

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO APLICADO A
CONVERSORES PWM TRIFÁSICOS**

TESE DE DOUTORADO

Robinson Figueiredo de Camargo

Santa Maria, RS, Brasil

2006

MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO APLICADO A CONVERSORES PWM TRIFÁSICOS

por

Robinson Figueiredo de Camargo

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica,
Área de Concentração em Processamento de Energia, da Universidade Federal
de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Humberto Pinheiro

Santa Maria, RS, Brasil

2006

© 2006

Todos os direitos autorais reservados a Robinson Figueiredo de Camargo. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser realizada com a autorização por escrito do autor. Endereço: Rua Floriano Peixoto, n. 202, Bairro Centro, Ijuí, RS, 98.700-000. Fone (0xx)55-33337652; End. Eletr: robinsonfcamargo@hotmail.com

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Tese de Doutorado

**MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO APLICADO A
CONVERSORES PWM TRIFÁSICOS**

elaborada por

Robinson Figueiredo de Camargo

como requisito parcial para a obtenção do grau de

Doutor em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Humberto Pinheiro, Ph.D.
(Presidente / Orientador)

Ernane Antônio Alves Coelho, Dr. (UFU)

Vicente Mariano Canalli, Dr. (PUC-RS)

Hilton Abílio Gründling, Dr. (UFSM)

José Renes Pinheiro, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 17 de julho de 2006.

DEDICO ESTA TESE:

A Deus, a minha Esposa Edinéia,
meus pais João Carlos e Zilca e
minha irmã Carla.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Universidade Federal de Santa Maria, por ser uma instituição de ensino pública e de qualidade, a qual me oportunizou cursar tanto a graduação como a pós-graduação a nível Mestrado e doutorado em Engenharia Elétrica. Ao Professor Humberto Pinheiro pelo ensino, exigência, paciência e seriedade dedicadas durante a orientação deste trabalho.

Ao professor José Renes Pinheiro um agradecimento especial por possibilitar minha iniciação na pesquisa científica e ser um modelo, para mim, de Engenheiro Cristão e também devido à preocupação que tem pelo humanismo, o que em nossa profissão, às vezes deixa a desejar.

Aos Professores Hilton Abílio Gründling e Hélio Leães Hey agradeço pela ajuda e também as excelentes aulas ministradas, bem como a colaboração durante o trabalho de pesquisa. Agradeço também aos demais professores da PPGEE pela dedicação e ensino prestados.

Agradecimento especial também aos colegas e amigos do laboratório de Engenharia Elétrica GEPOC, pela excelente amizade e recepção desde o começo do Doutorado.

Especialmente quero agradecer, em primeiro lugar, aos amigos Fernando Botterón, Jeferson Marques, Helder Câmara, Marcelo Hey Duarte, Jean Patric e Igor Jaskulski com os quais compartilhei os momentos mais importantes, os conhecimentos adquiridos e recebidos, e a excelente amizade.

Aos colegas do GEPOC, Cassiano Rech, Luciano Schuch, Mário Lúcio Martins, Jumar Russi e Johninson pelo companheirismo durante todo o tempo do curso e pela agradável convivência de todos os dias, a troca de idéias e conhecimentos, sempre visando o crescimento intelectual do grupo.

Um agradecimento especial a Felipe Grigoletto, Ivan Gabe e Jorge Massing pelo auxílio prestado.

Aos funcionários Cleonice Sanger, Luis Fernando Martins, Zulmar B. Nascimento, Anacleto L. Brondani e todas as pessoas que de uma forma ou de outra contribuíram para o desenvolvimento desse trabalho.

Agradecimento a CAPES por ser o órgão financiador e a CEEE pelo fornecimento de alguns componentes, ambas ajudaram a concretizar meus projetos.

Com muito amor e carinho agradeço a minha esposa Edinéia Peres, meus pais João Carlos M. de Camargo e Zilca Figueiredo de Camargo, e minha irmã Carla F. de Camargo pelo amor, carinho, dedicação e preocupação com meu bem estar e saúde durante o andamento do curso.

A todos os meus familiares, que mesmo sem conviver muito com eles nestes quatro anos, tenho certeza que torciam por mim.

Dedico esta Tese ainda, a todo povo brasileiro e afirmo com a maior convicção, que tudo é possível àquele que crê, em Deus, no seu potencial e no grupo em que trabalha.

Prof. Dr. Robinson Figueiredo de Camargo.

“Se para vencer somente o talento não bastar,
vença pelo esforço,
se também o esforço não bastar,
vença pela insistência.”

(autor desconhecido)

RESUMO

Tese de Doutorado

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Universidade Federal de Santa Maria

MÉTODO DE SINCRONIZAÇÃO APLICADO A CONVERSORES PWM TRIFÁSICOS

Autor: Robinson Figueiredo de Camargo, Ms.

Orientador: Humberto Pinheiro, Ph.D.

Santa Maria, 17 de julho de 2006.

Nas últimas décadas houve um aumento significativo de distúrbios nas tensões dos sistemas elétricos, tais como distorções harmônicas, desequilíbrios, variações de frequência entre outros, devido principalmente, ao aumento da utilização de cargas não lineares. Estes distúrbios podem causar distorções nos sinais de sincronização gerados, os quais são usados para sincronizar conversores PWM com a rede elétrica. Estas distorções nos sinais de sincronismo podem, conseqüentemente, provocar o aumento de distorções nas correntes geradas ou drenas por conversores PWM trifásicos.

Devido a estes fatos, vários métodos de sincronização foram desenvolvidos no intuito de operar adequadamente, reduzindo o impacto destes distúrbios sobre os sinais de sincronismo gerados. Neste sentido, métodos de sincronização que utilizam algoritmos em malha fechada e em malha aberta são propostos na literatura.

Com relação aos métodos de malha fechada, estes apresentam baixa sensibilidade a variações de frequência, entretanto, a relação entre uma adequada resposta transitória e uma boa característica de filtragem deve ser considerada. Além disso, os algoritmos desenvolvidos para os métodos em malha fechada e implementados em processadores digitais de sinais, apresentam um tempo de processamento, geralmente, maior que os métodos em malha aberta. Por sua vez, métodos em malha aberta destacam-se por sua

simplicidade quando comparados aos métodos em malha fechada. Entretanto, nenhum método em malha aberta foi apresentado até o momento na literatura, que resulte em um bom desempenho com relação aos sinais de sincronização gerados quando se fazem presentes nas tensões da rede elétrica, conjuntamente, desequilíbrios, harmônicos e variações de frequência.

Neste sentido, a presente Tese de Doutorado trata do estudo, análise e desenvolvimento de um novo método de sincronização em malha aberta aplicado a conversores PWM trifásicos a três e a quatro fios conectados a rede elétrica. Este método possibilita um bom desempenho em termos redução da taxa de distorção harmônica nos sinais de sincronização mesmo na presença de distorções harmônicas, severos desequilíbrios de tensão e variações de frequência da rede elétrica.

Inicialmente, é apresentada uma visão geral sobre os métodos de sincronização em malha aberta aplicados a conversores PWM trifásicos. Em seguida, são abordadas as principais características e limitações do novo método de sincronização em malha aberta proposto. Posteriormente, o método de sincronização proposto é implementado considerando dois casos distintos. O primeiro caso se refere à aplicação do método de sincronização proposto a retificadores PWM trifásicos a três fios. O segundo caso, refere-se à aplicação do método para gerar as referências de corrente de compensação para filtros ativos de potência paralelos trifásicos a quatro fios.

Ao longo desta tese, resultados de simulações e experimentais são apresentados, a fim de que, seja demonstrada a aplicabilidade do método de sincronização em malha aberta proposto em sistemas trifásicos a três fios e a quatro fios.

Palavras-Chaves: Método de Sincronização, Conversores PWM Trifásicos.

ABSTRACT

Doctor Thesis

Pos-Graduation Program on Electrical Engineering

Federal University of Santa Maria

SYNCHRONIZATION METHOD APPLIED TO THREE-PHASE PWM CONVERTERS

Author: Robinson Figueiredo de Camargo, Ms.

Research Supervisor: Humberto Pinheiro, Ph.D.

Santa Maria, July 17, 2006.

In the last decade, disturbances in the electrical system have been increased, mainly due to proliferation of nonlinear loads. As a result harmonic distortion, voltage unbalance and frequency variations are becoming a concern. These disturbances can produce distortions in the synchronization signals used by PWM converters connected to utility grid. These distortions in the synchronization signals, consequently, increase distortions in generated or drained currents by the three-phase PWM converters.

Due these facts, several synchronization methods are developed with purpose to operate adequately to reduce the impacts of corrupting grid voltages on the synchronization signals. In this sense, synchronization methods that used closed loop and open loop algorithms are proposed in the literature.

Although closed loop methods have low sensitivity to the frequency variations, a trade of between good transient response and good filtering characteristics must always be considered. Moreover, the algorithms developed to the closed loop methods on fixed point DSP, generally, present larger execution time those open loop synchronization methods. Open loop methods stand out for their simplicity as compare closed loop methods. However, none of open loop methods reported, so far, have a good performance in terms of the distortion synchronization signals and consequently in the generated or drained currents

in the three-phase PWM converters under unbalance, harmonics and frequency variations in the grid voltages.

In this sense, this Doctor Thesis proposes a study, analysis and development of a new open loop synchronization method applied on three-phase three-wire and four-wire PWM converters connected to the utility grid. This method provides a good performance even in the presence of harmonics, severe voltage unbalance and frequency variations on grid voltages.

Initially, it is presented an overview of open loop synchronization method applied to three-phase PWM converters. Then, have been situated the characteristics and limitations of the new method under grid voltages disturbances. In addition, the proposed method is implemented considering that two distinct cases. The first case describes the implementation of the new synchronization method to synchronized three-phase three-wire PWM rectifiers. The second case presents the implementation of the new synchronization method to generate reference currents to three-phase four-wire shunt active power filter.

Furthermore, simulation and experimental results are obtained to demonstrate the good performance of the new open-loop synchronization method used in three-phase three-wire and four-wire PWM converters along the Thesis.

