



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Faculdade de Engenharia de Bauru



PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Algoritmos para Geração de Referências, Inicialização e Proteção de
um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia

THIAGO MENEZES TERRAZAS

Bauru
2011

THIAGO MENEZES TERRAZAS

Algoritmos para Geração de Referências, Inicialização e Proteção de
um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia

Dissertação apresentada à faculdade de
Engenharia de Bauru para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni

Bauru
2011

Terrazas, Thiago Menezes.

Algoritmos para Geração de Referências,
Inicialização e Proteção de um Condicionador Unificado
de Qualidade de Energia / Thiago Menezes Terrazas,
Bauru, 2011
120f.: il.

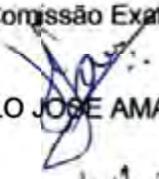
Orientador: Paulo José Amaral Serni

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011

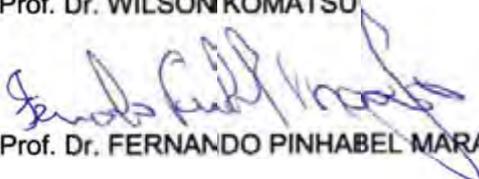
1. Filtros ativos de potência. 2. Geradores de
referência. 3. Qualidade de energia elétrica. I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de
Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE THIAGO MENEZES TERRAZAS, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 19 dias do mês de agosto do ano de 2011, às 13:30 horas, no(a) AMFITEATRO DO STI DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. PAULO JOSE AMARAL SERNI do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. WILSON KOMATSU do(a) Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétrica / Escola Politécnica da USP, Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO do(a) Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Sorocaba, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de THIAGO MENEZES TERRAZAS, intitulado "ALGORITMOS PARA GERAÇÃO DE REFERÊNCIAS, INICIALIZAÇÃO E PROTEÇÃO DE UM CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA". Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.


Prof. Dr. PAULO JOSE AMARAL SERNI


Prof. Dr. WILSON KOMATSU


Prof. Dr. FERNANDO PINHABEL MARAFÃO

Dedicatória

Aos meus pais.

Agradecimentos

Ao prof. Paulo José Amaral Serni, por todo apoio, orientação e conselhos.

Ao prof. Fernando Pinhabel Marafão pelo confiança, incentivos e transferência de conhecimentos.

Ao prof. Wilson Komatsu e prof. Lourenço Matakas Jr. pelo apoio, confiança e incentivo.

Aos amigos com quem trabalhei no LEP e no GASI: Thiago Costa Monteiro, Antonio Ricardo Giaretta, Marco Antonio Oliveira, Rubens Domingos de Miranda e Fernando Ortiz Martinz e Helmo Kelis Morales Paredes, Wesley Angelino de Souza, Danilo Iglesias Brandão e Eduardo Verri Liberado, pela simpatia e amizade. Não seria a mesma coisa sem a colaboração de vocês.

À CAPES, pela bolsa de fomento.

À CPFL, pelo financiamento do projeto P&D171, correlacionado a este trabalho.

AO CNPq pelo financiamento do projeto 554960/2006-0, o qual possibilitou a compra de importantes dispositivos e instrumentos de análise utilizados neste trabalho.

À minha família, que sempre me apoio e suportou em todos os momentos.

“A mente, quando expandida para
dimensões de ideias maiores, jamais
retorna ao tamanho original”

Oliver Wendell Holmes

Resumo da Dissertação apresentada à faculdade de Engenharia de Bauru como parte dos requisitos para obtenção de grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Algoritmos para Geração de Referências, Inicialização e Proteção de um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia

Thiago Menezes Terrazas

Agosto / 2011

Orientador: Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni

Dentre as muitas topologias de condicionadores de energia disponíveis na literatura, destaque especial tem sido dado aos filtros ativos de potência, dispositivos tipicamente eletrônicos, controlados digitalmente. Neste sentido, as topologias mais estudadas são as de filtros ativos paralelos, filtros ativos série e filtros ativos universais (série-paralelo). Neste trabalho, foi dada atenção especial ao estudo de um filtro ativo universal, também conhecido como Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (CUQE) ou em inglês, Unified Power Quality Conditioner (UPQC). Assim, dentre os muitos assuntos que permeiam o projeto e implementação deste dispositivo, este trabalho propõe novos algoritmos para a geração de referência dos conversores eletrônicos, bem como algoritmos de inicialização e proteção do CUQE. Os algoritmos de referência são baseados em técnicas de álgebra vetorial e filtragem digital, enquanto as rotinas de inicialização e proteção visam à solução de problemas de ordem prática, para que o dispositivo possa ser utilizado em ambiente industrial, como produto. Um estudo sobre os controladores de tensão e corrente também foi realizado e as técnicas mais adequadas estão descritas no trabalho. Destaca-se que todos os algoritmos de geração de referência, proteção, inicialização e os controladores foram avaliados e validados por meio de simulações computacionais e resultados experimentais. No caso dos resultados experimentais, foram realizados ensaios em malha aberta para validação dos algoritmos de referência, bem como ensaios em um protótipo de CUQE, de potência igual a 75 kVA, os quais validaram o desempenho de todos os algoritmos desenvolvidos em um dispositivo real para aplicações industriais.

Palavras-chave: Condicionadores Unificados de Energia, Filtros Ativos de Potência, Geradores de Referência, Qualidade de Energia Elétrica, Cargas não lineares.

Abstract of the Dissertation presented to the Department of Electrical Engineering as a partial fulfillment of the requirements for obtaining the degree of Master in Engineering.

Algorithms for Reference Generation, Initialization and Protection for a Unified Power Quality Conditioner

Thiago Menezes Terrazas

August / 2011

Advisor: Prof. Dr. Paulo José Amaral Serni

Among different topologies of power conditioners found in literature, special emphasis has been given to active power filters (typically power electronic devices with digital control). In this sense, the most studied topologies have been the parallel active filters, the series active filters and the unified active filters (series-parallel). In this work, special attention was given to the study of a Unified Power Quality Conditioner (UPQC). Thus, among many issues that underlie the design and implementation of this device, this dissertation proposes new algorithms for the generation of voltage and current references to the applied power converters, as well as new algorithms for the initialization and protection of the UPQC. The reference algorithms are based on vector algebra and digital filtering techniques, while the initialization and protection routines aimed to solve practical problems, so the device can be used in an industrial environment, as a commercial product. The voltage and current controllers were also studied and the most suitable techniques are described. It is noteworthy that all proposed algorithms and controllers have been evaluated and validated by means of computer simulations and experimental results. The experimental validation were performed by means of open loop tests, as well as considering an UPQC prototype (75 kVA rated) in order to validate the overall UPQC development and the performance of the proposed algorithms.

Keywords: Unified Power Quality Conditioner, Power Active Filters, Reference Generator, Power Quality, Non linear Loads.

Lista de Figuras

Figura 1.1 - Compensador Unificado de Qualidade de Energia.	24
Figura 2.1 - Topologias de Inversores: a- Meia Ponte; b- Ponte Completa; c- Trifásico.	32
Figura 2.2 - Configuração VSI.	32
Figura 2.3 - Configuração CSI.	33
Figura 2.4 - Filtro Ativo Série.	33
Figura 2.5 - Filtro Ativo Paralelo.	34
Figura 2.6 - Filtro Ativo Universal.	34
Figura 3.1 - Fluxo de Potência Reativa.	36
Figura 3.2 - Fluxo de Potência Ativa durante Afundamentos de tensão.	37
Figura 3.3 - Fluxo de Potência Ativa durante elevação de tensão.	37
Figura 3.4 - Diagrama fasorial UPQC-Q.	38
Figura 3.5 - Ramo Paralelo próximo a rede.	38
Figura 3.6 - Ramo Paralelo próximo a carga.	38
Figura 4.1 - Diagrama de funcionamento do PLL.	43
Figura 4.2 – Diagrama de bloco do PLL [7].	44
Figura 4.3 - Comportamento durante transitório do PLL para entrada senoidal.	45
Figura 4.4 - Comportamento dos componentes internos do PLL para entrada senoidal.	45
Figura 4.5 - Comportamento durante transitório do PLL para entrada com distúrbios harmônicos.	46
Figura 4.6 - Comportamento dos componentes internos do PLL para entrada com distúrbios.	46
Figura 4.7 - Detector de Amplitude.	47
Figura 4.8 - Diagrama de Bode do FPB.	49
Figura 4.9 - Resposta ao Degrau do FPB.	49
Figura 4.10 - Algoritmo do GRT.	50

Figura 4.11 - Dinâmica do FPB e do Detector de Amplitude quando ocorre uma sobretensão sustentada.	51
Figura 4.12 - Dinâmica do FPB e do Detector de Amplitude quando ocorre uma subtensão sustentada.....	51
Figura 4.13 - O FPB manteve-se estável enquanto ocorria um afundamento trifásico, nota-se que o detector de amplitude (A_v) leva um ciclo (16ms) para convergir a partir do início do distúrbio (63,2s).	52
Figura 4.14 - Algoritmo de obtenção da sequência positiva da corrente, em fase com a tensão.	53
Figura 4.15 - Resultado Carga Reativa para cada fase, os cruzamentos por zero da tensão foram sinalizados por linhas verticais.....	54
Figura 4.16 - Resultado Carga Desequilibrada para cada fase.....	55
Figura 4.17 - Resultado Carga Não Linear para cada fase.	55
Figura 5.1 – Diagrama detalhado do CUQE.....	59
Figura 5.2 - Rotina de Inicialização do ramo Paralelo.	60
Figura 5.3 - Detecção de Presença e Sequência de Fase.	62
Figura 5.4 - Rotina de Pré-carga.	63
Figura 5.5 - Rotina de Desligamento do Ramo Paralelo.	64
Figura 5.6 - Rotina de Proteção do Ramo Paralelo.....	66
Figura 5.7 - Rotina de Inicialização do ramo Série.....	67
Figura 5.8 - Diagrama da rotina de Sobrecorrente.	68
Figura 5.9 - Rotina de Desligamento do Ramo Série.	69
Figura 5.10 - Rotina de Proteção do Ramo Série.....	71
Figura 6.1 - Diagrama esquemático completo do CUQE implementado.	74
Figura 6.2 - Diagrama de Blocos do Controle do Ramo Série[35].....	78
Figura 6.3 - Diagrama de blocos da malha de tensão CC[3].....	79
Figura 6.4 - Diagrama de blocos da malha de corrente[3].	80
Figura 6.5 - Parte frontal, portas abertas.....	80
Figura 6.6 - Conversores da parte traseira, A - Conversor ramo Serie; B - Conversor Ramo Paralelo.....	81
Figura 6.7 - Barramento de acoplamento com a carga.	81
Figura 6.8 - Transformadores de Injeção.	82
Figura 7.1 - a: Carga resistiva; b: Carga não linear.....	84
Figura 7.2 - Fonte California.....	85

Figura 7.3 – PortoSag.	85
Figura 7.4 - Comportamento experimental do VRG durante flutuação de tensão. ...	87
Figura 7.5 - Comportamento experimental do VRG quando ocorre um AMT.	87
Figura 7.6 - Tensão da rede.	88
Figura 7.7 - Resultado do VRG para fase A.	88
Figura 7.8 - Resultado do detector de amplitude e FPB.	88
Figura 7.9 - Tensão da rede.	89
Figura 7.10 – Referência para o Inversor.	89
Figura 7.11 - Soma da referência do filtro e a tensão de entrada, para cada fase, com ajuda do Matlab.	89
Figura 7.12 - Comportamento de uma fase durante SAG.	90
Figura 7.13 - Resultado para AMT, com carga resistiva equilibrada de 5Ω por fase. a: todo o evento; b: Detalhes do Início e C: Detalhes do término.	91
Figura 7.14 - Resultado para AMT desequilibrado, com carga resistiva equilibrada de 15Ω por fase. a: todo o evento; b: Detalhes do Início e C: Detalhes do término.	92
Figura 7.15 - Compensação de Corrente não linear.	93
Figura 7.16 – Resultados para carga não linear, tensão de entrada fase A.	94
Figura 7.17 - Resultado para carga não linear, funcionamento do Ramo Paralelo, correntes de carga e de entrada.	94
Figura 7.18 - Resultados para desequilibrada, tensão de entrada fase A.	95
Figura 7.19 - Resultado para carga desequilibrada, funcionamento do Ramo Paralelo, correntes de carga e de entrada.	95

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais Distúrbios[3][15].....	29
Tabela 2.2 - Níveis de Referência para distorção individuais de ordem ímpares[12].	29
Tabela 2.3 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração[12].	30
Tabela 2.4 – Terminologia [12].....	30
Tabela 2.5 - Valores típicos máximos de tensão e corrente para IGBTs[3].	31
Tabela 4.1- Componentes do sinal de entrada.	47
Tabela 4.2 - Valores da Simulação.	54
Tabela 5.1 - Sinais entre os ramos.....	58
Tabela 6.1 - Parâmetros para o protótipo.....	73
Tabela 6.2 - Valores dos componentes do protótipo.	75
Tabela 6.3 - Especificações do Processador.	76
Tabela 6.4 - Sensores de corrente.	76
Tabela 6.5 - Detalhes dos Sensores de corrente.	76
Tabela 6.6 - Detalhes dos Sensores de tensão.....	77
Tabela 6.7 - Ganhos do Ramo Série.....	78
Tabela 6.8 - Ganhos Aplicados na Malha Anti-Saturação do Transformador.	79
Tabela 6.9 - Ganhos do Ramo Paralelo.	79
Tabela 7.1 - Protótipo em malha aberta com harmônicas.	86
Tabela 7.2 - Protótipo em malha aberta com desbalanço.	86
Tabela 7.3 - Conteúdo Harmônico.	93
Tabela 7.4 - Eficiência do protótipo.	95

Lista de Abreviaturas e Definições

AMT	Afundamento Momentâneo de Tensão
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ATT	Afundamento Temporário de Tensão
Bypass	Circuito de Passagem Livre
C	Capacitor
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
CSI	Current Source Inverter (Inversor Fonte de Corrente)
CUQE	Condicionador Unificado de Qualidade de Energia
DHTT	Distorção Harmônica Total de Tensão
DSP	Digital Signal Processor
DVR	Dynamic Voltage Restorers (Restauradores Dinâmicos de Tensão)
EMT	Elevação Momentânea de Tensão
EPRI	Electric Power Research Institute
ETT	Elevação Temporária de Tensão
FAP	Filtro Ativo de Potência
FP	Fator de Potência
FPB	Filtro Passa Baixa
GASI	Grupo de Automação e Sistemas Integráveis, Unesp/Sorocaba
GRC	Gerador de Referência de Corrente
GRT	Gerador de Referência de Tensão
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
IMT	Interrupção Momentânea de Tensão
ITT	Interrupção Temporária de Tensão

iUPQC	UPQC com a função invertida dos ramos Paralelo e Série
L	Indutor
LEP	Laboratório de Eletrônica de Potência, Poli/USP
PI	Proporcional e Integral
PLL	Phase-Locked-Loop
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
pu	por unidade
PWM	Pulse Width Modulation (Modulação por Largura de Pulso)
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
UCPC	Universal Custom Power Conditioner
UPQC	Unified Power Quality Conditioner
UPQC-Q	UPQC com compensação de reativos diferenciada
UPS	Uninterruptable Power Supplies (Fontes Ininterruptas de Tensão)
VSI	Voltage Source Inverter (Inversor Fonte de Tensão)
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração

ChaveEstatica	Sinal de controle da chave estática
ContatorBypass	Sinal de controle do contator de Bypass
ContatorGeralParalelo	Sinal de controle do contator geral do ramo Paralelo
ContatorPreCarga	Sinal de controle do contator de pré carga
$Cont_{Reset}$	Variável interna, contador das tentativas de reset da placa de erros
$CorrenteParaleloA_{ABS}$	Valor absoluto da corrente aferida no ramo Paralelo, fase A
$CorrenteParaleloB_{ABS}$	Valor absoluto da corrente aferida no ramo Paralelo, fase B
$CorrenteParaleloC_{ABS}$	Valor absoluto da corrente aferida no ramo Paralelo, fase C
Desliga	Sinal Digital, reflete o sinal das botoeiras na porta do painel, indica que o protótipo deve ser ligado
Desligando	Sinal Digital, indica que o processo de desligamento foi inicializado mas ainda não terminou de desligar.

