor.

7.1 SISTEMA SIMULADO

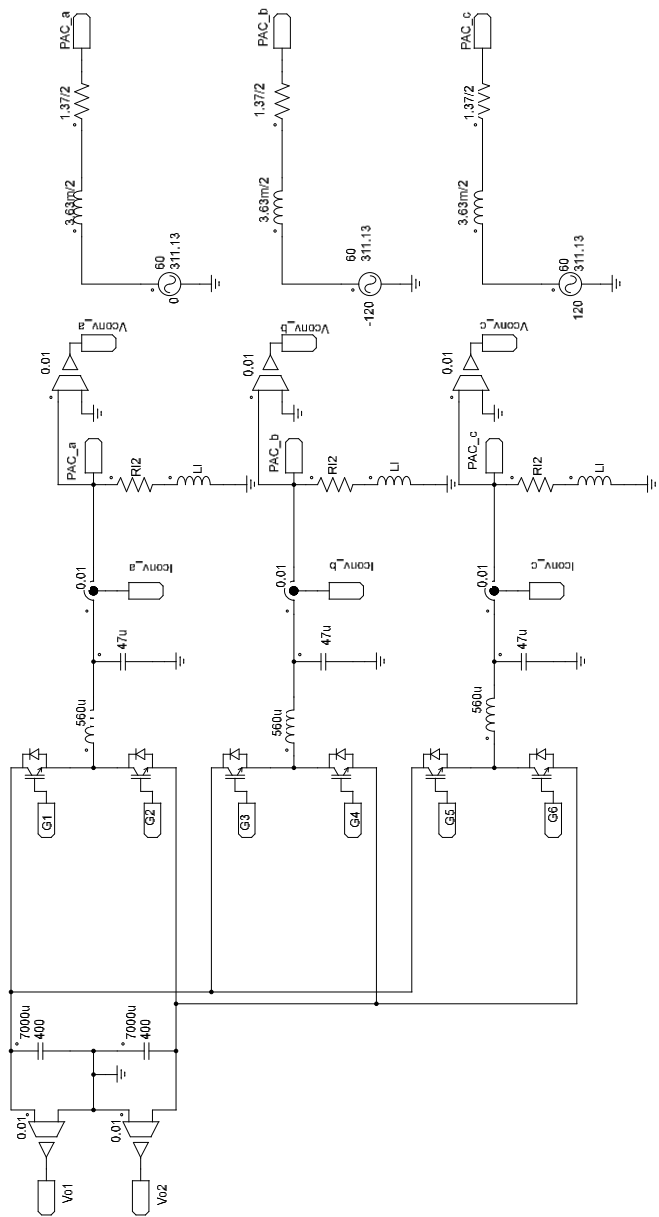
O sistema simulado é dividido em duas partes: os circuitos de potência e os circuitos de comando.

O circuito de potência é apresentado na Figura 42, contendo os capacitores do barramento cc, os interruptores do inversor meia ponte trifásico, os filtros LC de saída e a representação da rede elétrica através de três fontes senoidais ideais juntamente com a sua impedância.

A carga é representada pelos resistores e indutores nomeados como “R12” e “LI” e assumem valores distintos conforme as simulações de interesse.

A Figura 43 apresenta os circuitos de controle do regulador de tensão. Na parte superior da Figura 43 estão os circuitos das malhas de tensão ca, com os compensadores de tensão ca e os compensadores de amortecimento ativo. Na parte inferior estão os circuitos das malhas de tensão total e diferencial do barramento cc e o bloco que representa o DSP. As entradas do DSP são os sinais das malhas de tensão do barramento cc, as três tensões do PAC e as três correntes de compensação do conversor. As saídas do DSP são os sinais de referência para as malhas de tensão ca. O DSP executa também as rotinas de cálculo dos valores eficazes de tensão e corrente e a rotina do mPPT.

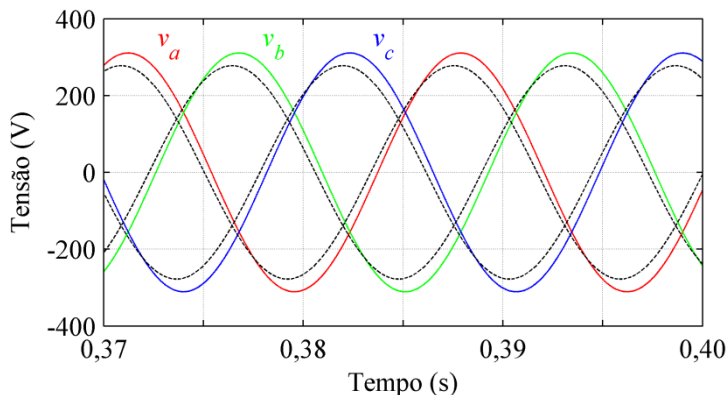
Figura 42 - Circuito de potência simulado



Fonte: produção do próprio autor

Com carga pesada, as formas de onda da tensão do PAC com e sem (linhas tracejadas) compensação são mostradas na Figura 44. Nela é possível notar o decréscimo de fase gerado pelo controle do conversor.

Figura 44 - Tensão do PAC com e sem compensação com carga pesada



Fonte: produção do próprio autor

O valor eficaz de tensão com o PAC compensado foi arbitrado como sendo de 220 V (1 pu). Sem compensação, o valor eficaz de tensão seria de 196,4 V (0,893 pu).

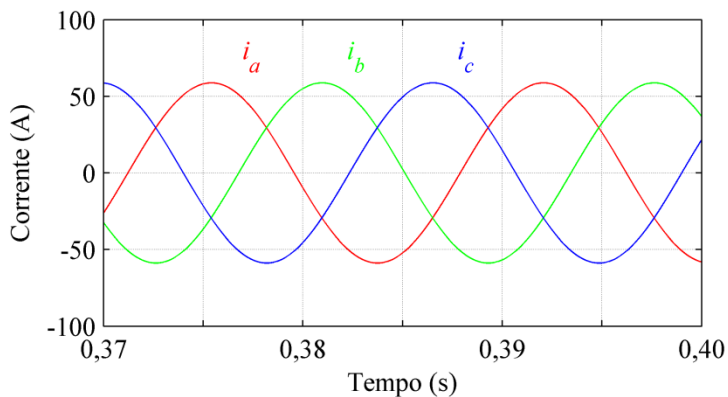
A Figura 45 traz as formas de onda das três correntes injetadas pelo conversor no PAC com carga pesada, cujo valor eficaz é de 41,57 A. Dessa forma, o valor de potência aparente processada por fase pelo conversor é de 9,14 kVA por fase (0,914 pu), totalizando 27,42 kVA.

Esse resultado mostra que o conversor, operando na máxima capacidade de regulação, consegue compensar cargas de até 0,6 pu na condição de tensão nominal no PAC.

Comparando com a Figura 8, onde a análise teórica aponta potência de 0,9033 pu, o presente resultado se mostra bem adequado.

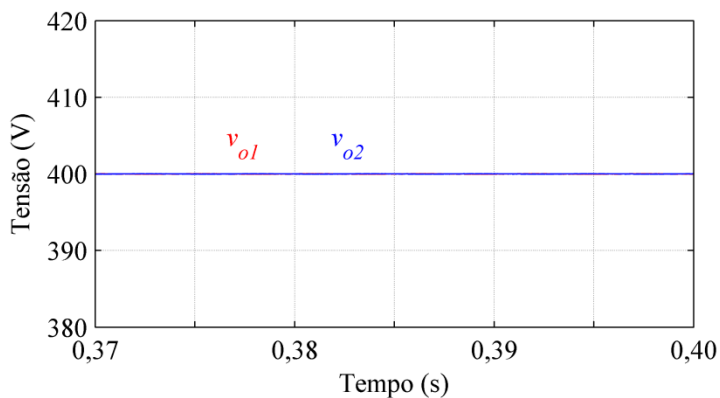
A Figura 46 traz as tensões no barramento cc com carga pesada, as quais permanecem reguladas nos seus valores estipulados e não apresentam erro de regime permanente, conforme o projetado.

Figura 45 - Correntes injetadas pelo conversor com carga pesada



Fonte: produção do próprio autor

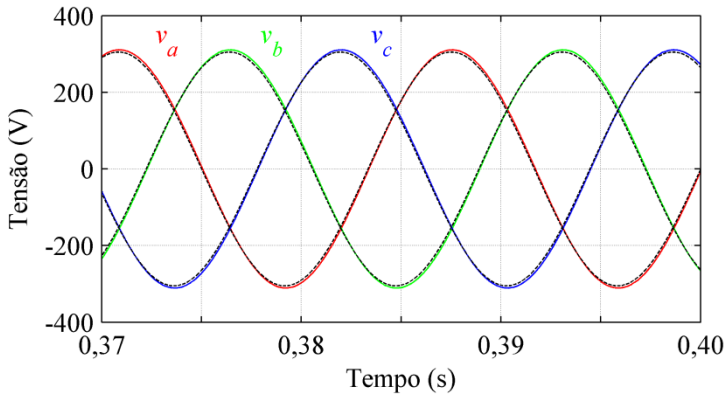
Figura 46 - Tensões do barramento cc com carga pesada



Fonte: produção do próprio autor

Com carga leve, a Figura 47 traz as formas de onda da tensão PAC com e sem (linhas pretas) compensação. O valor eficaz de tensão do PAC se mantém em 220 V, enquanto seria de 215,7 V (0,98 pu) sem a compensação.

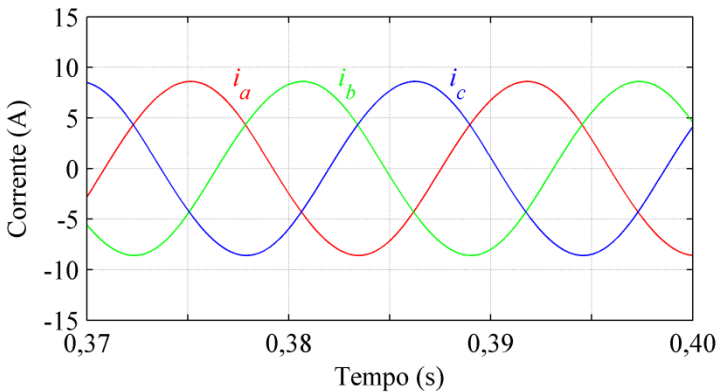
Figura 47 - Tensão do PAC com e sem compensação com carga leve



Fonte: produção do próprio autor

A Figura 48 mostra as formas de onda de corrente de compensação fornecida pelo conversor com carga leve. Seu valor eficaz baixa para 6,08 A por fase e a potência total processada pelo conversor cai para 4,02 kVA (0,134 pu). Nessa condição, o valor de potência processada encontrado na simulação se mantém próximo ao teórico (0,1397 pu).

Figura 48 - Correntes injetadas pelo conversor com carga leve



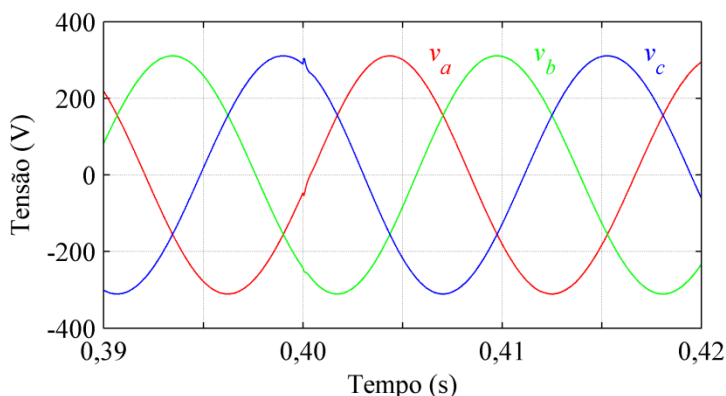
Fonte: produção do próprio autor

7.3 COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM VARIAÇÃO DE CARGA

O conversor, quando se defronta com variações bruscas na potência consumida pelas cargas, apresenta dinâmicas transitórias que podem vir a prejudicar seu desempenho em fornecer tensões com alta qualidade.

Quando a carga passa de pesada para leve (instante de tempo de 0,4 s) a Figura 49 mostra as formas de onda de tensão no PAC com compensação. Nela é possível notar que há uma pequena deformação na forma de onda, porém com duração extremamente curta.

Figura 49 - Formas de onda da tensão do PAC durante a desconexão de carga

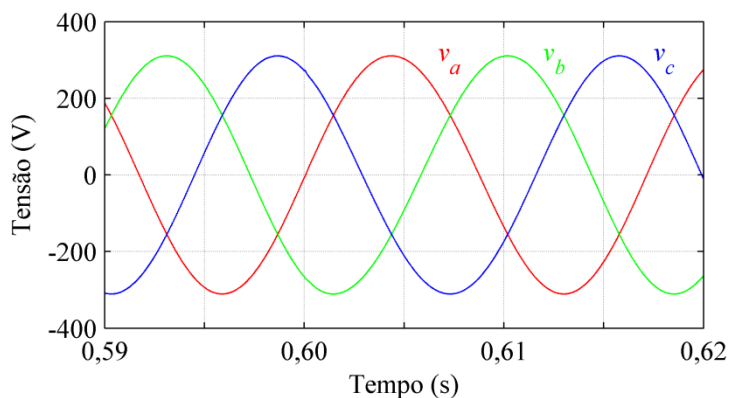


Fonte: produção do próprio autor

A Figura 50 apresenta as formas de onda da tensão do PAC com compensação quando a carga retorna a ser pesada (instante de tempo de 0,6 s). Durante o reestabelecimento da potência nominal não é evidente a deformação ocorrida na desconexão.

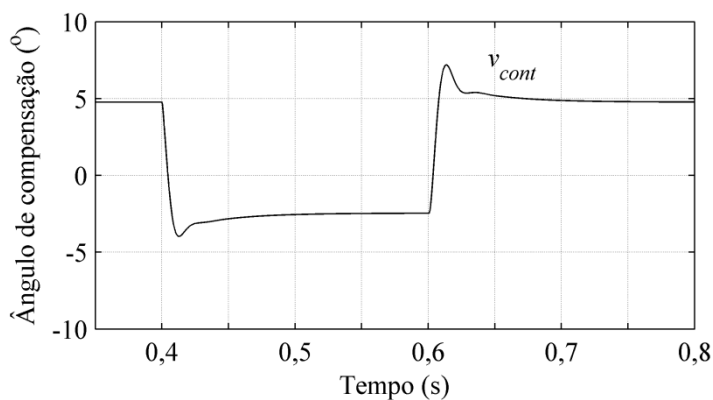
É importante ressaltar que, logo após a desconexão, a frequência do PAC aumenta ligeiramente durante um período de tempo em torno de um ciclo da rede e após a conexão a frequência diminui. Esse efeito é consequência da variação da ação de controle total do barramento cc, que pode ser vista na Figura 51.

Figura 50 - Formas de onda da tensão do PAC durante a conexão de carga



Fonte: produção do próprio autor

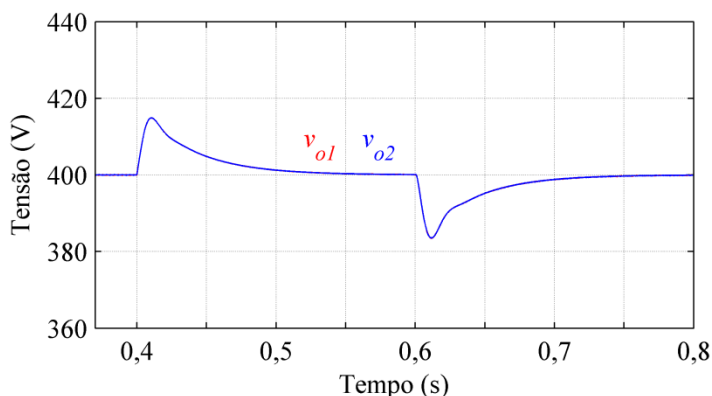
Figura 51 - Ação do controlador de tensão total durante a entrada e retirada de carga



Fonte: produção do próprio autor

A Figura 52 apresenta o transitório das tensões do barramento cc, onde cada capacitor tem tensão máxima em torno de 415 V e mínima em torno de 383 V, o que não compromete a qualidade da tensão ca nem excede a tensão máxima permitida nos capacitores.

Figura 52 - Tensão do barramento cc durante a entrada e retirada de carga



Fonte: produção do próprio autor

7.4 COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM DESEQUILÍBRIO DE CARGA

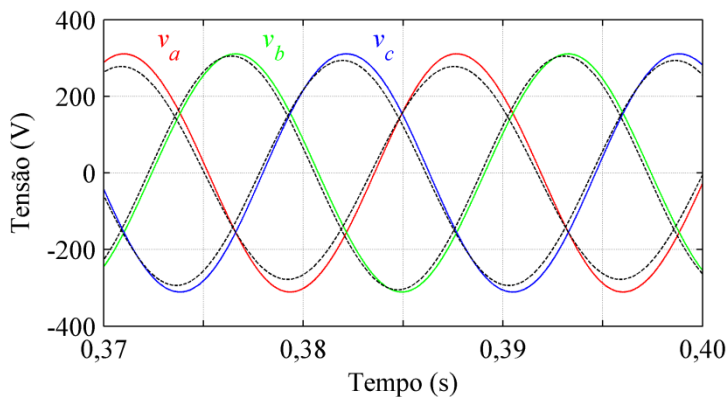
A rede elétrica, quando possui cargas monofásicas conectadas a ela, está sujeita a desequilíbrios de carga, onde cada fase possuirá esforços de corrente e potência diferentes.

O DSTATCOM foi simulado com as seguintes características de carga:

- Fase A: carga pesada
- Fase B: carga leve
- Fase C: carga média

A Figura 53 mostra as tensões da rede e do PAC nas três fases, onde se verifica que as três fases do sistema estão equilibradas e possuem a mesma defasagem angular. Sem regulação, os valores eficazes de tensão seriam 196,4 V, 215,7 V e 207,6 V para as fases A, B e C, respectivamente.

Figura 53 - Tensões da rede e do PAC com cargas desequilibradas

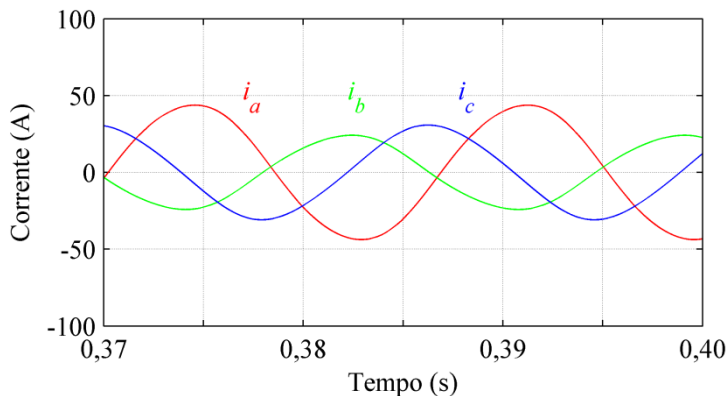


Fonte: produção do próprio autor

A Figura 54 traz as formas de onda das três correntes injetadas pelo conversor na rede. É nítida a diferença dos valores eficaz de corrente necessária para a regulação das tensões do PAC.

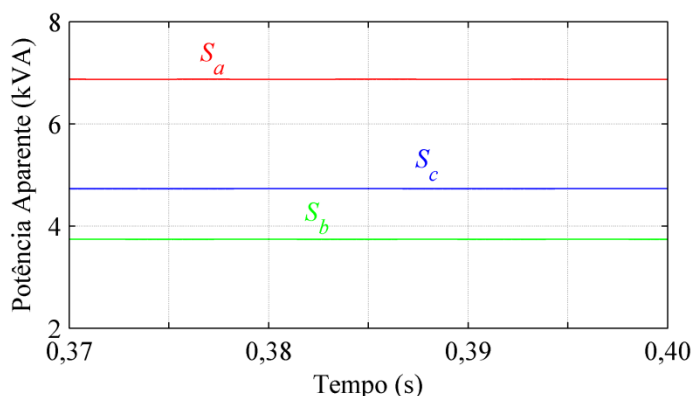
A potência aparente processada pelo conversor é apresentada na Figura 55, onde a fase A processa 6,87 kVA, a fase B 3,74 kVA e a fase C 4,73 kVA.

Figura 54 - Correntes injetadas pelo conversor com cargas desequilibradas



Fonte: produção do próprio autor

Figura 55 - Potência processada pelo conversor com cargas desequilibradas

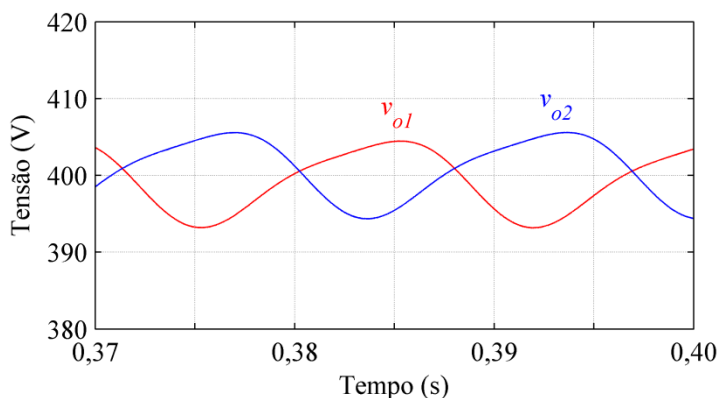


Fonte: produção do próprio autor

Para a correta regulação da tensão no PAC, há uma parcela de potência ativa que circula entre as fases. A fase B absorve então 1,95 kW e a fase C 52 W para suprir a fase A, que fornece 1,99 kW.

A tensão do barramento terá ondulação cuja componente fundamental possui a mesma frequência da rede devido ao desequilíbrio imposto pelas cargas, com amplitude de 9 V. A Figura 56 apresenta as formas de onda das tensões de cada capacitor.