Keywords: Synchronization Method, Three-phase PWM Converters

Simbologia

abc	- Sistema de coordenadas estacionário em um sistema trifásico
C_{cc}	- Capacitor do barramento CC
$dq0$	- Sistema de coordenadas síncronas em um sistema trifásico
EC	- Esforço computacional
$f(t)$	- Função no domínio do tempo
h	- h -ésimo componente harmônico
i_a, i_b, i_c	- Correntes trifásicas
I_{a_rms}, I_{b_rms}	- Corrente <i>rms</i> da fase a e b
i_{avg}	- Média dos valores <i>rms</i> das correntes de fase
I_{base}	- Corrente base
i_{cc}	- Corrente no capacitor do barramento CC
i_d, i_q, i_0	- Componentes das correntes em eixos síncronos $dq0$
I_{frms}	- Corrente de fase <i>rms</i>
I_h	- Amplitude das componentes harmônicas de corrente
i_{ret}	- Corrente do retificador PWM
i_o	- Corrente na carga
I_1	- Amplitude da corrente na frequência fundamental
k	- Número de amostras no DSP
L	- Indutância
L_f	- Indutância do filtro de entrada do retificador
L_n	- Indutância nominal do filtro de entrada do retificador
Q_x	- Formato da variável utilizado no DSP
R_f	- Resistência interna associada à indutância de entrada L_f
$\mathbf{u}_{dq,n}$	- Vetor de controle normalizado em eixos síncronos dq
S_a, \dots, S_n	- Interruptores de potência (IGBT's)
$T_{abc_ \alpha\beta 0}$	- Matriz de transformação de abc para $\alpha\beta 0$

T_{abc_dq0}	- Matriz de transformação de abc para $dq0$
T_d	- Tempo utilizado para executar o algoritmo de controle no DSP
T_{l-f}	- Matriz de transformação das grandezas de linha para fase
T_s	- Período de amostragem
T_{seq+}	- Matriz de transformação de seqüência positiva
v_{ab}, v_{bc}	- Tensões trifásicas de linha
v_a, v_b, v_c	- Tensões trifásicas
V_{base}	- Tensão base
V_{cc}	- Tensão do barramento CC
\mathbf{v}_{fase}	- Vetor das tensões de fase
\mathbf{v}_{fase+}^f	- Vetor das tensões de fase na freqüência fundamental de seqüência positiva
$\mathbf{v}_{\alpha\beta 0}$	- Vetor das tensões de fase em coordenadas estacionárias $\alpha\beta 0$
$\mathbf{v}_{\alpha\beta+}^f$	- Vetor das tensões de fase em coordenadas estacionárias $\alpha\beta$ na freqüência fundamental de seqüência positiva
$\mathbf{v}_{\alpha\beta_nf+}$	- Vetor das tensões de fase em coordenadas estacionárias $\alpha\beta$ na freqüência fundamental de seqüência positiva normalizado
\mathbf{v}_{Ll}	- Vetor das tensões de linha
V_{ef}, V_{rms}	- Tensão eficaz
V_p	- Tensão do pico
V_1	- Amplitude da tensão na freqüência fundamental
\mathbf{x}_{dq_n}	- Vetor de estado normalizado em eixos síncronos dq
W	- Watt
\mathbf{w}_{dq_n}	- Vetor de distúrbio normalizado em eixos síncronos dq
$\alpha\beta 0$	- Sistema de coordenadas estacionário em um sistema trifásico
θ_1	- Ângulo da tensão na freqüência fundamental
θ_{f+}	- Ângulo da tensão da rede na freqüência fundamental filtrado de seqüência positiva
φ_1	- Ângulo da corrente na freqüência fundamental
ω	- Freqüência angular

- ω_b - Largura de faixa da banda passante
- ω_g - Frequência angular da rede
- ω_n - Frequência natural amortecida
- γ - Fator de ponderação

Abreviaturas

A	- Ampère
C	- Capacitância
CA	- Corrente alternada
CAPES	- Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	- Corrente contínua
CC_{PI}	- Controlador de corrente proporcional-integral
CI	- Circuito Integrado
CP_{PI}	- Controlador de potência proporcional-integral
CPU	- Unidade Central de Processamento
DA ou DAC	- Conversor Digital-Analógico (<i>Digital to Analog Converter</i>)
DRC_q	- Desacoplamento por retroação de estados e servo controlador no eixo q
DSC_{dq}	- Desacoplamento por retroação de estados e servos controladores no eixo d e q
DSP	- Processador de Sinais Digitais
EKF	- Filtro de Kalman Extendido (<i>Extend Kalman Filter</i>)
FFT	Transformada rápida de Fourier (<i>Fourier Fast Transformer</i>)
f	- Freqüência da tensão da rede
F	- Faraday
f_s	- Freqüência de amostragem
FD	- Fator de deslocamento
FP	- Fator de potência
FIFO	- <i>First-Input First-Output</i>
GEPOC	- Grupo de Eletrônica de Potência e Controle – UFSM
H	- Henry
Hz	- Hertz
IEC	- <i>International Electrotechnical Commission</i>

IEEE	- <i>Institute of Electrical and Electronic Engineers</i>
IGBT	- Insulated Gate Bipolar Transistor
kVA	- kilovoltampère
L	- Indutância
L_f	- Indutância do filtro de entrada do retificador
L_n	- Indutância nominal do filtro de entrada do retificador
LPF	- Filtro Passa-Baixa (<i>Low-Pass Filter</i>)
LPF-B	- Método de sincronização baseado em filtro passa-baixa (<i>Low-pass filter based</i>)
LKC	- Lei de Kirchhoff das Correntes
MIMO	- Sistema de Múltiplas Entrada múltiplas saídas (<i>Multiple Input Multiple Output</i>)
MSRF	- Referência síncrona modificada (<i>Modified síncronos reference frames</i>)
NPSF	- Referência síncrona de seqüência positiva normalizada (<i>Normalized positive sequence síncronos frame</i>)
Amp-Op	- Amplificador operacional (<i>Operational amplifier</i>)
P	- Potência ativa
PCC	- Ponto de conexão comum
PI	- Proporcional-integral
PLL	- laço de sincronização de fase –(<i>Phase-Locked Loop</i>)
p.u.	- por unidade
PWM	- Modulação por Largura de Pulso (<i>Pulse Width Modulation</i>)
RAM	- Memória de acesso randômico (<i>Randon memory</i>)
S	- Potência aparente
SISO	- <i>Single Input Single Output</i>
SVF	- Filtro por espaço de estado (<i>Space Vector Filter</i>)
SVM	- Modulação por Vetores no Espaço (<i>Space Vector Modulation</i>)
TD_i	- Taxa de desequilíbrio de corrente
TD_v	- Taxa de desequilíbrio de tensão
THD_I	- Taxa de distorção harmônica da corrente
THD_v	- Taxa de distorção harmônica da tensão

UFSM	- Universidade Federal de Santa Maria
UPS	- Fonte de energia ininterrupta (<i>Uninterruptible Power Supply</i>)
V	- Volt
VA	- Volt-Ampère
VSI	- Estrutura em ponte inversora alimentada por fonte de tensão
FOH	- Amostrador retentor de Primeira ordem (<i>First Order Hold</i>)
W	- Watt
WLSE	- Estimação dos mínimos quadrados recursivos (<i>Weighted Least-Square Estimation</i>)

Índice Geral

Capítulo 1	1
Introdução Geral.....	1
1.1 Descrição do Problema	1
1.2 Revisão Bibliográfica.....	4
1.2.2.1 Principais Métodos de Sincronização em Malha Aberta a partir da Medição das Tensões da Rede.....	5
1.2.2.1.2 Método Utilizando Filtros Passa-Baixas	7
1.2.2.1.3 Método dos Vetores Filtrados no Espaço $\alpha\beta$	8
1.2.2.1.4 Método dos Vetores Filtrados no Espaço $\alpha\beta$ Modificado.....	9
1.2.2.1.5 Método de Sincronização Utilizando Filtro de Kalman Estendido	10
1.2.2.1.6 Método dos Mínimos Quadrados Recursivo	11
1.3 Objetivos do Trabalho.....	14
1.4 Contribuições da Tese.....	15
1.5 Organização da Tese	16
Capítulo 2	19
Método de Sincronização em Malha Aberta de Conversores PWM com a Rede Elétrica.....	19
2.1 Introdução.....	19
2.2 Novo Método de Sincronização em Malha Aberta para Conversores PWM com a Rede Elétrica	20
2.2.1.5.1.2 Caso b – Tensões de Linha da Rede com Harmônicos.....	39
2.2.1.5.1.4 Caso d – Tensões de Linha da Rede Desequilibradas e com Harmônicos.....	45
2.2.1.6 Resultados Experimentais.....	53
2.2.1.6.1 Ensaio a – Tensões de Linha da Rede Equilibradas e sem Distorções. 53	
2.2.1.6.2 Ensaio b – Tensões de Linha da Rede Equilibradas e com Distorções 57	
2.2.1.6.3 Ensaio c – Tensões de Linha da Rede Desequilibradas.....	61

2.2.1.6.4 Ensaio d – Tensões de Linha da Rede Desequilibradas e com Distorções	64
2.2.1.6.5 Ensaio Adicionais	68
2.3 Conclusões	77
Capítulo 3	80
Método de Referência Síncrona de Seqüência Positiva Normalizada Aplicado a Retificadores PWM Trifásicos a Três Fios Alimentados em Tensão	80
3.1 Introdução	80
3.2 Revisão Bibliográfica	82
3.3 Definição de Critérios para Análise de Desempenho	85
3.4 Controlador Proporcional-Integral	88
3.4.4 Limitação da Ação de Controle	97
3.5 Regulação de Tensão do Barramento CC Utilizando Sistema Servo e Controle de Potência Ativa	105
3.5.1 Limitação da Ação de Controle	108
3.6 Análise dos Métodos de Sincronização NPSF e MSRF Aplicados a Retificadores PWM Trifásicos	111
3.7 Conclusões	122
Capítulo 4	125
Método de Referência Síncrona de Seqüência Positiva Normalizada Aplicado a Filtros Ativos de Potência Trifásicos a Quatro Fios Alimentados em Tensão	125
4.1 Introdução	125
4.2 Revisão Bibliográfica	126
4.3 Critérios Relevantes para Análise do Desempenho	130
4.4 Modelo Discreto Normalizado do Filtro Ativo	131
Aplicado a Sistemas Trifásicos a Quatro Fios	131
4.5 Extensão do Método de Detecção Aplicado a	135
Sistemas Trifásicos a Quatro Fios	135
4.6 Controlador de Corrente com Resposta de Tempo Mínimo Aplicado a Sistemas Trifásicos a Quatro Fios	142
4.7 Servo Controlador de Tensão para o Barramento CC	146

4.8. Resultados de Simulação	150
4.9. Resultados Experimentais	155
4.8 Análise de Desempenho dos Métodos de Sincronização NPSF e MSRF Aplicados a Filtros Ativos de Potência	163
4.9 Conclusões	172
Capítulo 5	174
Implementação dos Protótipos Relativos ao Retificador PWM Trifásico e ao Filtro Ativo de Potência Paralela.....	174
5.1 Introdução	174
5.2 Descrição do Primeiro Protótipo Relativo ao Retificador PWM Trifásico.....	175
5.2.2.1 Módulo de Inicialização	178
5.2.2.2 Módulo de Calibração.....	178
5.2.2.3 Módulo de Normalização e Adaptação de Variáveis.....	179
5.2.2.4 Módulo de Cálculo da Inversa da Norma das Tensões $\alpha\beta$ e Sinais de Sincronização	181
5.2.2.5 Módulo de Transformação das Grandezas abc para dq.....	183
5.2.2.6 Módulo de Cálculo das Ações de Controle	184
5.2.2.7 Módulo de Transformação das Ações de Controle dq para $\alpha\beta$	184
5.2.2.8 Modulação Space Vector para Conversores Trifásicos a Três Fios	185
5.3 Descrição do Segundo Protótipo.....	186
5.3.2.1 Organização do Algoritmo	190
5.3.2.1.1 Módulo de Inicialização.....	191
5.3.2.1.2 Módulo de Calibração.....	191
5.3.2.1.3 Módulo de Normalização e Adaptação de Variáveis.....	192
5.3.2.1.4 Módulo de Cálculo dos Senos e Co-senos.....	193
5.3.2.1.5 Módulo de Transformação das Tensões de Fase em Coordenadas abc para dq0	193
5.3.2.1.6 Módulo de Filtragem das Tensões de Fase (filtros passa-altas)	193
5.3.2.1.7 Módulo do Cálculo das Correntes de Compensação	194
5.3.2.1.8 Módulo de Transformação das Correntes de Compensação de Coordenadas dq0 para $\alpha\beta$ 0.....	194