Desligar	Variável Digital, armazena o comando de desligar o ramo Série
Emergência	Sinal Digital, indica a ocorrência da emergência
<i>Erro_{ABS}</i>	Variável interna, calcula a médio da soma dos valores absolutos da corrente do ramo Paralelo
<i>Erro_{Cont}</i>	Variável interna, contador das tentativas de realizar os testes de tensão
ErroTensão	Sinal Digital, indica que os teste de tensão não foram realizados com sucesso
FimPreCarga	Sinal Digital, Indica que o processo de pré carga terminou
HabilitaRampaTensão	Variável digital, controla se a rampa na referência de tensão será ascendente ou descendente
HabilitaRefCorrente	Multiplicador da referência de corrente
Liga	Sinal Digital, reflete o sinal das botoeiras na porta do painel, indica que o protótipo deve ser desligado
LigaChaveEstática	Variável Digital, garante um atraso de um período de amostragem entre a acionamento da chave estática e a aberturado contator de bypass
Ligado	Sinal Digital, indica o protótipo está ligado (já terminou o processo de inicialização)
Ligando	Sinal Digital, indica que o processo de inicialização está ocorrendo
ParaleloLigado	Variável Digital, memória do estado do ramo Paralelo
<i>Rampa</i>	Variável interna, valor multiplicador da referência de tensão, garante entrada e saída suave do inversores do ramo Série
ResetPlacaErros	Controle do reset da placa de erros
Rprot	Sinal de controle do resistor de proteção
SequFase	Sinal Digital, indica sequência correta ou invertida
SobreCorrente	Memória da ocorrência de sobrecorrente
<i>tempDesl</i>	Variável interna, temporizador para limitar o tempo de desligamento
<i>tempDeslMax</i>	Constante, tempo limite para executar o processo de desligamento
<i>Tempo_{Cont}</i>	Variável interna, temporizador para aguardar a comutação do contator de Bypass

<i>TempoContator</i>	Variável interna, temporizador para aguardar a comutação do contator geral do ramo Paralelo
<i>TempoContatorMax</i>	Constante, tempo suficiente para comutação do contator geral do ramo Paralelo
<i>TempoContMax</i>	Constante, tempo suficiente para comutação do contator de Bypass
<i>TempoDet</i>	Variável interna, temporizador dos testes de presença e sequência de fase
<i>TempoPreCarga</i>	Variável interna, temporizador para limitar o tempo de pré carga
<i>TempoPreCargaMax</i>	Constante, tempo limite para o processo de pré carga
<i>TempoRprot</i>	Variável interna, temporizador do tempo de atuação do Rprot
<i>TempoRprotMax</i>	Constante, tempo máximo para utilização do Rprot
<i>TempoRprotMem</i>	Variável, memoriza quanto tempo o Rprot foi utilizado
<i>TempoSobrecorrente</i>	Variável interna, temporizador da sobrecorrente
<i>TempoSobreCorrenteMax</i>	Constante, tempo permitido para sobrecorrente
TerminoEmergencia	Variável Digital, indica o fim da sobrecorrente
<i>V_{CC}</i>	<i>Aquisição do valor de tensão no barramento CC</i>
<i>V_{CC}MAX</i>	Constante, valor limite superior para a tensão no barramento CC
<i>V_{CC}med</i>	Variável interna, indica o calculo do valor médio na tensão do barramento CC
<i>V_{CC}MinEmerg</i>	Constante, valor mínimo de tensão no barramento CC
<i>V_{CC}Nom</i>	Variável interna, Constante, indica o valor nominal da tensão no barramento CC
<i>V_{CC}pre</i>	Constante, indica a tensão mínima para encerrar o processo de pré carga
<i>VCCProt</i>	Constante, valor crítico, se atingido deve desligar o protótipo imediatamente
<i>VCCRampLimit</i>	Constante, valor da tensão no barramento CC onde começa a atuar a proteção por redução da correção do Ramo Série
<i>V_{CC}Ref</i>	Referência para o controlador da tensão do barramento CC

V_{RMSA}	Variável interna, calculo do valor eficaz da tensão da fase A
V_{RMSB}	Variável interna, calculo do valor eficaz da tensão da fase B
V_{RMSC}	Variável interna, calculo do valor eficaz da tensão da fase C
V_{RMSMin}	Constante, indica o valor eficaz mínimo

Lista de Símbolos

I_{Linha}	Corrente da linha
Z_{Linha}	Impedância de Linha
I_{Carga}	Corrente da carga
V_{Carga}	Tensão na carga
V_{Linha}	Tensão fornecida
V_{CUQE}	Tensão de correção
I_{CUQE}	Corrente de correção
Q_{C}	Potência Reativa da Carga
Q_{R}	Potência Reativa da Rede
Q_{CUQE}	Compensação da Potência Reativa
P_{R}	Potência ativa da Rede
P_{C}	Potência ativa consumida pela Carga
P_{Paralelo}	Potência do ramo Paralelo do CUQE
$P_{\text{Série}}$	Potência do ramo Série do CUQE
V_{C1}	Tensão na Carga no instante inicial
V_{C2}	Tensão na Carga durante afundamento
V_{R1}	Tensão da Rede no instante inicial
V_{R2}	Tensão na Rede durante afundamento
I_{C1}	Corrente na Carga no instante inicial
I_{C2}	Corrente na Carga durante afundamento
I_{inj1}	Corrente necessária para correção de reativos no instante inicial

I_{inj2}	Corrente necessária para correção de reativos durante o afundamento
V_{inj}	Tensão utilizada para correção do afundamento
$\mathbf{x} = [x_a \ x_b \ x_c]$	Vetor de sinais medidos
$\mathbf{u} = [u_a \ u_b \ u_c]$	Vetor de sinais senoidais com mesma frequência, sequência e sincronismo do sinal de entrada
$\mathbf{u}_{\perp} = [u_{\perp a} \ u_{\perp b} \ u_{\perp c}]$	Vetor de sinais senoidais ortogonais à \mathbf{u}
dp	Produto escalar
Δw	Erro da frequência angular
w	Frequência angular
θ	Ângulo instantâneo
f_n	Frequência nominal
$H_{planta}(s)$	Modelo matemático da planta
$H_{ma}(s)$	Controle em malha aberta
$H_{mf}(s)$	Controle em malha fechada
W_n	Frequência angular nominal
ξ	Amortecimento
K_P	Ganho proporcional
K_I	Ganho integral
$y[k]$	Resposta do filtro digital para o instante k
$y[k-1]$	Resposta do filtro digital para o instante k-1
$x[k]$	Sinal de entrada do filtro digital para o instante k
$x[k-1]$	Sinal de entrada do filtro digital para o instante k-1
A_v	Amplitude da sequência positiva do sinal de entrada
A'_v	Amplitude da sequência positiva do sinal de entrada após o filtro digital
va, vb, vc	Tensão de entrada
va*, vb*, vc*	Valores ideais para a tensão de entrada

$v_a^{\text{filtro}}, v_b^{\text{filtro}}, v_c^{\text{filtro}}$	Referências para o ramo Série
i_{la}, i_{lb}, i_{lc}	Corrente da Carga
i_a^*, i_b^*, i_c^*	Valores ideais para a corrente da Carga
$i_a^{\text{filtro}}, i_b^{\text{filtro}}, i_c^{\text{filtro}}$	Referência para o ramo Série
Rprot	Resistor de proteção do barramento CC
Rprecarga	Resistor de carga do barramento CC
KIF	Ganho do sensor de corrente do ramo Série
KVO	Ganho do sensor de tensão do ramo Série
KPWM	Ganho do inversor
KV	Ganho do sensor de tensão do barramento CC
K	Ganho do sensor de corrente no ramo Paralelo
$S_{3\phi\text{carga}}$	Potência aparente da carga
$V_{sag3\phi}$	Mínima tensão da rede nas três fases durante afundamento
$V_{sag1\phi}$	Mínima tensão da rede em uma das fases afundamento
Δt	Duração do evento

Sumário

Dedicatória	5
Agradecimentos	6
Resumo	8
Abstract	9
Lista de Figuras	10
Lista de Tabelas	13
Lista de Abreviaturas e Definições	14
Lista de Símbolos	19
1. Introdução	23
1.1. Contextualização do trabalho com outros projetos	25
1.2. Estrutura do trabalho	25
2. Qualidade e Condicionamento de Energia Elétrica.....	27
2.1. Distúrbios de Corrente e Tensão	28
2.2. Normalização	28
2.3. Condicionadores de Energia Elétrica.....	30
2.3.1. Princípios de Compensação Ativa.....	31
2.3.2. Filtro Ativo Série	33
2.3.3. Filtro Ativo Paralelo	33
2.3.4. Filtro Ativo Universal.....	33
2.4. Conclusão.....	34
3. Considerações sobre o fluxo de potência no CUQE	35
3.1. Fluxo de potência	36
3.2. Posição do ramo Paralelo.....	38
3.3. Conclusão.....	39
4. Algoritmos de Referência.....	41

4.1. Phase-Locked-Loop (PLL)	42
4.1.1. Controlador PI	42
4.1.2. Resultados de Simulações	44
4.2. Gerador de Referência de Tensão (GRT).....	47
4.2.1. Detector de Amplitude da Sequência Positiva.....	47
4.2.2. Detector de Variação Momentânea de Tensão	48
4.2.3. Diagrama do algoritmo	49
4.2.4. Resultados de Simulação	51
4.3. Gerador de Referência de Corrente (GRC)	52
4.3.1. Diagrama do Algoritmo.....	52
4.3.2. Justificativa Algébrica	53
4.3.3. Resultados de simulação	54
4.4. Conclusão.....	55
5. Rotinas de Inicialização e Proteção para o CUQE.....	57
5.1. Rotinas do Ramo Paralelo	58
5.1.1. Inicialização.....	58
5.1.2. Detecção de Sequência e Presença de Fase	61
5.1.3. Rotina de Pré Carga.....	61
5.1.4. Rotinas de Desligamento	63
5.1.5. Rotinas de Proteção	64
5.2. Rotinas do Ramo Série.....	65
5.2.1. Inicialização.....	65
5.2.2. Rotina de Sobre Corrente.....	68
5.2.3. Rotina de Desligamento	69
5.2.4. Rotina de Proteção.....	69
5.3. Conclusão.....	70
6. Protótipo do CUQE	73
6.1. Detalhes do protótipo.....	73
6.2. Componentes	75
6.3. Elementos de Controle	75
6.4. Controladores	77
6.4.1. Ramo Série	77
6.4.2. Ramo Paralelo.....	79
6.5. Ilustrações do Protótipo	80

6.6. Conclusão.....	82
7. Resultados Experimentais	83
7.1. Bancada de Testes.....	84
7.1.1. Fonte de Potência Programável	84
7.1.2. Porto Sag	85
7.2. Resultados em Malha Aberta do GRT	86
7.3. Ramo Série.....	90
7.4. Ramo Paralelo	93
7.5. Ensaio de Certificação (IEE/USP).....	95
7.6. Conclusão.....	96
8. Conclusões	97
8.1. Proposta de Trabalhos Futuros	98
Apêndices.....	99
Referências	117

1. Introdução

Este capítulo apresenta as principais motivações e objetivos do trabalho, assim como um breve resumo sobre a estrutura da dissertação. Também conta com uma contextualização de trabalhos correlatos, que inspiraram o desenvolvimento desta dissertação e possibilitaram a validação experimental dos algoritmos propostos.

O crescimento contínuo da utilização de cargas eletrônicas não lineares, como por exemplo, computadores, lâmpadas fluorescentes e inversores de frequência, degradam tanto a corrente drenada como a tensão fornecida nos sistemas elétricos atuais. Também neste contexto, a expansão do consumo de energia gera a necessidade do estudo de estratégias de otimização dos sistemas de transmissão e distribuição de energia.

Além disto, cargas sensíveis podem apresentar funcionamento inadequado ou mesmo parar de funcionar devido a distúrbios de Qualidade de Energia (QEE), sejam eles distúrbios de regime permanente ou distúrbios transitórios. O próximo capítulo trará um breve resumo sobre os principais tipos de distúrbios de QEE, sua classificação e possíveis técnicas de compensação dos mesmos.

Em geral, o uso de dispositivos condicionadores de energia minimiza o impacto dos distúrbios no sistema e nas cargas sensíveis. Mesmo apresentando diversas deficiências na operação [1], os dispositivos mais utilizados ainda são baseados em elementos passivos (fixos ou chaveados), tais como: bancos de capacitores, filtros sintonizados, capacitores chaveados por tiristores, reatores chaveados por tiristores, dentre outros. Isto se deve basicamente aos custos de implementação de tais compensadores, os quais ainda são bem menores do que os de condicionadores eletrônicos de energia, em virtude do custo dos semicondutores de potência no Brasil.

Entretanto, é crescente o interesse por tais dispositivos eletrônicos. Os dispositivos mais conhecidos e utilizados são as Fontes Ininterruptas de Tensão (UPS, do inglês *Uninterruptable Power Supplies*), os Filtros Ativos de Potência (paralelo, série ou universal), os Restauradores Dinâmicos de Tensão (DVR, do inglês *Dynamic Voltage Restorers*), dentre outros.

As UPSs e os DVRs são normalmente sugeridos para solução de problemas relacionados a distúrbios da tensão, de forma que cargas sensíveis ou prioritárias não sofram a influência de eventuais distúrbios na tensão de fornecimento. A principal diferença entre os dois dispositivos baseia-se na quantidade de energia armazenada para suprir a carga durante eventuais falhas na tensão de fornecimento. Os DVRs normalmente armazenam energia suficiente para suprir as cargas por pequenos intervalos de tempo (até poucos segundos), enquanto as UPSs podem ser projetadas para suprir a carga por períodos prolongados (de minutos a horas). Ambos dispositivos são conectados em série entre a fonte e a carga.

Os Filtros Ativos de Potência por sua vez, podem ser conectados em série ou em paralelo com a carga, de forma a compensar distúrbios de tensão ou corrente, respectivamente. A configuração mais completa de filtro ativo seria um filtro unificado, o qual possui conversores eletrônicos (inversores) tanto em série, quanto em paralelo com as cargas, acoplados entre si através de um barramento comum de corrente contínua (CC). Em geral, os filtros ativos de potência não possuem grande capacidade de armazenamento de energia, pelo contrário, são conhecidos por sua capacidade de compensar reativos, harmônicos e desequilíbrios, sem a necessidade teórica de armazenadores de energia [2].

O objetivo de um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (CUQE) é garantir que tanto a tensão na carga, quanto a corrente que circula pela rede após a compensação, sejam senoidais, equilibradas e em fase entre si. Isto significa dizer que o CUQE é utilizado para garantir que tanto a tensão quanto a corrente em um determinado ponto de acoplamento comum se aproximem das condições ideais de fornecimento e consumo de energia [3]. A Figura 1.1 ilustra o diagrama esquemático de um CUQE conectado a uma rede elétrica.

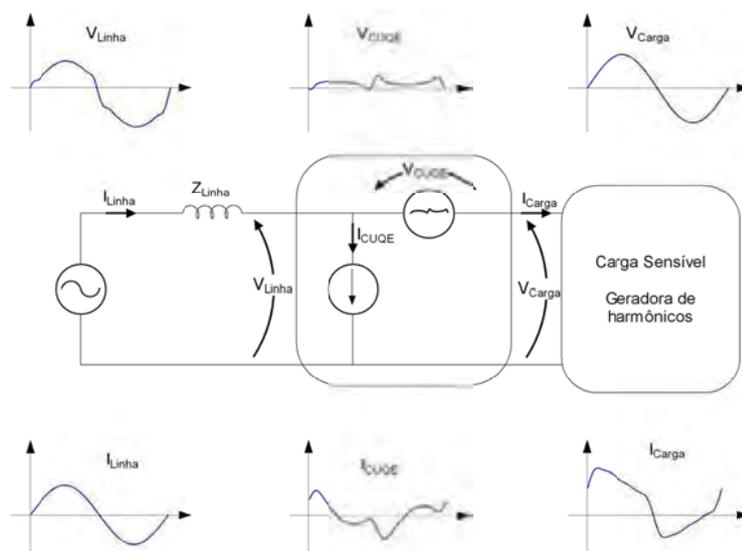


Figura 1.1 - Compensador Unificado de Qualidade de Energia.

Neste contexto, este trabalho visa o estudo das características de projeto e implementação de um CUQE. Após uma análise da literatura disponível sobre o assunto, observou-se que muitos trabalhos tratam das estratégias de controle das

variáveis de saída dos conversores [4] e [5], bem como estratégias de geração das referências para o controle [6], [7] e [8]. Neste sentido, o presente trabalho buscou aplicar e avaliar o desempenho de técnicas de controle multimalhas para o controle das variáveis de saída dos conversores série e paralelo do CUQE [9] e [10]. Além disto, o trabalho propõe algoritmos alternativos para a geração de referência dos conversores, os quais, como será demonstrado, apresentam bom desempenho dinâmico e de regime permanente e são de fácil implementação.

Vale também destacar que poucos trabalhos encontrados na literatura apresentavam critérios de projeto dos elementos de hardware dos filtros, bem como sobre as rotinas de inicialização e proteção, necessárias à implementação prática do dispositivo. Tais tópicos também foram abordados no trabalho e no caso dos procedimentos de inicialização e proteção, algumas rotinas também foram propostas e validadas através de simulações computacionais e resultados experimentais.