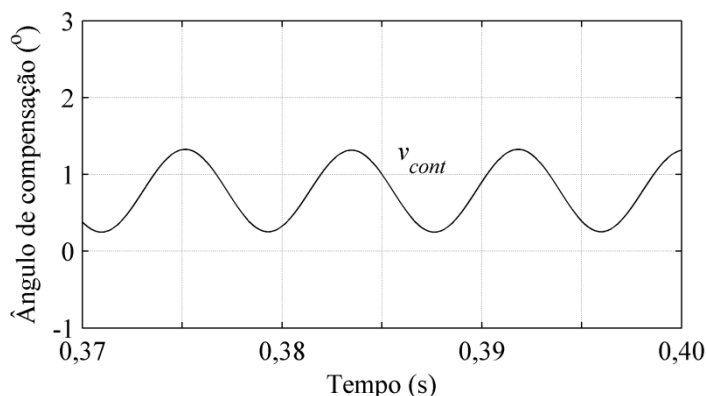
Figura 56 - Tensões do barramento cc com cargas desequilibradas



Fonte: produção do próprio autor

A ação de controle de tensão total apresenta ondulação de 120 Hz em torno de $0,79^\circ$, conforme a Figura 57. Apesar dessa ondulação, a qualidade da forma de onda da tensão do PAC não é afetada, conforme pode ser visto na Figura 53, pois a amplitude da variação é pequena.

Figura 57 - Ação de controle do barramento total com cargas desequilibradas



Fonte: produção do próprio autor

7.5 COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM CARGA NÃO LINEAR

A presença de cargas não lineares está em expansão nas unidades consumidoras em baixa tensão, trazendo impacto direto na qualidade da forma de onda da tensão no PAC no qual esse consumidor está conectado e também nos demais pontos de acoplamento existentes na linha.

O conversor, estando em uma rede de distribuição, estará sujeito às influências dos conteúdos harmônicos de tensão e de corrente proveniente, principalmente, das cargas não lineares das unidades consumidoras.

Para tanto, um perfil bem conhecido na literatura de carga não linear é proposto para ser conectado ao PAC e verificar o comportamento do DSTATCOM. Idealmente, o conversor deve absorver toda e qualquer componente de corrente que não estiver na frequência fundamental e não permitir a propagação dessas distorções.

7.5.1 Definição da carga não linear padrão

Dentre as diversas possibilidades de cargas não lineares, a mais comum em sistemas de distribuição em baixa tensão, ou seja, consumidores residenciais e pequenos estabelecimentos comerciais, é o retificador monofásico com filtro capacitivo.

Uma normativa que se assemelha ao caso do DSTATCOM é a norma IEC 62040-1-1, que estabelece vários critérios de testes de inversores de tensão, incluindo cargas não lineares (IEC 62040-1-1, 2008). A carga não linear abrangida é o retificador monofásico com filtro capacitivo, conforme a Figura 58, e a metodologia de projeto dos elementos do retificador é mostrada pela norma, segundo as equações (7.1)-(7.4).

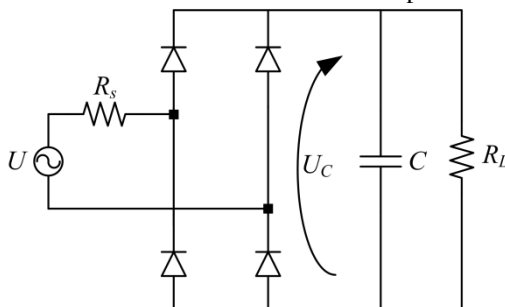
$$U_C = 1,22 \cdot U \quad (7.1)$$

$$R_s = \frac{0,04 \cdot U_C^2}{S} \quad (7.2)$$

$$R_L = \frac{0,66 \cdot U_C^2}{S} \quad (7.3)$$

$$C = \frac{7,5}{f_{rd} \cdot R_L} \quad (7.4)$$

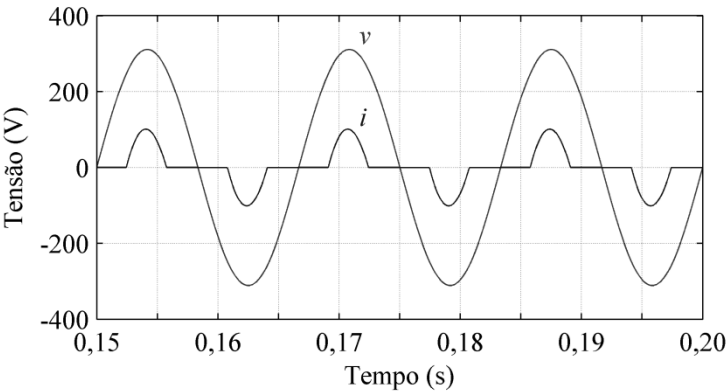
Figura 58 - Retificador monofásico com filtro capacitivo



Fonte: produção do próprio autor

As formas de onda da tensão de alimentação do retificador e da corrente drenada por ele são mostradas na Figura 59.

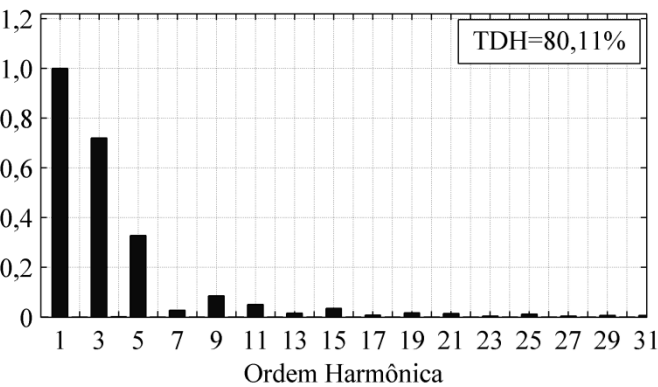
Figura 59 - Tensão e corrente do retificador monofásico



Fonte: produção do próprio autor

A Figura 60 traz o espectro proveniente da decomposição harmônica da forma de onda da corrente do retificador. A TDH calculada é de 80,11%, sendo predominantes a terceira, quinta e nona harmônicas.

Figura 60 - Espectro harmônico da corrente do retificador monofásico



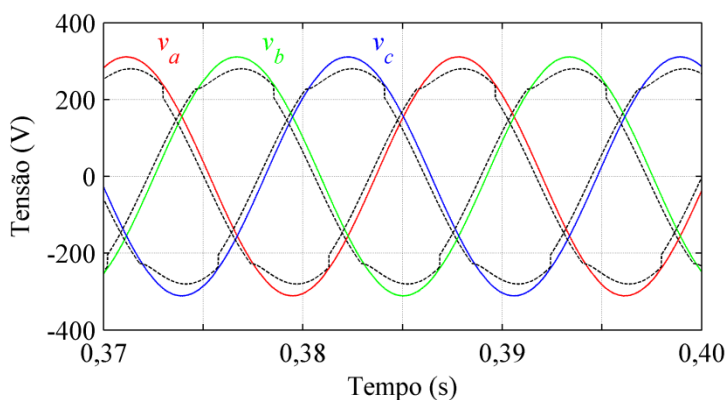
Fonte: produção do próprio autor

7.5.2 Análise da regulação de tensão com cargas não lineares

O conversor foi simulado com carga média somada com 6 kVA (0,2 pu) de carga não linear, conforme a carga padrão.

A Figura 61 traz as formas de onda de tensão no PAC com e sem a presença do conversor, o que destaca a melhoria da qualidade de tensão promovida pelo DSTATCOM, não somente a cerca da amplitude. A TDH da tensão do PAC decresce de 5,4 % para 0,3 % e seu valor eficaz cresce de 203,2 V para 220 V.

Figura 61 - Tensões no PAC para uma carga não linear

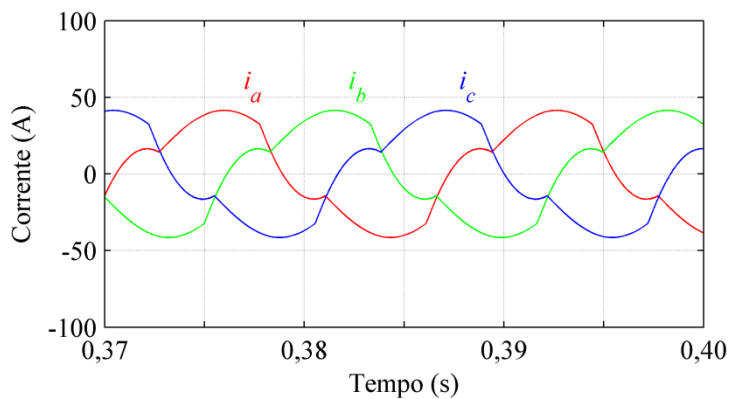


Fonte: produção do próprio autor

As formas de onda de corrente do conversor e na carga podem ser visualizadas na Figura 62 e na Figura 63, respectivamente. A TDH da corrente da carga é de 29,1 % e todas as componentes harmônicas dessa corrente são desviadas para o conversor, livrando a rede de suas influências, como mostra a Figura 64.

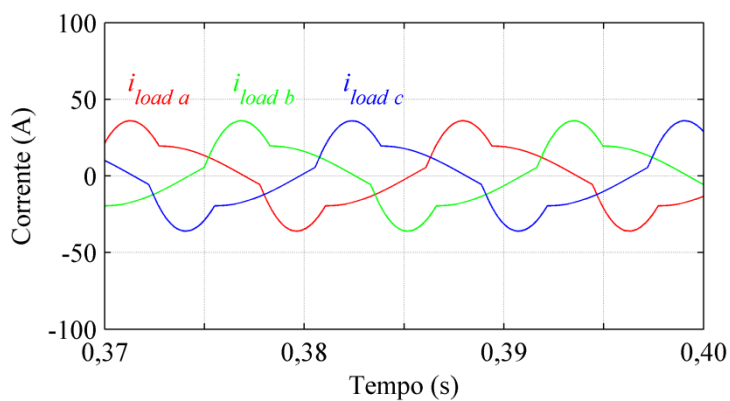
O valor eficaz da corrente do conversor é de 28,70 A, resultando em uma potência processada de 18,93 kVA (0,631 pu), com TDH de 20,8%.

Figura 62 - Corrente no conversor para uma carga não linear



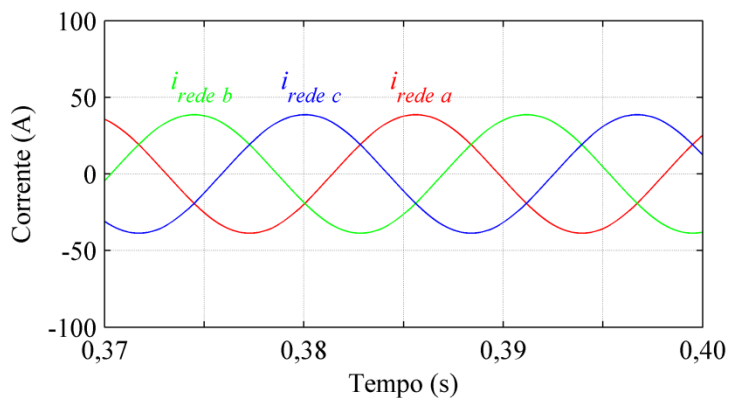
Fonte: produção do próprio autor

Figura 63 - Corrente na carga não linear



Fonte: produção do próprio autor

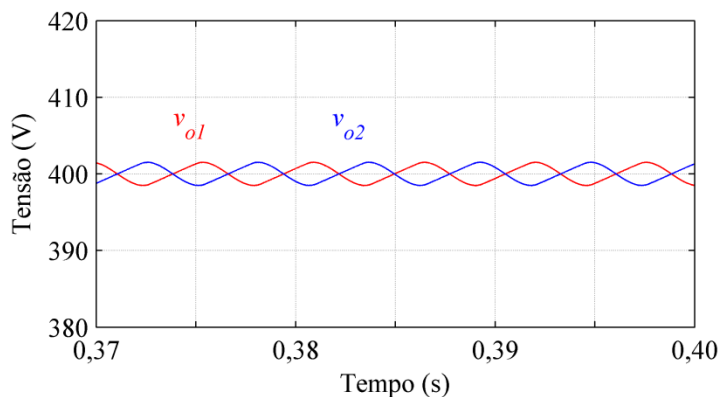
Figura 64 - Corrente na rede com carga não linear



Fonte: produção do próprio autor

A tensão no barramento cc se mantém regulada em torno de seu valor nominal e possui ondulação de tensão em 180 Hz em cada capacitor, conforme a Figura 65, e ondulação em 360 Hz na tensão total do barramento cc, cuja amplitude é da ordem de 0,5 V.

Figura 65 - Tensão do barramento cc para uma carga não linear



Fonte: produção do próprio autor

7.6 COMPORTAMENTO DO SISTEMA COM TENSÃO DISTORCIDA NA REDE ELÉTRICA

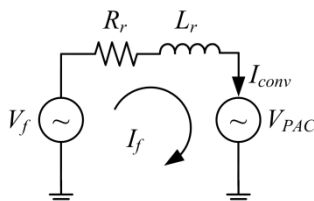
A rede elétrica apresenta naturalmente distorções harmônicas oriundas de cargas não lineares que não estão conectadas à rede de distribuição analisada, e sim em redes adjacentes.

O conversor, quando conectado à rede de distribuição, sintetizará uma tensão no PAC com baixa TDH. Assim, há a circulação de duas componentes de corrente entre a tensão da rede e o conversor.

A primeira componente tem frequência igual à frequência fundamental da rede e é nessa frequência em que ocorre a compensação de reativos, como foi visto no Capítulo 2. A Figura 66 traz o circuito equivalente para a componente na frequência fundamental de corrente.

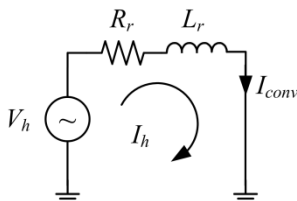
A segunda componente de corrente é derivada do conteúdo harmônico da tensão da rede. O conversor será um caminho de baixa impedância para esses harmônicos, conforme a Figura 67. Sendo assim, o conversor terá corrente de compensação com conteúdo harmônico, embora as cargas sejam lineares.

Figura 66 - Circuito equivalente para circulação de corrente na frequência fundamental



Fonte: produção do próprio autor

Figura 67 - Circuito equivalente para circulação de corrente nas componentes harmônicas



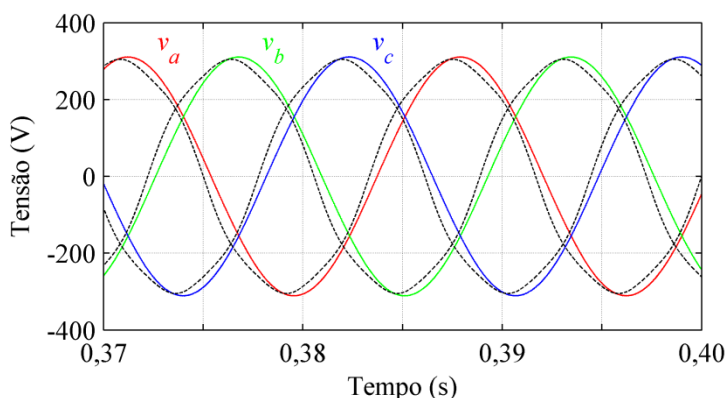
Fonte: produção do próprio autor

Assim, a corrente do conversor pode ser escrita como a soma da componente fundamental e as componentes harmônicas conforme a equação (7.5).

$$I_{conv} = I_f + I_h \quad (7.5)$$

Para demonstrar esse fenômeno, foi adicionado à tensão da rede componente de terceira e quinta harmônicas, com amplitudes de 5% e 3%, respectivamente. A Figura 68 traz as formas de onda da tensão do PAC e da tensão da rede com distorção harmônica (linhas tracejadas).

Figura 68 - Formas de onda da tensão do PAC e da tensão da rede com distorção harmônica

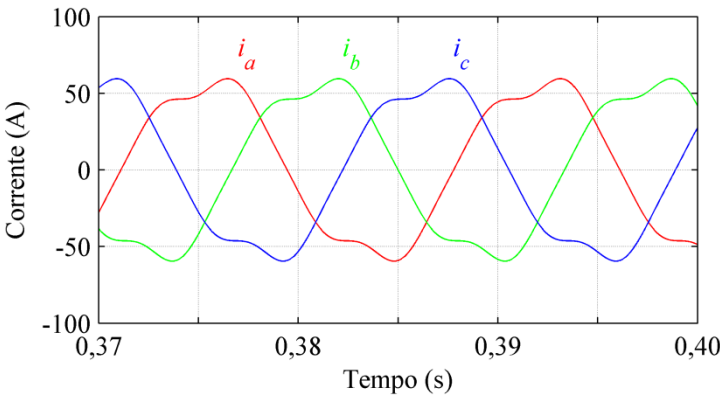


Fonte: produção do próprio autor

É possível notar que o conversor é capaz de manter o PAC com baixa TDH, em torno de 0,3%, enquanto a rede apresenta 5,8%.

O efeito da distorção na tensão da rede se reflete na corrente processada pelo conversor, que passa a processar componentes harmônicas, conforme mostra a Figura 69. A corrente do conversor apresenta TDH de 13,1%.

Figura 69 - Correntes injetadas pelo conversor com carga pesada e rede distorcida



Fonte: produção do próprio autor

7.7 ANÁLISE DINÂMICA SOB DISTÚRBIOS DA REDE ELÉTRICA

O DSTATCOM, provendo o balanceamento das tensões no PAC, não está livre de sofrer influências da rede elétrica.

Afundamentos (*sags*) e elevações (*swells*) de tensão ocorrem de maneira corriqueira e, geralmente, de pequenas proporções. Entretanto, há momentos que esses afundamentos e elevações impactam consideravelmente as cargas conectadas à rede e, por consequência, o DSTATCOM.

Afundamentos de tensão são aqueles em que o valor eficaz de tensão de atendimento é maior ou igual a 0,1 pu e inferior a 0,9 pu, enquanto elevações de tensão são aquelas onde o valor eficaz da tensão é superior a 1,1 pu (ANEEL, 2001).

A duração dos afundamentos e elevações é classificada em duas categorias: momentânea e temporária, conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Classificação dos distúrbios da rede

Tipo	Duração
Momentânea	1 ciclo a 3 segundos
Temporária	3 segundos a 3 minutos

Fonte: (ANEEL, 2001)

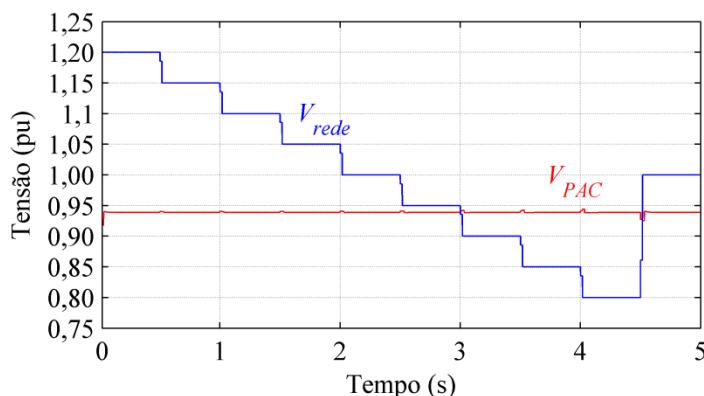
O desempenho do conversor será testado com carga média equilibrada e com variações na tensão de atendimento até que sua máxima capacidade seja atingida. Essas variações serão de três formas: variação monofásica, bifásica e, por fim, trifásica.

Para essa análise optou-se por utilizar como referência para a tensão do PAC 206,8 V (0,94 pu), pois é a condição predominante durante a operação do conversor. A carga conectada ao PAC é carga média.

7.7.1 Distúrbio monofásico

A Figura 70 traz o perfil de tensão de abastecimento em pu aplicado à fase A do sistema que o DSTATCOM compõe, partindo de 1,2 pu da tensão nominal para 0,8 pu. A tensão do PAC fica regulada independentemente da variação da tensão de atendimento na fase A.

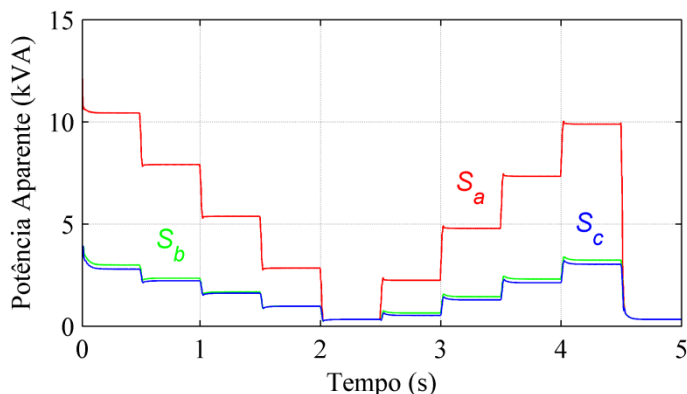
Figura 70 - Tensão da rede e do PAC em pu



Fonte: produção do próprio autor

Diante dessas variações, a potência aparente processada por cada fase do conversor é apresentada na Figura 71, onde é verificado que para valores de tensão da rede acima de 1 pu existe também a necessidade de correção, porém na forma de potência reativa indutiva.

Figura 71 - Potência aparente das fases A, B e C para um distúrbio monofásico



Fonte: produção do próprio autor

Isso significa que quanto maior for a diferença entre a tensão da rede e a tensão de regulação do PAC, maior é a demanda de potência reativa, seja na forma capacitiva ou indutiva.

Ao passo que a tensão varia, aumenta o processamento de reativos até que o conversor atinja os pontos em que é demandado mais do conversor do que ele é capaz de fornecer. Nesses pontos, para a tensão de atendimento maior que 1,15 pu e menor que 0,80 pu, a fase A extrapola seu limite de 10 kVA.

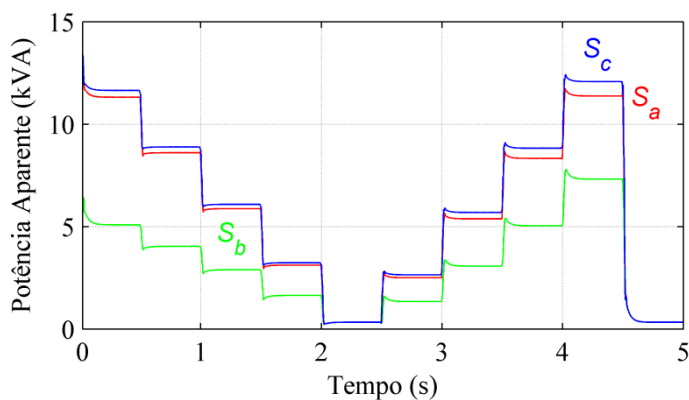
As fases B e C apresentam valores semelhantes de potência aparente. É válido ressaltar que há fluxo de energia ativa que circula das fases não afetadas para a fase A com o objetivo de manter o PAC equilibrado.