5.3.2.1.9 Módulo do Cálculo da Ação de Controle para a Malha Interna de Corrente	195
5.3.2.1.10 Módulo da Limitação das Ações de Controle da Malha de Corrente utilizando o Método do Elipsóide.....	195
5.3.3.1 Parte Frontal.....	203
5.3.3.2 Parte Posterior.....	204
5.3.3.3 Procedimentos para Realização de Testes na Parte de Potência do Protótipo Desenvolvido	207
5.4 Conclusões	207
Conclusões Gerais.....	209
Sugestão para Trabalhos Futuros.....	212
Referências Bibliográficas.....	213
Anexo A - Extensão do Método de Referência Síncrona de Seqüência Positiva Normalizada Aplicado a Sistemas Trifásicos a Quatro Fios	232
Anexo B - Análise Comparativa de Técnicas de Controle de Corrente	235
B.1.1 Resultados Experimentais.....	238
B.2.1 Introdução	242
B.2.2 Projeto do Controlador de Potências Ativa e Reativa.....	242
B.2.3 Resultados Experimentais.....	246
B.3.1. Introdução	248
B.3.2 Desacoplamento do Sistema por Retroação de Estados no Domínio Discreto.....	249
B.3.3 Projeto dos Servos Controladores para a Regulação das Correntes de Entrada do Retificador PWM Trifásico.....	256
B.3.4. Resultados Experimentais	261
B.4.1 Introdução	263
B.4.2 Descrição do Projeto do Controlador Proposto para o Controle das Correntes de Entrada do Retificador PWM Trifásico	264
B.4.3 Realimentação de Estados para Compensação do Distúrbio da Rede	264
B.4.4 Projeto do Servo Controlador para o Controle da Corrente de Eixo de Quadratura	267

B.4.4 Resultados Experimentais	271
B.5.1 Introdução	274
B.5.2 Resultados Experimentais	275
B.6.1 Introdução	278
B.6.2 Resultados Experimentais	279
B.7 Análise Comparativa.....	281
B.7.1 Justificativa da Análise Comparativa.....	281
B.8 Análise Comparativa dos Controladores de Corrente.....	282
B.8. Análise Comparativa dos Controladores de Corrente Considerando Desequilíbrio e Harmônicos nas Tensões da Rede.....	283
Anexo C - Obtenção das Equações de Estado da Planta em Eixos Estacionário e Síncrono.....	289
Anexo D - Modelagem no Domínio Discreto em Eixos Síncronos considerando a Resistência Interna R_f	297
Anexo E - Desacoplamento por Retroação de Estados no Domínio Discreto.....	299
Anexo F - Projeto dos Ganhos para os Servos Controladores nos Eixos d e q Utilizando a Abordagem de Alocação de Pólos.....	301
Anexo G - Projeto dos Ganhos para os Compensadores PI.....	306
Anexo H - Modulação Space Vector para Conversores Trifásicos a Quatro Braços	311

Índice de Figuras

Figura 1. 1 – Diagrama em blocos da estrutura básica do método em malha fechada que utiliza laço de sincronização de fase (<i>PLL</i>).	4
Figura 1. 2 – Rotação do vetor de tensão do sistema de coordenadas $\alpha\beta$ para o sistema de coordenadas <i>dq</i>	6
Figura 1. 3 – Diagrama de blocos do método de sincronização <i>MSRF</i>	7
Figura 1. 4 – Diagrama de blocos do método de sincronização <i>LPF-B</i>	8
Figura 1. 5 – Diagrama de blocos do método de sincronização <i>SVF</i>	8
Figura 1. 6 – Diagrama de blocos do método de sincronização <i>MSVF</i>	10
Figura 2. 1 – Diagrama de blocos das transformações do vetor de linha das tensões da rede.....	24
Figura 2. 2 – Diagrama de blocos das transformações do vetor de linha para o vetor de fase de seqüência positiva em coordenadas estacionárias $\alpha\beta$ das tensões da rede.	25
Figura 2. 3 – Diagrama de blocos do método por estrutura de referência síncrona de seqüência positiva normalizada.	26
Figura 2. 4 – Gráficos de: (a) Bode. (b) Resposta ao degrau.	29
Figura 2. 5 – Diagrama de blocos do método de sincronização <i>NPSF</i> com adição do algoritmo de adaptação de freqüência.	31
Figura 2. 6 – Modelo não-linear escolhido para representar o algoritmo de adaptação de freqüência.	32
Figura 2. 7 – Diagrama de blocos do modelo linear escolhido para representar o algoritmo de adaptação de freqüência.	33
Figura 2. 8 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} em p.u. a partir de simulação no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha normalizadas.	37
Figura 2. 9 – Tensão de linha v_{ca} normalizada e norma a partir de simulação no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: grandezas normalizadas.	37

Figura 2. 10 – Tensões de fase v_{α} e v_{β} obtidas a partir do método <i>NPSF</i> simulado no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: v_{α} e v_{β} normalizadas.	38
Figura 2. 11 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , simulado no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno normalizados	38
Figura 2. 12 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.11, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD_v=0\%$. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno normalizado.	39
Figura 2. 13 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} em p.u. a partir de simulação no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha normalizadas.	40
Figura 2. 14 – Tensão de linha v_{ca} em p.u. e norma a partir de simulação no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha normalizadas.	40
Figura 2. 15 – Tensões de fase v_{α} e v_{β} obtidas a partir do método <i>NPSF</i> simulado no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: v_{α} e v_{β} normalizadas.	41
Figura 2. 16 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , simulado no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno normalizados.	41
Figura 2. 17 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.16, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD_v=0\%$. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno normalizado.	42
Figura 2. 18 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} em p.u. a partir de simulação no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha normalizadas.	43
Figura 2. 19 – Tensão de linha v_{ca} em p.u. e norma a partir de simulação no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: grandezas normalizadas.	43

Figura 2. 20 – Tensões de fase v_{α} e v_{β} obtidas a partir do método <i>NPSF</i> simulado no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: v_{α} e v_{β} normalizadas.	44
Figura 2. 21 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , simulado no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno normalizados.	44
Figura 2. 22 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.21, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD_v=1,4$ %. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno normalizado.....	45
Figura 2. 23 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} em p.u. a partir de simulação no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha normalizadas.	46
Figura 2. 24 – Tensão de linha v_{ca} em p.u. e norma a partir de simulação no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha normalizadas.	46
Figura 2. 25 – Tensões de fase v_{α} e v_{β} obtidas a partir do método <i>NPSF</i> simulado no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: v_{α} e v_{β} normalizadas.	47
Figura 2. 26 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , simulado no DSP. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno normalizados.	47
Figura 2. 27 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.26, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD_v=1,5$ %. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno normalizado.....	48
Figura 2. 28 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} da rede normalizadas. Primeiro ciclo tensões equilibrada e sem distorção. Segundo ciclo tensões com $TD_v=58\%$. Terceiro ciclo tensões da rede com $TD_v=58$ % e $THD_v=7,5$ %. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha normalizadas.	49
Figura 2. 29 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , sob operação em regime transitório. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno normalizados.	49

Figura 2. 30 – Ação de controle do algoritmo de adaptação de frequência sob um degrau de frequência de 5 Hz (entre 57,5 Hz e 62,5 Hz). Escala Horizontal: Tempo (s). Escala vertical: ação de controle em números relativos à frequência em Hz.	50
Figura 2. 31 – Comportamento transitório do seno sob degrau de frequência de 5 Hz (entre 57,5 Hz e 62,5 Hz). Escala Horizontal: Tempo (s) Amostras. Escala vertical: seno e co-seno normalizados.	51
Figura 2. 32 – Comportamento transitório do erro de fase relativo ao método de sincronização <i>NPSF</i> durante um degrau de frequência de 5 Hz nas tensões de linha em $t=13$ ms.	52
Figura 2. 33 – Comportamento transitório do erro de fase relativo ao método de sincronização <i>NPSF</i> durante um degrau de fase de 10° nas tensões de linha em $t=13$ ms.	52
Figura 2. 34 – Comportamento transitório do erro de fase relativo ao método de sincronização <i>NPSF</i> durante um <i>sag</i> de $TD_v=50\%$ nas tensões de linha v_{ab} e v_{bc} em $t=13$ ms.	53
Figura 2. 35 – Tensões de linha v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} da rede no <i>PCC</i> com $TD_v=1,88\%$ e $THD_v=1,29\%$. Escala Horizontal: 5ms/div. Escala vertical: tensões de linha 100V/div.	54
Figura 2. 36 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} da rede em p.u. a partir da aquisição do DSP relacionada à figura 2.35. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u.	55
Figura 2. 37 – Tensão de linha v_{ca} da rede em p.u. e norma, a partir da aquisição do DSP relacionada a figura 2.35. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha e norma em p.u.	55
Figura 2. 38 – Tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} de seqüência positiva em p.u. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} em p.u.	56
Figura 2. 39 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , relacionado as condições das tensões do sistema no <i>PCC</i> dadas na figura 2.35. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno.	56

Figura 2. 40 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.39, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD \cong 0\%$. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno.	57
Figura 2. 41 – Tensões de linha v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} da rede no <i>PCC</i> com $TD_v=1,66\%$ e $THD_v=7,61\%$. Escala Horizontal: 5ms/div. Escala vertical: tensões de linha 100V/div.....	58
Figura 2. 42 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} da rede em p.u., a partir da aquisição do DSP relacionada à figura 2.41. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u.....	58
Figura 2. 43 – Tensão de linha v_{ca} da rede em p.u. e norma, a partir da aquisição do DSP relacionada a figura 2.41. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u e norma.....	59
Figura 2. 44 – Tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} de seqüência positiva em p.u. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} em p.u.	59
Figura 2. 45 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , relacionado às condições das tensões do sistema no <i>PCC</i> dadas na figura 2.41. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno em p.u.	60
Figura 2. 46 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.45, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD=0,1\%$. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno.....	60
Figura 2. 47 – Tensões de linha v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} da rede no <i>PCC</i> com $TD_v=58,2\%$ e $THD_v=4,2\%$. Escala Horizontal: 5ms/div. Escala vertical: tensões de linha 50V/div.....	61
Figura 2. 48 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} da rede em p.u. a partir da aquisição do DSP relacionada à figura 2.47. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u.....	62
Figura 2. 49 – Tensão de linha v_{ca} da rede em p.u e norma, a partir da aquisição do DSP relacionada a figura 2.47. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u.e norma.....	62