1.1. Contextualização do trabalho com outros projetos

Conforme mencionado anteriormente, todos os algoritmos e rotinas propostas neste trabalho foram avaliados experimentalmente, entretanto, é importante atestar que o trabalho de validação experimental foi realizado parte no Laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI) da UNESP de Sorocaba, parte no Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP) da Poli/USP, através de colaborações previamente estabelecidas.

Além disto, vale destacar que os protótipos e demais equipamentos utilizados para a validação dos algoritmos e demais rotinas foram financiados basicamente por dois projetos de pesquisa: Um deles financiado pelo CNPq (Condicionador Modular de Energia Elétrica – GASI), o qual permitiu a montagem de um condicionador reconfigurável de energia que pode ser utilizado como filtro ativo paralelo, série, unificado, UPS, DVR, etc. O outro projeto foi financiado pela CPFL Energia (PD171 – Cabeça de Série do Mini-DVR) e realizado através de parceria entre USP, UNESP e Expertise Engenharia. Neste segundo projeto, foram implementados alguns protótipos de restauradores dinâmicos de tensão, dentre os quais, dois que possuem características básicas de um CUQE.

1.2. Estrutura do trabalho

A estrutura desta dissertação de mestrado está dividida em 8 capítulos, como segue:

- Capítulo 1: apresenta uma breve introdução sobre o trabalho, suas motivações e principais objetivos, bem como uma explanação sobre projetos correlatos;
- Capítulo 2: traz uma revisão sobre qualidade de energia elétrica, resume a norma brasileira relacionada ao assunto e apresenta o funcionamento dos

filtros ativos de potência, capazes de reduzir prejuízo com os distúrbios discutidos;

- Capítulo 3: discute características particulares dos Condicionadores Unificados de Qualidade de Energia, ilustra o funcionamento durante a correção de variações de tensão e explica algumas estratégias de funcionamento existentes na literatura;
- Capítulo 4: apresenta os algoritmos *Phase-Locked-Loop*, Gerador de Referência de Tensão e Gerador de Referência de Corrente, que regem o funcionamento de Condicionadores Unificados de Energia Elétrica, detalhando o funcionamento de cada um deles e apontando as diferenças dos demais existentes;
- Capítulo 5: propõe rotinas de inicialização, desligamento e proteção para equipamentos Condicionadores Unificados de Energia, estas rotinas foram aplicadas no protótipo utilizado nesta dissertação, trazendo agilidade e segurança para sua operação;
- Capítulo 6: apresenta detalhes e ilustrações do protótipo de Condicionador Unificado de Qualidade de Energia utilizado para validar o funcionamento dos algoritmos propostos nesta dissertação;
- Capítulo 7: apresenta a bancada de testes e os resultados obtidos com o protótipo de Condicionador Unificado de Qualidade de Energia, validando o funcionamento do protótipos e assim dos algoritmos;
- Capítulo 8: consolida as conclusões obtidas durante a dissertação, indica trabalhos futuros para solucionar questões ainda não sanadas.

2. Qualidade e Condicionamento de Energia Elétrica

Problemas relacionados com qualidade de energia elétrica vêm se tornando cada vez mais importantes devido à mudança no perfil das cargas elétricas, crescimento do consumo e também, devido às características das modernas redes elétricas com a possibilidade de geração distribuída (baixo nível de curto circuito). Neste capítulo serão discutidos os principais distúrbios relacionados tanto a tensão como a corrente elétrica, normalização e condições ideais. Também serão discutidas possíveis soluções para os problemas de QEE, dando atenção especial aos condicionadores eletrônicos de energia.

Como mencionado no capítulo anterior, a expansão da utilização de cargas não lineares, como inversores de frequência e elementos de automação em geral nas indústrias, ou computadores, lâmpadas fluorescentes e demais equipamentos eletrônicos nos consumidores residenciais, os problemas de qualidade de energia elétrica (QEE) tendem a se agravar.

Entre diversas interpretações na literatura o conceito de QEE pode ser considerado qualquer problema manifestado na tensão, corrente ou desvio de frequência, que resulte em falha ou má operação de equipamentos consumidores ou das redes de distribuição de energia [11].

Normas e regulamentações vêm surgindo ao redor do mundo, assim como pesquisas acadêmicas, com a intenção de monitorar e/ou mitigar os problemas de QEE [12], [13] e [14]. Microcontroladores e microprocessadores de alta performance são utilizados para, através de análise de sinais, identificar os distúrbios.

Para um sistema trifásico em regime permanente, consideram-se como condições ideais de fornecimento e consumo de energia, tensões e correntes senoidais, com frequência constante, equilibradas, simétricas e com amplitude nominal constante, além de fator de potência unitário [3].

Além dos distúrbios de regime permanente, tais como distorções de forma de onda, desequilíbrios ou circulação de reativos, a entrada ou saída de grandes cargas no sistema pode gerar variações na tensão de fornecimento. Outros fatores podem causar a interrupção do serviço, como queda de postes ou queda de galhos sobre cabos de distribuição.

Sendo muito difícil manter os padrões ideais, muitas vezes é necessário garantir alguns parâmetros mínimos, seja para atender as condições exigidas por normas ou para reduzir perdas para o consumidor, evitando paradas não programadas, mau funcionamento e reinicialização de sistemas.

Condicionadores de QEE são propostos para reduzir alguns problemas, não sendo possível lidar com todos os problemas de uma forma genérica. Cada situação deve ser analisada procurando uma solução que leve a situação mais próxima da ideal.

As opções de condicionadores ativos (ou eletrônicos) são largamente estudadas por lidar com um maior número de distúrbios e ser mais flexível quanto ao circuito onde será instalado, sendo este tipo de solução abordada nesta dissertação.

2.1. Distúrbios de Corrente e Tensão

Diversas situações geram distúrbios de QEE, cargas não lineares são geradoras de distúrbios de corrente, que podem se propagarem afetando a tensão ou cargas vizinhas. A expansão do consumo, superior à capacidade instalada pode ainda enfraquecer o barramento agravando problemas na tensão (baixo nível de curto circuito).

Os principais distúrbios são listados na Tabela 2.1, sendo os três primeiros tipicamente relacionados à tensão de fornecimento e os dois últimos ao consumo. Desequilíbrios na tensão fornecida ou na corrente exigida são relacionados a cargas desiguais e podem causar sobretensão, sobrecorrente e vibração em máquinas.

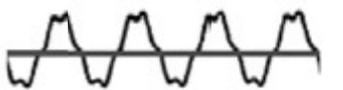
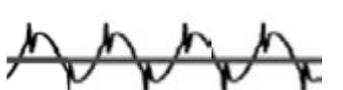
Defasagens entre a corrente da carga e tensão fornecida são relacionadas a cargas que armazenam energia, como indutores e capacitores, e ocasionam subutilização do sistema elétrico, aquecimento de transformadores entre outros problemas.

Normas e recomendações buscam atuar na regulamentação dos distúrbios e atribuição de culpa, algumas abordagens exigem que as cargas tenham níveis máximos de distorção, outras que o consumidor mantenha sua corrente dentro de padrões mínimos.

2.2. Normalização

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) regulamenta as condições da energia elétrica, o módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) [12] trata das condições mínimas de QEE para o consumidor final.

Tabela 2.1 - Principais Distúrbios[3][15].

Distúrbio	Causas	Efeitos	Ilustração
Afundamento (sag ou dip)	Degrau de carga, curto circuito momentâneo	Perda de potência, falha de operação	
Interrupção	Curto circuito momentâneo	Estresse do dielétrico, sobrecarga	
Elevação (swell)	Redução da carga, excesso de reativos, curto desequilibrado	Estresse do dielétrico, sobrecarga	
Distorção Harmônica	Cargas não lineares, chaveamento, descontinuidades	Ressonância, perdas adicionais, ruído, aquecimento	
Cortes (Notches)	Curto circuitos instantâneos devido a comutações de conversores eletrônicos	Estresse de dielétricos, modulação harmônica	

A norma brasileira trata apenas das condições da tensão fornecida, diferente de normas internacionais que são mais rígidas em relação a deformidades na corrente consumida. No Brasil é apenas exigido que o Fator de Potência (FP) não ultrapasse 0,92 com pena de multa para o consumidor.

Para o consumidor de baixa tensão o nível de Distorção Harmônica Total de Tensão (DHT_T) não deve ultrapassar 10% com valores individuais de ordem ímpares conforme Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Níveis de Referência para distorção individuais de ordem ímpares[12].

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão (%)
3	6,5
5	7,5
7	6,5
9	2
11	4,5
13	4
15	1
17	2,5
19	2
21	1
23	2
25	2
>21 múltiplas de 3	1
>25 não múltiplas de 3	1,5

A tensão fornecida pode ser classificada em faixas, adequada (entre 91% e 104%), precária (de 86% a 91% ou de 104% a 106%) e crítica (abaixo de 86% ou acima de 106%), para valor de referência de 380V.

As variações de tensão de curta duração são classificadas na Tabela 2.3. A Tabela 2.4 resume a terminologia adotada às variações de tensão de curta duração e será adotada no restante da dissertação.

Tabela 2.3 - Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração[12].

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão em relação à tensão de referência (RMS)
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Tabela 2.4 – Terminologia [12].

Identificação do Distúrbio	Sigla
Variação de Tensão de Curta Duração	VTCD
Interrupção Momentânea de Tensão	IMT
Afundamento Momentâneo de Tensão	AMT
Elevação Momentânea de Tensão	EMT
Interrupção Temporária de Tensão	ITT
Afundamento Temporário de Tensão	ATT
Elevação Temporária de Tensão	ETT

2.3. Condicionadores de Energia Elétrica

Ainda é muito comum a utilização de filtros passivos por serem mais acessíveis economicamente, porém possuem certas restrições, quanto a parâmetros do circuito e riscos de ressonância. Os bancos de capacitores são utilizados para corrigir defasagens na corrente e filtros sintonizados para atenuar

harmônicas. Os Filtros Ativos de Potência (FAP) podem atuar corrigindo reativos, harmônicos, desequilíbrios, variações de tensão, tanto em cargas lineares como não lineares.

Para tanto, alguns aspectos devem ser ressaltados, como tecnologias de semicondutores, processamento de sinais, estratégias de compensação e armazenamento de energia. De uma forma geral, o desenvolvimento dos FAPs se apoiou no desenvolvimento da tecnologia dos IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*).

Diferente dos compensadores acionados por tiristores ou eletromecanicamente, os componentes utilizados atualmente podem interromper a corrente ou recortar a tensão de um circuito com frequências de chaveamento da ordem de vários kHz, mesmo em potências elevadas [3].

Para lidar com essa velocidade de chaveamento é necessário a utilização de processadores com velocidades de processamento suficientemente elevadas, atualmente já são acessíveis DSPs (*Digital Signal Processors*) com velocidade de processamento acima de 150MHz e conjunto de periféricos próprios para trabalhar com eletrônica de potência, tais como comparadores PWM, conversores A/D, diversas entradas e saídas digitais (I/O), circuitos amostrador-retentor (*sample-hold*), todos em um único circuito integrado.

2.3.1. Princípios de Compensação Ativa

Os conversores podem ser montados como fonte de tensão controlada (VSI, do inglês *Voltage Source Inverter*) ou fonte de corrente controlada (CSI do inglês *Current Source Inverter*) gerando tensões ou correntes com amplitude e frequência desejadas, até mesmo componentes harmônicas.

2.3.1.1. Inversor

Os inversores compõem o circuito de potência, atualmente existem módulos pré-montados sendo produzidos, com IGBTs de alta potência, com valores típicos na Tabela 2.5. Quando for necessário atuar em sistemas com valores acima da capacidade do IGBT pode-se utilizar transformadores de acoplamento ou associação de conversores (topologias multiníveis).

Tabela 2.5 - Valores típicos máximos de tensão e corrente para IGBTs[3].

Tensão [V]	Corrente [A]
1200	2400
1700	1800
3300	1200

Na figura são apresentados 3 modelos de inversores, monofásico de meia onda, de onda completa e trifásico de onda completa. No primeiro caso são necessários 2 capacitores idênticos para compor o armazenamento de energia,

pois será necessária a utilização do ponto central para alimentar a carga e apenas técnicas de Modulação por Largura de Pulso (PWM do inglês *Pulse Width Modulation*) de 2 níveis podem ser utilizadas, sendo que a tensão na carga pode ser $+V_{CC}/2$ ou $-V_{CC}/2$.

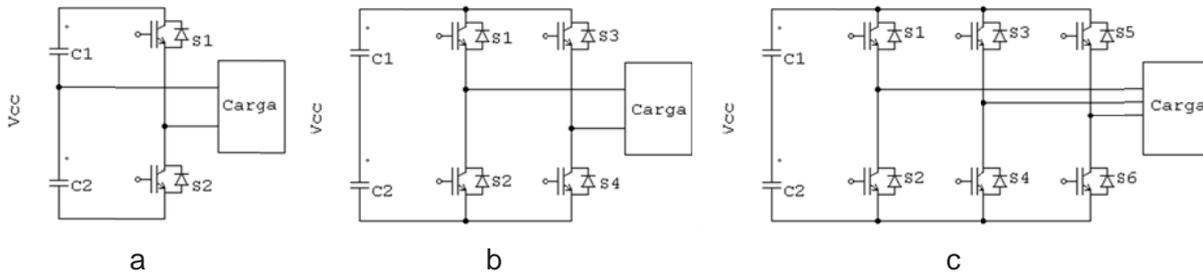


Figura 2.1 - Topologias de Inversores: a- Meia Ponte; b- Ponte Completa; c- Trifásico.

No caso de ponte completa, utiliza-se técnicas de PWM de três níveis, $+V_{CC}$, $-V_{CC}$ e 0, proporcionando uma maior frequência de chaveamento. Para circuitos trifásicos pode-se utilizar três pontes monofásicas completas, uma em cada fase, normalmente é utilizado transformadores de acoplamento para evitar interações entre os inversores.

Para o caso trifásico, também se pode utilizar a configuração diferente da Figura 2.1c, sendo composta por conversores meia ponte em cada fase. Caso seja necessário o quarto fio (neutro) pode-se utilizar o ponto central entre os capacitores ou um quarto conversor meia ponte.

Outra opção é a utilização de associação de conversores em aplicações PWM multiníveis, porém tais técnicas não serão abordadas neste trabalho.

2.3.1.2. Inversor fonte de tensão e inversor fonte de corrente

Na configuração VSI, Figura 2.2, o inversor converte a tensão CC do capacitor em uma tensão CA, operando como fonte de tensão CA. No caso CSI, Figura 2.3, o inversor funciona como fonte de corrente CA utilizando um corrente constante como fonte.

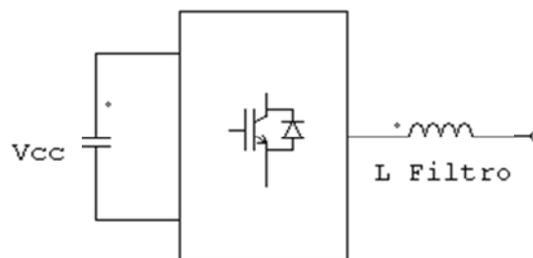


Figura 2.2 - Configuração VSI.

Nesta dissertação será utilizada apenas a configuração VSI, por apresentar dimensões e peso menores e custo significativamente menor quando comparado com a configuração CSI. Na saída do Inversor é utilizado um filtro para eliminar as componentes harmônicas geradas pelo chaveamento, podendo ser apenas um indutor ou mesmo um LC.

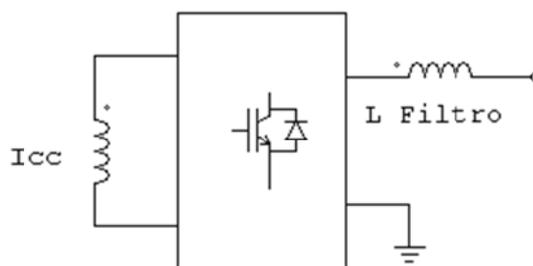


Figura 2.3 - Configuração CSI.

2.3.2. Filtro Ativo Série

Inseridos entre a fonte e a carga, normalmente utilizam uma configuração VSI para gerar forma de onda de tensão que compense distúrbios na tensão fornecida, a Figura 2.4 exemplifica o funcionamento. Existem inúmeras variações deste dispositivo, quanto ao armazenamento de energia, topologia de construção ou mesmo estratégias de compensação e aplicação conjunta com elementos passivos, como os filtros híbridos [16].