7.7.2 Distúrbio bifásico

O mesmo perfil de variação na tensão de atendimento foi aplicado à fase A e à fase C. A potência aparente processada pelo conversor pode ser vista na Figura 72. As fases A e C processam mais energia que a fase B e, com a tensão de atendimento maior que 1,15 pu e menor que 0,85 pu, o conversor atinge sua capacidade máxima.

Nesse caso, energia ativa é retirada da fase B e fornecida pelas demais fases do sistema.

Figura 72 - Potência aparente das fases A, B e C para um distúrbio bifásico

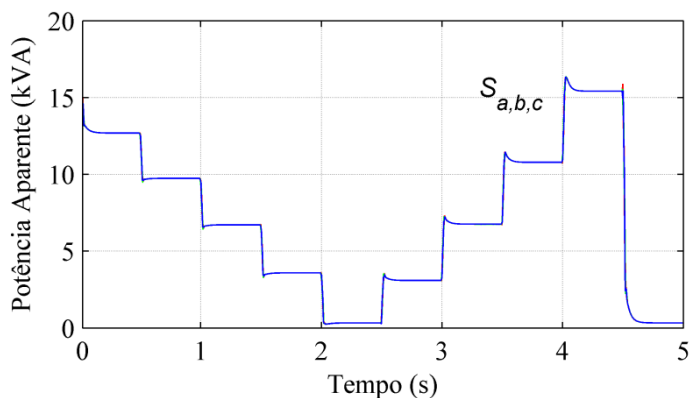


Fonte: produção do próprio autor

7.7.3 Distúrbio trifásico

A potência aparente processada pelo conversor é apresentada na Figura 73. O limite do conversor é ultrapassado com a tensão de atendimento maior que 1,15 pu e menor que 0,90 pu.

Figura 73 - Potência aparente das fases A, B e C para um distúrbio trifásico



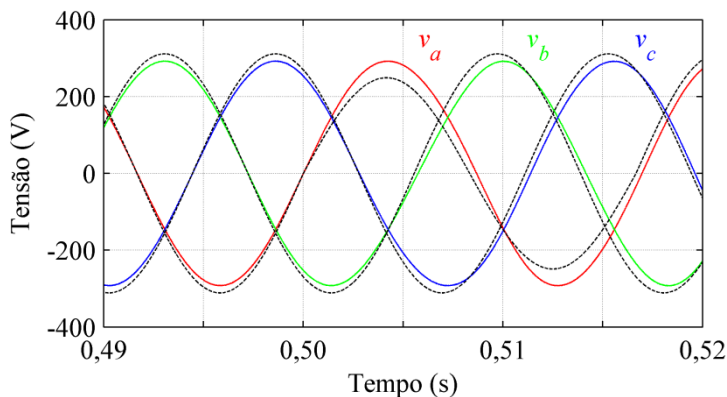
Fonte: produção do próprio autor

7.7.4 Distúrbio de curta duração

No instante de tempo igual a 0,5 s foi aplicado um distúrbio monofásico na fase A, cuja tensão da rede cai subitamente de 1,0 pu para 0,8 pu durante um ciclo da rede.

A Figura 74 apresenta as formas de onda da tensão do PAC e da tensão da rede (linhas tracejadas) durante o afundamento de um ciclo. Note que a forma de onda da tensão do PAC não é afetada por esse distúrbio.

Figura 74 - Formas de onda da tensão do PAC e da tensão da rede com distúrbio de curta duração

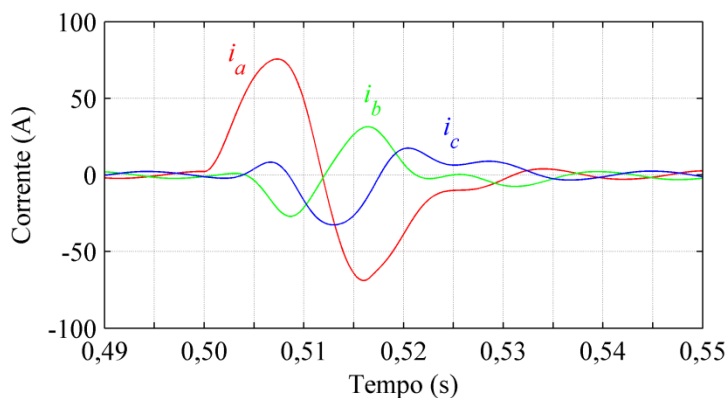


Fonte: produção do próprio autor

Assim que há o distúrbio, a corrente processada pelo conversor apresenta uma dinâmica com valores de corrente elevados, principalmente na fase A, conforme mostra a Figura 75.

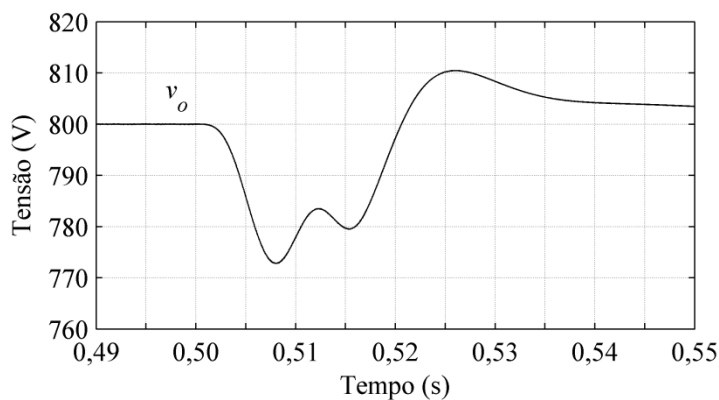
A energia necessária para manter o PAC regulado é retirada do barramento cc, como mostra a Figura 76. A tensão total do barramento cc apresenta um afundamento de 28 V durante o início do distúrbio e uma elevação de 10 V no término. Após o distúrbio, a tensão total do barramento cc retorna lentamente ao valor nominal.

Figura 75 - Correntes injetadas pelo conversor com distúrbio de curta duração



Fonte: produção do próprio autor

Figura 76 - Tensão do barramento total com distúrbios de curta duração

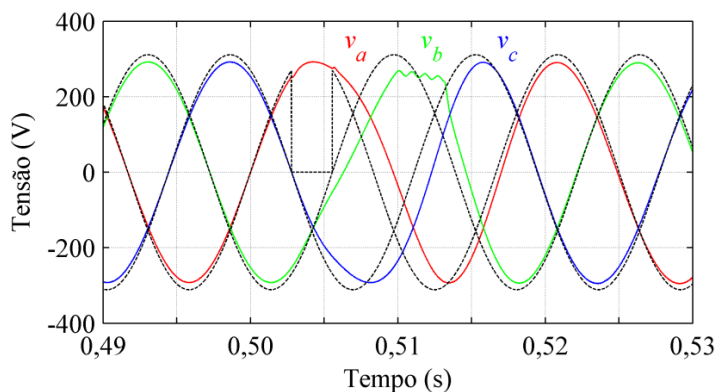


Fonte: produção do próprio autor

7.7.5 Interrupção momentânea

Aplicando uma interrupção no fornecimento da energia elétrica durante o pico da forma de onda da tensão da rede da fase A, a Figura 77 apresenta as formas de onda do PAC e da rede (linhas tracejadas).

Figura 77 - Formas de onda da tensão do PAC e da tensão da rede com interrupção momentânea

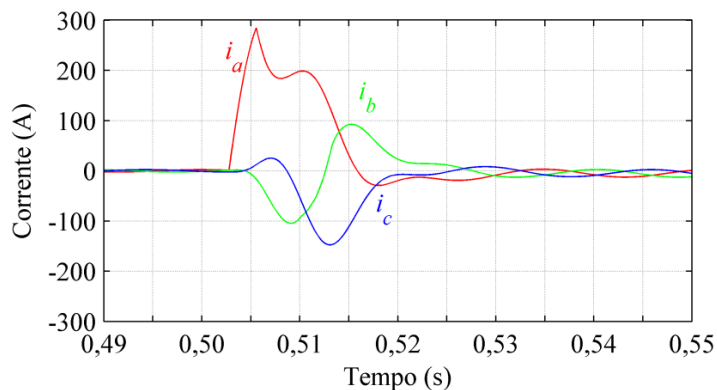


Fonte: produção do próprio autor

É possível notar que as tensões das três fases se tornam distorcidas durante o transiente, sendo que a fase B é afetada também por uma distorção na amplitude causada pela redução significativa na tensão total do barramento cc.

A corrente processada pelo conversor apresenta valores elevados de corrente, chegando a 285 A na fase A, conforme mostra a Figura 78.

Figura 78 - Correntes injetadas pelo conversor com interrupção momentânea

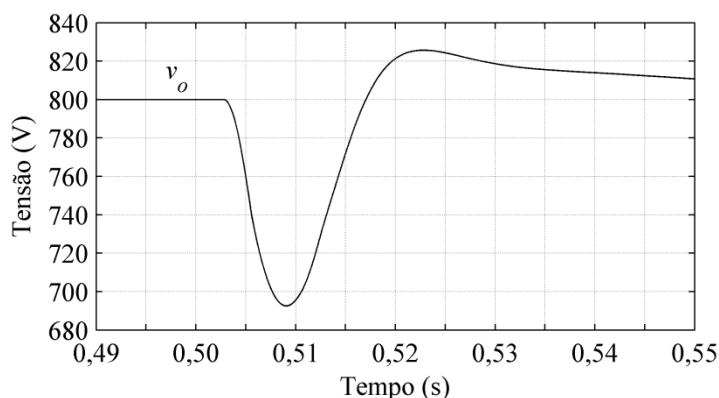


Fonte: produção do próprio autor

Durante a operação normal do conversor, transitórios como esse podem ser danosos ao conversor e, por isso, o conversor será desligado antes de atingir tais valores de corrente.

A tensão total do barramento cc cai para 692 V no início do distúrbio, apresenta uma elevação de 25 V e retorna lentamente ao valor nominal, como mostra a Figura 82.

Figura 79 - Tensão do barramento total com interrupção momentânea



Fonte: produção do próprio autor

7.8 AVALIAÇÃO DO mPPT

O algoritmo de mPPT foi simulado para comprovar sua eficiência em buscar a menor potência processada pelo conversor diante a presença de cargas lineares e não lineares.

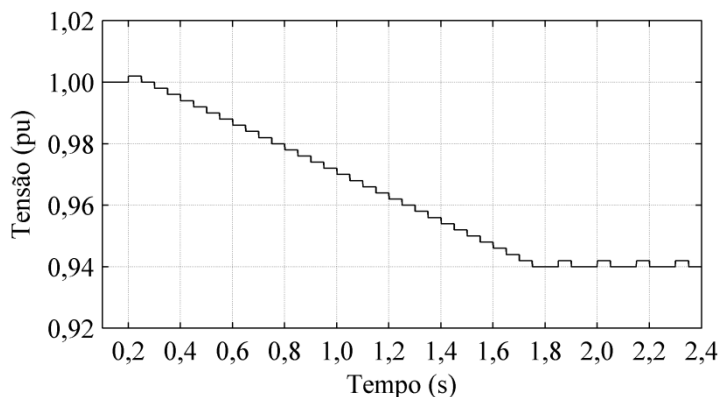
A simulação foi realizada com uma amplitude inicial de tensão definida como sendo 1,0 pu e passo de incremento ou decremento de 0,002 pu a cada 50 ms. Os limites mínimo e máximo permitido para a excursão de tensão foram fixados em 0,94 e 1,04 pu.

7.8.1 Sistema com carga pesada

O DSTATCOM foi simulado com carga pesada e o algoritmo é habilitado a partir do instante de tempo igual a 0,2 s. A Figura 80 traz a evolução temporal da amplitude imposta às tensões do PAC, onde é possível notar que, a partir da segunda iteração, o algoritmo começa sua

convergência para o mPPT. Entretanto, a amplitude é saturada quando atinge 0,94 pu.

Figura 80 - Amplitude da tensão do PAC com carga pesada



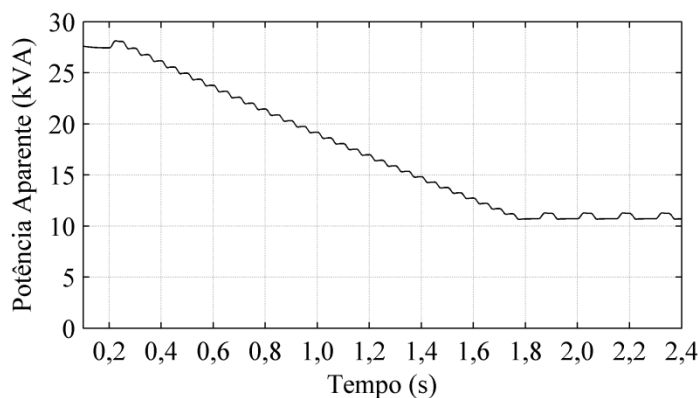
Fonte: produção do próprio autor

Dessa forma, o conversor atinge o mPP diante das restrições impostas ao algoritmo. O fato de o método P&O oscilar em torno do ponto de mínimo pode ser visto também na Figura 80.

A evolução temporal da potência aparente do conversor pode ser vista na Figura 81, com decréscimos até a saturação da amplitude. O conversor parte de 27,43 kVA e estabiliza em 10,71 kVA, o que significa redução de 61 %.

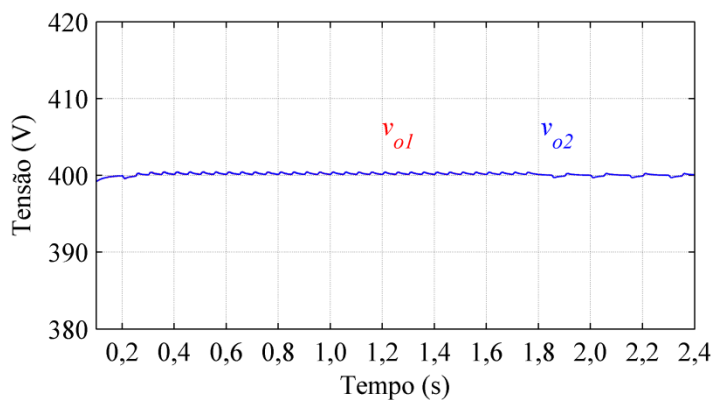
As formas de onda das tensões do barramento cc durante as sistemáticas variações de amplitude são apresentadas na Figura 82. A variação de tensão provocada pelo algoritmo do mPPT é pequena (em torno de 1 V).

Figura 81 - Potência aparente processada pelo conversor com carga pesada



Fonte: produção do próprio autor

Figura 82 - Tensão do barramento com carga pesada



Fonte: produção do próprio autor

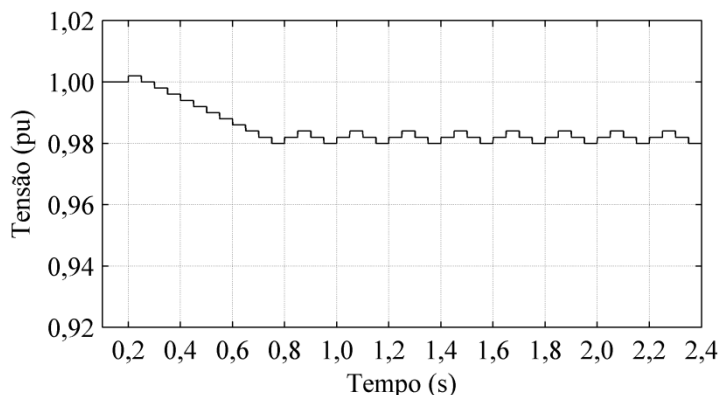
7.8.2 Sistema com carga leve

O DSTATCOM foi conectado a uma rede com carga leve, carga essa em que naturalmente a tensão do PAC permanece dentro do limite adequado. A amplitude inicial do algoritmo foi mantida em 1,0 pu.

A Figura 83 traz a evolução da amplitude imposta às tensões do PAC. Para esse caso, o algoritmo mantém a operação do conversor em torno da potência aparente nula (216 V ou 0,982 pu).

Novamente pode ser visto a oscilação da amplitude em torno da amplitude de menor potência.

Figura 83 - Amplitude da tensão do PAC com carga leve

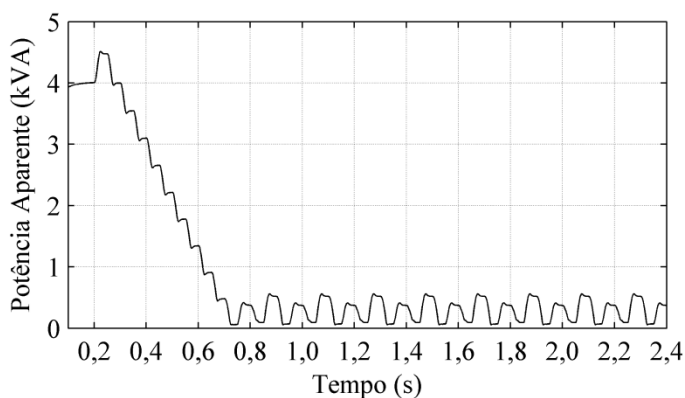


Fonte: produção do próprio autor

A Figura 84 traz a evolução da potência processada pelo conversor, o qual transita entre capacitiva e indutiva com valores próximos de zero. O conversor parte de 4 kVA e estabiliza em torno de 0,5 kVA, o que significa redução de 87,5 %.

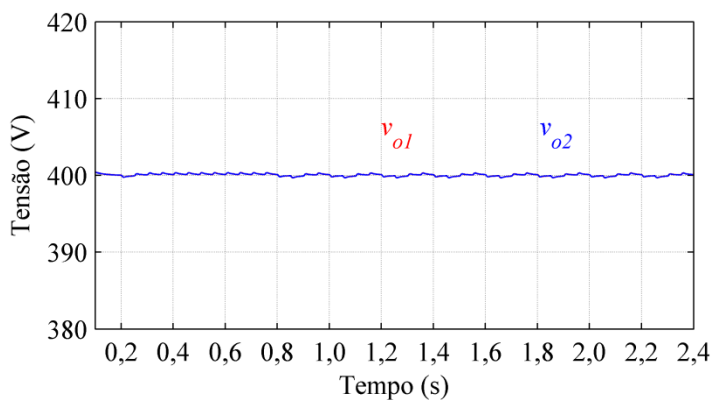
A Figura 85 apresenta o efeito da variação da tensão do PAC sobre o barramento cc. Percebe-se que o barramento permanece regulado durante as variações da amplitude do PAC.

Figura 84 - Potência aparente processada pelo conversor com carga leve



Fonte: produção do próprio autor

Figura 85 - Tensão do barramento com carga leve

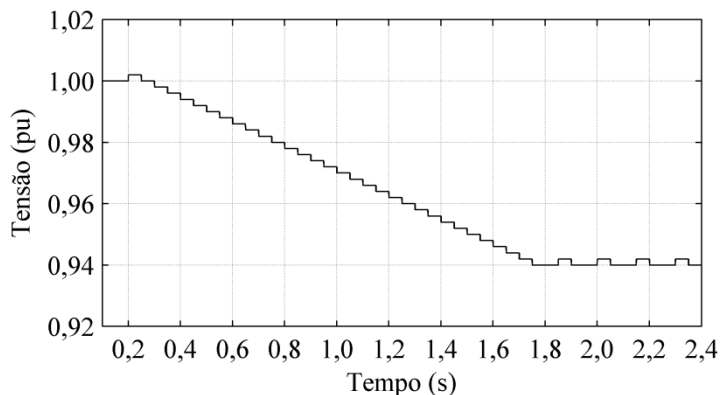


Fonte: produção do próprio autor

7.8.3 Sistema com carga não linear

Adicionando 6 kVA de carga não linear à carga média, a Figura 86 traz a evolução temporal da amplitude imposta às tensões do PAC. Igualmente ao caso puramente linear, o algoritmo do mPPT decresce a tensão do PAC até que seja atingido seu valor mínimo.

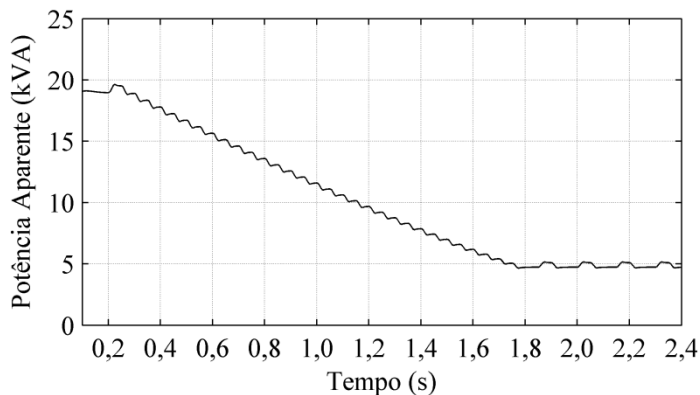
Figura 86 - Amplitude da tensão do PAC com carga pesada e não linear



Fonte: produção do próprio autor

A potência aparente processada do conversor decresce de 19 kVA para 4,73 kVA, conforme a Figura 87, o que significa redução de 75 %.

Figura 87 - Potência aparente processada pelo conversor com carga nominal e não linear

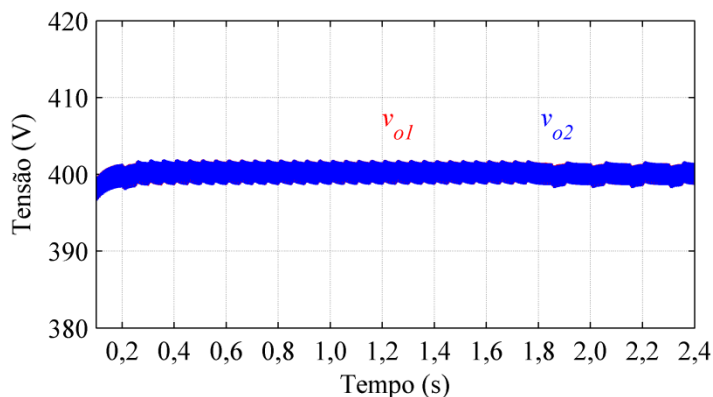


Fonte: produção do próprio autor

A Figura 88 apresenta o efeito da variação da tensão do PAC sobre o barramento cc. Agora, diferentemente da operação com cargas lineares, a ondulação de tensão total do conversor apresenta

componentes de alta frequência. Mesmo assim, a malha de controle é capaz de manter as tensões total e diferencial reguladas em seus respectivos patamares.