Figura 2. 50 – Tensões de fase v_{α} e v_{β} de seqüência positiva em p.u. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de fase v_{α} e v_{β} em p.u.	63
Figura 2. 51 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , relacionado as condições das tensões do sistema no <i>PCC</i> dadas na figura 2.47. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno.....	63
Figura 2. 52 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.51, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD_v=1,58\%$. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno.....	64
Figura 2. 53 – Tensões de linha v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} da rede no <i>PCC</i> com $TD_v=58,2\%$ e $THD_v=143,02\%$ (v_{ab}), $THD_v=56,05\%$ (v_{bc} e v_{ca}). Escala Horizontal: 10 ms/div. Escala vertical: tensões de linha 200V/div.....	65
Figura 2. 54 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} da rede em p.u. a partir da aquisição do DSP relacionada à figura 2.53. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u.....	65
Figura 2. 55 – Tensão de linha v_{ca} da rede em p.u e norma, a partir da aquisição do DSP relacionada a figura 2.53. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha e norma.	66
Figura 2. 56 – Tensões de fase v_{α} e v_{β} de seqüência positiva em p.u. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de fase v_{α} e v_{β} em p.u.	66
Figura 2. 57 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , relacionado as condições das tensões do sistema no <i>PCC</i> dadas na figura 2.53. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno.....	67
Figura 2. 58 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.57, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD=1,68\%$. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno.....	67
Figura 2. 59 – Tensões de linha v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} da rede no <i>PCC</i> com $TD_v=82,9\%$ e $THD_v=4,2\%$. Escala Horizontal: 10 ms/div. Escala vertical: tensões de linha 50V/div.	68
Figura 2. 60 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} da rede em p.u. a partir da aquisição do DSP relacionada à figura 2.59. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u.....	69

Figura 2. 61 – Tensão de linha v_{ca} da rede em p.u. e norma, a partir da aquisição do DSP relacionada a figura 2.59. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u. e norma.....	69
Figura 2. 62 – Tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} de seqüência positiva em p.u. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} em p.u.	70
Figura 2. 63 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , relacionado as condições das tensões do sistema no <i>PCC</i> dadas na figura 2.59. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno.....	70
Figura 2. 64 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.63, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD_v=1,36$ %. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno.....	71
Figura 2. 65 – Tensões de linha v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} da rede no <i>PCC</i> com $TD_v=58,2$ %, $THD_v=56,05$ % (v_{ca}) e $THD_v=143,02$ % (v_{ab} e v_{bc}). Escala Horizontal: 10 ms/div. Escala vertical: tensões de linha 200V/div.....	71
Figura 2. 66 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} da rede em p.u. a partir da aquisição do DSP relacionada à figura 2.65. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u.....	72
Figura 2. 67 – Tensão de linha v_{ca} da rede em p.u. e norma, a partir da aquisição do DSP relacionada a figura 2.65. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u. e norma.....	72
Figura 2. 68 – Tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} de seqüência positiva em p.u. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} em p.u.	73
Figura 2. 69 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , relacionado as condições das tensões do sistema no <i>PCC</i> dadas na figura 2.65. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno.....	73
Figura 2. 70 – Espectro harmônico do sinal seno da figura 2.69, obtido através do método <i>NPSF</i> com $THD_v=2,35$ %. Escala Horizontal: Harmônicos. Escala vertical: seno.....	74
Figura 2. 71 – Tensões de linha v_{ab} , v_{bc} e v_{ca} da rede no <i>PCC</i> com $TD_v=41,3$ %, $THD_v=4,01$ %. Escala Horizontal: 10 ms/div. Escala vertical: tensões de linha 100V/div.	75

Figura 2. 72 – Tensões de linha v_{ab} e v_{bc} da rede em p.u. a partir da aquisição do DSP relacionada à figura 2.71. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u.....	75
Figura 2. 73 – Tensão de linha v_{ca} da rede em p.u. e norma, a partir da aquisição do DSP relacionada a figura 2.71. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de linha em p.u. e norma.....	76
Figura 2. 74 – Tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} de seqüência positiva em p.u. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: tensões de fase v_{alfa} e v_{beta} em p.u.	76
Figura 2. 75 – Seno e co-seno obtidos a partir do uso do método de sincronização <i>NPSF</i> , relacionado as condições das tensões do sistema no <i>PCC</i> dadas na figura 2.71. Escala Horizontal: Amostras. Escala vertical: seno e co-seno.....	77
Figura 3. 1 – Diagrama esquemático de um conversor PWM trifásico utilizado como interface entre a carga e o sistema elétrico trifásico.	83
Figura 3. 2 – Diagrama esquemático do circuito simplificado do retificador PWM trifásico, filtro de entrada e carga.....	91
Figura 3. 3 – Representação em diagrama de blocos do sistema em eixos síncronos <i>dq</i> com inclusão do controlador PI.	95
Figura 3. 4 – Diagrama de Bode para a resposta em malha fechada de corrente para a condição de projeto do ganhos $K_1=0,0238$ e $K_2=0,0048$	95
Figura 3. 5 – Resultado de simulação do controlador PI para a malha de corrente com aplicação de um degrau em $ref_{id}(k)$	96
Figura 3. 6 – Limitador da ação de controle do controlador PI.	97
Figura 3. 7 – Diagrama esquemático do retificador PWM e controladores de corrente PI.	99
Figura 3. 8 – Resultados de simulação. Tensões da rede em escala reduzida 10 vezes ($v_x/10$) e corrente de entrada do retificador PWM, $THD_i=3,8\%$ e $FP=0,99\%$...	100
Figura 3. 9 – Resultados de simulação. Tensão e corrente na fase <i>a</i> na entrada do retificador PWM com $FD=0,999$	100
Figura 3. 10 – Resultados de simulação. Comportamento transitório nas correntes de entrada do retificador PWM. (a) Aplicação de um degrau na referência de	

	corrente de eixo direto i_{refd} e referência de corrente de eixo de quadratura nula, ou seja, $i_{refq}=0$. (b) Correntes em coordenadas abc	101
Figura 3. 11 –	Resultados experimentais. Tensões da rede e corrente de entrada do retificador na fase a . Tensões com $THD_v=2,5\%$ e $TD_v=7,8\%$. Escala Horizontal: 10 ms/div. Escala Vertical das correntes: 20 A/div. Escala Vertical da tensão: 50V/div.	103
Figura 3. 12 –	Resultados experimentais. Correntes de entrada do retificador e tensão da rede na fase a . Correntes com $THD_i=3,41\%$ e uma $TD_i=1,52\%$. Escala Horizontal: 10 ms/div. Escala Vertical das correntes: 20 A/div. Escala Vertical da tensão: 50V/div.	103
Figura 3. 13 –	Resultados experimentais. Correntes trifásicas na entrada do retificador com um degrau na referência de corrente de eixo direto, ou seja, i_{refd} variando de 0,65 pu a 1 pu. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical: 10 A/div...	104
Figura 3. 14 –	Resultados experimentais. Corrente de entrada do retificador e tensão da rede na fase a . Retificador operando com fator de deslocamento unitário. Escala Horizontal: 10 ms/div. Escala Vertical das correntes: 20 A/div (ponteiros de corrente em 10mV/A). Escala Vertical da tensão: 50V/div.....	104
Figura 3. 15 -	Diagrama em blocos da malha externa de regulação de tensão do barramento CC do retificador PWM trifásico.....	105
Figura 3. 16 -	Diagrama do controlador de tensão do barramento CC.	107
Figura 3. 17 -	Resultados experimentais. Escala Horizontal: 10 ms/div. Escala de corrente: 10 A/div. Escala de tensão CC: 100 V/div.	109
Figura 3. 18 -	Resultados experimentais. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala de corrente: 5 A/div. Escala de tensão 50 V/div.....	110
Figura 3. 19 –	Resultados experimentais. Escala Horizontal: 500 ms/div. Escala Vertical das correntes: 20 A/div. Escala Vertical da tensão no barramento CC: 100 V/div.	110
Figura 3. 20 –	Sinais de sincronização seno e co-seno obtidos utilizando o método de sincronização $MSRF$ a partir das tensões da rede equilibradas.....	113
Figura 3. 21 –	Sinais de sincronização seno e co-seno obtidos utilizando o método de sincronização $NPSF$ a partir das tensões da rede equilibradas.	113

Figura 3. 22 – Correntes de entrada do retificador PWM e tensões de fase (1/4,5 do valor nominal) sob condições de equilíbrio das tensões da rede utilizando o método <i>MSRF</i> .	113
Figura 3. 23 – Correntes de entrada do retificador PWM e tensões de fase (1/4,5 do valor nominal) sob condições de equilíbrio das tensões da rede utilizando o método <i>NPSF</i> .	113
Figura 3. 24 – Espectro harmônico da corrente em uma das fases da figura 3.22, onde a $THD_i=1,0\%$.	114
Figura 3. 25 – Espectro harmônico da corrente em uma das fases da figura 3.23, onde a $THD_i=1,0\%$.	114
Figura 3. 26 – Sinais de sincronização seno e co-seno obtidos utilizando o método de sincronização <i>MSRF</i> com 10 % de distorções harmônicas nas tensões da rede.	115
Figura 3. 27 – Sinais de sincronização seno e co-seno obtidos utilizando o método de sincronização <i>NPSF</i> com 10 % de distorções harmônicas nas tensões da rede.	115
Figura 3. 28 – Correntes de entrada do retificador PWM e tensões de fase (1/4,5 do valor nominal) sob condições de $THD_v=10\%$ nas tensões da rede utilizando o método <i>MSRF</i> .	115
Figura 3. 29 – Correntes de entrada do retificador PWM e tensões de fase (1/4,5 do valor nominal) sob condições de $THD_v=10\%$ nas tensões da rede utilizando o método <i>NPSF</i> .	115
Figura 3. 30 – Espectro harmônico da corrente em uma das fases em p.u.da figura 3.28, onde a $THD_i=6,7\%$.	116
Figura 3. 31 – Espectro harmônico da corrente em uma das fases em p.u. da figura 3.29, onde a $THD_i=1,67\%$.	116
Figura 3. 32 – Sinais de sincronização seno e co-seno obtidos utilizando o método de sincronização <i>MSRF</i> a partir de 25 % de desequilíbrio nas tensões da rede.	116