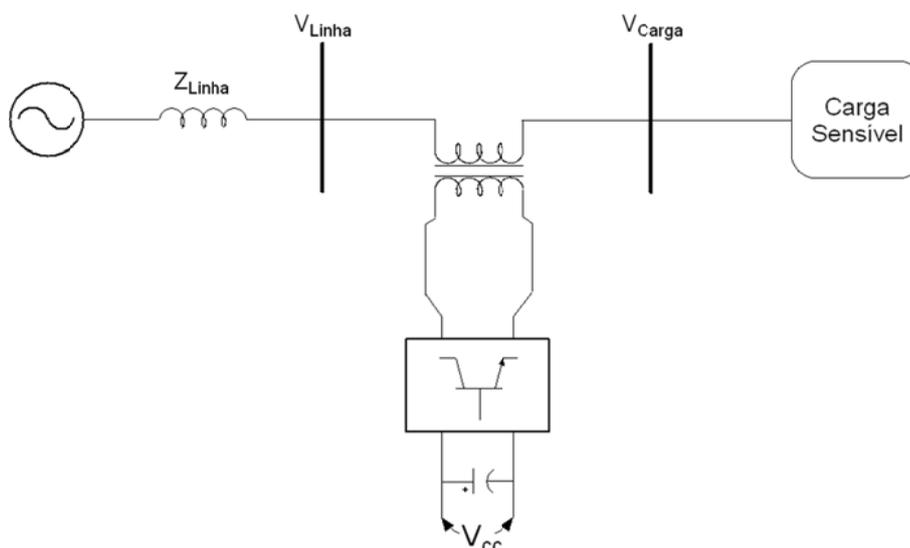


Figura 2.4 - Filtro Ativo Série

2.3.3. Filtro Ativo Paralelo

São indicados para atenuar distúrbios de corrente, como harmônicos, defasagens e desequilíbrios. O dispositivo é instalado em paralelo com a carga de forma que injete ou absorva a parcela da corrente associada aos distúrbios.

A Figura 2.5 exemplifica seu diagrama de conexão com a rede. Geralmente são compostos por inversores configurados como VSI, onde a corrente é controlada, sendo necessário o uso de indutor de acoplamento para permitir o funcionamento como fonte de corrente.

2.3.4. Filtro Ativo Universal

O Filtro Ativo Universal ou Unificado, também é conhecido como Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (CUQE) atua em distúrbios de tensão e corrente, corrigindo harmônicas e desequilíbrios na tensão e na corrente. Corrige também defasagens na corrente e variações de tensão de curta duração. A Figura 2.6 ilustra o diagrama de conexão deste tipo de filtro na rede.

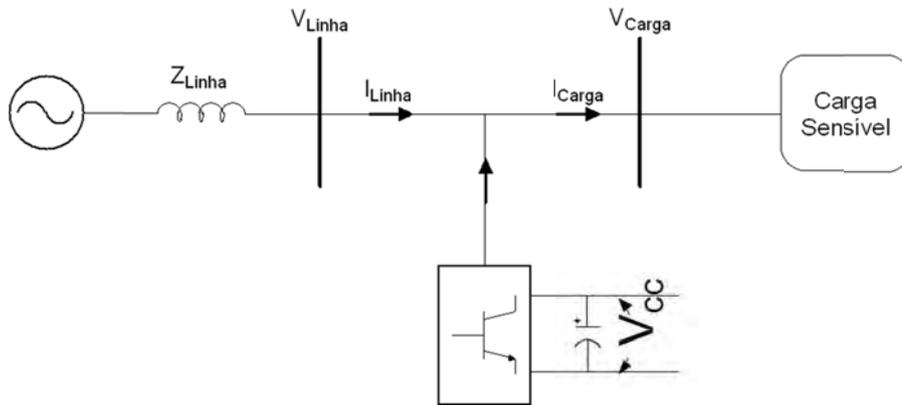


Figura 2.5 - Filtro Ativo Paralelo.

Na maioria das vezes são compostos por inversores configurados como VSI montados em série e em paralelo com a carga. Em análise simplificada, os inversores em paralelo atuam como Filtro Ativo Paralelo e os inversores em série como Filtro Ativo Série, compartilhando os capacitores de armazenagem de energia.

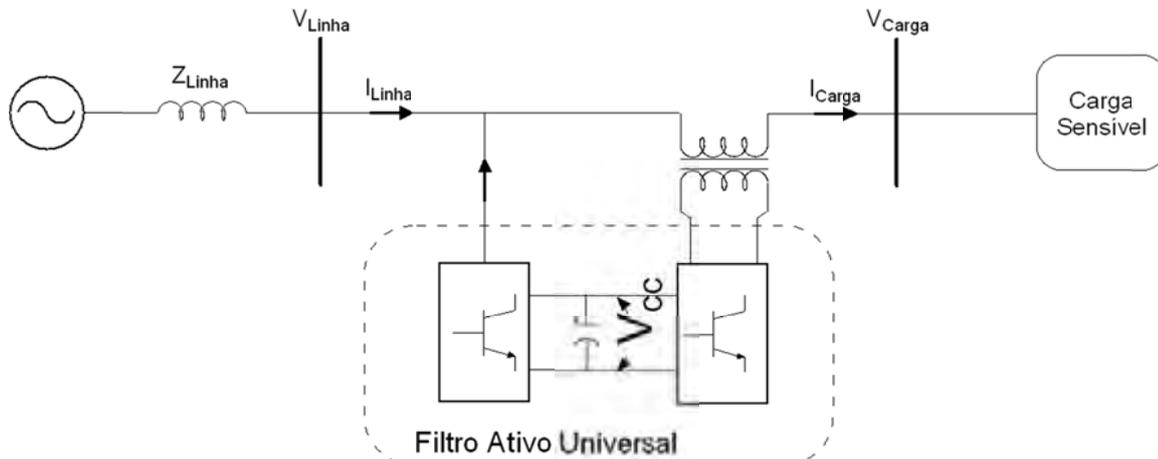


Figura 2.6 - Filtro Ativo Universal.

2.4. Conclusão

Neste capítulo os principais distúrbios de QEE foram analisados e a norma brasileira vigente foi resumida em termos relevantes. Também foram apresentadas algumas opções de compensação, sendo a última opção mais abrangente por atuar tanto na tensão como na corrente.

A interação entre os ramos Paralelo e Série é discutida no Capítulo 3 e no restante da dissertação outros aspectos dos Filtros Universais são explorados, sendo interessante conhecer as abordagens encontradas na literatura.

Outros distúrbios de QEE relacionados com a mudança de frequência, sub-harmônicas ou harmônicas pares não serão abordados nesta dissertação, mesmo porque, a legislação brasileira não trata destes assuntos detalhadamente.

A legislação atual também não trata de harmônicos de corrente, no entanto, por concepção do projeto, o ramo Paralelo atenua distorções harmônicas na corrente da carga.

3. Considerações sobre o fluxo de potência no CUQE

Neste capítulo as principais características de funcionamento do CUQE são descritas, bem como algumas variações encontradas na literatura, assim justificando algumas decisões tomadas quanto à construção do protótipo descrito no Capítulo 6.

O avanço nas tecnologias de eletrônica de potência proporcionaram um grande salto no desenvolvimento dos filtros ativos na década de 1980 e 1990. Diversos pesquisadores trabalharam em soluções para a identificação de distúrbios e geração de referências [2], [6], [8] e [9].

Parte das contribuições esteve em comprovar que para correção de distúrbios de corrente não é necessário o armazenamento de energia, já que o filtro, idealmente não lida com potência ativa e sim com oscilações de potências [2] e [17], possibilitando a implementação e desenvolvimento de equipamentos condicionadores.

A abordagem utilizada para obtenção de referências deve levar em conta o balanço de energia, que tende a ser muito pequeno para correções de harmônicos e desequilíbrios e significativo para correção de VTCDs.

Durante a evolução do assunto, surgiram algumas variações do CUQE, inicialmente chamado de *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC) ou *Universal Custom Power Conditioner* (UCPC), os quais, em geral, não eram projetados para corrigir VTCDs.

Em casos de VTCDs, o condicionador deverá ser projetado para manipular potências ativas e o barramento CC deve armazenar energia ou outras fontes podem ser planejadas para manter a tensão no barramento, reduzindo a capacidade do ramo Paralelo.

Outra variação do CUQE permite a inversão das funções dos ramos Série e Paralelo, de forma parcial (UPQC-Q) e de forma completa (iUPQC). No iUPQC o ramo Paralelo garante a carga uma tensão senoidal de sequência positiva, com mesma amplitude da tensão fornecida e o ramo Série impõe uma corrente de entrada senoidal e sem distúrbios na rede [18].

3.1. Fluxo de potência

A principal função do ramo Série é compensar harmônicas e desequilíbrios na tensão fornecida. A regulação de tensão ou correção de VTCDs depende da capacidade de armazenar energia.

O comportamento da potência reativa é ilustrado na Figura 3.1, antes da operação do CUQE os reativos da Carga (Q_C) são trocados com a alimentação (Q_R). Com a entrada do condicionador os reativos são trocados entre a Carga e o ramo Paralelo (Q_{CUQE}).

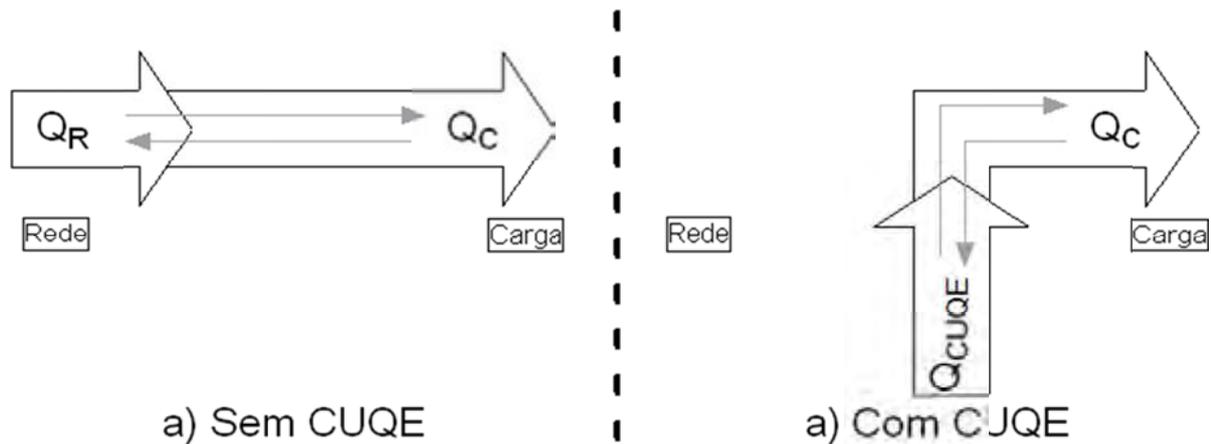


Figura 3.1 - Fluxo de Potência Reativa.

Durante a operação normal, corrigindo desequilíbrios, distorções e reativos não ocorre transferência de potência ativa pelo CUQE, diferente do que ocorre durante correção de VTCDs, onde existe variação de Potência ativa pelo condicionador.

A Figura 3.2 ilustra o fluxo de potência durante afundamentos, o ramo Paralelo deve solicitar potência ativa para manter a tensão no barramento CC controlada, enquanto o ramo Série recompõe a tensão na carga, fornecendo potência ativa a carga.

Neste caso o ramo Série solicitará potência do barramento CC e por consequência do ramo Paralelo, sendo que a necessidade de corrente do ramo Paralelo será menor quanto maior for o armazenamento de energia.

No caso de interrupção do fornecimento de energia o condicionador pode manter o funcionamento da carga enquanto existir potência no barramento CC, atuando como UPS, sendo necessárias fontes auxiliares para manter a energia no barramento CC.



Figura 3.2 - Fluxo de Potência Ativa durante Afundamentos de tensão.

O fluxo de potência ativa durante elevação de tensão é ilustrado na Figura 3.3 (caso oposto ao afundamento). O ramo Série deve retirar o excedente de tensão, o que gera um fluxo de potência ativa do CUQE para a rede. A tensão subtraída pelo ramo Série resulta em elevação de tensão do barramento CC exigindo que o ramo Paralelo devolva o excedente para a rede o que resulta em fluxo de corrente para a rede.



Figura 3.3 - Fluxo de Potência Ativa durante elevação de tensão.

Outra abordagem utiliza o ramo Série injetando uma tensão em quadratura adiantada em relação a corrente drenada da rede, conhecida como UPQC-Q, dessa forma quando ocorre VTCDs o ramo Série compartilha a correção dos reativos com o ramo Paralelo, possibilitando a redução da potência construtiva dos inversores do ramo Paralelo [19].

A Figura 3.4 ilustra o diagrama fasorial para uma carga com reativos, sendo I_{c1} a corrente necessária para correção. Durante o afundamento o ramo Série altera a fase original da tensão sendo que agora a corrente para correção dos reativos cai para I_{c2} .

Assim, libera-se a capacidade do ramo Paralelo para manter a tensão no barramento CC, de forma que o dimensionamento do ramo Paralelo pode ser reduzido. No entanto, existe alteração na fase da tensão na carga durante o evento.

Essa restrição pode ser inconveniente para cargas sensíveis e também a necessidade de aumentar a capacidade de tensão do ramo Série pode inviabilizar a utilização desta abordagem, nesta dissertação será utilizada apenas a abordagem tradicional de injeção de tensão em fase com a tensão de regime antes do evento.

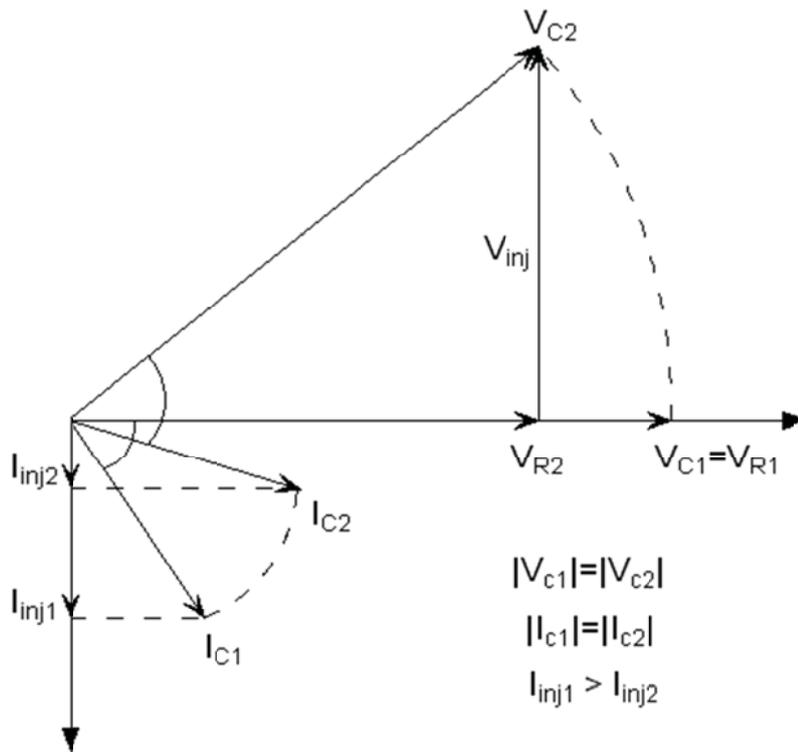


Figura 3.4 - Diagrama fasorial UPQC-Q.

3.2. Posição do ramo Paralelo

O ramo Paralelo pode ser posicionado próximo à rede (Figura 3.5) ou próximo à carga (Figura 3.6), sendo que nos dois casos suas funções não são alteradas, afetando apenas o dimensionamento dos elementos dos ramos.

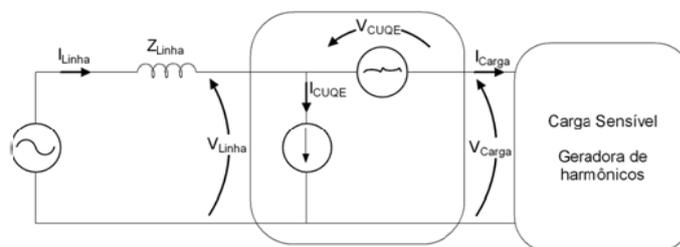


Figura 3.5 - Ramo Paralelo próximo a rede.

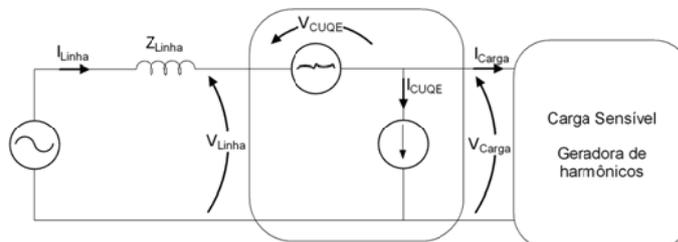


Figura 3.6 - Ramo Paralelo próximo a carga.

Quando posicionado ao lado da carga a tensão de acoplamento do ramo Paralelo será a mesma que a da carga, livre de variações. Durante afundamentos a corrente solicitada pelo ramo Paralelo, para manter a tensão no barramento CC estável, se somará a corrente de carga, resultando em acréscimo na corrente do ramo Série durante o afundamento.

No outro caso, o ramo Série não sofre aumento de corrente durante afundamentos, porém a corrente do ramo Paralelo será proporcionalmente maior conforme o afundamento na tensão de alimentação, já que a tensão de acoplamento sofrerá o VTCD. No caso de afundamentos a corrente no ramo Paralelo será proporcionalmente maior para manter a tensão no barramento CC.