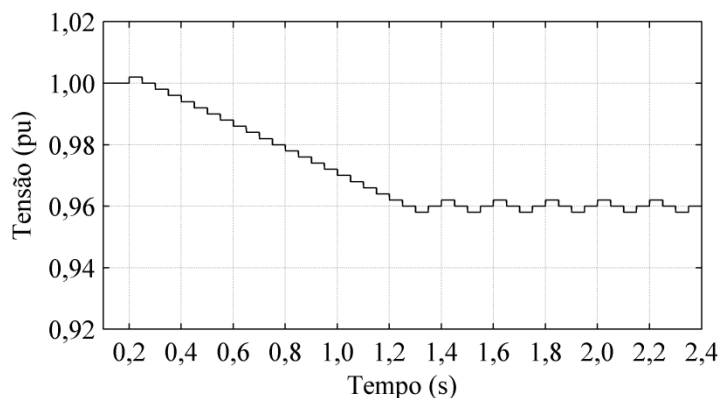
Figura 88 - Tensão do barramento com carga nominal e não linear



Fonte: produção do próprio autor

Diminuindo a parcela da carga linear para leve, a Figura 89 traz a evolução temporal da amplitude da tensão do PAC. O algoritmo do mPPT agora consegue achar o ponto de equilíbrio em 211,2 V (0,960 pu).

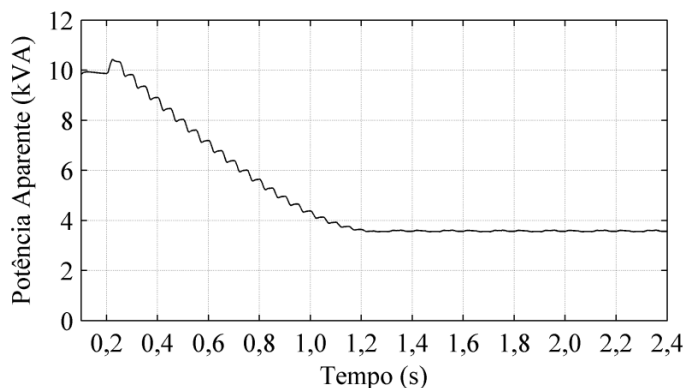
Figura 89 - Amplitude da tensão do PAC com carga leve e não linear



Fonte: produção do próprio autor

A Figura 90 traz a evolução da potência processada pelo conversor. No presente caso, a potência aparente não atinge valores próximos a zero devido ao processamento inevitável das componentes harmônicas de corrente da carga. A potência processada inicia em 9,87 kVA e decresce para de 3,55 kVA, redução de 64%.

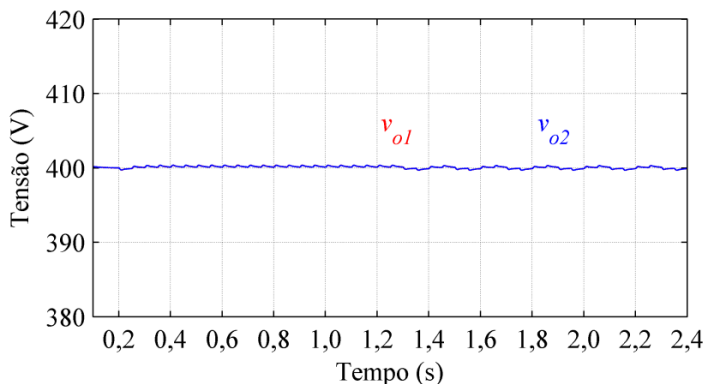
Figura 90 - Potência aparente processada pelo conversor com carga leve e não linear



Fonte: produção do próprio autor

As formas de onda das tensões do barramento cc são apresentadas na Figura 91.

Figura 91 - Tensão do barramento com carga leve e não linear



Fonte: produção do próprio autor

7.9 AVALIAÇÃO DA MALHA DE FREQUÊNCIA

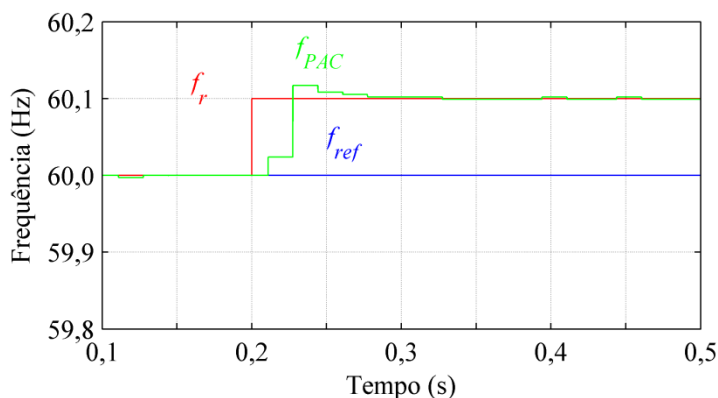
Como visto anteriormente, faz-se necessária a contínua atualização da frequência da tensão do PAC para que essa seja igual à frequência da rede e, assim, garantir a operação do regulador de tensão.

Entretanto cabe avaliar seu desempenho dinâmico frente a duas formas de variação da frequência: do tipo degrau e do tipo senoidal.

7.9.1 Sistema sem a malha de frequência

A avaliação da malha de frequência se inicia com a demonstração do impacto da variação da frequência da rede no sistema de controle. No instante de tempo igual a 0,2 s é acrescentado 0,1 Hz à frequência da rede, conforme a Figura 92.

Figura 92 - Frequência da rede, do PAC e da referência de tensão sem a malha de frequência

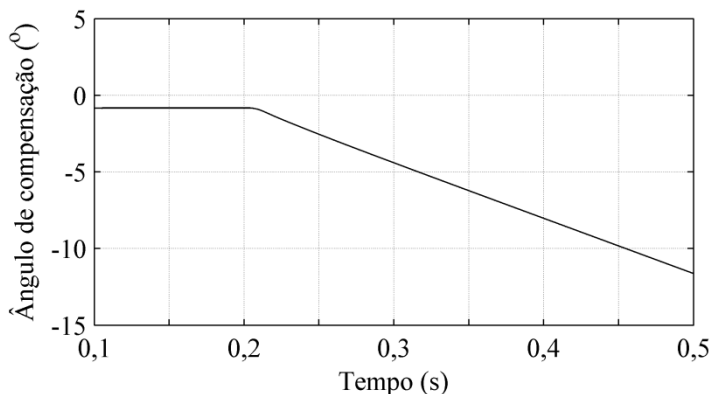


Fonte: produção do próprio autor

O compensador de tensão total do barramento cc tentará rejeitar a perturbação, fazendo com que a frequência do PAC se iguale a frequência da rede, enquanto a frequência da referência de tensão permanece em 60 Hz. O ângulo de compensação resultante é do tipo rampa, mostrado na Figura 93.

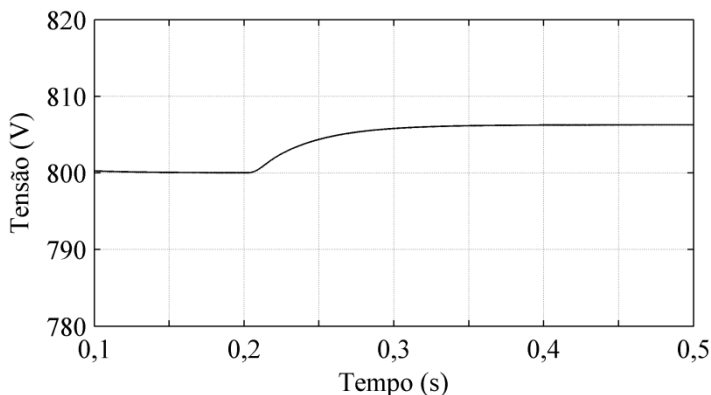
A consequência direta sobre a tensão total do barramento cc é apresentada na Figura 94. O erro estático é pequeno, em torno de 0,78 %.

Figura 93 - Ângulo de compensação sem a malha de frequência



Fonte: produção do próprio autor

Figura 94 - Tensão total do barramento cc sem a malha de frequência

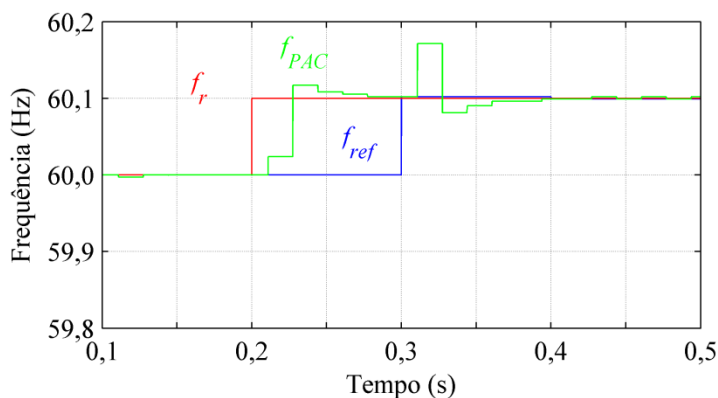


Fonte: produção do próprio autor

7.9.2 Sistema com a malha de frequência

Com a malha de frequência habilitada, há a detecção da frequência do PAC no instante de tempo igual a 0,3 s e a malha de frequência substitui o valor anterior da frequência da referência de tensão pelo valor medido da frequência do PAC, conforme a Figura 95.

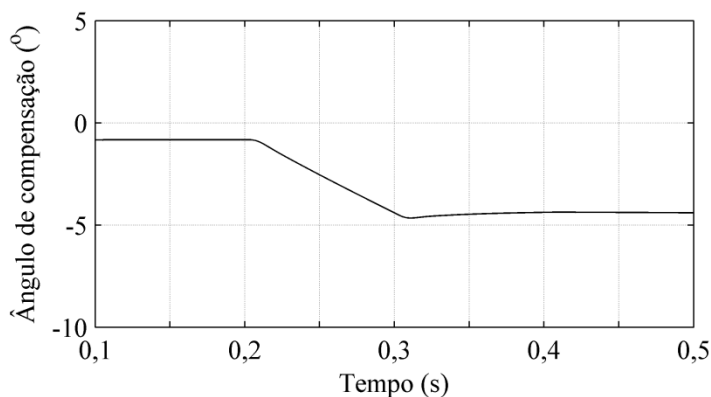
Figura 95 - Frequência da rede, do PAC e da referência de tensão com a malha de frequência



Fonte: produção do próprio autor

O ângulo de compensação, que antes sempre decrescia, estabiliza em outro valor após a atualização do valor de frequência e apresenta novamente valor constante. O comportamento temporal do ângulo de compensação é mostrado na Figura 96.

Figura 96 - Ângulo de compensação com a malha de frequência



Fonte: produção do próprio autor

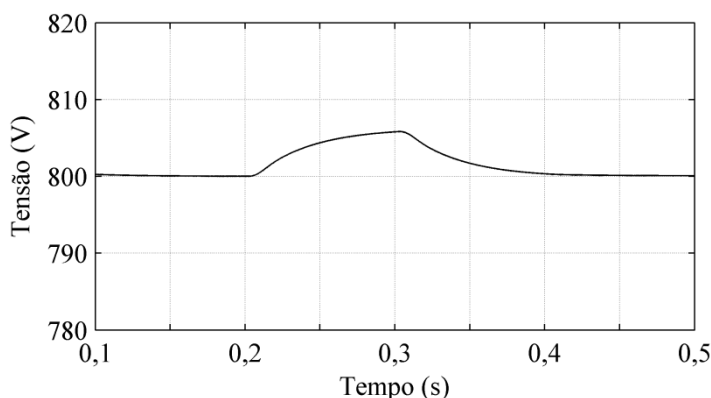
Infelizmente, o ângulo de compensação, com a atualização do valor de frequência, não retorna ao valor anterior, onde ambas as

frequências da rede e do PAC eram iguais. Isso indica que o erro existente entre as frequências é acumulado na ação de controle de tensão total, o que pode levar o controlador à saturação.

Caso a ação de controle tenda à saturação, a malha de frequência entra em uma rotina de proteção que força a ação de controle ir a zero e, em seguida, ela retorna à sua operação regular.

A tensão total do barramento, que possuía erro estático, volta para o seu valor de referência, como mostra a Figura 97.

Figura 97 - Tensão total do barramento cc com a malha de frequência

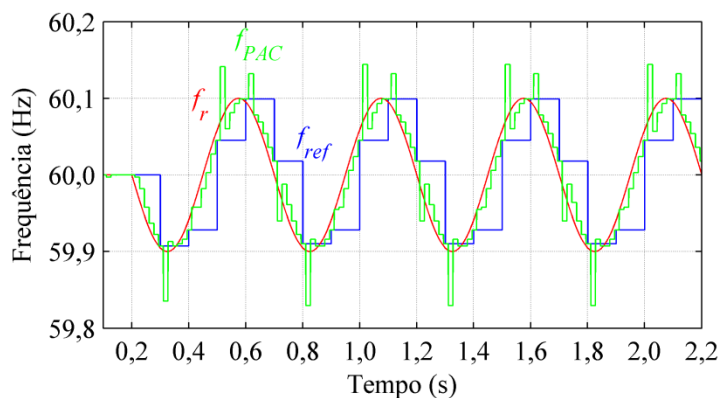


Fonte: produção do próprio autor

Para uma avaliação mais crítica a cerca do desempenho da malha de frequência, o degrau foi substituído por uma variação senoidal de amplitude 0,1 Hz e período de 0,5 s. A Figura 98 apresenta a variação da frequência da rede de forma senoidal. A frequência da referência da tensão do PAC tenta seguir a variação da frequência da rede, pois é limitada pela amostragem da malha. Mesmo assim, é atingido um estado oscilatório estável.

O ângulo de compensação tem também comportamento oscilatório e acompanha as atualizações de frequência, como mostra a Figura 99. Pode-se ver que a amplitude da oscilação do ângulo de defasagem não aumenta conforme a sucessão de ciclos.

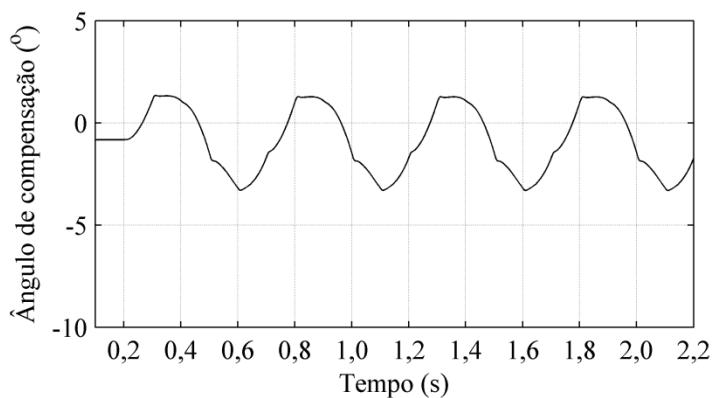
Figura 98 - Frequência da rede e do PAC com a malha de frequência e variação senoidal



Fonte: produção do próprio autor

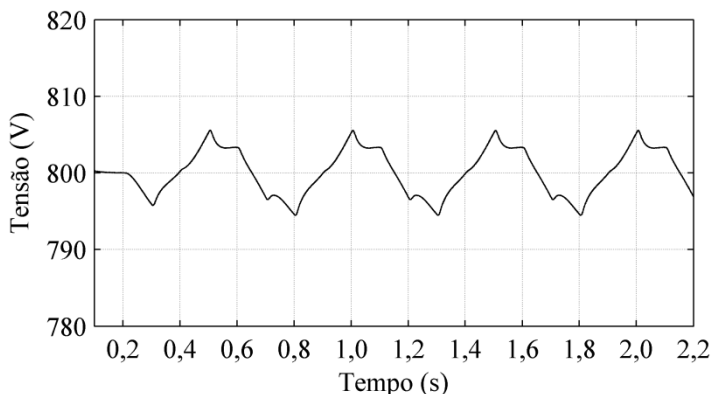
A tensão total do barramento também apresenta oscilações, de 5,5 V de amplitude, mas o nível médio se mantém no seu valor nominal. A forma de onda da tensão pode ser vista na Figura 100.

Figura 99 - Ângulo de compensação com a malha de frequência e variação senoidal



Fonte: produção do próprio autor

Figura 100 - Tensão total do barramento cc com a malha de frequência e variação senoidal



Fonte: produção do próprio autor

7.10 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram apresentados e discutidos os resultados de simulação do conversor diante de cargas lineares e não lineares, assim como distúrbios na rede. Além disso, foi verificada a malha de amplitude da tensão do PAC e a malha de frequência.

O conversor regulou as tensões no PAC diante de todas as cargas simuladas e foi capaz de rejeitar rapidamente perturbações na carga. Com a presença de cargas não lineares, o conversor manteve as tensões do PAC senoidais com baixa TDH e absorveu todo o conteúdo harmônico gerado pelas cargas.

Os controles de tensão total e diferencial do barramento cc apresentaram o comportamento esperado, mantendo as tensões do barramento reguladas e equilibradas durante todos os casos simulados.

A malha de amplitude foi capaz de rastrear adequadamente a amplitude do PAC em que o conversor atinge o mPP, nem que seja no limite inferior adotado.

A malha de frequência manteve a frequência da tensão do PAC próxima à frequência da rede. Com isso, é garantida a correta operação do conversor, pois o compensador de tensão total não atingiu a saturação e, com isso, a tensão do barramento permanece em torno de seu valor de referência.

O período de amostragem e atualização da malha de frequência devem ser cuidadosamente escolhidos para que variações de carga não sejam confundidas com a variação na frequência da rede.

O conversor e o sistema de controle, portanto, estão aptos a serem reproduzidos e verificados em um protótipo.

8 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Equation Section (Next)

Após a verificação das características do DSTATCOM durante simulações numéricas, foi desenvolvido em laboratório um protótipo para reproduzir os resultados obtidos.

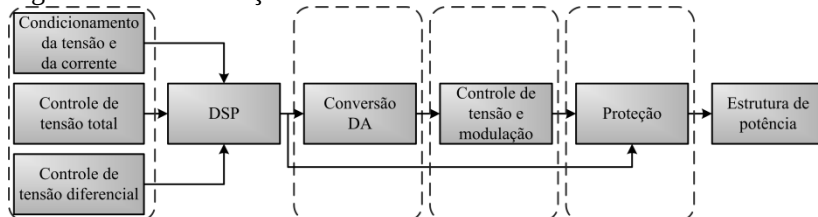
O sistema implementado é apresentado, citando os principais componentes utilizados e como foram distribuídos os circuitos.

Os ensaios do conversor foram realizados com parâmetros semelhantes àqueles apresentados para as simulações e os resultados foram obtidos com cargas resistivas e de potência inferior, devido a limitações de equipamentos.

8.1 SISTEMA IMPLEMENTADO

As placas principais de controle foram divididas em quatro, cada uma desempenhando uma função específica, separadas pela sua posição e pelo tipo de sinal que contém, destacadas na Figura 101.

Figura 101 - Distribuição dos circuitos do DSTATCOM



Fonte: produção do próprio autor

A primeira placa foi definida como a placa de entrada do Processador Digital de Sinais (DSP) e contém os circuitos de condicionamento das três tensões do PAC e das três correntes do conversor, assim como as tensões do barramento cc. Foram incluídos também os dois controladores de tensão do barramento, o controlador de tensão total e o controlador de tensão diferencial.

A segunda placa é a placa de saída do DSP e tem como função converter os três sinais PWM enviados pelo DSP em três sinais analógicos, que serão utilizados na terceira placa.

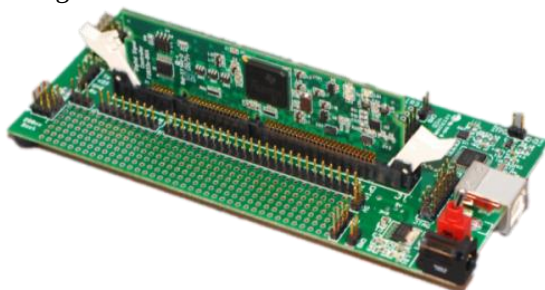
A terceira placa é a placa de controle analógico e abriga os compensadores de tensão ca, os compensadores de amortecimento ativo e o modulador PWM. A quarta placa, que possui os sinais digitais do

conversor, realiza a proteção via hardware do conversor, recebe o sinal de proteção proveniente do DSP e envia os pulsos de gatilho para os interruptores no estágio de potência.

Já as placas de sensoriamento foram divididas em duas: sensoriamento de tensão e de corrente. Para o sensor de tensão foram utilizados divisores resistivos e para o sensor de corrente foram utilizados transdutores LA 125-P/SP3.

O DSP utilizado é o TMS320F28335 da Texas Instruments no kit de desenvolvimento TMDSDOCK28335 utilizando a daughter board TMDSCNCD28335. A Figura 102 traz uma imagem do kit de desenvolvimento.

Figura 102 - Imagem do kit TMDSDOCK28335



Fonte: Texas Instruments.

O protótipo desenvolvido para o DSTATCOM é mostrado na Figura 103.