Figura 3. 33 – Sinais de sincronização seno e co-seno obtidos utilizando o método de sincronização <i>NPSF</i> a partir de 25 % de desequilíbrio nas tensões da rede.	116
Figura 3. 34 – Correntes de entrada do retificador PWM e tensões de fase (1/4,5 do valor nominal) sob condições de 25 % de desequilíbrio nas tensões da rede utilizando o método <i>MSRF</i>	117
Figura 3. 35 – Correntes de entrada do retificador PWM e tensões de fase (1/4,5 do valor nominal) sob condições de 25 % de desequilíbrio nas tensões da rede utilizando o método <i>NPSF</i>	117
Figura 3. 36 – Espectro harmônico da corrente em uma das fases em p.u. da figura 3.34, onde a $THD_i=6,9\%$	118
Figura 3. 37 – Espectro harmônico da corrente em uma das fases em p.u. da figura 3.35, onde a $THD_i=1,65\%$	118
Figura 3. 38 – Sinais de sincronização seno e co-seno obtidos utilizando o método de sincronização <i>MSRF</i> com 25 % de desequilíbrio e 10 % de distorções harmônicas nas tensões da rede.	119
Figura 3. 39 – Sinais de sincronização seno e co-seno obtidos utilizando o método de sincronização <i>NPSF</i> com 25 % de desequilíbrio e 10 % de distorções harmônicas nas tensões da rede.	119
Figura 3. 40 – Correntes de entrada do retificador PWM e tensões de fase sob condições de 25% de desequilíbrio e $THD_v=10\%$ nas tensões da rede utilizando o método <i>MSRF</i> . Correntes com $TD_i=6,9\%$ e $FP=0,98$	119
Figura 3. 41 – Correntes de entrada do retificador PWM e tensões de fase sob condições de 25% de desequilíbrio e $THD_v=10\%$ nas tensões da rede utilizando o método <i>NPSF</i> . Correntes com $TD_i=1,3\%$ e $FP=0,999$	119
Figura 3. 42 – Espectro harmônico da corrente em uma das fases em p.u. da figura 3.40, onde a $THD_i=11,9\%$	120
Figura 3. 43 – Espectro harmônico da corrente em uma das fases em p.u. da figura 3.41, onde a $THD_i=1,8\%$	120
Figura 3. 44 – Gráfico que apresenta as curvas relativas a variação do desequilíbrio das correntes de entrada do retificador PWM em função da variação do	

desequilíbrio nas tensões da rede com a utilização dos métodos <i>MSRF</i> e <i>NPSF</i> e controlador de corrente <i>CC_{PI}</i>	121
Figura 3. 45 – Gráfico que apresenta as curvas relativas à variação da THD_i nas correntes de entrada do retificador PWM em função do desequilíbrio nas tensões da rede com a utilização dos métodos <i>MSRF</i> e <i>NPSF</i> e controlador de corrente <i>CC_{PI}</i>	122
Figura A 1 - Diagrama de blocos do método de sincronização <i>NPSF</i> aplicado a sistemas trifásicos a quatro fios incluindo o algoritmo de adaptação de frequência.	232
Figura B. 1 – Diagrama esquemático da estrutura básica do retificador PWM trifásico, controladores e método de sincronização utilizado.....	236
Figura B. 2 – Resultados experimentais. Tensões da rede e corrente de entrada do retificador na fase <i>a</i> . Tensões com $THD_v= 2,5\%$ e $TD_v=5,8 \%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	240
Figura B. 3 – Resultados experimentais. Correntes de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Correntes com $THD_i=5,41\%$ e uma $TD_i=1,52\%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	240
Figura B. 4 – Resultados experimentais. Correntes trifásicas na entrada do retificador com um degrau na referência de corrente de eixo direto, ou seja, i_{refd} variando de 0,5 pu a 0,9 pu. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical: 5 A/div.	241
Figura B. 5 – Resultados experimentais. Corrente de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Retificador operando com $FD\cong 1$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.	241
Figura B. 6 – Representação em diagrama de blocos do sistema em eixos síncronos <i>dq</i> com inclusão do controlador de potência PI.	243
Figura B. 7 – Resultado de simulação do controlador PI para a malha de corrente com aplicação de um degrau em $P_{ref}(k)$	245
Figura B. 8 – Diagrama esquemático do retificador PWM e controlador de potência PI..	245

Figura B. 9 – Resultados experimentais. Tensões da rede e corrente de entrada do retificador na fase <i>a</i> . Tensões com $THD_v= 2,5\%$ e $TD_v=5,8 \%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	246
Figura B. 10 – Resultados experimentais. Correntes de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Correntes com $THD_i=5,53\%$ e uma $TD_i=1,74\%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	247
Figura B. 11 – Resultados experimentais. Correntes trifásicas na entrada do retificador com um degrau na referência de corrente de eixo direto, ou seja, P_{ref} variando de 0,5 pu a 0,9 pu. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical: 5 A/div.	247
Figura B. 12 – Resultados experimentais. Corrente de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Retificador operando com $FD\cong 1$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div (ponteiras de corrente em 10mV/A). Escala Vertical da tensão: 10V/div.	248
Figura B. 13 – Representação em diagrama de blocos do sistema em eixos síncronos <i>dq</i> incluindo as matrizes de desacoplamento por retroação de estados \mathbf{M}_{des} e \mathbf{K}_{des}	253
Figura B. 14 – Resultado de simulação do controlador para a malha de corrente com aplicação de um degrau em $ref_{id}(k)$	255
Figura B. 15 – Representação por diagrama de blocos do sistema servo utilizado para controle das correntes de entrada do retificador PWM trifásico em eixos síncronos <i>dq</i>	256
Figura B. 16 – Diagrama de blocos do desacoplamento das componentes das ações de controle de eixo direto e de quadratura.	259
Figura B. 17 – Diagrama de blocos do desacoplamento das componentes das ações de controle de eixo direto e de quadratura.	260
Figura B. 18 – Resultado de simulação do controlador para a malha de corrente com aplicação de um degrau em $ref_{id}(k)$ e $ref_{iq}(k)$ considerando o projeto dos servos controladores nos eixos <i>d</i> e <i>q</i>	260

Figura B. 19 – Resultados experimentais. Tensões da rede e corrente de entrada do retificador na fase <i>a</i> . Tensões com $THD_v= 2,5\%$ e $TD_v=5,8 \%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	261
Figura B. 20 – Resultados experimentais. Correntes de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Correntes com $THD_i=5,4\%$ e uma $TD_i=1,53\%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	262
Figura B. 21 – Resultados experimentais. Correntes trifásicas na entrada do retificador com um degrau na referência de corrente de eixo direto, ou seja, i_{refd} variando de 0,5 pu a 0,9 pu. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical: 5 A/div.	262
Figura B. 22 – Resultados experimentais. Corrente de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Retificador operando com $FD\cong 1$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 20V/div.	263
Figura B. 23 – Diagrama em blocos do sistema em eixos síncronos <i>dq</i> incluindo as matrizes de desacoplamento e de compensação do distúrbio da rede.	265
Figura B. 24 – Representação por diagrama de blocos do sistema servo utilizado para controle da corrente de eixo síncrono <i>q</i>	268
Figura B. 25 – Resultado de simulação do controlador para a malha de corrente com aplicação de um degrau em $i_{refd}(k)$ e $i_{refq}(k)$ considerando o projeto do servo controlador no eixo <i>q</i>	271
Figura B. 26 – Resultados experimentais. Tensões da rede e corrente de entrada do retificador na fase <i>a</i> . Tensões com $THD_v= 2,5\%$ e $TD_v=5,8 \%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	272
Figura B. 27 – Resultados experimentais. Correntes de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Correntes com $THD_i=5,82\%$ e uma $TD_i=1,55\%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	272

Figura B. 28 – Resultados experimentais. Correntes trifásicas na entrada do retificador com um degrau na referência de corrente de eixo direto, ou seja, i_{refd} variando de 0,7 pu a 1,2 pu. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical: 5 A/div.	273
Figura B. 29 – Resultados experimentais. Corrente de entrada do retificador e tensão da rede na fase a . Retificador operando com $FD \cong 1$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.	273
Figura B. 30 – Diagrama de blocos do controlador de tempo mínimo e planta do retificador PWM em coordenadas $\alpha\beta$	274
Figura B. 31 – Diagrama de blocos do controlador de tempo mínimo, planta do retificador PWM e compensação <i>feedforward</i> em coordenadas $\alpha\beta$	275
Figura B. 32 – Resultados experimentais. Tensões da rede e corrente de entrada do retificador na fase a . Tensões com $THD_v = 2,5\%$ e $TD_v = 5,8\%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.	276
Figura B. 33 – Resultados experimentais. Correntes de entrada do retificador e tensão da rede na fase a . Correntes com $THD_i = 6,48\%$ e uma $TD_i = 1,46\%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.	276
Figura B. 34 – Resultados experimentais. Correntes trifásicas na entrada do retificador com um degrau na referência de corrente de eixo direto, ou seja, i_{refd} variando de 0,7 pu a 1,2 pu. Escala Horizontal: 2 ms/div. Escala Vertical: 5 A/div.	277
Figura B. 35 – Resultados experimentais. Corrente de entrada do retificador e tensão da rede na fase a . Retificador operando com $FD \cong 1$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.	277
Figura B. 36 – Diagrama de blocos do controlador ressonante e planta do FAPP.	278
Figura B. 37 – Resultados experimentais. Tensões da rede e corrente de entrada do retificador na fase a . Tensões com $THD_v = 2,5\%$ e $TD_v = 5,8\%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.	279

Figura B. 38 – Resultados experimentais. Correntes de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Correntes com $THD_i=4,2\%$ e uma $TD_i=1,92\%$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 5 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.....	280
Figura B. 39 – Resultados experimentais. Correntes trifásicas na entrada do retificador com um degrau na referência de corrente de eixo direto, ou seja, i_{refd} variando de 0,7 pu a 1,2 pu. Escala Horizontal: 2 ms/div. Escala Vertical: 5 A/div.	280
Figura B. 40 – Resultados experimentais. Corrente de entrada do retificador e tensão da rede na fase <i>a</i> . Retificador operando com $FD\cong 1$. Escala Horizontal: 5 ms/div. Escala Vertical das correntes: 2 A/div. Escala Vertical da tensão: 10V/div.	281
Figura B. 41 – Gráfico que apresenta as curvas relativas ao desequilíbrio percentual nas correntes de entrada do retificador PWM devido à presença de desequilíbrios nas tensões da rede com a utilização método de sincronização <i>NPSF</i>	284
Figura B. 42 – Gráfico que apresenta as curvas relativas à taxa de distorção harmônica total em percentagem nas correntes de entrada do retificador PWM devido à presença de desequilíbrios nas tensões da rede com a utilização método de sincronização <i>MSRF</i>	284
Figura B. 43 – Gráfico que apresenta as curvas relativas à taxa de distorção harmônica total em percentagem nas correntes de entrada do retificador PWM devido à presença de distorções harmônicas nas tensões da rede (5 ^a , 7 ^a e 11 ^a harmônica) com a utilização método de sincronização <i>MSRF</i>	285
Figura C. 1 – Circuito equivalente da Figura 3. 2 utilizado para obter as equações da planta.....	289

Índice de Tabelas

Tabela 1– Resumo Comparativo dos Principais Métodos de sincronização em Malha Aberta a partir da Medição das Tensões da Rede.....	13
Tabela 2– Resumo Comparativo dos Principais Métodos de sincronização em Malha Aberta Incluindo o método <i>NPSF</i>	79
Tabela 3. 1- Valores obtidos para os critérios de comparação estabelecidos <i>FD</i> , <i>FP</i> , <i>TD_i</i> , <i>THD_i</i> , <i>EC</i> E <i>vAlor rms do sinal de erro</i>	89
Tabela 3. 2 - Análise Comparativa para as seis técnicas de controle de corrente aplicadas a retificadores PWM trifásicos	90
Tabela 3. 3- Parâmetros definidos para simulação do retificador PWM trifásico.	99
Tabela 3. 4- Resultados obtidos para as correntes de entrada do retificador PWM trifásico utilizando os métodos de sincronização <i>NPSF</i> e <i>MSRF</i>	120
Tabela 4. 1– Limites de Distorção de tensão segundo a <i>IEEE Std. 519-1992</i>	130
Tabela 4. 2- Principais Parâmetros de Projeto para Simulação e Experimental do FAPP.	152
Tabela 4. 3 - Resultados de Simulação da <i>DTI</i> e <i>THD</i> no Sistema trifásico a quatro Fios.	154
Tabela 4. 4- Resultados Experimentais da <i>DTI</i> no Sistema trifásico a quatro Fios.	160
Tabela 4. 5- Resultados Experimentais relativo as potências do sistema	163
Tabela 5. 1- Parâmetros definidos para o desenvolvimento do protótipo do retificador PWM trifásico.....	186
Tabela 5. 2- Parâmetros escolhidos para o desenvolvimento do protótipo do retificador PWM trifásico.	203

Capítulo 1

Introdução Geral

Este Capítulo coloca o problema do aumento das distorções harmônicas nas tensões da rede e os principais fatores que contribuem para este aumento. Tais distorções podem provocar distorções nos sinais de sincronização utilizados para sincronizar conversores PWM com a rede elétrica. Será realizada uma revisão bibliográfica relativa aos métodos de sincronização em malha aberta, os quais utilizam as tensões da rede elétrica como referência para obtenção dos sinais de sincronização, onde foram apresentadas as principais vantagens e desvantagens destes métodos de sincronização segundo determinadas características desejáveis. A partir desta revisão uma tabela comparativa será gerada a fim de se estabelecer as semelhanças e diferenças entre os métodos e a proposta de um novo método de sincronização.