Segundo estudos anteriores [20], a configuração do ramo Paralelo próximo à rede necessita de um acréscimo de potência do ramo Paralelo menor que o acréscimo de potência do ramo Série quando na configuração do ramo Paralelo próximo a carga.

O protótipo utilizado nesta dissertação utiliza a configuração do ramo Paralelo próximo à rede, por concepção de projeto, o que permite que a tensão no barramento CC sofra afundamentos durante AMTs, dividindo a necessidade de potência para correção de AMTs, entre o barramento CC (banco de capacitores) e ramo Paralelo. Assim, diminuindo a necessidade de potência do ramo Paralelo.

3.3. Conclusão

As considerações discutidas neste capítulo permitem uma melhor compreensão do funcionamento do CUQE e trazem justificativas para a topologia dos ramos série e paralelo, bem como para o armazenamento de energia adotado no protótipo do Capítulo 6.

4. Algoritmos de Referência

No presente capítulo serão apresentadas ferramentas de processamento de sinais utilizadas para extrair das variáveis do circuito, como tensões e correntes, informações para assim atuar de forma instantânea, nos distúrbios encontrados. Os principais algoritmos utilizados são: *Phase-Locked-Loop* que fornece a frequência e a fase do sinal de referência; Gerador de Referência de Tensão que extrai informações sobre distúrbios de tensão e gera referência para o ramo Série e Gerador de Referência de Corrente que extrai informações sobre distúrbios de corrente e gera referência para o ramo Paralelo.

O funcionamento do CUQE depende diretamente do tratamento de sinais e da forma que os dados de tensão e corrente são manipulados [23]. Não existe uma forma única de se manipular os dados [21], mas é importante que os algoritmos possuam rápida resposta dinâmica e baixo erro em regime e sejam capazes de identificar harmônicos e desequilíbrios, assim como variações de amplitude e deslocamento da corrente com relação à tensão.

Os algoritmos deste capítulo utilizam ortogonalidade e cálculo de valores médios para obter as referências instantâneas [7]. Existem outras opções para obtenção da referência que utilizam componentes de potências decompostas [24], [25] e [26] ou transformadas $\alpha\beta$ e dq [2], [9] e [17].

O sincronismo com a rede poderia ser obtido com detectores de cruzamento com zero, no entanto em diversas situações de distúrbios podem ocorrer múltiplos cruzamentos por zero, como na presença de harmônicos [20], assim será utilizado algoritmo de *Phase-Locked-Loop* (PLL) trifásico que proporciona rápida resposta transitória, pouca sensibilidade à distorções e desequilíbrios e boa capacidade de rastreamento da fase e frequência do sinal medido [27].

Neste capítulo também serão propostos dois novos algoritmos para a geração de referências do CUQE: o Gerador de Referência de Tensão (GRT) e Gerador de Referência de Corrente (GRC). Detalhes do funcionamento de cada algoritmo serão esclarecidos e simulações em software PSIM serão utilizadas para comprovar o comportamento dos mesmos.

4.1. Phase-Locked-Loop (PLL)

Diversos equipamentos industriais, incluindo condicionadores de energia, precisam do sincronismo com a rede, ou a determinação do momento que o sinal cruza com o zero, para funcionar. Nesta seção será discutido o algoritmo de um PLL digital que será usado para se obter o sincronismo com a tensão [27].

O algoritmo está baseado no cálculo de vetores instantâneos, onde as propriedades do produto escalar e ortogonalidade são empregadas para sintetizar uma função ortogonal ao sinal de entrada $\mathbf{x} = [x_a \ x_b \ x_c]$ e assim obter os valores $\mathbf{u} = [u_a \ u_b \ u_c]$ em sincronismo com a entrada. Aplicado a sinais periódicos, a eq. (4.1) demonstra a condição de ortogonalidade.

$$\overline{\mathbf{x} \cdot \mathbf{u}_\perp} \equiv \frac{1}{T} \int_T^{t+T} [\mathbf{x}(t) \cdot \mathbf{u}_\perp(t)] dt = 0 \quad (4.1)$$

A Figura 4.1 mostra o diagrama de blocos relativo ao processo, onde o produto escalar (dp) deve convergir para um valor médio zero, sendo utilizado um filtro de média móvel para atenuar a influência de harmônicas.

O controlador PI converte o erro do produto (erro) em um termo de correção da frequência (Δw) que busca a frequência e a fase da entrada (w). É utilizado um integrador discreto para sintetizar o ângulo (θ), sendo utilizado um bloco para evitar que seu valor ultrapasse 2π fazendo que θ volte para zero sempre que essa situação ocorrer. Assim, com este θ são obtidos os valores ortogonais $\mathbf{u}_\perp = [u_{\perp a} \ u_{\perp b} \ u_{\perp c}]$.

O mesmo conceito pode ser estendido para sistemas monofásicos ou sistemas com n-entradas, o dimensionamento do controlador PI é o mesmo independente do número de entradas e é descrito na próxima seção.

4.1.1. Controlador PI

Para o algoritmo da Figura 4.1 garantir a ortogonalidade do vetor \mathbf{u}_\perp o controlador PI atua no argumento Δw minimizando o erro. O controlador deve convergir o valor dp para média zero rapidamente sem perder a estabilidade.

Uma referência da frequência ($2\pi f_n = 377$) é incluída para assegurar uma melhor resposta dinâmica, onde f_n é a frequência nominal do sinal de entrada.

Uma função de atraso deve ser considerada para aplicações digitais, chegando ao modelo na Figura 4.2. O modelo do controlador pode ser simplificado para eq. (4.2), chegando a eq. (4.3) de malha aberta e eq. (4.4) de malha fechada.

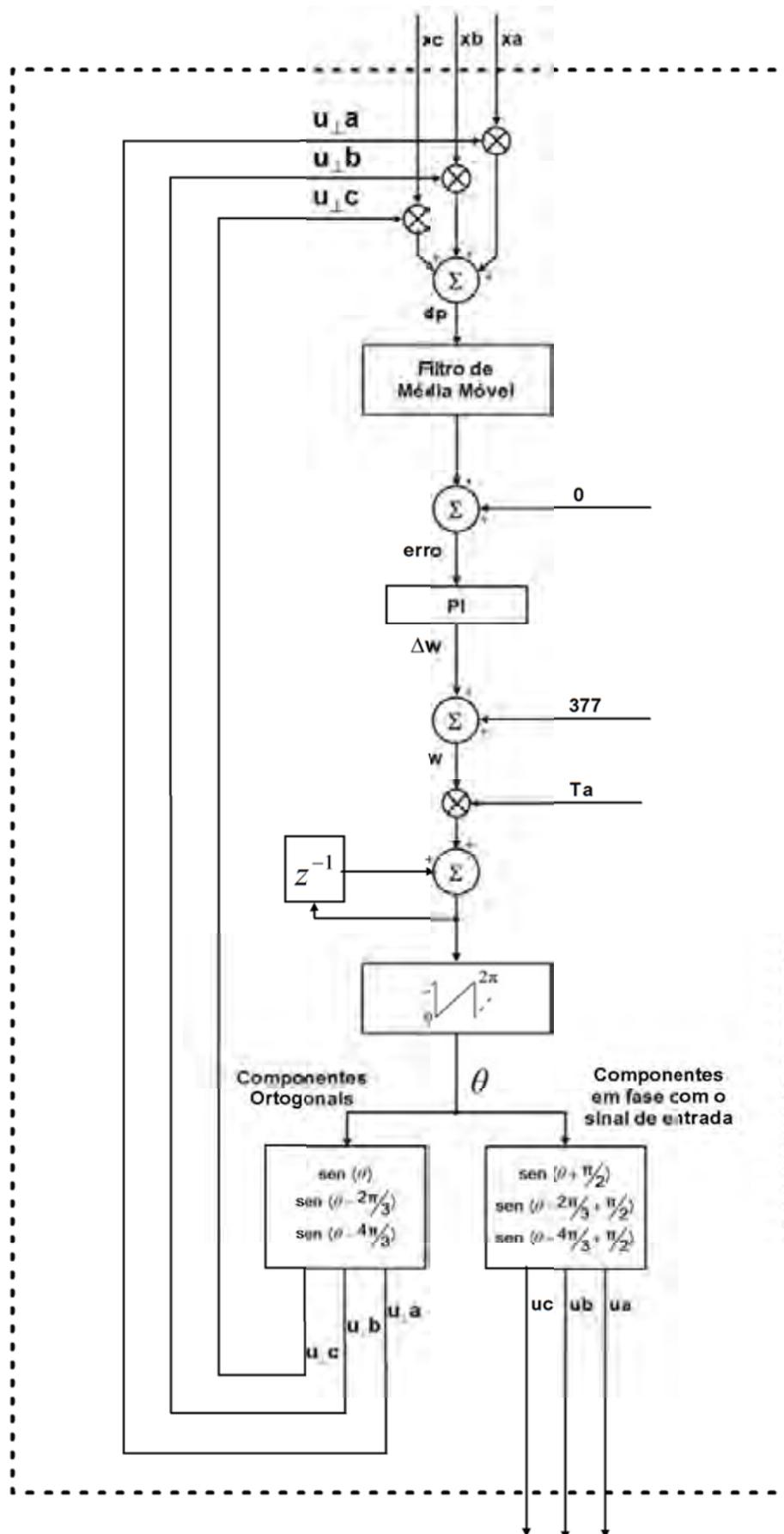


Figura 4.1 - Diagrama de funcionamento do PLL.

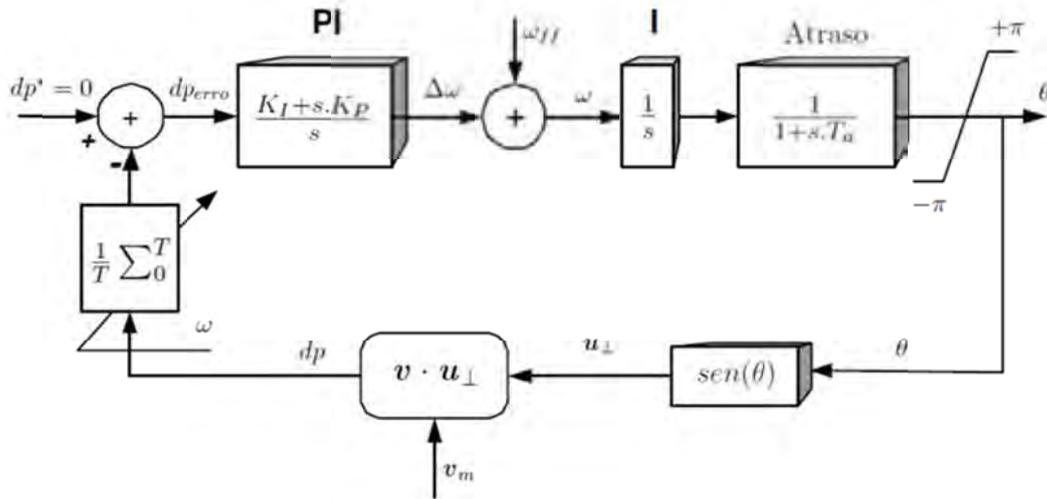


Figura 4.2 – Diagrama de bloco do PLL [7].

$$H_{planta}(s) = \left(\frac{1}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + s.T_a}\right) \quad (4.2)$$

$$H_{ma}(s) = PI(s) \cdot H_{planta}(s) = \left(\frac{K_I + s.K_P}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{s}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + s.T_a}\right) \quad (4.3)$$

$$H_{mf}(s) = \frac{H_{ma}(s)}{1 + H_{ma}(s)} = \frac{K_I + s.K_P}{s^3.T_a + s^2 + s.K_P + K_I} \quad (4.4)$$

Quando utilizado em controladores com alta frequência de amostragem, se comparado com a frequência do sistema, a equação de terceira ordem (4.4) pode ser reduzido para forma canônica de segunda ordem na eq. (4.5) sem prejudicar a controlabilidade do sistema.

$$H_{mf}(s) = \frac{2\xi W_n s + W_n^2}{s^2 + 2\xi W_n s + W_n^2} = \frac{K_P s + K_I}{s^2 + K_P s + K_I} \quad (4.5)$$

Os ganhos do PI podem ser ajustados como $K_P = 2\xi W_n$ e $K_I = W_n^2$. Onde W_n define a frequência de interesse (crossover) da malha fechada e ξ é o fator de amortecimento do regulador, normalmente definido entre $0,5 \leq \xi \leq 1$.

4.1.2. Resultados de Simulações

Para comprovar o funcionamento do algoritmo da Figura 4.1 são apresentados resultados de simulações em Software Psim. São utilizados 3 fontes de 60Hz, com defasagens 0° , 240° e 120° respectivamente. Os ganhos de sensor são unitários sendo considerado o valor de p.u.=1V. A frequência de amostragem é de 12kHz.

Utilizando os cálculos da seção 4.1.1 chega-se a $K_P = 377$ e $K_I = 142.120$, adotando $\xi = 0,5$. Porém, quando implementado em dispositivos de processamento digital os valores tiveram que ser ajustado, sendo utilizados na simulação os mesmos obtidos empiricamente, $K_P = 25$ e $K_I = 456,25$.

Na primeira simulação os sinais trifásicos de entrada são senoidais sem distorção ou desequilíbrio, com amplitude de 0,83 p.u. de pico. Na Figura 4.3 pode-se observar o comportamento durante a inicialização, o PLL leva cerca de 0,2 segundos para convergir.

Durante o transitório pode-se observar o resultado da eq. (4.1) na Figura 4.4, o produto interno converge para zero no caso de entradas senoidais e equilibradas. O controlador atua aumentando ou diminuindo $\Delta\omega$ buscando a ortogonalidade.

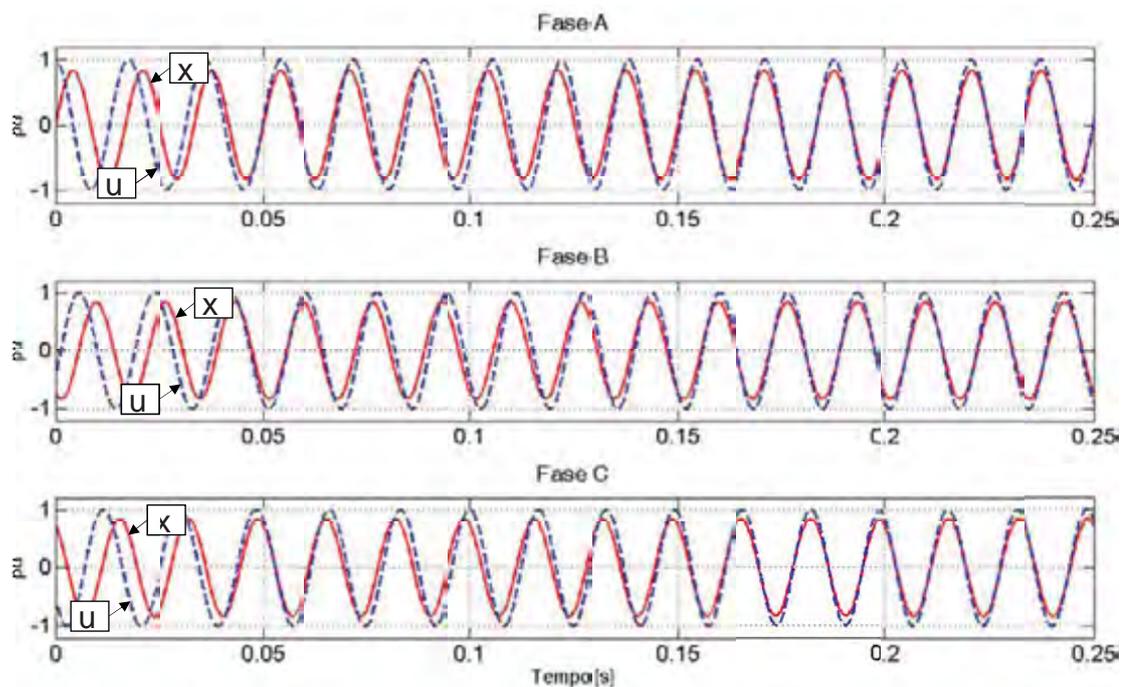


Figura 4.3 - Comportamento durante transitório do PLL para entrada senoidal.