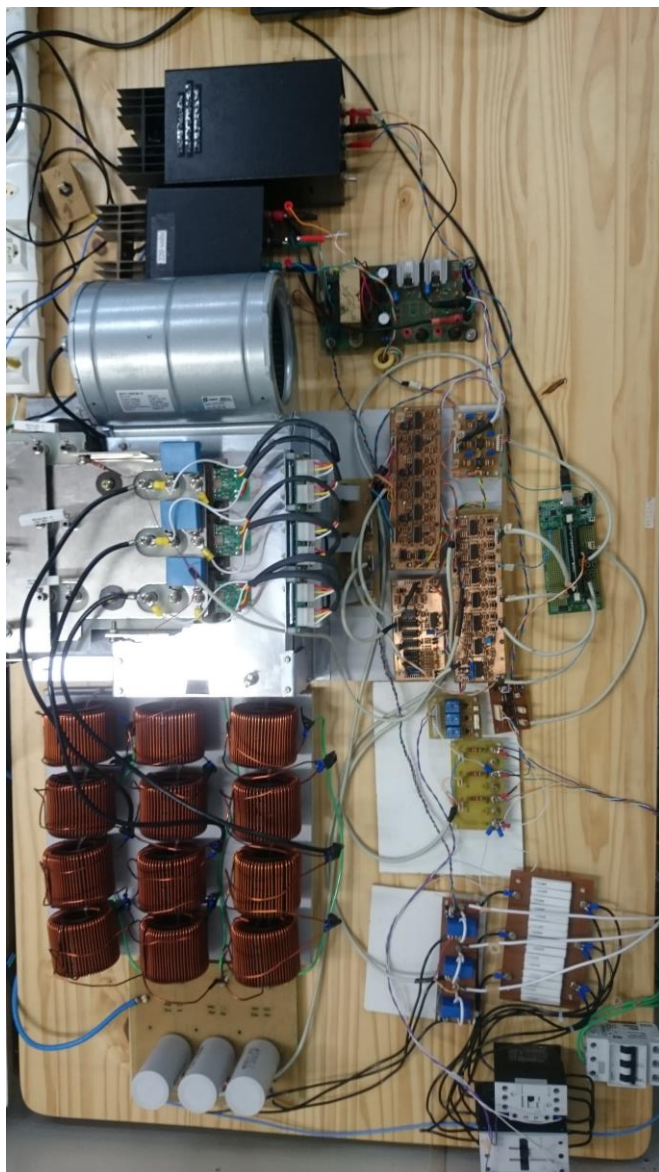
A impedância da rede adicionada ao ramal da rede possui aproximadamente os mesmos valores dos empregados na simulação, conforme traz a Tabela 7.

Tabela 7 - Comparativo entre os parâmetros utilizados na simulação e nos ensaios

	Módulo da impedância da rede	Ângulo da impedância da rede
Simulação	0,20 pu	45°
Experimento	0,24 pu	49°

Fonte: produção do próprio autor

Figura 103 - Protótipo implementado



Fonte: produção do próprio autor

8.2 SISTEMA COM CARGA LINEAR

Durante os testes com o protótipo, foi necessário reduzir a banda passante do controlador de tensão da tensão de saída C_{vac} pela metade (com frequência de cruzamento por zero em 2,6 kHz), pois foi verificado que ele apresentava períodos de tempo em saturação e, como consequência, não era capaz de realizar o devido controle sobre as tensões do PAC com a qualidade exigida.

Os resultados experimentais do regulador de tensão foram obtidos com carga resistiva conectada PAC, primeiramente aplicando uma carga leve (5,2 kW ou 0,175 pu) e após uma carga pesada (10,4 kW ou 0,35 pu).

As formas de onda das fases A, B e C serão doravante atribuídas aos canais CH1, CH2 e CH3, respectivamente, tanto para as tensões do PAC quanto para as correntes processadas pelo conversor.

Para o correto funcionamento do regulador de tensão, é preciso que os capacitores do barramento cc estejam carregados com a sua tensão nominal. A Figura 104 apresenta a evolução temporal das tensões do barramento durante a inicialização do regulador.

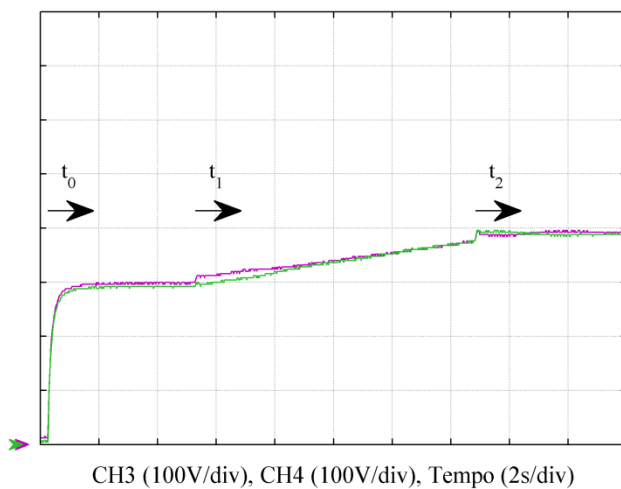
No instante de tempo t_0 é iniciada a primeira etapa, onde é acionado um contator auxiliar, responsável pela inserção de resistências em série com o circuito, evitando o pico elevado de corrente drenada pelos capacitores. Nessa etapa, os interruptores são comandados a bloquear.

Na segunda etapa, iniciada no instante de tempo t_1 , o contator principal é acionado, retirando as resistências, e os pulsos de comando dos interruptores são habilitados. A referência de tensão total do barramento cc cresce linearmente até o seu valor nominal, evitando sobressinal no controlador de tensão total.

Na última etapa, o contator auxiliar é desligado, permanecendo acionado o contator principal. Nessa etapa, o conversor está em sua operação normal.

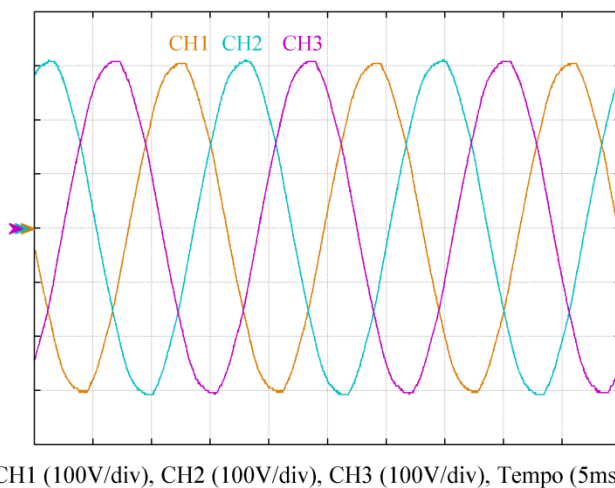
As tensões do PAC operando sem a compensação do DSTATCOM e com carga leve possuem valor eficaz de tensão de 215 V, 219 V e 218 V para as fases A, B e C, respectivamente. Suas formas de onda são mostradas na Figura 105.

Figura 104 - Formas de onda das tensões do barramento cc durante a inicialização do regulador de tensão



Fonte: produção do próprio autor

Figura 105 - Formas de onda das tensões do PAC sem compensação e com carga leve

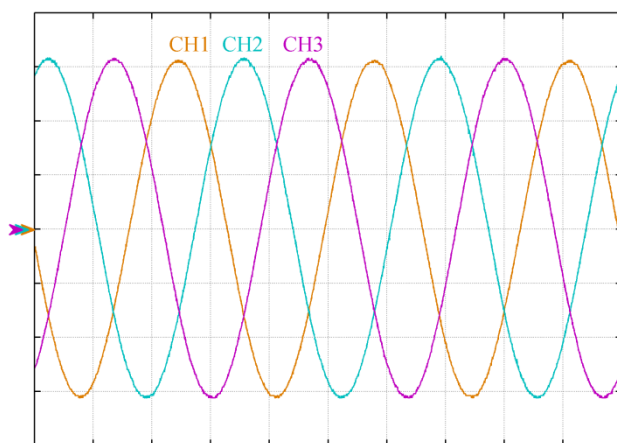


Fonte: produção do próprio autor

O valor de tensão para o PAC foi arbitrado em 220 V (1,00 pu), mesmo valor nominal da tensão da rede. A Figura 106 mostra as formas de onda das três tensões do PAC sintetizadas pelo DSTATCOM para uma carga leve.

Como pode ser visto na Figura 106, as tensões do PAC com compensação estão reguladas no valor adotado e apresentam baixa distorção harmônica, sendo que a medida foi menor que 0,20%.

Figura 106 - Formas de onda das tensões do PAC com compensação e com carga leve



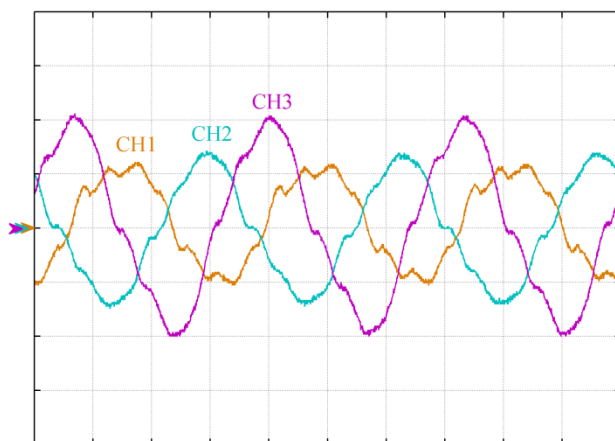
CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

Já as formas de onda de corrente de compensação do conversor são apresentadas na Figura 107. As correntes das fases A, B e C possuem valor eficaz de 3,75 A, 4,73 A e 6,59 A, respectivamente, totalizando uma potência de 3,32 kVA (0,111 pu).

A distorção harmônica presente nas formas de onda de corrente são originadas pela distorção da tensão da rede. O conversor, impondo tensões com baixa TDH, absorverá essas distorções na forma de corrente e evitará que a tensão do PAC seja distorcida, conforme visto durante os resultados de simulação.

Figura 107 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga leve



CH1 (5A/div), CH2 (5A/div), CH3 (5A/div), Tempo (5ms/div)

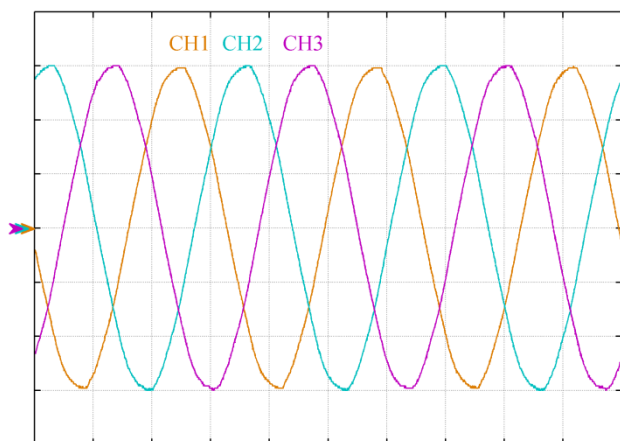
Fonte: produção do próprio autor

Além disso, pode-se notar que a própria rede elétrica apresenta um leve desequilíbrio nos seus valores de tensão que implica nos valores distintos de corrente de compensação.

As tensões da rede de distribuição operando sem a compensação do DSTATCOM e com carga pesada possuem valor eficaz de tensão de 210 V, 212 V e 212 V para as fases A, B e C, respectivamente. Suas formas de onda são mostradas na Figura 108.

Com carga pesada, a Figura 109 apresenta as formas de onda de tensão do PAC com compensação, as quais permanecem reguladas e com uma baixa distorção harmônica, mantida menor que 0,20%.

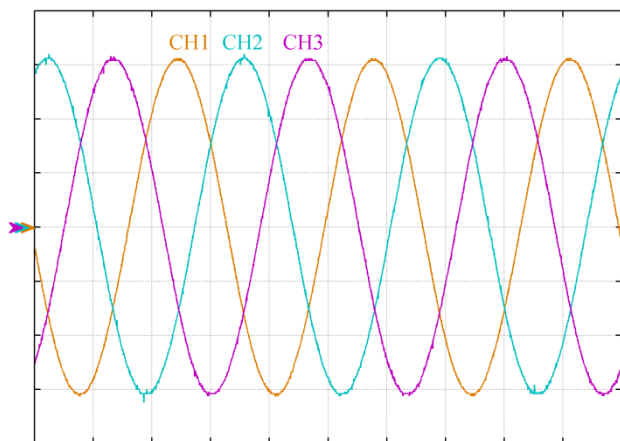
Figura 108 - Formas de onda das tensões do PAC sem compensação e com carga pesada



CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

Figura 109 - Formas de onda das tensões do PAC com compensação e com carga pesada

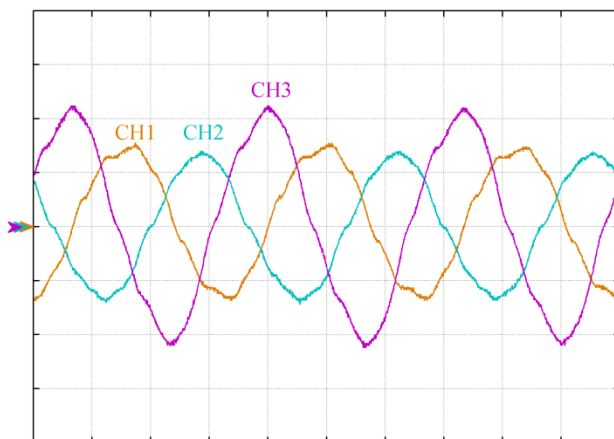


CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

A Figura 110 mostra as formas de onda da corrente de compensação. O valor eficaz de corrente das fases A, B e C se elevam para 10,2 A, 9,38 A e 14,8 A, respectivamente. A potência aparente total processada pelo conversor sobe para 7,56 kVA (0,252 pu).

Figura 110 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga pesada



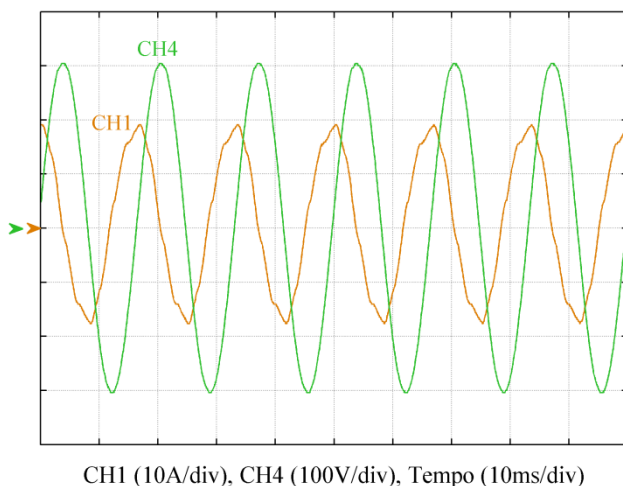
CH1 (10A/div), CH2 (10A/div), CH3 (10A/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

Para exemplificar a compensação de reativos, a Figura 111 traz as formas de onda da tensão do PAC (CH4) e da corrente do conversor (CH1) para a fase A. É possível verificar que a corrente do conversor está adiantada em relação à tensão do PAC com ângulo de defasagem próximo a 90 graus.

As demais fases possuem comportamento semelhante ao apresentado para a fase A, distinguindo-se exclusivamente pela defasagem do sistema trifásico.

Figura 111 - Formas de onda da tensão do PAC e da corrente de compensação do conversor na fase A com carga pesada



Fonte: produção do próprio autor

8.3 DINÂMICA DO CONTROLE COM VARIAÇÃO DE CARGA

Para avaliar o desempenho das malhas de controle das tensões do barramento, foram aplicados degraus de carga, partindo da carga leve para carga pesada e, posteriormente, retornando a carga leve.

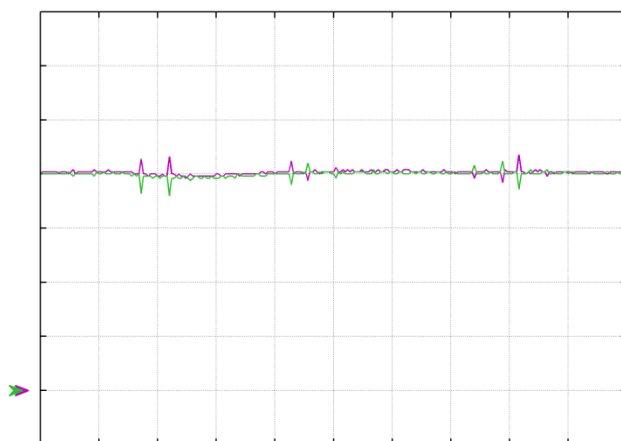
Na entrada de carga, que passa de leve para pesada, a Figura 112 apresenta o comportamento dinâmico das tensões do barramento cc. As tensões do barramento apresentam boa regulação e retornam aos seus valores nominais depois de 200 ms, com variação de tensão de -10 V em relação à tensão total do barramento cc.

As formas de onda das tensões no PAC são apresentadas na Figura 113, onde é possível notar que não há impactos significativos à qualidade da forma de onda das tensões de saída do conversor.

Na retirada de carga, passando de pesada para leve, as tensões do barramento apresentam novamente uma boa regulação e o tempo de assentamento se mantém próximo a 200 ms. Entretanto, a variação de tensão é maior (+20 V), como pode ser visto na Figura 114.

Já na Figura 115 verifica-se que na retirada de carga também há pouca influencia na forma de onda das tensões do PAC.

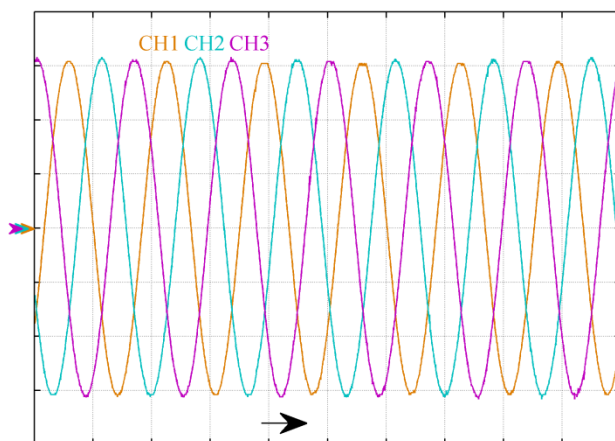
Figura 112 - Formas de onda das tensões do barramento cc durante a entrada de carga



CH3 (100V/div), CH4 (100V/div), Tempo (500ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

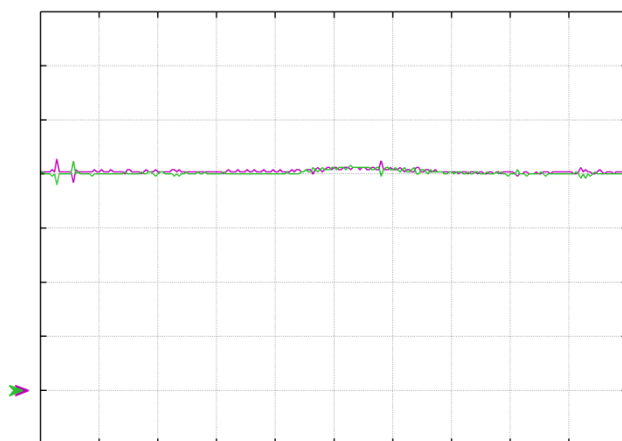
Figura 113 - Formas de onda das tensões do PAC durante a entrada de carga



CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (10ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

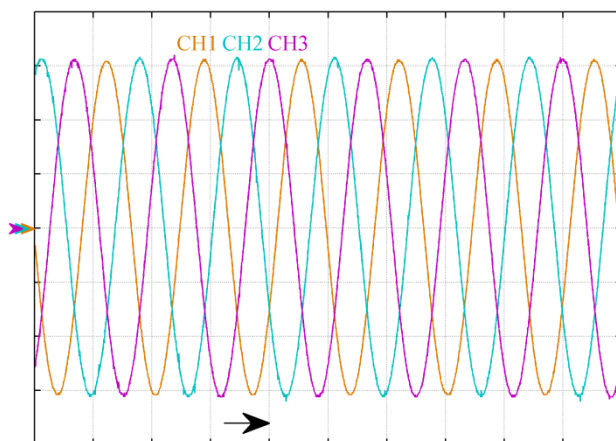
Figura 114 - Formas de onda das tensões do barramento cc durante a retirada de carga



CH3 (100V/div), CH4 (100V/div), Tempo (500ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

Figura 115 - Formas de onda das tensões do PAC e corrente na fase A durante a retirada de carga



CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (10ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

8.4 DINÂMICA DO CONTROLE COM DESEQUILÍBRIO DE CARGA

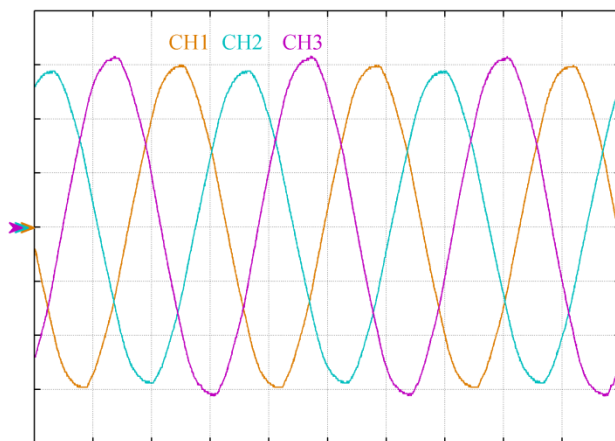
A capacidade do regulador de tensão em promover, entre outras coisas, o equilíbrio das três tensões do PAC foi avaliado durante testes com desequilíbrio de carga resistiva. Para formar esse desequilíbrio, foram conectadas três cargas distintas a cada fase do PAC, tal como segue:

- Fase A: 3,46 kW
- Fase B: 5,19 kW
- Fase C: 1,73 kW

As formas de onda da tensão do PAC sem a presença do conversor perante um desequilíbrio de carga são vistas na Figura 116. As fases A, B e C possuem valor eficaz de 211 V, 204 V e 221 V, respectivamente.

Com compensação, Figura 117, verifica-se que as tensões possuem agora valor eficaz muito próximo, em torno de 220 V. A TDH de tensão se mantém baixa, menor que 0,20%.

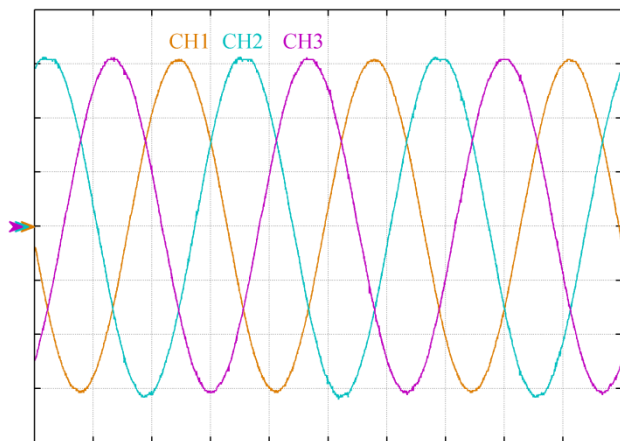
Figura 116 - Formas de onda das tensões do PAC sem compensação e com desequilíbrio de carga



CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

Figura 117 - Formas de onda das tensões do PAC com compensação e com desequilíbrio de carga



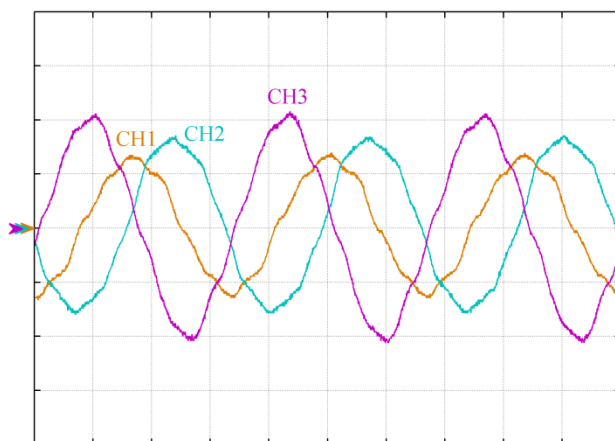
CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

As correntes processadas pelo conversor podem ser vistas na Figura 118, cujo valor eficaz é de 8,92 A, 11,3 A e 14,0 A para a fase A, B e C, respectivamente, totalizando uma potência aparente processada de 7,5 kVA.