1.1 Descrição do Problema

Nas últimas décadas, houve um aumento significativo da presença de distúrbios nas tensões dos sistemas elétricos, entre estes distúrbios destacam-se a presença de distorções harmônicas, desequilíbrios, afundamentos de tensão (*sags*), sobretensões, *notchs* (entalhes na forma de onda), ruído elétrico, variações de frequência nas tensões do sistema de distribuição [1, 2, 23, 26, 76, 78, 79].

Os principais fatores que contribuem para estas distorções são:

(i) O aumento da presença de ressonâncias causadas pela interação entre capacitância, por exemplo, utilizadas para correção do fator de potência, e indutâncias associadas à linha e transformadores da rede [1];

(ii) O crescimento da utilização de cargas não lineares que drenam correntes com distorções harmônicas e que, dependendo da impedância do sistema, podem aumentar as distorções nas tensões da rede elétrica [1, 89];

(iii) Variações de frequência, as quais podem ocorrer em sistemas elétricos que operam de forma isolada do sistema interligado nacional (SIN) brasileiro de energia elétrica ou em sistemas de energia de emergência [32], devido ao mau funcionamento dos equipamentos utilizados para este fim.

Para o propósito de operação, controle e geração de referências de conversores PWM trifásicos, estes necessitam ser sincronizados com a rede elétrica a partir do uso de um método de sincronização. Como grande parte dos métodos de sincronização utilizados por conversores PWM trifásicos fazem uso das medidas das tensões da rede elétrica como referência, o aumento das distorções nas tensões pode causar distorções nos sinais de sincronização gerados por estes métodos e, conseqüentemente, provocar o aumento de distorções nas correntes geradas ou drenadas por estes conversores.

Devido a estes problemas, existe uma maior preocupação por parte de pesquisadores (nas áreas de Eletrônica de Potência e Sistemas de Potência), no sentido de desenvolver métodos de sincronização, que possam operar o mais rápido quanto possível, enquanto adequadamente reduzam o impacto da presença de distúrbios nos sinais de sincronização gerados. Diante destes desafios, há que se considerarem ainda, no desenvolvimento de métodos de sincronização as seguintes características desejáveis:

- i) Simplicidade estrutural (tanto de projeto como de implementação);
- ii) Rejeição de possíveis distorções harmônicas e desequilíbrios nas tensões da rede;
- iii) Adaptabilidade a possíveis variações de frequência nas tensões da rede, devido principalmente a faltas ocorridas no sistema elétrico [2].

A fim de atender tais características, vários métodos de sincronização que utilizam algoritmos tanto em malha aberta [3-11], quanto em malha fechada [12-19], são propostos na literatura.

Com relação aos métodos de malha fechada estes apresentam baixa sensibilidade a variações de frequência, entretanto, um bom compromisso entre uma adequada resposta transitória e uma boa rejeição de ruídos deve ser considerada [169]. Além disso, o tempo de processamento dos algoritmos desenvolvidos para estes métodos em processadores de sinais digitais, geralmente é maior que os métodos em malha aberta [169].

Devido aos cuidados que devem ser tomados com os métodos de malha fechada, métodos em malha aberta apresentam-se como soluções mais vantajosas, principalmente em termos de simplicidade estrutural. Todavia, nenhum método em malha aberta foi encontrado até o momento, que apresente um bom desempenho com relação aos sinais de sincronização gerados quando se fazem presentes nas tensões da rede elétrica, conjuntamente, desequilíbrios, harmônicos e variações de frequência.

Neste sentido, esta tese propõe um novo método de sincronização em malha aberta, o qual apresenta bom desempenho em termos de *THD* nos sinais de sincronização, mesmo na presença de severos desequilíbrios da rede, harmônicos, variações de frequência nas tensões, maiores que os recomendados pela Norma IEC 61000-2-2, que trata de sistemas de alimentação em baixa tensão, e IEC 60034-3, que trata de requerimentos específicos para turbinas, as quais utilizam máquinas síncronas. Além disso, o método proposto é aplicável a conversores PWM trifásicos operando em sistema de três ou de quatro fios.

A seguir será apresentada uma revisão bibliográfica relativa aos métodos de sincronização em malha aberta, que utilizam as tensões da rede elétrica como referência para obtenção dos sinais de sincronização. Serão apresentadas suas principais particularidades, vantagens e desvantagens, segundo as características desejáveis apresentadas anteriormente.

1.2 Revisão Bibliográfica

Várias técnicas de sincronização de conversores PWM trifásicos conectados a rede elétrica são propostas na literatura. Estas podem ser classificadas em dois grupos principais:

- (i) Métodos de sincronização em malha fechada;
- (ii) Métodos de sincronização em malha aberta.

1.2.1 Métodos de Sincronização em Malha Fechada

Estes apresentam como principal característica a obtenção do ângulo de sincronização através de uma estrutura em malha fechada, a qual possibilita que o valor estimado do ângulo de fase rastreie o valor real do ângulo. Entre os métodos desenvolvidos em malha fechada destacam-se os que utilizam um laço de sincronização de fase (*PLL*) [12-19], cuja estrutura básica é apresentada no diagrama de blocos da Figura 1. 1.

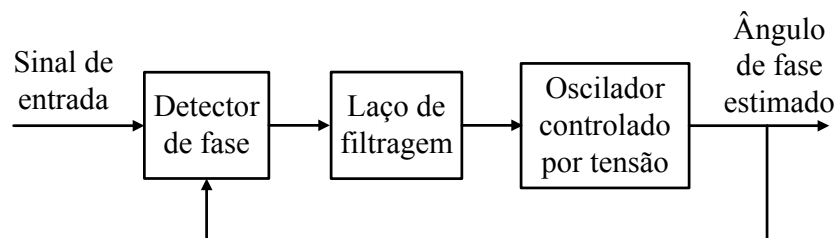


Figura 1. 1 – Diagrama em blocos da estrutura básica do método em malha fechada que utiliza laço de sincronização de fase (*PLL*).

Embora os métodos em malha fechada tenham baixa sensibilidade a variações de frequência da rede, a relação entre uma boa característica de filtragem de distorções provindas da rede e um tempo de execução adequado para determinada aplicação sempre devem ser considerados. Além disso, cuidados devem ser tomados com o

fenômeno chamado de escorregamento de ciclo, o qual geralmente pode estar presente em métodos em malha fechada que utilizam *PLL* [20].

1.2.2 Métodos de Sincronização em Malha Aberta

Nestes métodos o ângulo de sincronização ou o vetor de sincronização normalizado é obtido diretamente a partir das tensões da rede [3, 4, 6], ou pela estimação das tensões da rede [9, 10] ou ainda a partir do fluxo virtual [5, 7, 8], obtido pela filtragem das tensões da rede. Além destes, destacam-se os algoritmos que utilizam filtro de Kalman [6] ou método dos mínimos quadrados (*least-square*) [21], porém estes dois últimos métodos apresentam um grau de complexidade maior se comparado aos anteriormente citados.

1.2.2.1 Principais Métodos de Sincronização em Malha Aberta a partir da Medição das Tensões da Rede

Os principais métodos em malha aberta considerando que, o vetor de sincronização normalizado é obtido diretamente a partir das tensões da rede são:

1.2.2.1.1 Estrutura de Referência Síncrona Modificada

O método de estrutura de referência síncrona modificada (*MSRF - modified synchronous reference frames*) [3, 4] pode ser obtido a partir das componentes do vetor das tensões de fase v_{abc} em um sistema trifásico. Considerando que a soma das tensões de fase é nula, a seguinte representação em coordenadas estacionárias *abc* é obtida:

$$\mathbf{v}_{abc} = \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}. \quad (1.1)$$

Com base em uma transformação linear do espaço $\mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{R}^2$, ou seja, de coordenadas estacionárias abc para $\alpha\beta$, utilizando a matriz $\mathbf{T}_{\alpha\beta}$, o vetor \mathbf{v}_{abc} pode ser representado pelo vetor $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$, ou seja:

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \mathbf{T}_{\alpha\beta} \mathbf{v}_{abc}, \quad (1.2)$$

onde:

$$\mathbf{v}_{\alpha\beta} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}; \quad \mathbf{T}_{\alpha\beta} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}. \quad (1.3)$$

Posteriormente, o vetor $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$, conforme mostrado na Figura 1. 2 é representado em um sistema de coordenadas síncronas dq , estabelecido pela rotação dos eixos α e β de um ângulo θ .

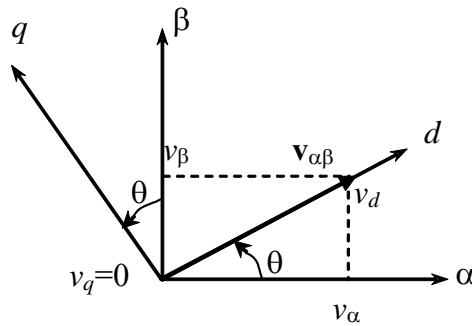


Figura 1. 2 – Rotação do vetor de tensão do sistema de coordenadas $\alpha\beta$ para o sistema de coordenadas dq .

Alinhando o eixo d da Figura 1. 2 com o vetor de tensão $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$, no plano $\alpha\beta$, são possível obter as componentes normalizadas do vetor de sincronização em coordenadas $\alpha\beta$. Tais componentes, geralmente, são o seno e co-seno utilizados nas transformações de coordenadas síncronas dq , ou seja:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{v_\beta}{v_{\alpha\beta}} ; \text{cos}(\theta) = \frac{v_\alpha}{v_{\alpha\beta}}, \quad (1.4)$$

onde, $v_{\alpha\beta}$ é o módulo da Norma Euclidiana do vetor $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$, dado por:

$$v_{\alpha\beta} = \|\mathbf{v}_{\alpha\beta}\|_2 = \sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}; \quad (1.5)$$

sendo $\theta=2\pi ft$ na equação (1.4), e f é a frequência fundamental da tensão da rede assumida ser constante.

A representação em diagrama de blocos do método de sincronização *MSRF* é mostrada na Figura 1. 3.

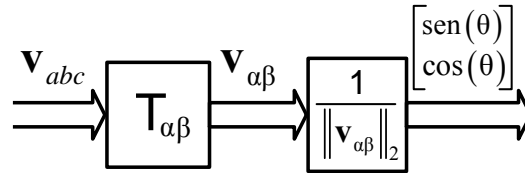


Figura 1. 3 – Diagrama de blocos do método de sincronização *MSRF*.