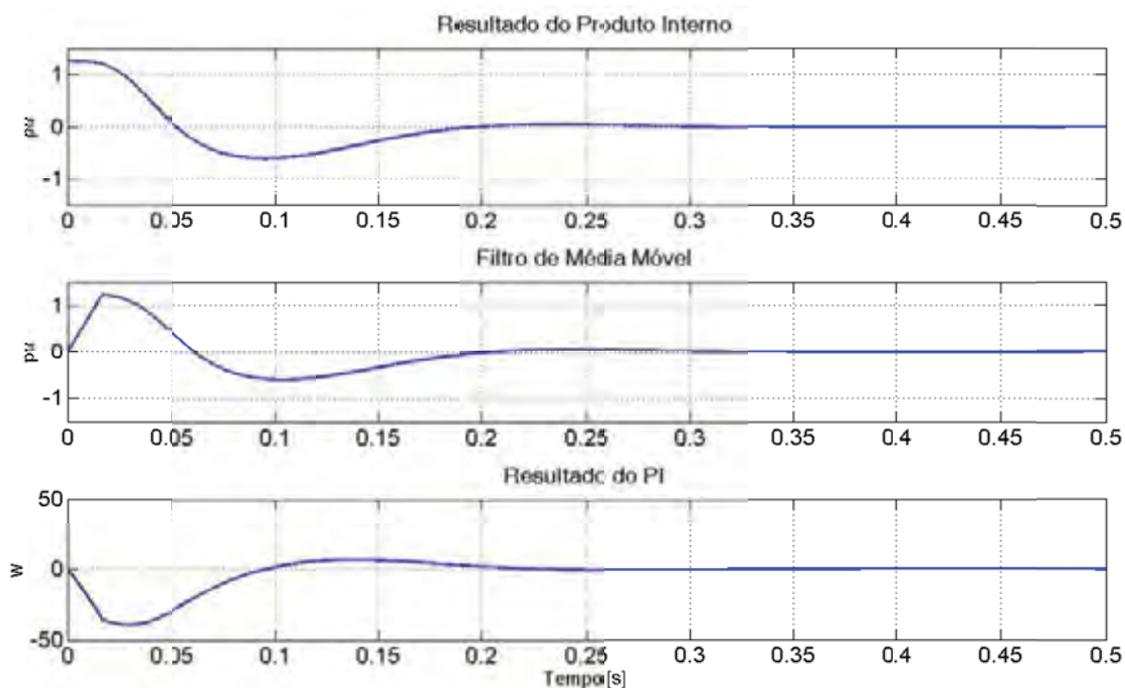


Figura 4.4 - Comportamento dos componentes internos do PLL para entrada senoidal.

Agora para um sinal de entrada não senoidal, composto por uma série harmônica como indica a Tabela 4.1, o comportamento foi semelhante ao primeiro caso conforme pode ser observado na Figura 4.5.

Neste caso a eq. (4.1) não converge para zero devido a presença de harmônicas, a Figura 4.6 demonstra a necessidade do filtro de média móvel. Como no caso anterior, o controlador atua buscando a ortogonalidade.

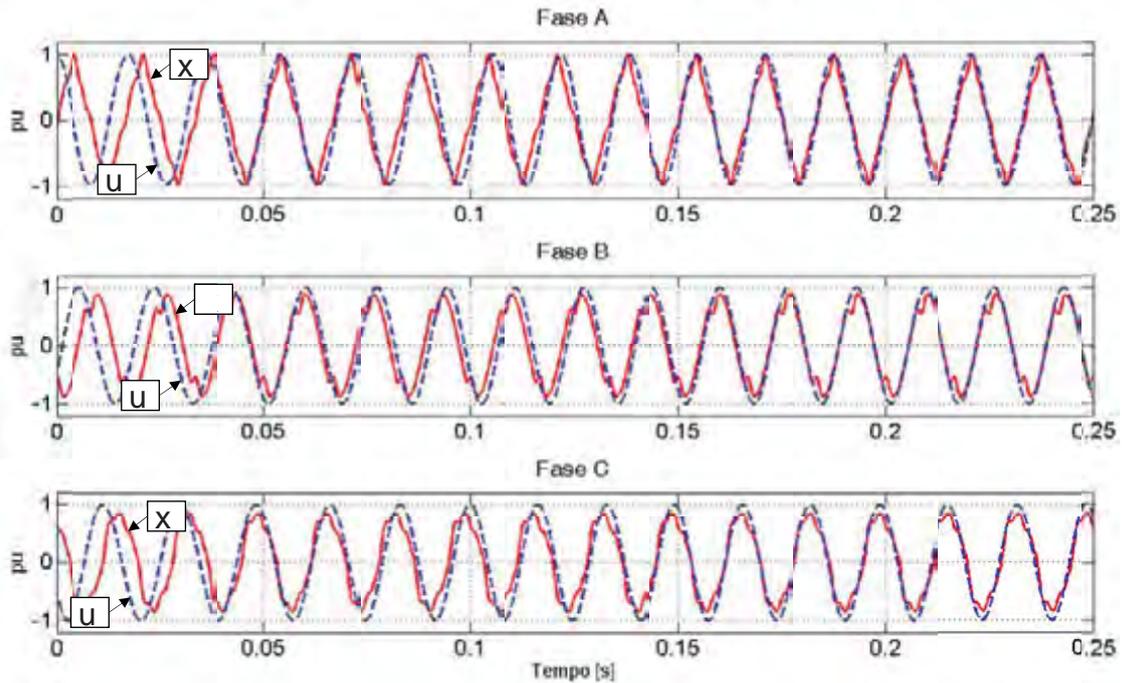


Figura 4.5 - Comportamento durante transitório do PLL para entrada com distúrbios harmônicos.

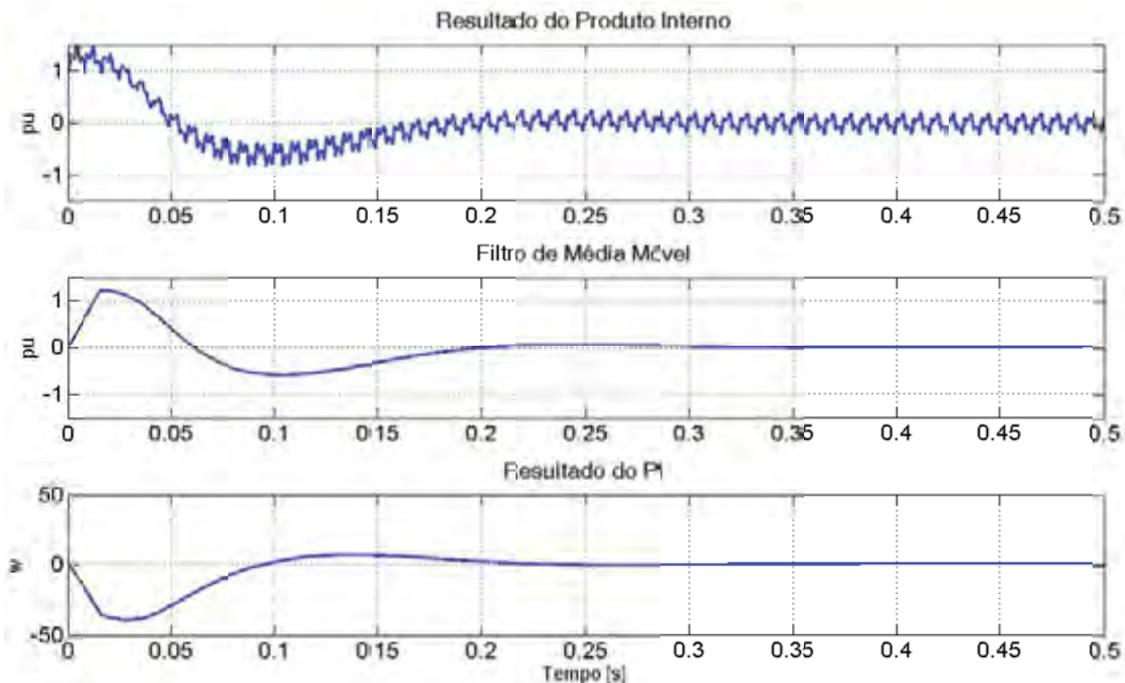


Figura 4.6 - Comportamento dos componentes internos do PLL para entrada com distúrbios.

Tabela 4.1- Componentes do sinal de entrada.

	Amplitude (p.u.)	Frequência (Hz)
Fundamental	0,830 (99,1%)	60
3ª Harmônica	0,083 (9,9%)	180
5ª Harmônica	0,062 (7,4%)	300
7ª Harmônica	0,042 (5,0%)	420
11ª Harmônica	0,002 (0,2%)	540

4.2. Gerador de Referência de Tensão (GRT)

Para o funcionamento de um CUQE como compensador de distúrbios de tensão, é preciso que seu sistema de controle seja capaz de identificar distorções harmônicas, desequilíbrios e também, variações momentâneas de tensão, especificamente AMT e EMT. Através do tratamento adequado dos sinais e da determinação da sequência positiva, o algoritmo GRT proposto neste trabalho isola distúrbios como harmônicos e desequilíbrios gerando uma referência oposta para o conversor do ramo série do CUQE.

O algoritmo discutido nesta seção é semelhante ao encontrado em [7], pois permite extrair a amplitude da sequência positiva a partir dos valores instantâneos de tensão, porém pode ser implementado de forma bem mais simples. Também é flexível quanto a alterações da tensão em regime permanente, diferente dos demais encontrados na literatura [18] e [22].

O GRT será utilizado para se obter tanto o conteúdo harmônico e desequilíbrios, quanto os valores de afundamentos e elevações de tensão. Sendo importante que a resposta deste algoritmo seja rápida e precisa. A seguir, os blocos internos do GRT são descritos e comentados.

4.2.1. Detector de Amplitude da Sequência Positiva

Utilizando os sinais senoidais de amplitude unitária em fase com as tensões, obtidos com o PLL da seção anterior, é aplicado o produto interno destes valores com as tensões medidas, obtendo o valor da amplitude (A_v) das tensões medidas. O algoritmo é demonstrado na Figura 4.7.

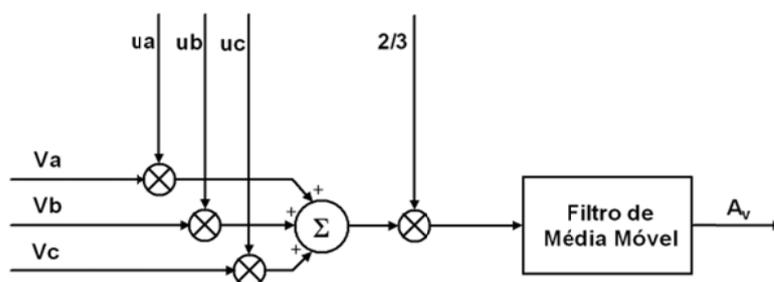


Figura 4.7 - Detector de Amplitude.

O resultado do produto interno será composto por uma parcela constante e outra oscilatória. Será utilizado um filtro de média móvel para extrair a componente constante. O fator $2/3$ deverá ser utilizado para o caso trifásico.

Este resultado expressa a média entre as amplitudes da sequência positiva de cada fase, por isso o uso do $1/3$. Já o 2 se deve ao fato do resultado da média

móvel ser a metade da amplitude da componente em fase e com a mesma frequência que o PLL [23], sendo que as demais componentes possuem média zero.

Utilizando esta técnica o resultado converge no máximo em um período da rede CA, se a amplitude A_v for multiplicada pelos valores do PLL será encontrado os valores ideais para as tensões de entrada, livre de distorções e desequilíbrios, porém serão mantidos os VTCDs.

A amplitude encontrada poderia ser comparada com o valor nominal da tensão da rede CA, detectando qualquer variação na tensão. O próximo tópico apresenta uma alternativa para que apenas VTCDs sejam detectados.

4.2.2. Detector de Variação Momentânea de Tensão

A amplitude da tensão em regime pode variar durante o dia, devido à variação do consumo horário, no tópico 2.2 são estabelecidas as faixas adequada, precária e crítica da tensão.

Variações sustentadas que ultrapassem três minutos e permaneçam dentro da faixa adequada (90% - 105%) são consideradas aceitáveis pela legislação[12], isentando a necessidade de manter a amplitude em um valor fixo.

Aplicando-se um Filtro Passa Baixa (FPB) de terceira ordem na amplitude A_v calculada, com o objetivo de atenuar variações rápidas e permite que variações lentas sejam absorvidas pela referência A'_v . O algoritmo também deve garantir que a referência A'_v não ultrapasse os valores da faixa adequada de tensão (90% - 105%), mesmo de forma sustentada.

A eq. (4.6) descreve o FPB de terceira ordem e as Figuras 4.8 e 4.9 mostram o diagrama de bode e a resposta ao degrau, demonstrando que o FPB não apresenta ganho significativo para entrada constante e que leva cerca de 20s para absorver variações lentas.

$$f_3(s) = \frac{0,03100627}{s^3 + 0,94247778 \cdot s^2 + 0,29608813 \cdot s + 0,03100627} \quad (4.6)$$

O FPB de terceira ordem é constituído por três filtros de primeira ordem com frequência de corte em 0,05Hz, em cascata. Para converter o filtro de primeira ordem, da eq. (4.7), para o domínio discreto foi utilizado a transformada bilinear com frequência de amostragem de 12KHz.

Chegando a eq.(4.8), onde $y_{[k]}$, $y_{[k-1]}$, $x_{[k]}$ e $x_{[k-1]}$ são respectivamente a saída atual, saída anterior, entrada atual e entrada anterior. Na implementação, a saída do primeiro filtro é utilizada na entrada do seguinte e o processo se repete no ultimo, cascadeando três filtros.

$$f_1(s) = \frac{0,314159}{s + 0,314159} \quad (4.7)$$

$$y[k] = 0.999973820404 \cdot y[k-1] + 0.0000130897980 \cdot x[k] + 0.0000130897980 \cdot x[k-1] \quad (4.8)$$

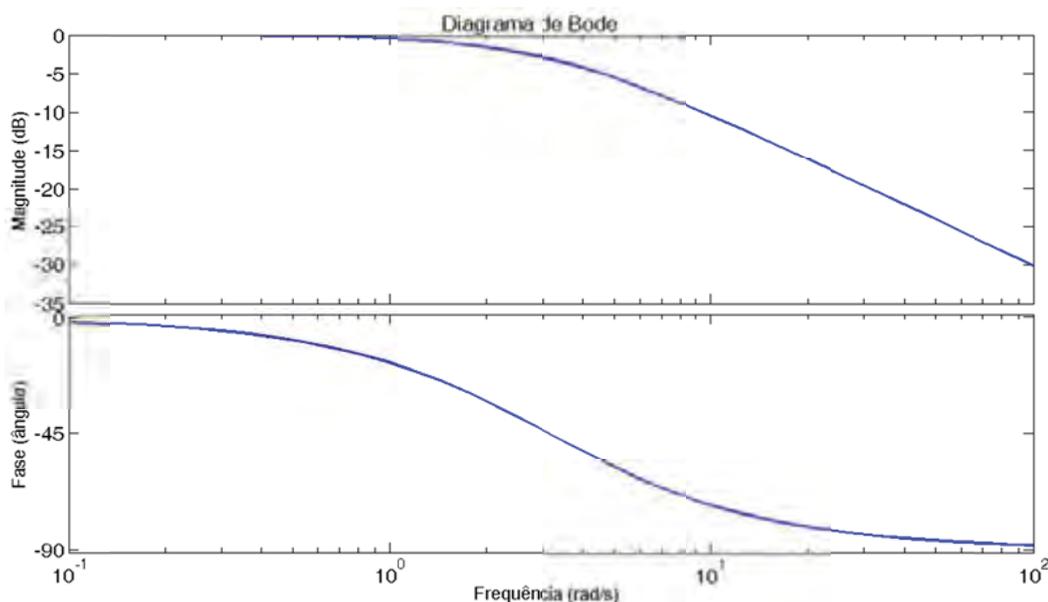


Figura 4.8 - Diagrama de Bode do FPB.

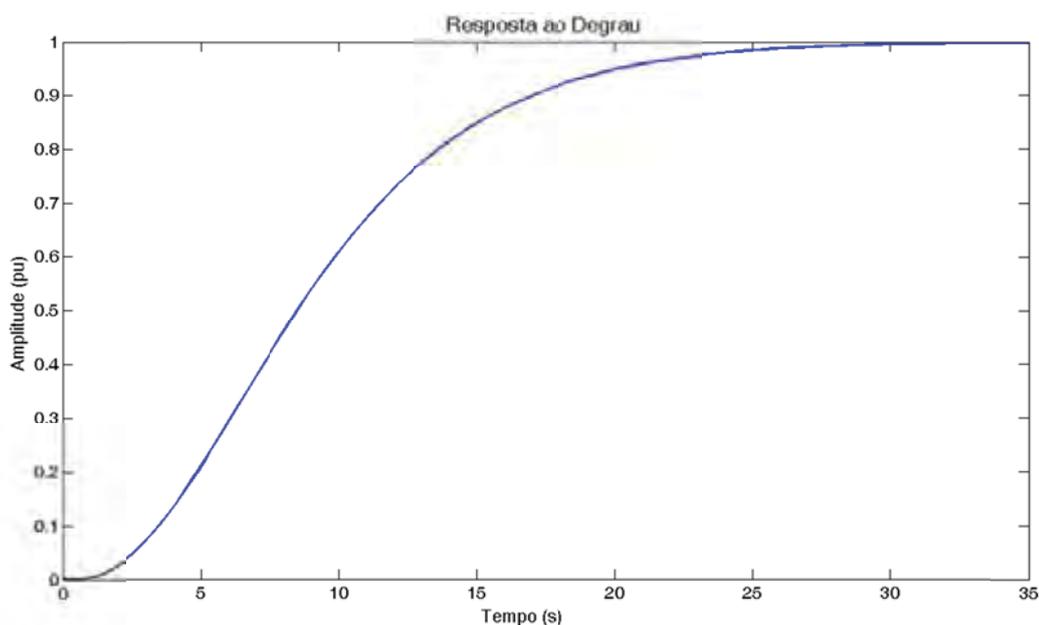


Figura 4.9 - Resposta ao Degrau do FPB.