Nessa condição de desequilíbrio de cargas, a fase C, conectada a uma baixa carga, tem menos necessidade de compensação. Como a malha de tensão total do barramento cc aplica o mesmo ângulo de compensação nas três fases, a fase C tem um ângulo tal que haverá um fluxo de potência ativa maior que as demais fases. Além disso, para manter a mesma amplitude nas três fases, a fase C acaba tendo que consumir reativos ao invés de fornecê-los.

Figura 118 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com desequilíbrio de carga



CH1 (10A/div), CH2 (10A/div), CH3 (10A/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

8.5 SISTEMA COM CARGA NÃO LINEAR

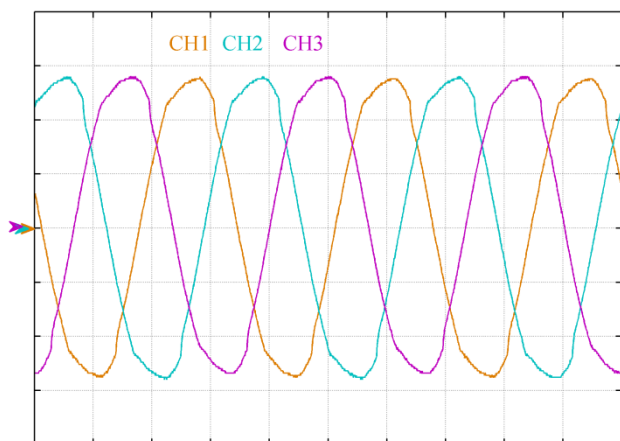
Para a verificação do comportamento do sistema de controle perante cargas não lineares, foram acrescentados à carga leve retificadores monofásicos com filtro capacitivo. Esses retificadores possuem parâmetros semelhantes aos que foram utilizados durante as simulações.

As tensões do PAC operando sem a compensação do DSTATCOM e com carga não linear possuem valor eficaz de tensão de 203 V, 206 V e 203 V para as fases A, B e C, respectivamente, e TDH de 6,42%, conforme a Figura 119.

As formas de onda das tensões do PAC com compensação podem ser visualizadas na Figura 120 e apresentam uma maior TDH (0,576%) em comparação ao desempenho com cargas lineares e estão reguladas em 220 V.

As formas de onda das correntes de compensação do conversor são mostradas na Figura 121. O valor eficaz de corrente das fases A, B e C é de valor eficaz de 8,73 A, 13,1 A e 11,9 A, respectivamente. A potência total é de 7,42 kVA (0,247 pu).

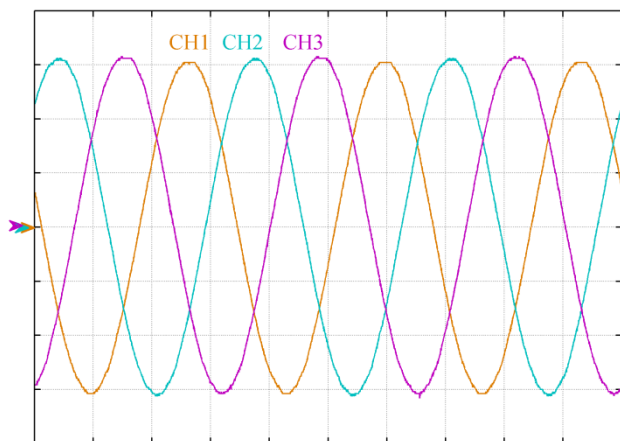
Figura 119 - Formas de onda das tensões do PAC sem compensação e com carga não linear



CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

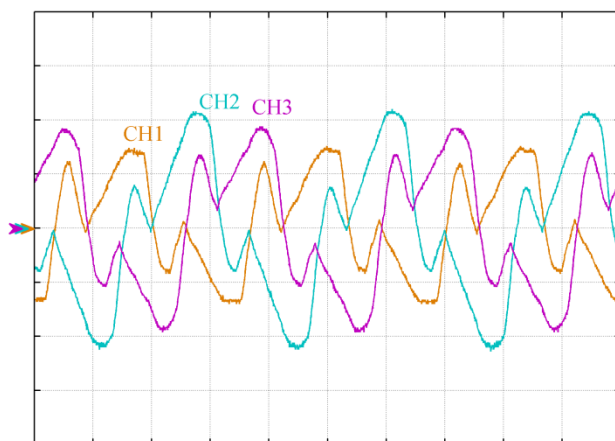
Figura 120 - Formas de onda das tensões do PAC com compensação e com carga não linear



CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

Figura 121 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga não linear



CH1 (10A/div), CH2 (10A/div), CH3 (10A/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

É possível notar que as correntes apresentam recortes profundos em suas formas de onda. Esses recortes são exatamente o oposto do pico de corrente que há nos retificadores utilizados.

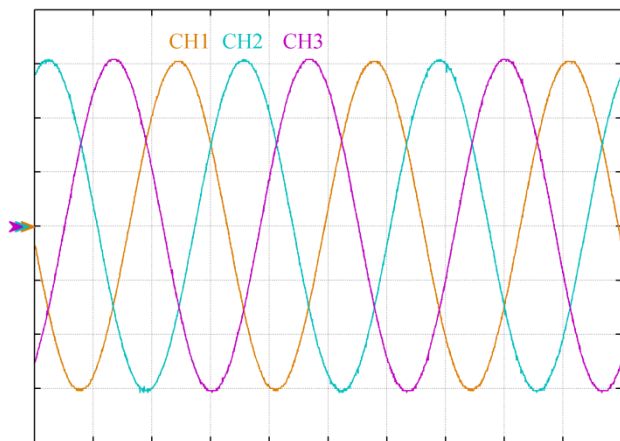
8.6 SISTEMA COM mPPT

O algoritmo de mPPT implementado na simulação foi habilitado. O passo de incremento ou decremento foi reduzido para 0,3 V (0,001 pu) e o tempo entre cada perturbação diminuído para 0,1667 s.

8.6.1 Sistema com carga leve

Com o conversor operando com uma carga leve no PAC, a Figura 122 apresenta as formas de onda da tensão do PAC com o algoritmo de mPPT habilitado. O mPP é atingido com as fases possuindo valor eficaz de 215 V.

Figura 122 - Formas de onda das tensões do PAC com carga leve e com o mPPT habilitado



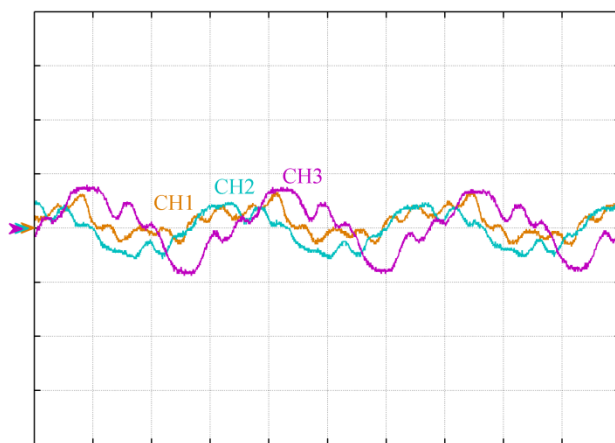
CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

As correntes processadas pelo conversor, como esperado, se mantêm próximas à zero, conforme mostra a Figura 123. Essas correntes são compostas majoritariamente pelo conteúdo harmônico da tensão da rede e há, também, uma pequena componente fundamental que fornece a energia consumida pelo estágio de potência.

A evolução temporal da amplitude resultante do algoritmo de mPPT é apresentada na Figura 124, onde pode ser visto que há instantes de tempo em que o algoritmo perturba o sistema no sentido oposto ao mPP. Essas perturbações errôneas acabam por atrasar a convergência ao mPP e podem ser atribuídas como falta de precisão nas leituras de corrente, visto que nessa condição a forma de onda da tensão possui pequenas amplitudes e significativo conteúdo harmônico, como visto anteriormente na Figura 123. O algoritmo aplica uma referência de 0,9773 pu (215 V). A potência calculada pelo algoritmo é mostrada na Figura 125, com valor médio em regime permanente de 1,8 kVA.

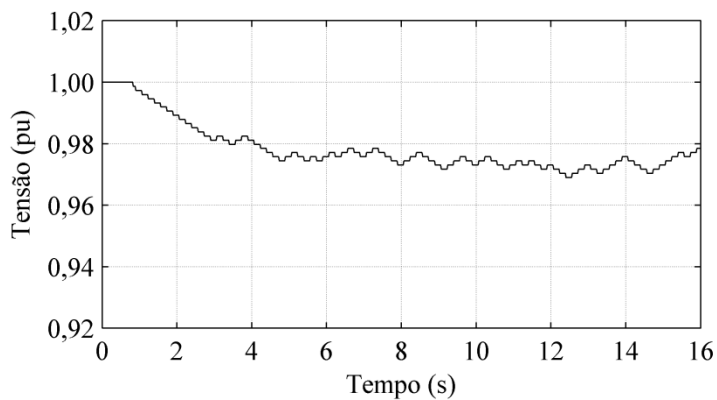
Figura 123 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga leve com o mPPT habilitado



CH1 (5A/div), CH2 (5A/div), CH3 (5A/div), Tempo (5ms/div)

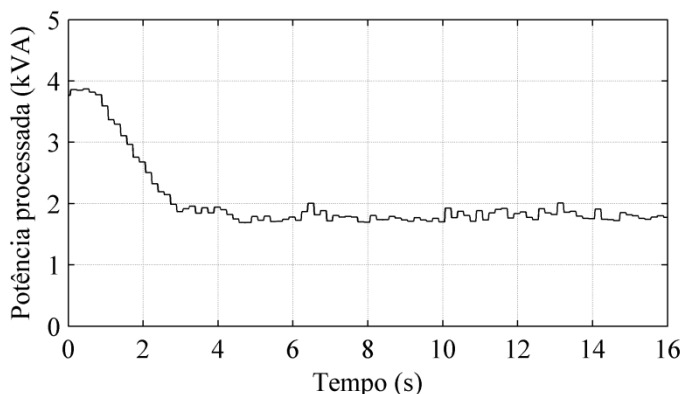
Fonte: produção do próprio autor

Figura 124 - Amplitude da tensão do PAC com carga leve



Fonte: produção do próprio autor

Figura 125 - Potência aparente processada pelo conversor com carga leve



Fonte: produção do próprio autor

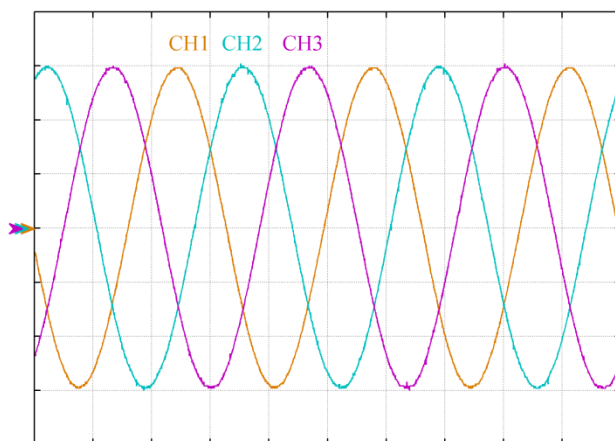
8.6.2 Sistema com carga pesada

Conectando a carga pesada ao PAC, a Figura 126 apresenta as formas de onda da tensão do PAC. O algoritmo do mPPT impõe tensão eficaz de 210 V.

Com isso, as correntes processadas pelo conversor se mantêm próxima a zero, conforme mostra a Figura 127.

A Figura 128 traz a evolução temporal da amplitude gerada pelo mPPT, com o algoritmo impondo referência de 0,9545 pu (210 V). Assim como no caso da carga leve, o algoritmo se mantém convergindo ao mPP até o ponto que as correntes de compensação se tornam pequenas. Em seguida, há perturbações errôneas, porém elas não aumentam significativamente a potência processada pelo conversor, como mostra a Figura 129, que gira em torno de 1,64 kVA.

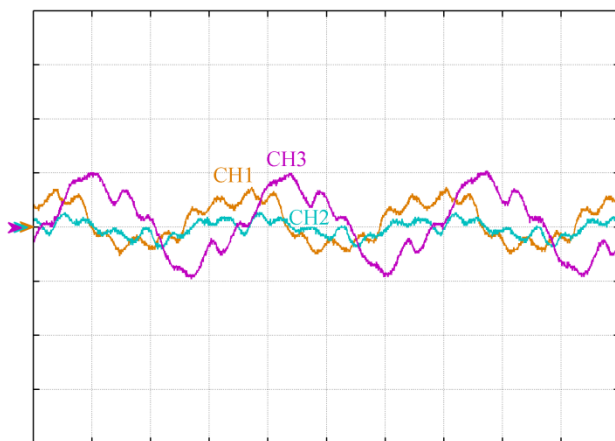
Figura 126 - Formas de onda das tensões do PAC com carga pesada e com o mPPT habilitado



CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

Fonte: produção do próprio autor

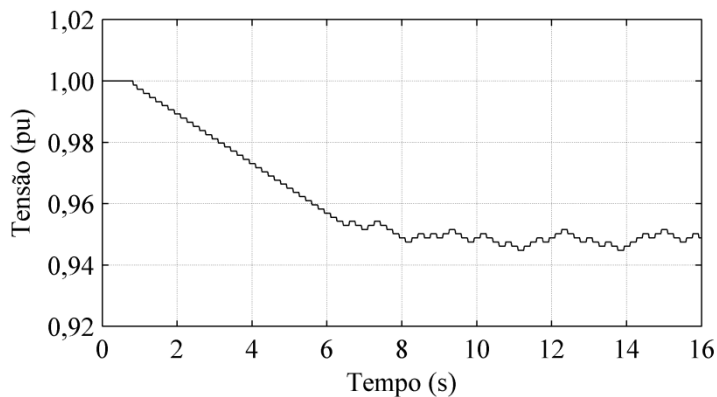
Figura 127 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga pesada e com o mPPT habilitado



CH1 (5A/div), CH2 (5A/div), CH3 (5A/div), Tempo (5ms/div)

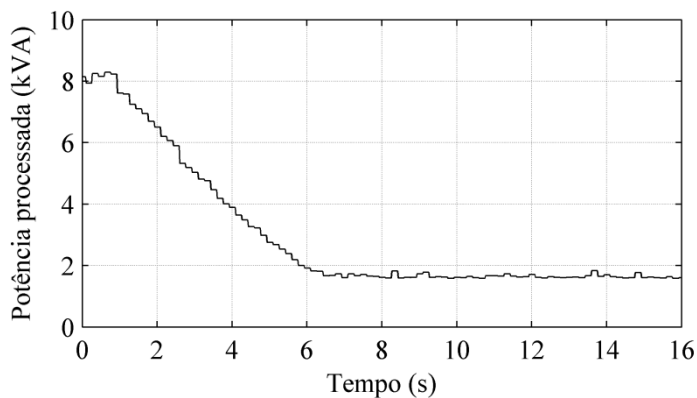
Fonte: produção do próprio autor

Figura 128 - Amplitude da tensão do PAC com carga pesada



Fonte: produção do próprio autor

Figura 129 - Potência aparente processada pelo conversor com carga pesada



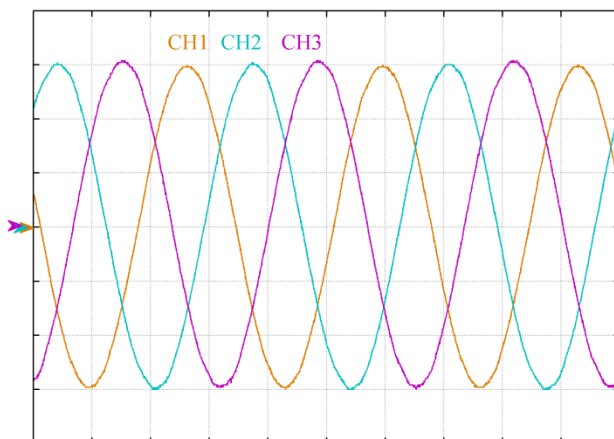
Fonte: produção do próprio autor

8.6.3 Sistema com carga não linear

O mesmo ensaio com carga não linear foi realizado, agora com o algoritmo de mPPT habilitado. As formas de onda das tensões do PAC podem ser vistas na Figura 130.

O algoritmo do mPPT impõe tensão eficaz de 212 V e as formas de onda de tensão do PAC continuam apresentando TDH mais elevada, em torno de 0,332%.

Figura 130 - Formas de onda das tensões do PAC com carga não linear e com o mPPT habilitado



CH1 (100V/div), CH2 (100V/div), CH3 (100V/div), Tempo (5ms/div)

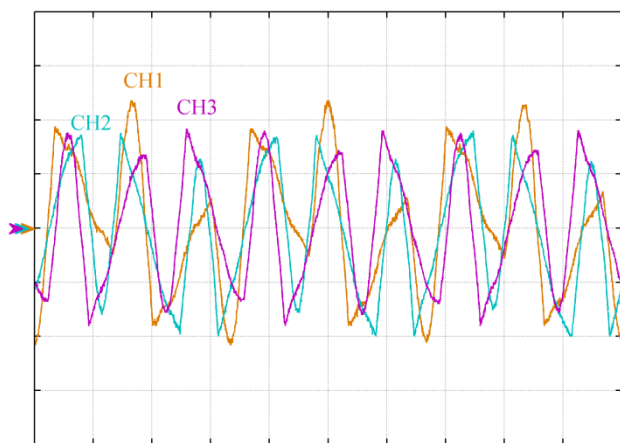
Fonte: produção do próprio autor

Entretanto, as correntes de compensação do conversor passam a ter o conteúdo harmônico da carga linear, além da parcela de energia ativa, como mostra a Figura 131.

Nessa condição de operação, o conversor se comporta da mesma forma de um filtro ativo paralelo.

A evolução temporal da amplitude do PAC é apresentada na Figura 132, com características semelhantes ao caso com carga linear. O algoritmo aplica uma referência de 0,9609 pu (211 V). O conversor processa em torno de 3,72 kVA de acordo com a Figura 133.

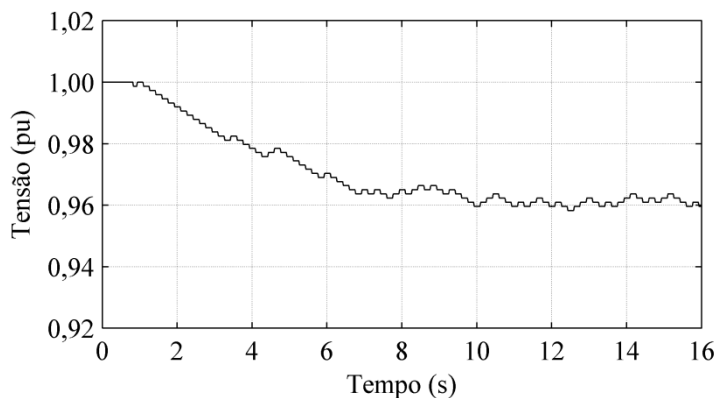
Figura 131 - Formas de onda das correntes de compensação do conversor com carga não linear e com o mPPT habilitado



CH1 (5A/div), CH2 (5A/div), CH3 (5A/div), Tempo (5ms/div)

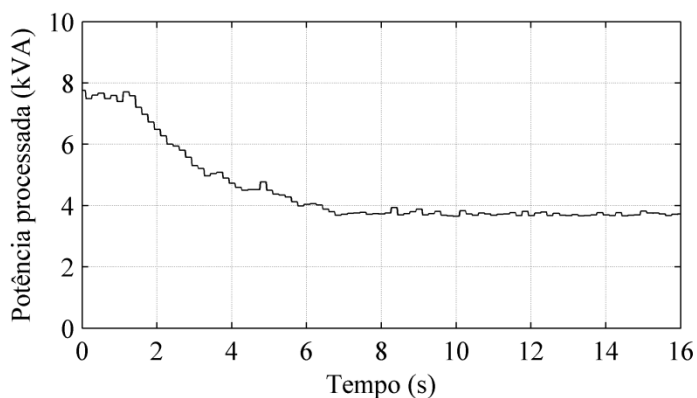
Fonte: produção do próprio autor

Figura 132 - Amplitude da tensão do PAC com carga não linear



Fonte: produção do próprio autor

Figura 133 - Potência aparente processada pelo conversor com carga não linear

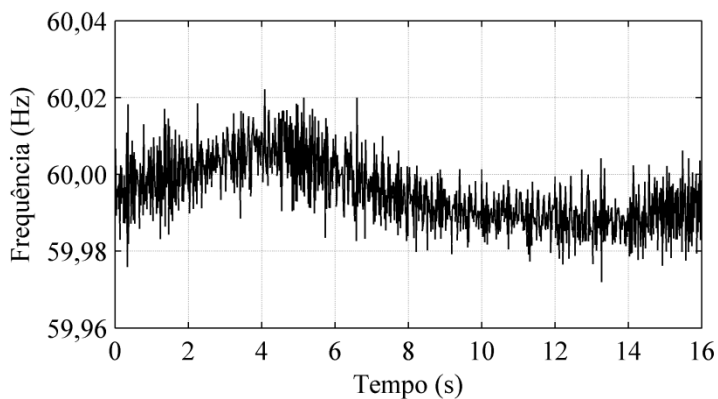


Fonte: produção do próprio autor

8.7 RESULTADOS DA MALHA DE FREQUÊNCIA

Para comprovar a capacidade de adequação da frequência da rede, a Figura 134 mostra resultados obtidos via DSP da frequência medida da rede.