Como vantagem este método apresenta grande simplicidade estrutural, o que reduz o tempo de processamento do algoritmo desenvolvido considerando uma implementação em DSPs, porém, deve ser ressaltado que este método é sensível a presença de desequilíbrios e harmônicos que possam se fazer presentes nas tensões da rede.

1.2.2.1.2 Método Utilizando Filtros Passa-Baixas

O método de sincronização que utiliza filtros passa-baixas (*LPF-B, low-pass filter based*), apresenta estrutura semelhante ao método *MSRF*, porém com a adição de filtros passa-baixas de 1ª ordem nas componentes do vetor de tensão $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$, conforme bloco *LPF* apresentado na Figura 1. 4. Tais filtros são projetados em uma frequência de corte entre 0,1 e 25 Hz segundo [6].

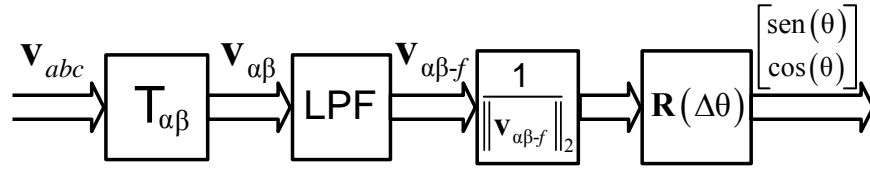


Figura 1. 4 – Diagrama de blocos do método de sincronização *LPF-B*.

Como vantagens este método atenua as componentes harmônicas provenientes das tensões da rede, porém, é sensível a desequilíbrios e variações de frequência e é mais complexo que o método *MSRF*. Logo, existe um compromisso entre resposta transitória e sensibilidade da matriz $\mathbf{R}(\Delta\theta)$ com a frequência [6].

1.2.2.1.3 Método dos Vetores Filtrados no Espaço $\alpha\beta$

O método de sincronização utilizando filtros passa-baixas para os vetores no espaço $\alpha\beta$ (*SVF – Space Vector Filter*) é baseado no fato de que as componentes fundamentais das tensões em coordenadas $\alpha\beta$ do vetor $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$ são dependentes uma da outra, podendo ser expressas como um vetor de tensão girante. A Figura 1. 5 apresenta o diagrama de blocos do método de sincronização *SVF*.

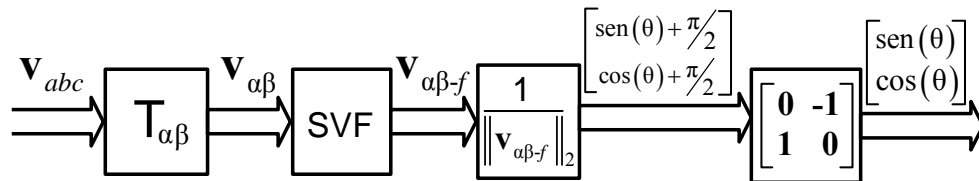


Figura 1. 5 – Diagrama de blocos do método de sincronização *SVF*.

As equações do filtro dadas em [6] e representadas em variáveis de estado, pelo bloco *SVF* na Figura 1. 5 são:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{SVF_a\beta}(k+1) &= \mathbf{G}_{SVF} \mathbf{x}_{SVF_a\beta}(k) + \mathbf{H}_{SVF} \mathbf{v}_{a\beta}(k); \\ \mathbf{y}_{SVF_a\beta}(k) &= \mathbf{C}_{SVF} \mathbf{x}_{SVF_a\beta}(k) + \mathbf{D}_{SVF} \mathbf{v}_{a\beta}(k); \end{aligned} \quad (1.6)$$

onde:

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_{SVF} &= \gamma \mathbf{R}(\omega_g T_s); \mathbf{H}_{SVF} = \begin{bmatrix} 1-\gamma & 0 \\ 0 & 1-\gamma \end{bmatrix}; \\ \mathbf{C}_{SVF} &= \gamma \mathbf{R}(\omega_g T_s); \mathbf{D}_{SVF} = \begin{bmatrix} 1-\gamma & 0 \\ 0 & 1-\gamma \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (1.7)$$

γ é definido como fator de ponderação e ω_g é a frequência angular da rede.

Este método tem a característica de rotacionar o seno e co-seno de um ângulo de 90° , sendo necessário à inclusão de uma matriz que realize a inversão dos sinais, ou seja, seno por co-seno e vice-versa.

Este método reduz o impacto de possíveis componentes harmônicos presentes nas tensões da rede, não introduzindo deslocamentos de fase como o método anterior. Entretanto, deve-se salientar que este método é mais complexo que o método *MSRF*, além de ser sensível a desequilíbrios e variações de frequência nas tensões da rede.

1.2.2.1.4 Método dos Vetores Filtrados no Espaço $\alpha\beta$ Modificado

Este método apresenta o mesmo princípio do método anterior, no entanto, é adicionado um algoritmo de adaptação a variações de frequência da rede conforme Figura 1. 6. Este algoritmo, chamado *Modified Space Vector Filter (MSVF)*, baseia-se na comparação entre a norma Euclidiana das componentes do vetor $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$ e do próprio vetor filtrado $\mathbf{v}_{\alpha\beta-f}$. O resultado desta comparação, ou seja, o sinal de erro passa por um filtro passa-baixa (*LP*), a fim de atenuar as oscilações provenientes das componentes do vetor $\mathbf{v}_{\alpha\beta}$, visto que, estas componentes podem apresentar componentes harmônicas. Então a variável de saída do filtro passa ainda por um controlador proporcional-integral (PI), a fim de garantir erro em regime permanente nulo, onde é obtida a variação da frequência estimada da rede, $\Delta\hat{\omega}_r$. Esta é somada a frequência nominal da rede, ω_r , a fim de se

obter a frequência estimada real da rede, $\hat{\omega}_r$, onde esta por sua vez é atualizada no projeto dos filtros passa-baixas implementados no bloco *SVF* da Figura 1. 6.

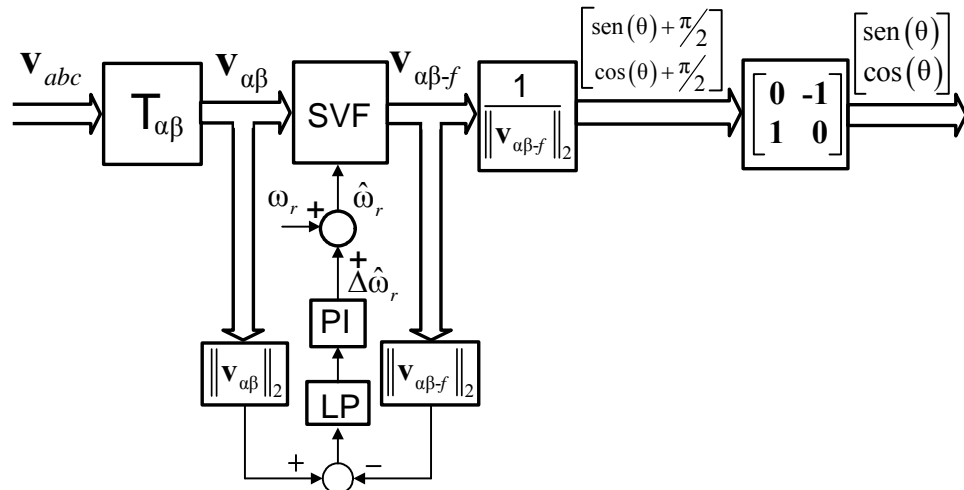


Figura 1. 6 – Diagrama de blocos do método de sincronização *MSVF*.

Como vantagem adicional ao método anterior, o método *MSVF* adapta os parâmetros do filtro *SVF* na presença de variações da frequência da rede, onde tais variações são originadas, principalmente, devido à retirada de grandes cargas do sistema ou abertura de linhas de transmissão ou distribuição de energia [2]. Este método, porém, apresenta grau de complexidade maior que os métodos anteriores e é sensível a desequilíbrios nas tensões da rede.

1.2.2.1.5 Método de Sincronização Utilizando Filtro de Kalman Estendido

A técnica do Filtro de Kalman Estendido (*EKF-Extend Kalman Filter*) é usada para estimar os parâmetros e variáveis em aplicações de sistemas de telecomunicações, sistemas de potência e em sistemas de acionamento. Além disso, também é utilizado para detectar harmônicos [22, 169] nas tensões da rede. Na aplicação em questão, este

método é utilizado para estimar a amplitude, frequência e ângulo do vetor de estados das tensões da rede, o qual é dado por:

$$\mathbf{x}_{EKF} = \begin{bmatrix} v_q & \theta & \omega_r \end{bmatrix}^T. \quad (1.8)$$

onde v_q , θ e ω_r são a amplitude, fase e frequência do vetor de tensão da rede respectivamente.

Considerando o modelo das tensões da rede em coordenadas estacionárias $\alpha\beta$ e representando-o por equações de estado no domínio discreto tem-se:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{EKF_a\beta}(k+1) &= \mathbf{G}_{EKF} \mathbf{x}_{EKF_a\beta}(k) + \mathbf{v}(k); \\ \mathbf{y}_{EKF_a\beta}(k) &= \mathbf{C}_{EKF} \mathbf{x}_{EKF_a\beta}(k) + \mathbf{w}(k); \end{aligned} \quad (1.9)$$

onde:

$$\mathbf{G}_{EKF} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & T_s \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{y}_{EKF_a\beta}(k) = \begin{bmatrix} v_\alpha(k) \\ v_\beta(k) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{C}_{EKF} = \begin{bmatrix} x_1(k) \cos(x_2(k)) \\ x_1(k) \sin(x_2(k)) \end{bmatrix}; \quad (1.10)$$

e $\mathbf{v}(k)$ e $\mathbf{w}(k)$ são vetores associados ao ruído do processo e de medida respectivamente.

O método *EKF* apresenta melhor desempenho em termos de variação de frequência e deslocamento de fase [6], porém requer um tempo de processamento maior para execução da rotina [16]. Isto pode representar um problema de implementação se uma alta frequência de amostragem é requerida, por exemplo, para aplicações em filtros ativos de potência. Além disso, este método, assim como os demais, é sensível a desequilíbrios nas tensões da rede.