4.2.3. Diagrama do algoritmo

O Algoritmo completo do GRT proposto é apresentado na Figura 4.10, formado pelo detector da amplitude de sequência positiva (A_v), FPB (A'_v) e limitador na faixa. Com a utilização do FPB e limitador de faixa evita-se que o CUQE funcione como regulador de tensão, reduzindo a necessidade de funcionamento do condicionador sem deixar de atender o Prodlist[12].

Caso ocorram variações sustentadas de tensão, fora da faixa adequada, o sistema não permitirá que a referência ultrapasse os limites da faixa, sendo utilizado um comparador com os valores máximos e mínimos da faixa.

Os resultados dos blocos de detecção são multiplicados pelo resultado do PLL para gerar uma referência senoidal (v_a^* , v_b^* e v_c^*), livre de harmônicas e desequilíbrios, que tenha a mesma amplitude que a sequência positiva de entrada, livre de variações abruptas. Comparando com os valores de entrada são obtidos as referências (v_a^{filtro} , v_b^{filtro} e v_c^{filtro}) para o VSI.

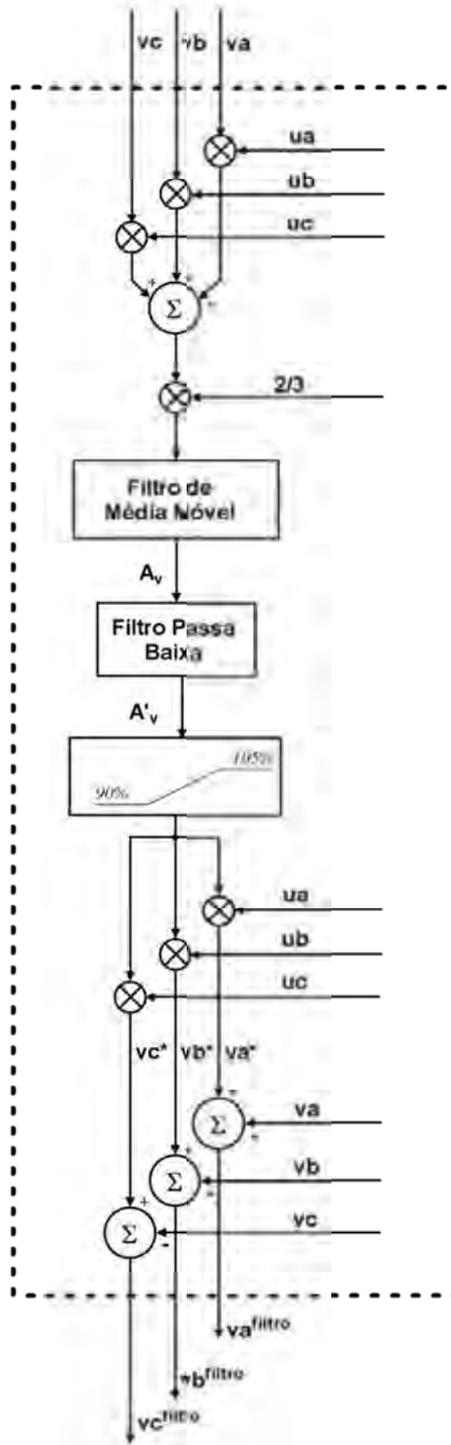


Figura 4.10 - Algoritmo do GRT.

4.2.4. Resultados de Simulação

O funcionamento do algoritmo proposto será demonstrado através de simulações em malha aberta, ou seja, onde apenas as variáveis internas e externas do algoritmo serão analisadas com o uso do software PSIM.

A Figura 4.11 demonstra o comportamento da simulação quando ocorre variação sustentada da tensão de entrada, tendo seu valor alterado de 0,9 pu para 1 pu nas três fases. O resultado foi semelhante à resposta ao degrau do FPB (Figura 4.9).

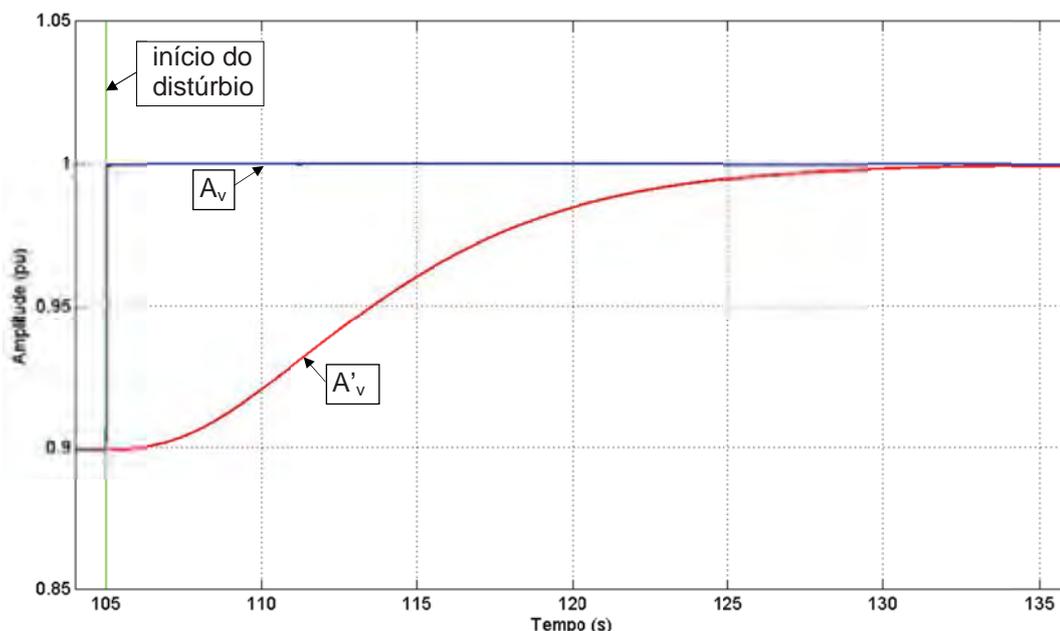


Figura 4.11 - Dinâmica do FPB e do Detector de Amplitude quando ocorre uma sobretensão sustentada.

Em uma situação oposta onde a variação de tensão cai de 1pu para 0,9pu a resposta do algoritmo também foi semelhante a do filtro, como pode ser observado na Figura 4.12.

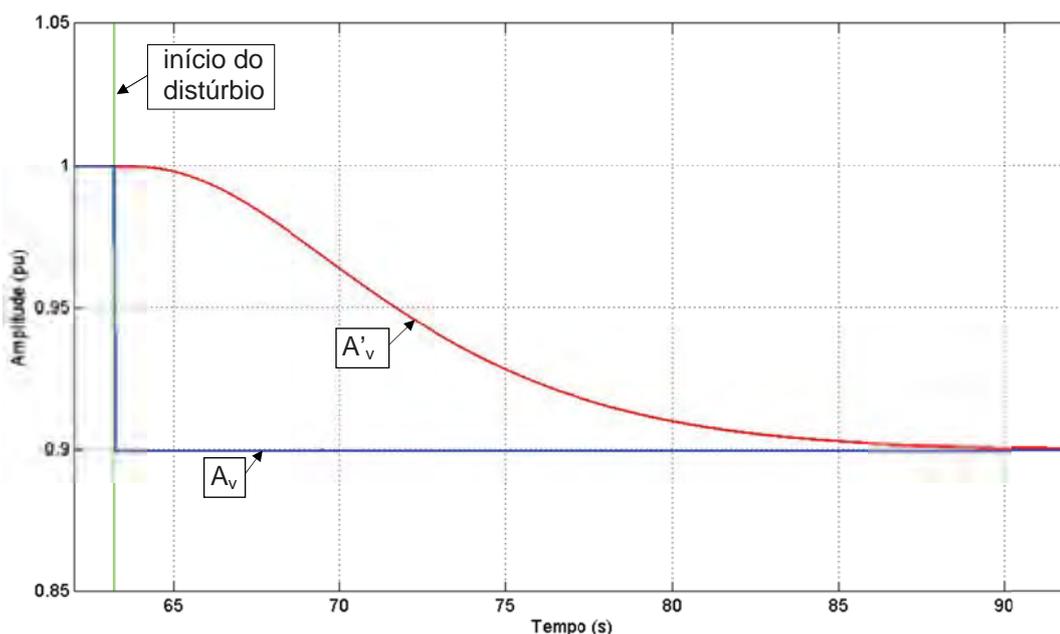


Figura 4.12 - Dinâmica do FPB e do Detector de Amplitude quando ocorre uma subtensão sustentada.

Na Figura 4.13 ocorre uma situação diferente, um AMT de 0,5s, onde a tensão trifásica de entrada cai de 1 pu para 0,9 pu, porém devido ao curto tempo do VTCD o filtro atenua a variação, não permitindo que altere a referência.

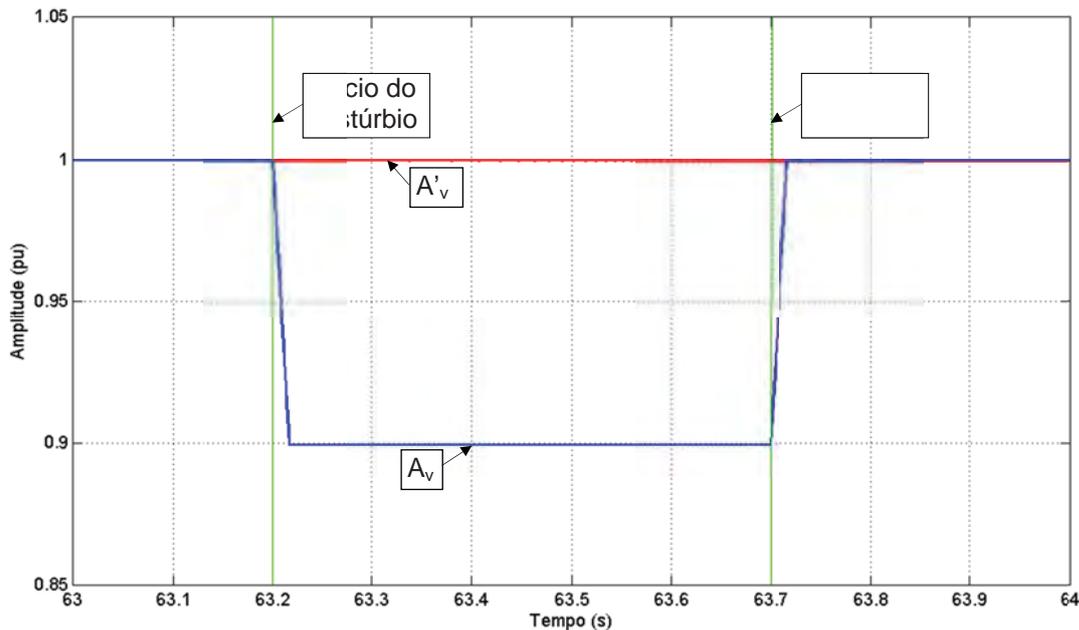


Figura 4.13 - O FPB manteve-se estável enquanto ocorria um afundamento trifásico, nota-se que o detector de amplitude (A_v) leva um ciclo (16ms) para convergir a partir do início do distúrbio (63,2s).

4.3. Gerador de Referência de Corrente (GRC)

Utilizando abordagem semelhante a da seção anterior, o GRC extrai a componente fundamental da sequência positiva da corrente em fase com a tensão [28], visando identificar a componente responsável pela máxima transferência de potência ativa entre a fonte e a carga. Tal referência pode ser utilizada no ramo paralelo do CUQE para otimizar a utilização do sistema elétrico, garantindo um sistema com fator de potência elevado.

O GRC utiliza o PLL da seção 4.1 nas tensões de entrada, realizando o produto interno entre os termos senoidais de amplitude unitária em fase com a tensão (u_a , u_b e u_c), e as correntes de entrada (i_{la} , i_{lb} e i_{lc}) isolando a componente de interesse.

4.3.1. Diagrama do Algoritmo

A Figura 4.14 demonstra o funcionamento do algoritmo. O produto será composto por uma parcela constante e outra oscilatória, e um filtro de média móvel será utilizado para extrair a componente constante.

A amplitude encontrada deve ser multiplicada pelos resultados do PLL obtendo um sinal senoidal (i_a^* , i_b^* e i_c^*), em fase com a tensão e com amplitude da componente fundamental de sequência positiva da corrente.

Subtraindo a corrente de carga (i_{la} , i_{lb} e i_{lc}) da componente de interesse (i_a^* , i_b^* e i_c^*) obtém-se a referência de corrente para o FA paralelo (i_a^{filtro} , i_b^{filtro} e i_c^{filtro}).

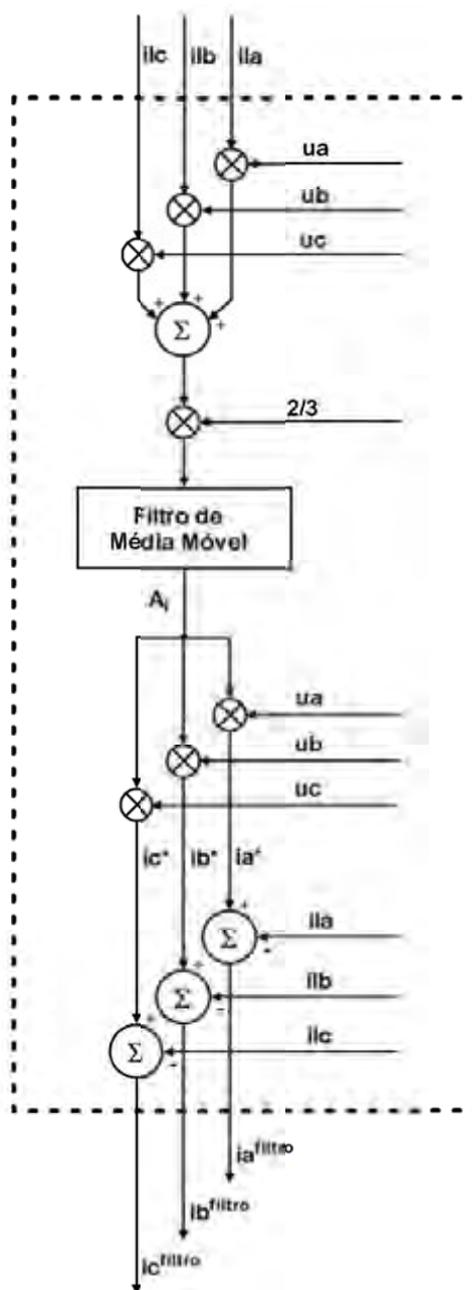


Figura 4.14 - Algoritmo de obtenção da sequência positiva da corrente, em fase com a tensão.

4.3.2. Justificativa Algébrica

Para esclarecer o processo de obtenção da componente de sequência positiva da corrente, em fase com a tensão, uma corrente trifásica genérica será analisada, contendo defasagem, desequilíbrio e distorção.

A componente de defasagem é ortogonal ao PLL portanto o produto interno entre estes sinais periódicos resulta em valor nulo, como na eq. (4.1). Já o produto de sinais periódicos com diferentes frequências resultará em um sinal não nulo, porém com média nula.

Apenas a componente da corrente em fase com a tensão, e de mesma frequência, resultará em um valor médio não nulo [29], sendo utilizado um filtro de média móvel para extrair essa componente que precisa de um ganho de $2/3$ para

representar a amplitude média das três fases.

4.3.3. Resultados de simulação

O funcionamento do algoritmo pode ser comprovado através dos resultados de simulação discutidos a seguir. A Tabela 4.2 contém os valores e configurações das cargas utilizadas nas simulações.

Tabela 4.2 - Valores da Simulação.	
1º caso: Carga RL	Ligada em Y sem neutro
Resistência	7,72Ω
Indutância	19,4mH
2º caso: Carga Resistiva desequilibrada	Ligada em Y sem neutro
R _a	3Ω
R _b	30Ω
R _c	6Ω
3º caso: Carga não Linear	Retificador Trifásico
R	10Ω
C	375μF

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 demonstram o comportamento para alguns tipos de carga. Nas figuras foi apontado o momento que a tensão cruza com zero. Os resultados mostram que o algoritmo é capaz de extrair da corrente de carga sua componente fundamental de sequência positiva em fase com a tensão.