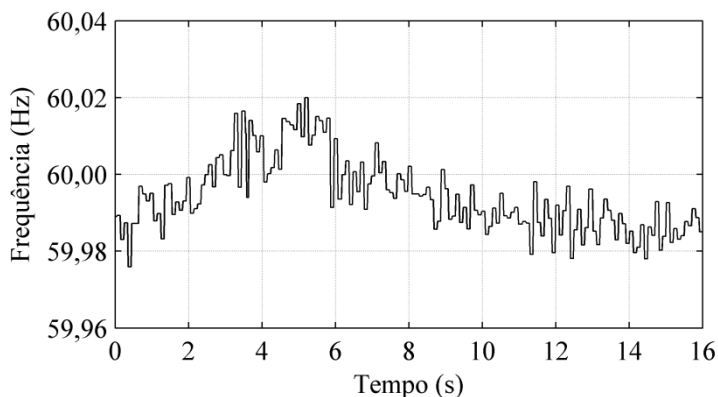
Figura 134 - Frequência medida da rede



Fonte: produção do próprio autor

A frequência da rede é adquirida a cada ciclo da rede e a frequência do PAC é atualizada a cada 100 ms conforme mostra a Figura 135.

Figura 135 - Frequência frequência adotada para o PAC



Fonte: produção do próprio autor

É possível notar que, assim como na simulação, haverá diferença entre essas frequências durante o período de atualização da malha.

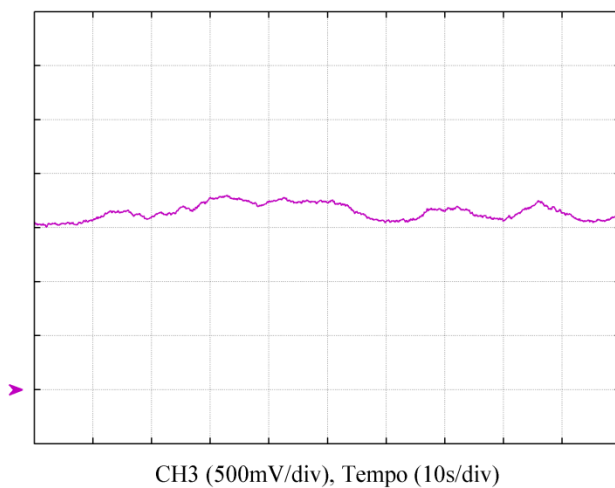
Com a malha de frequência habilitada, o ângulo de compensação proveniente do controlador de tensão total do barramento cc é apresentado na Figura 136. A ação de controle apresenta oscilações sem um padrão definido, assim como a frequência medida varia aleatoriamente.

A tensão do barramento cc permanece regulada, apresentando pequena ondulação de tensão devido às sucessivas correções na frequência da tensão de referência, conforme mostra a Figura 137.

Apesar do considerável aumento na autonomia que a malha de frequência proporciona, ela não é capaz de garantir que a ação de controle de tensão total se mantenha dentro dos limites físicos (0,5 V a 2,5 V, equivalem a -60 e 60 graus, respectivamente) durante grandes intervalos de tempo.

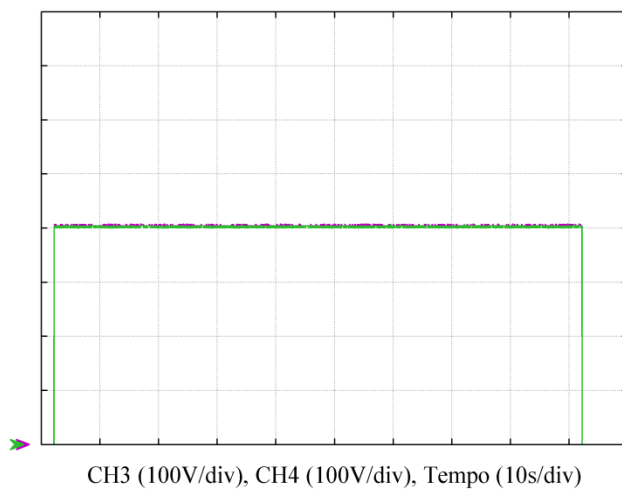
Diante disso, a Figura 138 mostra como a rotina de proteção traz a ação de controle a 1,5 V (equivale a 0 grau) e, a partir disso, retorna à sua operação normal.

Figura 136 - Ângulo de compensação com a malha de frequência



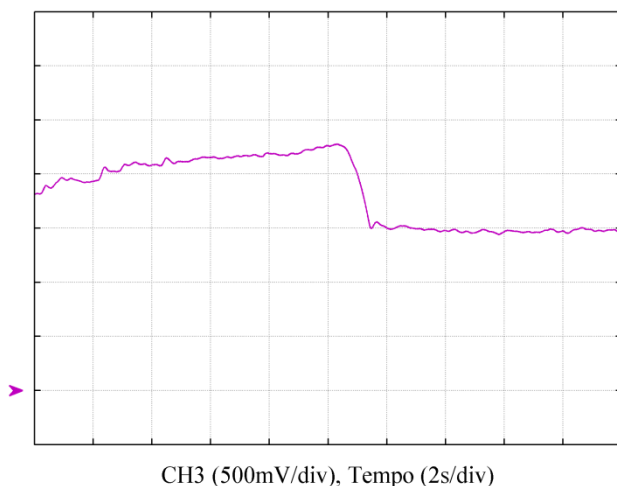
Fonte: produção do próprio autor

Figura 137 - Tensão total do barramento cc com a malha de frequência



Fonte: produção do próprio autor

Figura 138 - Exemplo da dinâmica da rotina de proteção da malha de frequência



Fonte: produção do próprio autor

8.8 CONCLUSÃO

Nesse capítulo foram expostos os resultados experimentais do protótipo construído para o regulador de tensão.

Assim como no ambiente de simulação, o regulador foi capaz de impor ao PAC três tensões puramente senoidais (com TDH menor que 0,4%) diante de todas as cargas ensaiadas e manter o barramento cc regulado em seu valor nominal.

A rede elétrica apresentou uma pequena distorção harmônica e também um desequilíbrio nas tensões de fornecimento. Isso contribuiu para que os resultados com cargas lineares apresentassem correntes de compensação com valores eficazes diferentes, bem como conteúdo harmônico. Essas características foram acentuadas durante os ensaios com cargas desequilibradas e cargas não lineares.

A malha de amplitude garantiu o processamento de potências aparente reduzidas, próximas ao mínimo, e rastreou o mPP. Entretanto, o algoritmo sofre com a falta de resolução na aquisição das correntes de compensação quando essas se aproximam de zero. Nessa condição, o algoritmo apresentou desempenho deficitário, pois a oscilação em regime permanente é muito maior do que o esperado.

O algoritmo de mPPT, durante os testes em laboratório, não atingiu o ponto de saturação da amplitude da tensão do PAC, definido como 0,94 pu, devido a cargas de potência reduzida. Entretanto, tal fato não invalida o algoritmo e os resultados obtidos.

A malha de frequência, com a implementação da rotina de proteção, atingiu seu objetivo, que é a operação segura do conversor sem a necessidade de informações das tensões da rede. Devido a carga ser pequena em relação à potência nominal do conversor, as tensões do barramento cc foram pouco afetadas, apresentando ondulação desprezível.

O método abordado para a compensação da frequência aumentou consideravelmente a complexidade do sistema e também a interação entre as malhas. Tanto o compensador de tensão total quanto a medição da frequência modificam o argumento da função seno que origina a tensão do PAC.

9 CONCLUSÃO GERAL

Equation Section (Next)

Esse trabalho apresentou um compensador estático de reativos controlado em tensão para a regulação da tensão de atendimento de consumidores em baixa tensão. A contribuição principal foi a adição de uma malha para a escolha da tensão de atendimento mais adequada, promovendo com isso a redução da potência aparente processada pelo conversor. Complementarmente, foi desenvolvida uma malha que modifica a frequência da tensão do PAC para que ela fique o mais próximo possível da frequência da rede, evitando assim eventuais desligamentos do regulador.

O capítulo 2 apresentou a análise da rede de distribuição, onde foi visto que a regulação paralela de tensão demanda muita energia, sendo que a compensação deve ser da ordem da potência da carga. Entretanto foi mostrado que há pontos de operação em que a potência processada pelo DSTATCOM é próxima à zero.

O capítulo 3 citou as principais técnicas de controle de compensadores de reativos e as características do controle em tensão do DSTATCOM, valendo destacar a baixa TDH da tensão no PAC, mesmo com cargas não lineares. Dentre as topologias mais empregadas, o conversor meia ponte trifásico a quatro fios foi escolhida para compor o estágio de potência e foram projetados os componentes de potência, bem como o filtro de saída.

O capítulo 4 abordou o sistema de controle, apresentando o diagrama de blocos completo, a modelagem das três plantas de tensão e o projeto dos compensadores de cada malha. À malha de tensão ca foi incluído um compensador responsável pelo amortecimento ativo do modelo. O método de projeto escolhido foi pela resposta em frequência.

Ainda no capítulo 4, a frequência de cruzamento por zero do compensador de tensão total do barramento cc teve de ser elevada, em torno de 50 Hz, a fim de evitar danos ao regulador de tensão quando há desconexões de carga. Apesar da malha não possui frequência de cruzamento por zero uma década abaixo da mínima frequência de ondulação do barramento cc (120 Hz), isso não afetou a qualidade da forma de onda da tensão do PAC.

O capítulo 5 se destinou à malha de amplitude da tensão do PAC. Essa malha garante que, através da variação do valor eficaz da tensão do PAC, o conversor sempre opere com o mínimo de potência possível, respeitando os limites da ANEEL. Foi escolhido para compor a

malha o algoritmo de mPPT baseado no método Perturba e Observa (P&O) e suas características foram apresentadas.

No capítulo 6 foram analisadas as consequências da variação da frequência da rede elétrica. Dessa análise, verificou-se a necessidade de tornar iguais ambas as frequências, a de rede e a do PAC. Foi proposto, então, um sistema simples, baseado na medida do período de tempo da forma de onda de tensão, para medição e adequação da frequência da tensão do PAC.

O capítulo 7 apresentou os resultados obtidos no ambiente de simulação. Inicialmente foram verificadas as funcionalidades básicas do regulador de tensão, que é a compensação da queda de tensão de uma rede de distribuição através da compensação de reativos. O conversor foi capaz de manter as tensões do PAC reguladas no valor de referência diante de diversos cenários, como cargas lineares e não lineares, além de variações de carga e na tensão da rede.

Ainda no capítulo 7 foi avaliada a capacidade da malha de amplitude em garantir o mínimo de potência processada. Como esperado, o sistema converge para o ponto de mínima potência e, caso a tensão do PAC esteja dentro dos limites, o conversor processa apenas os componentes harmônicos presentes na rede ou na carga.

O capítulo 7 avaliou também a malha de frequência. Ela garantiu a operação do conversor sem a sincronização com a tensão da rede, evitando assim a saturação do compensador de tensão total do barramento cc.

O capítulo 8 trouxe os resultados obtidos com o protótipo construído em laboratório. O regulador de tensão reproduziu, com pequena margem de erro, o desempenho visto no ambiente de simulação. Ele foi capaz de sintetizar três tensões puramente senoidais (com TDH menor que 0,4%) durante os testes realizados.

No capítulo 8 foi visto também o desempenho da malha de amplitude, que consegue rastrear o mPP, porém a medição de corrente induz erros nas perturbações em regime permanente devido às pequenas amplitudes de corrente.

Por fim, o capítulo 8 mostrou que a malha de frequência atingiu seus objetivos e garantiu a manutenção da operação do conversor durante grandes intervalos de tempo.

Diante do exposto, algumas investigações são propostas a fim de complementar a pesquisa a cerca do regulador de tensão:

- Implementação do sistema de controle no tempo discreto e avaliação de seu desempenho em comparação ao tempo

contínuo.

- Análise da influência de uma possível injeção de potência ativa no PAC, em conjunto com a compensação de reativos.
- Investigação de outros métodos para a minimização da potência aparente do conversor
- Implementação de uma técnica para a minimização da oscilação em regime permanente do algoritmo de mPPT
- Investigação de outros métodos para compensar as variações da frequência da rede
- Implementação de um filtro entre cada atualização da malha de frequência

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, M.; GUPTA, S.K.; MADHUSUDAN, M.; KASAL, G. D-STATCOM Control in Low Voltage Distribution System with Distributed Generation. ICETET, 3., 2010, Goa, Índia. **International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology**. 2010. p. 426-429.

AL-DIAB, A.; SOURKOUNIS, C. Multi-tracking single-fed PV inverter. In: MELECON 2010, 15., 2010, Valleta, Malta. **IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference**. 2010. p. 1117-1122.

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. 2001. (Norma)

ANSARI, F.; IQBAL, A.; CHATTERJI, S.; AFZAL, A. Control of MPPT for photovoltaic systems using advanced algorithm EPP. In: ICPS, 9., 2009. **International Conference on Power Systems**. 2009. p. 1-6.

AZEVEDO, G. M. S.; CAVALCANTI, M. C.; OLIVEIRA, K. C.; NEVES, F. A. S.; LINS, Z. D. Evaluation of maximum power point tracking methods for grid connected photovoltaic systems. In: PESC 2008, 39., 2008, Rhodes, Grécia. **Power Electronics Specialists Conference**. 2008. p. 1456-1462.

BARBI, I. **Projeto de Fontes Chaveadas**. 2 ed. Florianópolis. 2007.

BATSCHAUER, A. L. **Inversor multiníveis híbrido trifásico baseado em módulos meia-ponte**. 2011. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC. 2011.

CHEN, H.; SUN, H.; HUANG, Y.; SUN, Y.; ZHANG, D.. PR controller designed for NPC three-level STATCOM in rural grid. ICEMS, 16., 2013, Busan, Coréia do Sul. **International Conference on Electrical Machines and Systems**. 2013. p. 1609-1613.

DA CUNHA, J. C.; DA CUNHA, J. C.; DE OLIVEIRA ROSSI, W.; BATSCHAUER, A. L.; MEZARROBA, M. A simple control scheme to a voltage regulator based in a current controlled STATCOM. COBEP, 12., 2013, Gramado, Brasil. **2013 Brazilian Power Electronics Conference**. 2013. p. 1212-1218.

DE BRITO, M. A. G; GALOTTO, L.; SAMPAIO, L. P.; DE AZEVEDO E MELO, G.; CANESIN, C. A. Evaluation of the Main MPPT Techniques for Photovoltaic Applications. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 60, n. 3, p. 1156-1167, Março. 2013.

DOS SANTOS, R. J. M. **Condicionador Unificado de Qualidade de Energia Dual com Controle Simplificado**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012.

DU, S.; LIU, J. A Study on DC Voltage Control for Chopper-Cell-Based Modular Multilevel Converters in D-STATCOM Application. **IEEE Transactions on Power Delivery**, , v. 28, n. 4, p. 2030-2038, Outubro 2013.

ENDERLE, T. P. **Análise, Projeto e Implementação de um D-STATCOM para Redes de Distribuição Monofásica**. 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

ESRAM, T.; CHAPMAN, P. L. Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 22, n. 2, p. 439-449, Junho. 2007.

FARANDA, R.; LEVA, S.; MAUGERI, V. MPPT techniques for PV Systems: Energetic and cost comparison. In: Power and Energy Society General Meeting, 2008, Pittsburgh, Estados Unidos da América. **Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century**. 2008. p. 1-6.

IEC62040-1-1. **Uninterruptible power systems (UPS) - Part 1: General and safety requirements for UPS**. 2008.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY JR., C.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas**: Com introdução à eletrônica de potência. 6 ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

JAIN, S.; AGARWAL, V. Comparison of the performance of maximum power point tracking schemes applied to single-stage grid-connected photovoltaic systems. **Electric Power Applications, IET**, v. 1, n. 5, p. 753-762, Setembro. 2007.

JAYAPRAKASH, P.; SINGH, B.; KOTHARI, D. P. DSP based implementation of a three-phase four-wire DSTATCOM for voltage regulation and power quality improvement. IECON, 35., Porto, Portugal. **Industrial Electronics Annual Conference of IEEE**. 2009. p. 3660-3665.

KO, S.-H.; LEE, S. R.; DEHBONEI, H. NAYAR, C. V. Application of voltage- and current-controlled voltage source inverters for distributed generation systems. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 21, n. 3, p. 782-792, Setembro 2006.

KUMAR, C.; MISHRA, M. K. A multi-functional DSTATCOM operating in voltage control mode. In: ICIIS, 8., 2013, Peradeniya, Sri Lanka. **8th IEEE International Conference on Industrial and Information Systems**. 2013. p. 271-276.

KUMAR, C.; MISHRA, M. K. Energy conservation and power quality improvement with voltage controlled DSTATCOM. In: INDICON, 10., 2013, Mumbai, Índia. **2013 Annual IEEE India Conference**. 2013. p. 1-6.

KUMAR, C.; MISHRA, M. K. A Voltage-Controlled DSTATCOM for Power-Quality Improvement. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 3, p. 1499-1507, Junho 2014.

LEDWICH, G.; GHOSH, A. A flexible DSTATCOM operating in voltage or current control mode. **IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution**, v. 149, n. 2, p. 215-224, março. 2002.

LI, Y.; WU, B. A Novel DC Voltage Detection Technique in the CHB Inverter-Based STATCOM. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 23, n. 3, p. 1613-1619, Julho 2008.

MARZOUGH, A.; NEYSHABOURI, Y.; IMANEINI, H. Control scheme for cascaded H-bridge converter-based distribution network static compensator. **Power Electronics, IET**, v. 7, n. 11, p. 2837-2845, Novembro 2014.

MISHRA, M. K.; GHOSH, A.; JOSHI, A. Operation of a DSTATCOM in voltage control mode. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 1, p. 258-264, jan. 2003.

NISHIOKA, J. K. **Sistema de Controle Digital para Retificador Trifásico a Quatro Fios com Filtro LCL**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2011.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2003.

Operador Nacional do Sistema - ONS. **Procedimentos de Rede Módulo 2.8**. 2009.

PRAJAPATI, R.; SHARMA, S. Fuzzy logic controller based distribution static compensator. SCEECs, 2., 2014, Bhopal, India. **2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science**. 2014. p. 1-6.

SAEEDIFARD, M.; NIKKHAJOEI, H.; IRAVANI, R. A Space Vector Modulated STATCOM Based on a Three-Level Neutral Point Clamped Converter. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 2, p. 1029-1039, Abril 2007.

SHUKLA, A.; GHOSH, A.; JOSHI, A. Hysteresis Current Control Operation of Flying Capacitor Multilevel Inverter and Its Application in Shunt Compensation of Distribution Systems. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 396-405, Janeiro 2007.

SINGH, B.; ADYA, A.; MITTAL, A.P.; GUPTA, J.R.P. Analysis, simulation and control of DSTATCOM in three-phase, four-wire isolated distribution systems. In: IEEE Power India Conference, 2006, Nova Déli, Índia. **IEEE Power India Conference 2006**.

SINGH, B; SAHA, R.; CHANDRA, A.; AL-HADDAD, K. Static synchronous compensators (STATCOM): a review. **Power Electronics, IET**, v. 2, n. 4, p. 297-324, Julho 2009.

SINGH, B.; JAYAPRAKASH, P.; KUMAR, S.; KOTHARI, D. P. Implementation of Neural-Network-Controlled Three-Leg VSC and a Transformer as Three-Phase Four-Wire DSTATCOM. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 47, n. 4, p. 1892-1901, Julho 2011.

SINGH, B; JAYAPRAKASH, P.; KOTHARI, D. P.; CHANDRA, A.; AL HADDAD, K. Comprehensive Study of DSTATCOM Configurations. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 10, n. 2, p. 854-870, Maio 2014.

SOUZA, A. F. **Retificadores Monofásicos de Alto Fator de Potência com Reduzidas Perdas de Condução e Comutação Suave**. 1998. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998.

SPERB, J. D. **Projeto de um inversor trifásico com snubber de undeland regenerativo e controle digital implementado no DSP TMS320F2812**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2007.

VASQUEZ, J. C.; GUERRERO, J. M.; SAVAGHEBI, M.; TEODORESCU, R. Modeling, analysis, and design of stationary reference frame droop controlled parallel three-phase voltage source inverters. In: ICPE ECCE, 8., 2011, Jeju, Coréia do Sul. **2011 IEEE 8th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia**. 2011. p. 272-279.

XU, Y.; LI, F. Adaptive PI Control of STATCOM for Voltage Regulation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 29, n. 3, p. 1002-1011, Juljo 2014.

APÊNDICE A – ANÁLISE DA IMPEDÂNCIA DA REDE SOBRE O ÂNGULO DE DEFASAGEM DO CONVERSOR E A POTÊNCIA PROCESSADA

Equation Section (Next)

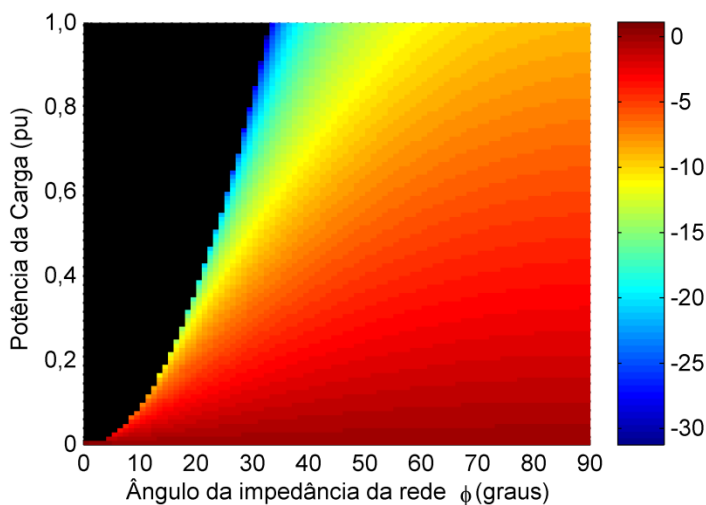
Com base nas equações (2.4) e (2.6), foi visto que se pode calcular o ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC, necessário para o conversor atingir o equilíbrio em relação à potência ativa, e a potência reativa, necessária para manter a tensão no PAC no valor estipulado.