1.2.2.1.6 Método dos Mínimos Quadrados Recursivo

Este método de sincronização é fundamentado na estimação do ângulo de sincronização utilizando o método dos mínimos quadrados recursivo (*WLSE- Weighted Least-Square Estimation*). Seja um sistema trifásico a três fios onde as tensões da rede

apresentam desequilíbrio, é possível representar estas tensões em coordenadas estacionárias $\alpha\beta$, a partir de suas componentes de seqüência positiva e negativa no domínio de tempo contínuo por:

$$\mathbf{y}_{WLSE} = \mathbf{H} \mathbf{x}_{WLSE}; \quad (1.11)$$

onde:

$$\mathbf{y}_{WLSE} = \begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}_{WLSE} = \begin{bmatrix} v_d^p & v_q^p & v_d^n & v_q^n \end{bmatrix}; \quad (1.12)$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) & \text{sen}(\omega t) \\ \text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) & -\text{sen}(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}$$

A partir da escolha de uma dada função custo, como a dada em [21], tem-se:

$$J[\mathbf{x}_{WLSE_i}] = \sum_{j=0}^i \lambda^{i-j} [\mathbf{y}_{WLSE_j} - \mathbf{H} \mathbf{x}_{WLSE_i}]^T \times [\mathbf{y}_{WLSE_j} - \mathbf{H} \mathbf{x}_{WLSE_j}]; \quad (1.13)$$

onde: $\lambda \in (0,1)$ é o fator de ponderação. A solução de $\hat{\mathbf{x}}_{WLSE}(t_i)$, que minimiza a função custo da equação (1.13), é obtida a partir do uso do algoritmo dos mínimos quadrados apresentado em [21] executado recursivamente. Este método de sincronização rejeita o impacto da seqüência negativa e não é sensível a variações de freqüência, porque apresenta um algoritmo de adaptação de freqüência, conforme definido pelas equações abaixo:

$$\hat{\phi}(t) = \Delta\omega\tau + \hat{\phi}(t-1) \quad (1.14)$$

onde: $\Delta\omega = \omega - \hat{\omega}$ e $\tau = t - (t-1)$. Sendo a condição necessária que $\Delta\hat{\phi} \equiv \hat{\phi}(t) - \hat{\phi}(t-1) = 0$ e que, $\Delta\omega = 0$, isto é, $\hat{\omega} = \omega$.

Entretanto, como desvantagem não reduz o impacto da presença de possíveis distorções harmônicas presentes nas tensões da rede e o algoritmo de detecção da freqüência apresenta transitórios de longa duração em comparação com os demais métodos que realizam a adaptação de freqüência. Além disso, devido à complexidade do algoritmo, sua operação em freqüências de amostragem elevada, pode tornar difícil a implementação deste método em determinados processadores de sinais digitais [16].

Com base na revisão bibliográfica realizada em termos dos principais métodos de sincronização em malha aberta baseados na medição das tensões da rede, observou-se que, nenhum atende integralmente as características desejáveis requeridas para um algoritmo de sincronização, principalmente no que diz respeito à presença de distúrbios na rede elétrica. Além disso, quase a totalidade dos métodos não leva em conta no seu desenvolvimento a possível presença de desequilíbrios nas tensões da rede, a não ser o último método apresentado, porém este não reduz o impacto da presença de harmônicos nas tensões da rede. A Tabela 1 apresenta um resumo comparativo entre os principais métodos de sincronização em malha aberta com medição da tensão da rede.

Tabela 1– Resumo Comparativo dos Principais Métodos de sincronização em Malha Aberta a partir da Medição das Tensões da Rede

Características Desejadas Métodos	Simplicidade Estrutural	Rejeição de Harmônicos	Rejeição de Desequilíbrios	Adaptabilidade a Variações de Frequência e Angulares
<i>MSRF</i>	Alta	Não possui	Não possui	Não necessita
<i>LPF-B</i>	Média	Possui	Não possui	Não possui
<i>SVF</i>	Média	Possui	Não possui	Não possui
<i>MSVF</i>	Média	Possui	Não possui	Possui
<i>EKF</i>	Baixa	Possui	Não possui	Possui
<i>WLSE</i>	Baixa	Não possui	Possui	Possui

Logo, no intuito de propor uma solução alternativa para os métodos de sincronização em malha aberta propostos e, além disso, atender as características desejadas citadas anteriormente, um novo método de sincronização em malha aberta será proposto no Capítulo 2 desta tese.

1.3 Objetivos do Trabalho

Os objetivos gerais desta tese são:

- i) Desenvolver, simular e implementar um novo método de sincronização em malha aberta aplicado a conversores PWM trifásicos a três fios que tenha capacidade de operar sob condições de desequilíbrios, distorções harmônicas e variações de frequência nas tensões da rede elétrica, sendo esta uma contribuição original desta Tese;
- ii) Estender o novo método de sincronização em malha aberta desenvolvido com aplicação deste para conversores PWM trifásicos a quatro fios que tenha capacidade de operar sob condições de desequilíbrios, distorções harmônicas e variações de frequência nas tensões da rede elétrica;
- iii) Definir, simular e implementar duas aplicações relativas a conversores PWM trifásicos, nas quais possam ser utilizado o método de sincronização proposto, sendo uma destas, retificadores PWM trifásicos a três fios e a outra filtros ativos de potência paralelos a quatro fios;
- iv) Definir, simular e implementar técnicas de controle de corrente, que possam ser usadas nas duas aplicações selecionadas. Ainda, deve-se levar em conta a utilização de técnicas que apresentem como característica principal a simplicidade de implementação dos algoritmos relacionados às ações de controle das mesmas e que possibilitem a utilização do método de sincronização proposto;
- v) Realizar a análise do desempenho das técnicas de controle de corrente em termos do fator de potência, fator de deslocamento, taxa de desequilíbrio, valor *rms* do erro do controlador em relação a sua referência, taxa de distorção harmônica total para a aplicação relacionada ao retificador PWM trifásico implementado;

- vi) Realizar a análise do desempenho em termos de taxa de distorção harmônica total e individual de tensão no ponto de conexão comum para a aplicação relacionada ao filtro ativo de potência paralelo implementado;
- vii) Realizar a análise do desempenho dos controladores em termos do esforço computacional necessário para implementação das rotinas em DSPs com aritmética de ponto fixo;
- viii) Definir, simular e implementar uma técnica de controle para regulação de tensão do barramento CC para ambas as aplicações;
- ix) Desenvolver protótipos experimentais que possibilitem a operação tanto com retificador PWM trifásico a três fios quanto como filtro ativo de potência paralelo trifásico a quatro fios, a fim de validar o estudo realizado.

1.4 Contribuições da Tese

As principais contribuições desta tese em termos de originalidade são:

- i) Proposta, desenvolvimento e implementação de um novo método de sincronização em malha aberta de conversores PWM trifásicos a três fios conectados a rede elétrica.
- ii) Extensão do novo método de sincronização proposto para aplicação em conversores PWM trifásicos a quatro fios conectados a rede elétrica.
- iii) Aplicação do método de sincronização proposto em retificadores PWM trifásicos a três fios e filtros ativos de potência trifásicos a quatro fios.

As demais contribuições desta tese são:

- 1) Extensão do método de detecção de tensão a sistemas trifásicos a quatro fios para geração das correntes de referência para filtros ativos de potência, a fim de realizar a compensação de harmônicos nas tensões no ponto de conexão comum e correntes de seqüência zero.

- 2) Extensão do controlador de corrente de tempo mínimo para sistemas trifásicos a quatro fios.
- 3) Desenvolvimento e descrição dos protótipos operando como retificador PWM trifásico a três fios e filtro ativo de potência paralelo trifásicos a quatro fios em baixa potência, os quais têm como propósito principal validar os métodos, controladores e algoritmos desenvolvidos.
- 4) Análise da influência dos sinais de sincronização gerados pelo novo método de sincronização e pelo método de sincronização de estrutura de referência síncrona modificada (*MSRF*), em relação as correntes de entrada drenadas pelo retificador PWM trifásico, e, correntes de referência geradas para compensação de harmônicos em filtros ativos de potência paralelos.

1.5 Organização da Tese

A Tese está organizada como segue:

O Capítulo 1 apresenta uma introdução geral desta Tese que coloca o problema do aumento das distorções harmônicas nas tensões da rede e os principais fatores que contribuí para este aumento. Tais distorções podem provocar distorções nos sinais de sincronização utilizados para sincronizar conversores PWM com a rede elétrica. Foi realizada uma revisão bibliográfica relativa aos métodos de sincronização em malha aberta, os quais utilizam as tensões da rede elétrica como referência para obtenção dos sinais de sincronização, onde foram apresentadas as principais vantagens e desvantagens destes métodos de sincronização segundo determinadas características desejáveis. A partir desta revisão uma tabela comparativa foi gerada a fim de se estabelecer as semelhanças e diferenças entre os métodos e a proposta de um novo método de sincronização.

O Capítulo 2 propõe o desenvolvimento, simulação e implementação de um novo método de sincronização em malha aberta, o qual possibilita a obtenção dos sinais de

sincronização com reduzidas distorções mesmo na presença de harmônicos, variações de frequência e severos desequilíbrios nas tensões da rede. É realizada ainda, a análise do comportamento transitório do novo método sob variações de frequência, amplitude e a presença de harmônicos nas tensões da rede.

No Capítulo 3, primeiramente é estabelecida uma aplicação a três fios para o método de sincronização proposto, constituído de um conversor PWM trifásico a três fios operando como retificador conectado a rede elétrica. Após, são definidos os critérios relevantes para análise de desempenho do retificador PWM trifásico alimentado em tensão. Posteriormente, é abordada a modelagem no domínio discreto para o retificador PWM trifásico, seguido do projeto e implementação da técnica de controle proporcional-integral escolhida para regular as correntes de entrada do retificador. Para a regulação da tensão do barramento CC do conversor é utilizado um servo controlador baseado no controle da potência ativa. São apresentadas as principais características destes controladores, tais como as equações relacionadas à lei de controle e diagramas esquemáticos. Além disso, são apresentados resultados de simulação e experimentais, a fim de validar o estudo realizado em termo dos critérios estabelecidos, tais como, fator de deslocamento, fator de potência, esforço computacional, taxa de desequilíbrio e de distorção harmônica total das correntes de entrada do retificador PWM trifásicos.

No Capítulo 4 é definida uma aplicação a quatro fios para o método de sincronização proposto, constituído de um conversor PWM trifásico a quatro fios operando como filtro ativo de potência paralelo para compensação de harmônicos de tensão no *PCC* e corrente de neutro. Ainda, são definidos os critérios relevantes para análise de desempenho do filtro ativo paralelo alimentado em tensão utilizando o método de sincronização proposto. É abordada a modelagem do sistema no domínio discreto e escolhida a técnica de controle de tempo mínimo para regular as correntes geradas pelo filtro, bem como a utilização de um servo controlador para regulação da tensão do barramento CC do conversor. São apresentadas as principais características destes controladores, tais como as equações relacionadas à lei de controle e diagramas esquemáticos. Além disso, é realizada a extensão do método de detecção de tensão para

sistemas a quatro fios, a fim de gerar as correntes de compensação para filtros ativos de potência paralelos a quatro fios. O controlador com resposta de tempo mínimo também é estendido para sistemas a quatro fios, a fim de regular as correntes de compensação de seqüência zero. Também é realizada a análise da taxa de distorção harmônica total e individual relacionada às tensões do sistema no *PCC*. Resultados experimentais obtidos são apresentados, a fim de validar o estudo realizado em termo dos critérios estabelecidos.

O Capítulo 5 apresenta as principais características dos protótipos implementados, os quais foram construídos com o intuito de validar o estudo e análises realizadas. Estes protótipos têm como aplicações básicas seu funcionamento como retificador PWM trifásico ou filtro ativo de potência paralelo, no qual são empregadas as técnicas de controle de corrente, tensão e geração de referências utilizadas. Uma breve descrição é realizada relativa aos circuitos de medição, de controle, de potência, partida e proteção dos mesmos.

Para finalizar, neste trabalho, serão apresentadas as conclusões gerais relativas ao método de sincronização propostos e suas aplicações a sistemas trifásicos a três e a quatro fios.