Aumentando os parâmetros de análise dessas equações, é possível variar a relação entre a resistência e a impedância indutiva da impedância da rede (R/X_L).

A Figura 139 apresenta o resultado da equação que determina o ângulo de defasagem do conversor para um fator de potência da carga de 0,8 indutivo.

A área em preto representa os pontos em que não há um ângulo θ que satisfaça (2.4). Isso significa que o conversor não consegue atuar nesses pontos.

Figura 139 - Variação do ângulo θ com a carga e a relação R/X_L para fator de potência 0,8 indutivo

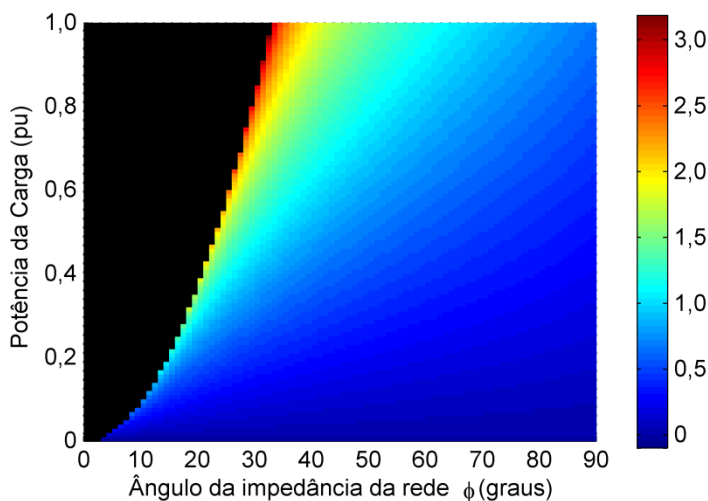


Fonte: produção do próprio autor

É importante destacar que a área em que o conversor não consegue atuar aumenta conforme o fator de potência se aproxima da unidade.

Para cada ponto onde há a possibilidade do conversor operar, existe o respectivo valor de potência reativa que o conversor deve fornecer, segundo (2.6). A Figura 140 apresenta a potência reativa para fator de potência da carga igual a 0,8 indutivo. Novamente, a área em preto representa os pontos em que o conversor não consegue operar.

Figura 140 - Variação da potência reativa processada pelo inversor (pu) com a carga e a relação R/X_L para fator de potência 0,8 indutivo



Fonte: produção do próprio autor

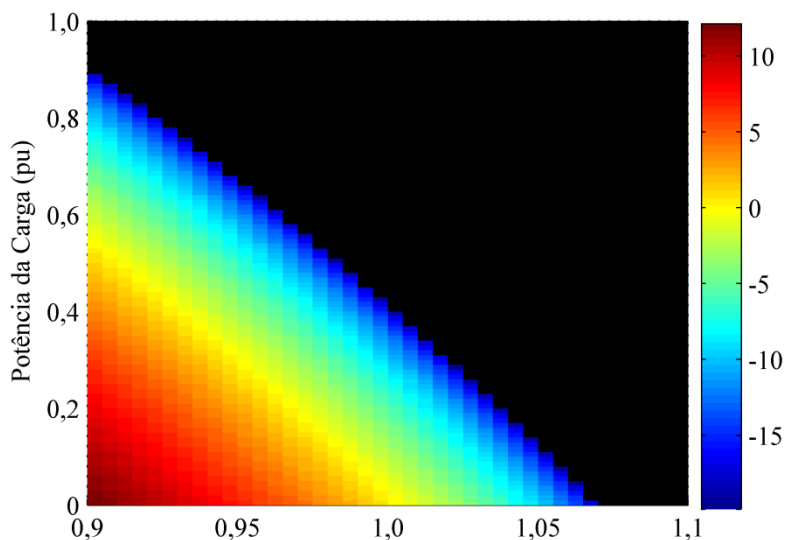
APÊNDICE B – ANÁLISE DO REGULADOR DE TENSÃO EM REDES RESISTIVAS

Durante o desenvolvimento das análises, simulações e resultados experimentais foi utilizada a relação R/X_L como sendo unitária.

Entretanto, redes comuns apresentam relações mais elevadas. Nesse sentido, a presente análise se dará com impedância da rede de 0,2 pu e com relação R/X_L igual a 2,7, ou ângulo da impedância da rede (ϕ) igual a $20,3^\circ$.

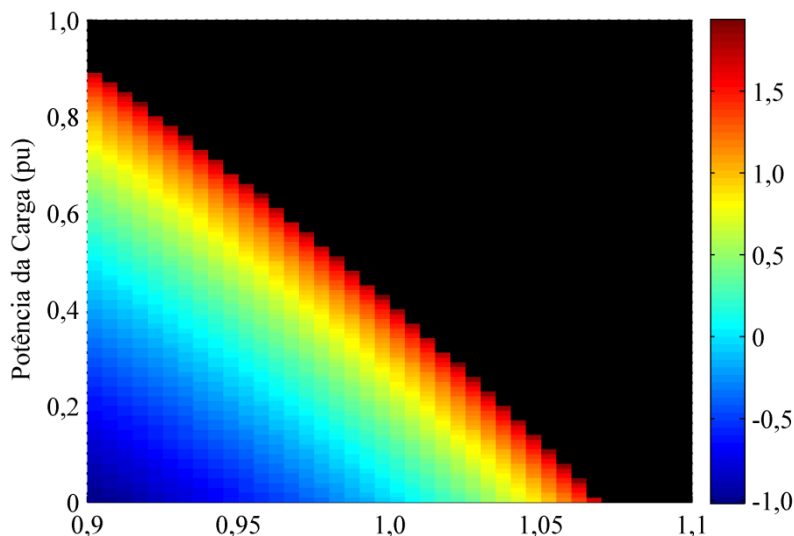
O fluxo de potência, com a diminuição de ϕ , apresenta maiores ângulos de compensação e, conseqüentemente, maior potência processada pelo conversor. A Figura 141 apresenta a variação do ângulo de compensação e a Figura 142 mostra a potência requerida do conversor para a adequada regulação de tensão.

Figura 141 - Variação do ângulo de compensação em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 20,3^\circ$ e $V_r = 1$ pu)



Fonte: produção do próprio autor

Figura 142 - Variação da potência reativa processada pelo inversor em função da potência aparente da carga e a tensão do PAC para fator de potência 0,8 indutivo ($Z = 0,2$ pu, $\phi = 20,3^\circ$ e $V_r = 1$ pu)



Fonte: produção do próprio autor

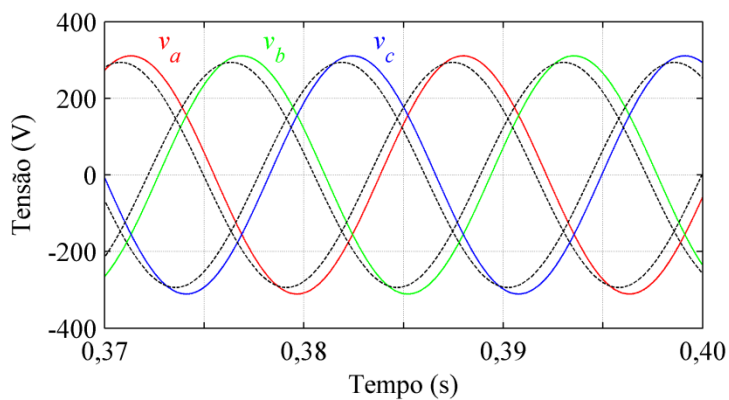
Da mesma forma que o Apêndice A, haverá valores de potência da carga em que o conversor não será capaz de regular a tensão através da injeção de energia reativa, representados pela área em preto.

A Figura 143 apresenta a tensão do PAC com e sem compensação para uma rede com características resistivas e carga média. Com compensação o conversor foi capaz de manter o PAC regulado em 220 V e com baixa TDH, enquanto que sem compensação o PAC apresenta tensão eficaz de 207,7 V.

Para tanto, o conversor necessita processar 48,42 A por fase, totalizando uma potência aparente de 31,96 kVA, valor ligeiramente maior que a capacidade nominal do conversor.

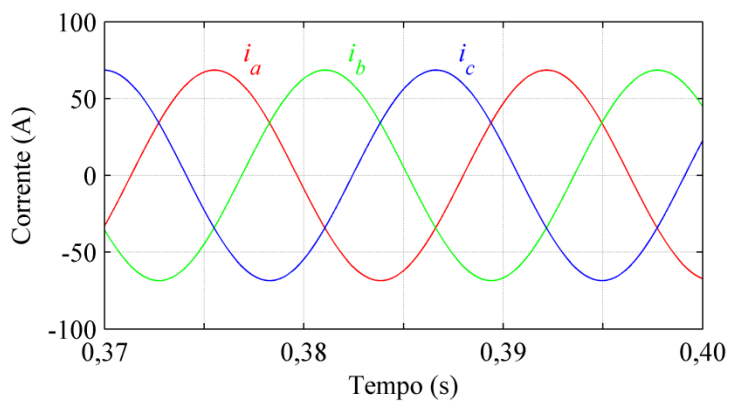
Esses valores de potência mostram a drástica redução da capacidade de compensação do regulador, de 0,6 pu para 0,3 pu, em redes com características mais resistivas do que indutivas.

Figura 143 - Tensão do PAC com e sem compensação com carga média e $\phi = 20,3^\circ$



Fonte: produção do próprio autor

Figura 144 - Correntes injetadas pelo conversor com carga média e $\phi = 20,3^\circ$



Fonte: produção do próprio autor

APÊNDICE C – ANÁLISE DA SIMPLIFICAÇÃO DO MODELO DE TENSÃO TOTAL

Equation Section (Next)

O modelo determinado no capítulo 4 foi obtido com uma simplificação que muitas vezes não é possível de realizar. Então, a expressão simplificada foi comparada com a expressão completa para apurar a faixa de validade de tal simplificação.

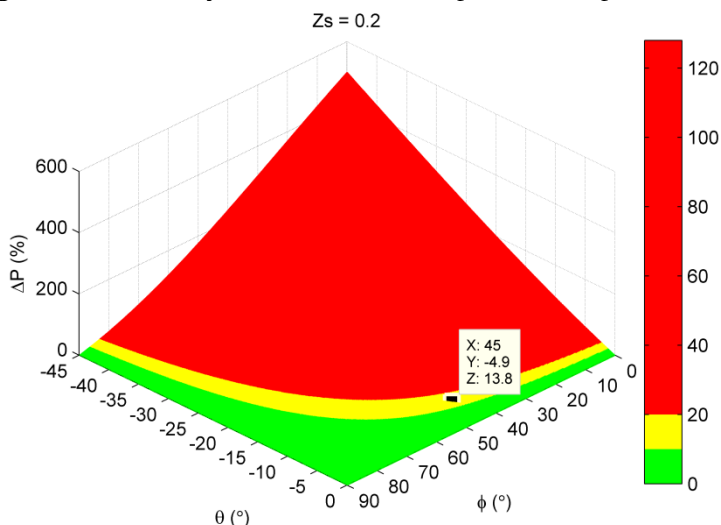
Para tanto, foram gerados gráficos da diferença entre a expressão completa e a expressão simplificada, aplicando variações no ângulo da impedância da rede (ϕ) e no ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC (θ). A tensão eficaz da rede e a tensão imposta pelo conversor são consideradas como 1,0 pu.

Os critérios adotados nessa análise para a verificação da validade do modelo foram:

- Erro menor que 10%: Adequado
- Erro maior que 10% e menor que 20%: Aceitável
- Erro maior 20%: Demasiado

Na Figura 145 são apresentados os resultados da análise para uma impedância da rede de 0,2 pu com relação R/X_L unitária e carga pesada (0,6 pu).

Figura 145 - Diferença entre o modelo completo e o simplificado



Fonte: produção do próprio autor

A faixa em verde representa os valores do ângulo da impedância da rede e o ângulo de defasagem entre a tensão da rede e a tensão do PAC que produzem um erro menor ou igual a 10% da potência efetivamente transferida. A faixa em amarelo representa a área com erro entre 10 e 20% e a faixa em vermelho representa erros maiores a 20%.

Dessa análise conclui-se que o modelo simplificado obtido é válido para as condições de rede fortemente indutiva, ou seja, ϕ próximo a 90° e para pequenos valores de θ .

Porém, para a rede fortemente indutiva, esse resultado já era esperado, pois a expressão simplificada se vale dessa condição. Já para pequenos valores de defasagem angular entre as tensões da rede e do PAC, a potência ativa circulante terá valores pequenos em ambas as expressões. Assim, a diferença entre os modelos também tenderá a ser pequena.

Além dos resultados esperados, é possível verificar que para valores intermediários o modelo simplificado ainda pode ser utilizado. Dificilmente os sistemas encontrados na prática possuirão esses valores extremos de impedância e potência ativa circulante.

Vale ressaltar que a validade do modelo simplificado é relativa a cada aplicação e das especificações de projeto de cada conversor.

O módulo da impedância determina se a faixa válida é mais ampla ou mais restrita. Quanto maior o valor da impedância, mais ampla será a faixa.

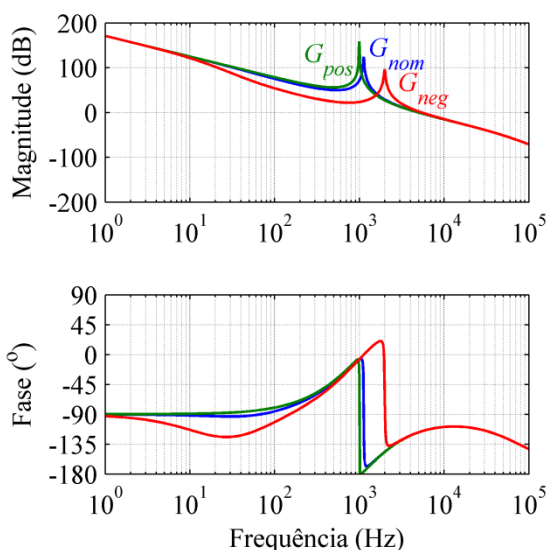
Nas condições de carga pesada a Figura 145 traz também graficamente o ponto de operação do conversor. A condição de carga pesada provoca uma defasagem de $4,9^\circ$, representando um erro de aproximadamente 13,8% entre o modelo simplificado e a equação completa.

APÊNDICE D – ANÁLISE DA VARIAÇÃO PARAMÉTRICA DOS CONTROLADORES

Após o cálculo dos compensadores feitos para a condição nominal de operação, cabe avaliar a susceptibilidade dos compensadores perante variações paramétricas. Serão considerados como variação apenas os valores de resistência e indutância da rede.

A Figura 146 apresenta a resposta em frequência da malha de tensão ca sob três condições distintas de resistência (R_r) e indutância (L_r): nominal (G_{nom}), um décimo da nominal (G_{neg}) e dez vezes maior (G_{pos}).

Figura 146 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão ca para três valores de resistência e indutância da rede

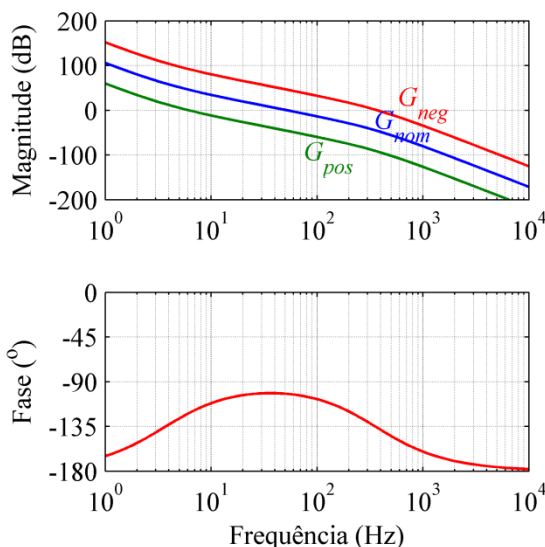


Fonte: produção do próprio autor

A malha de frequência apresenta, nas três condições, a mesma frequência de cruzamento por zero. Sendo assim, o sistema se mantém estável nessa faixa.

A Figura 147 traz a resposta em frequência da malha de tensão total do barramento cc para variações de indutância, visto que a resistência não faz parte do modelo.

Figura 147 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão total para três valores de resistência e indutância da rede



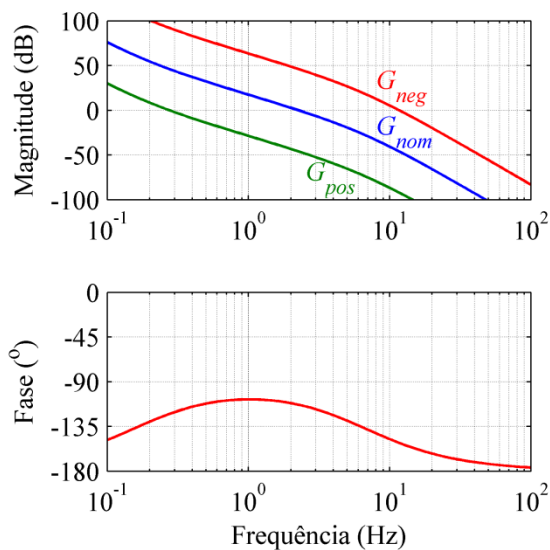
Fonte: produção do próprio autor

Com a variação da indutância da rede, há variação na frequência de cruzamento por zero. A frequência de cruzamento de G_{neg} é de 367 Hz, maior que a frequência de ondulação do barramento cc. Nessa condição, o sistema tende a perder sua estabilidade. Em contra partida, valores pequenos de indutância estão atrelados a pequenos valores de resistência e geralmente não necessitam de regulação de tensão, haja vista a pequena queda de tensão.

A Figura 148 apresenta a resposta em frequência da malha de tensão total do barramento cc para variações de resistência, pois a indutância não faz parte do modelo.

Para a malha de tensão diferencial, G_{neg} apresenta frequência de cruzamento por zero de 7,71 Hz, o que não chega a instabilizar o conversor.

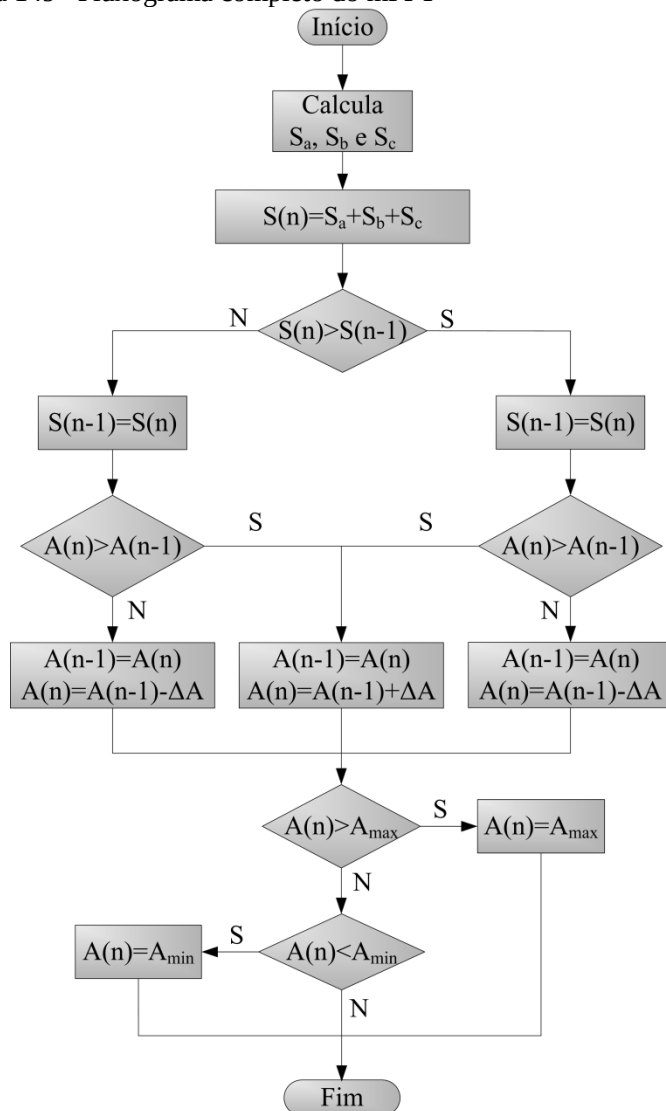
Figura 148 - Resposta em frequência da função de transferência em malha aberta da tensão diferencial para três valores de resistência e indutância da rede



Fonte: produção do próprio autor

APÊNDICE E – FLUXOGRAMA DO MPPT

Figura 149 - Fluxograma completo do mPPT



Fonte: produção do próprio autor

APÊNDICE F – CÓDIGO FONTE DO MPPT

```
//Interrupcao do mPPT
S_max = S_a + S_b + S_c;
if(S_max > S_ant)
{
    S_ant = S_max;
    if(amplitude_n > amplitude_nu)
    {
        amplitude_nu = amplitude_n;
        amplitude_n = amplitude_nu - delta;
    }
    else
    {
        amplitude_nu = amplitude_n;
        amplitude_n = amplitude_nu + delta;
    }
}
else
{
    S_ant = S_max;
    if(amplitude_n > amplitude_nu)
    {
        amplitude_nu = amplitude_n;
        amplitude_n = amplitude_nu + delta;
    }
    else
    {
        amplitude_nu = amplitude_n;
        amplitude_n = amplitude_nu - delta;
    }
}

//Saturador
if(amplitude_n >= 1.04)
{
    amplitude_n = 1.04;
}
if(amplitude_n <= 0.94)
{
    amplitude_n = 0.94;
}
```


APÊNDICE G – CÓDIGO FONTE DA MEDIÇÃO DA FREQUENCIA DO PAC

```
interrupt void ECAP_ISR()
{
if(ECap1Regs.CAP2 > 1200000 && ECap1Regs.CAP2 < 13000000)
{
if(ECap1Regs.CAP1 > 1200000 && ECap1Regs.CAP1 < 13000000)
{
omega_a = (float)(150000000 / (float)(ECap1Regs.CAP2 +
ECap1Regs.CAP1));
}
}
    ECap1Regs.ECCLR.bit.CEVT1 = 1;
    ECap1Regs.ECCLR.bit.INT = 1;
    PieCtrlRegs.PIEACK.all = PIEACK_GROUP4;
}
```