A Figura 4.15 demonstra o comportamento para uma carga com atraso de fase, pode-se notar que a componente de interesse (i_a^* , i_b^* e i_c^*) cruza com zero no mesmo instante que a tensão e amplitude encontrada foi menor que a da corrente da carga, já que não conta com a parcela reativa.

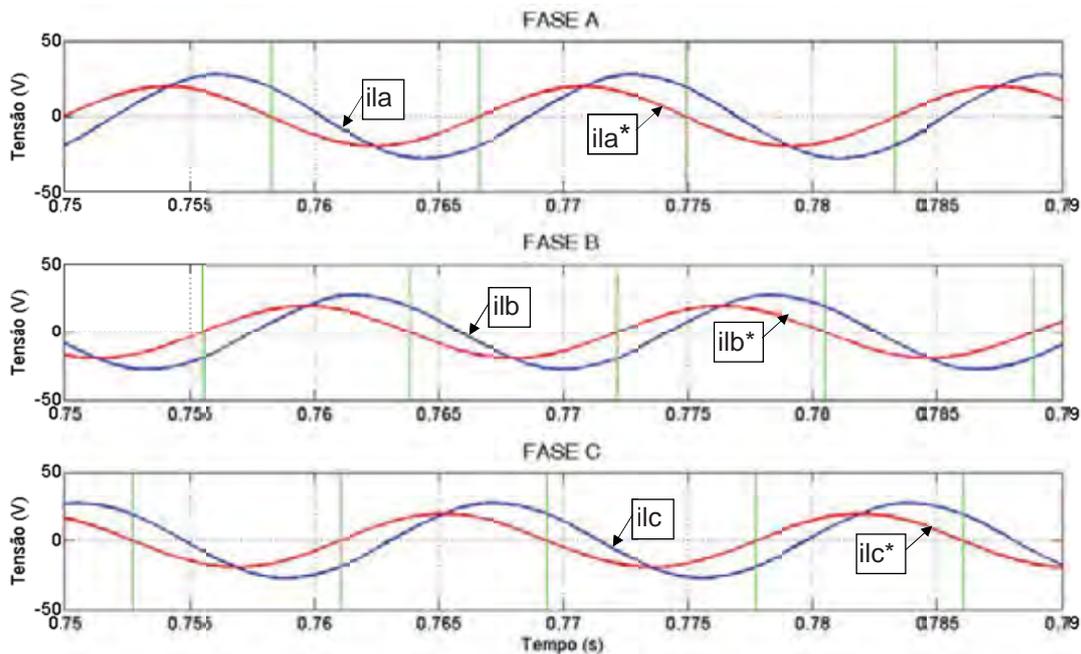


Figura 4.15 - Resultado Carga Reativa para cada fase, os cruzamentos por zero da tensão foram sinalizados por linhas verticais.

Na Figura 4.16 verifica-se o comportamento para uma carga resistiva desequilibrada, nota-se que existe uma defasagem nesta corrente devido ao surgindo de uma tensão no centro da carga. A amplitude encontrada é a média das amplitudes em fase com a tensão. Para uma corrente com distorção, Figura 4.17, a referência obteve a componente de interesse, fundamental em fase com a tensão.

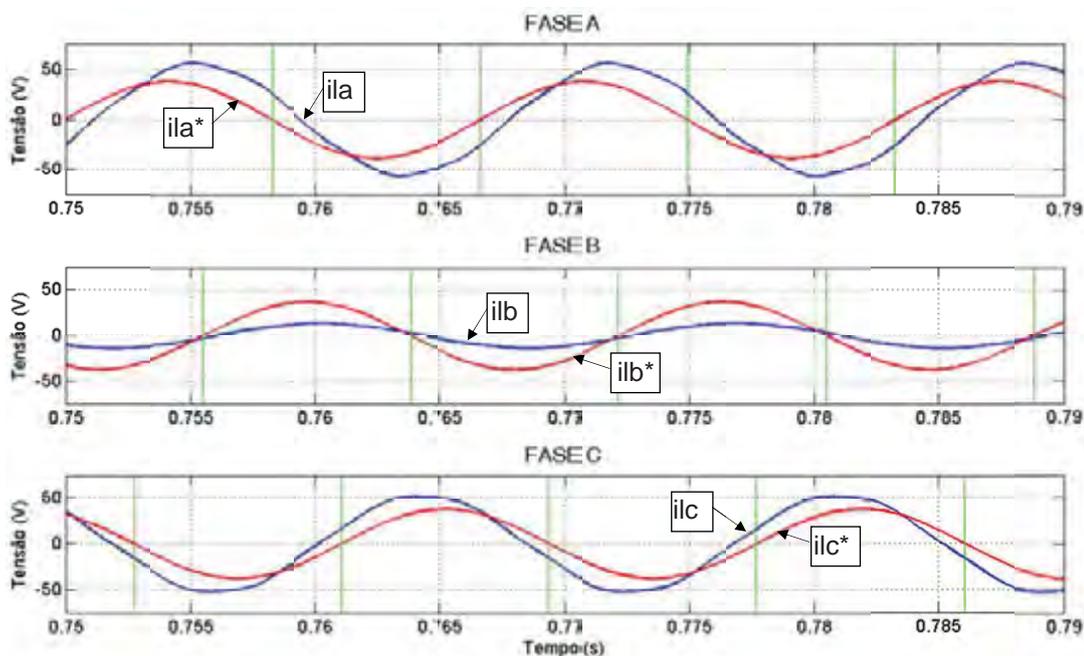


Figura 4.16 - Resultado Carga Desequilibrada para cada fase.

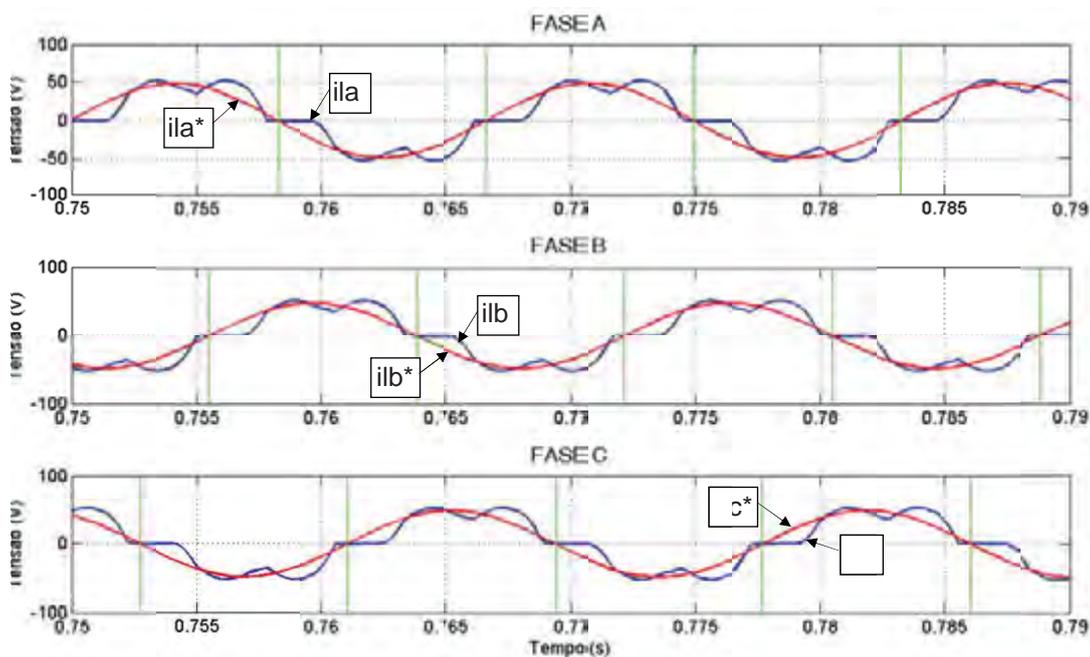


Figura 4.17 - Resultado Carga Não Linear para cada fase.

4.4. Conclusão

O desempenho dos algoritmos discutidos e/ou propostos neste capítulo foi analisado através de simulações computacionais. Tanto o PLL, quanto o GRT e o GRC apresentaram rápida resposta dinâmica, convergindo para resposta em um

ciclo da rede, mesmo em ambientes contendo distorções, desequilíbrios e variações momentâneas na tensão ou defasagem na corrente.

As referências geradas pelos algoritmos GRT e GRC serão utilizadas para recompor a tensão e a corrente, utilizando-se de técnicas de controle em malha fechada, para assim atuar no condicionamento da tensão e corrente da rede através do CUQE [4].

Vale destacar que o desempenho do CUQE é bastante dependente da correta geração de referências, pois caso exista alguma divergência, entre o valores obtidos e os distúrbios reais, poderá ocorrer um fluxo de potência ativa entre o CUQE e a carga, causando variações na tensão no barramento CC e a utilização indevida dos conversores, tanto do ramo Série quanto Paralelo.

5. Rotinas de Inicialização e Proteção para o CUQE

Rotinas de inicialização, desligamento e proteção são necessárias para garantir a operação segura de qualquer condicionador eletrônico de potência, portanto as informações apresentadas neste capítulo podem ser bastante úteis para os que pretendam implementar experimentalmente um dispositivo semelhante. Neste Capítulo são apresentados o sequenciamento de inicialização e rotinas de proteção, tanto para o ramo Paralelo como para o ramo Série.

Os algoritmos de inicialização e desligamento são importantes tanto para garantir segurança à operação dos dispositivos reais, quanto para agilizar e trazer segurança aos ensaios laboratoriais em fase de avaliação de protótipos.

Considerando-se o protótipo apresentado na Figura 5.1, utilizado no contexto deste trabalho e descrito com mais detalhes no próximo capítulo, o acionamento brusco do protótipo pode trazer riscos, sendo necessários alguns cuidados com a estabilidade do banco de capacitores e entrada dos inversores, os quais em estado desligado se encontram isolados através de contadores eletromecânicos.

Por concepção do projeto, o CUQE não deve interferir no funcionamento da carga, sendo utilizado um circuito de passagem livre (*bypass*) para alimentar a carga enquanto o condicionador não entra em funcionamento.

Rotinas de proteção são indispensáveis para realização dos ensaios, para proteção das instalações, equipamentos e operadores. Os algoritmos devem evitar que a tensão do barramento CC ou as correntes do ramo Série ultrapassem valores limites.

O funcionamento dos dois ramos é independente, sendo utilizados quatro sinais digitais para comunicação entre os ramos. As direções e funções dos sinais são listadas na Tabela 5.1. O ramo Paralelo possui interface com botoeiras na porta do painel sendo estas utilizadas para acionar e desligar o protótipo.

A tensão no barramento CC é prioritária no funcionamento do protótipo, assim o ramo Paralelo, que controla essa variável, é considerado como “Mestre”, sendo o primeiro a inicializar, terminando sua inicialização, ele envia um sinal para o ramo Série inicializar.

Para evitar a inicialização em situação de conexão incorreta dos cabos de alimentação, o ramo Paralelo realiza alguns testes antes de iniciar o processo, sendo que ele define se o protótipo inicializa ou não. Os fatores que impediriam a inicialização são: a inexistência de tensão em alguma das fases e a sequência invertida das tensões de alimentação.

A sequência de fase é importante para o funcionamento do algoritmo PLL, bem como a maioria dos algoritmos do protótipo, que dependem da sequência positiva da tensão para realização dos cálculos. O protótipo tem a possibilidade de inverter duas das fases, para efeito de cálculo, permitindo o funcionamento com tal ajuste.

Tabela 5.1 - Sinais entre os ramos.

Sinal	Responsável	Função
Paralelo Ligado	Paralelo	Sinaliza ao ramo Série o fim da inicialização do ramo Paralelo.
Sequência de Fase	Paralelo	Sinaliza ao ramo Série a sequência de fase.
Emergência do ramo Paralelo	Paralelo	Sinaliza Erro de operação do ramo Paralelo.
Emergência do ramo Série	Série	Sinaliza Erro de operação do ramo Série.

Para interpretar os diagramas contidos neste capítulo algumas diferenças na formatação sinalizam diferenças nas variáveis, apenas *itálico* sinaliza variável numérica, **negrito** e *itálico* sinalizam variável digital, quando sublinhado sinaliza negado. As rotinas de inicialização rodam em cada amostragem, independente em cada ramo, a partir dela são chamadas as outras rotinas .

5.1. Rotinas do Ramo Paralelo

Algumas medidas foram tomadas para possibilitar ligar e desligar o protótipo inúmeras vezes sem afetar o funcionamento da carga, o processo de inicialização do ramo Paralelo pode ser interrompido em qualquer momento, já o processo de desligamento não pode ser interrompido, devendo ser finalizado antes da próxima inicialização.

5.1.1. Inicialização

O diagrama da inicialização é apresentado na Figura 5.2. Inicia-se com a leitura das botoeiras na porta do painel, logo em seguida é chamado a rotina de proteção, para o caso de qualquer ocorrência não continuar com processo normal de inicialização.

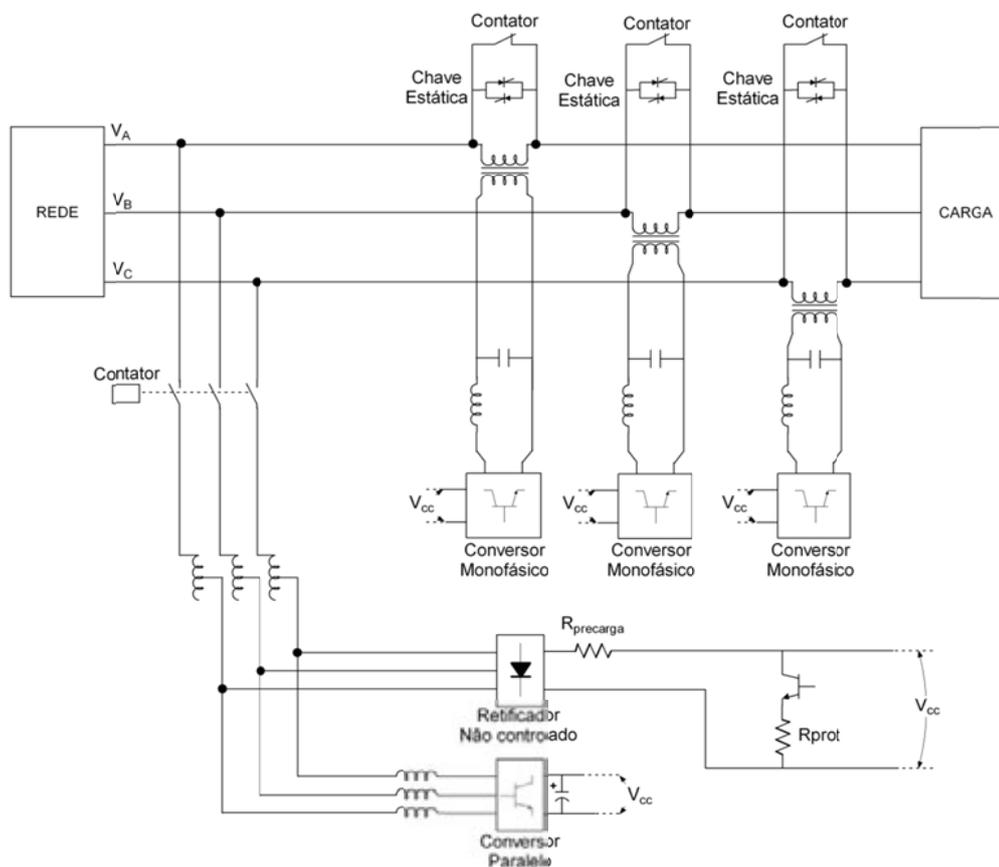


Figura 5.1 – Diagrama detalhado do CUQE.

Enquanto o processo de pré carga não termina, a rampa de referência de tensão do barramento CC se iguala ao valor da tensão medida, para que a comutação para o controle do inversor ocorra de forma suave, com cuidado para que a referência não ultrapasse o valor nominal.

Seguindo o diagrama, caso o comando da botoeira esteja sinalizando para desligar o condicionador ou o processo de desligar ainda não tenha terminado e o painel esteja ligado (para evitar que a rotina de desligamento seja chamada com o painel desligado), a rotina de desligamento será chamada.

Já no caso contrário, se a botoeira sinalizar para ligar o painel e processo de inicialização não tenha terminado (evitando que essa rotina seja chamada depois do fim do processo de inicialização), as rotinas de teste e presença de fase são realizadas.

A rotina de pré carga é chamada no fim da rotina de testes, sendo detalhada no tópico 5.1.3 e sinaliza para a rotina de inicialização o fim ou não do processo de pré carga. No caso do processo terminado a rampa de tensão é incrementada, partindo da última leitura da tensão no barramento CC e enquanto a referência não atingir o valor nominal do barramento CC

Quando o valor nominal é atingido o processo de inicialização termina, acionando na sinaleira na porta do painel e sinalizando ao ramo Série que ele está liberado para inicializar.

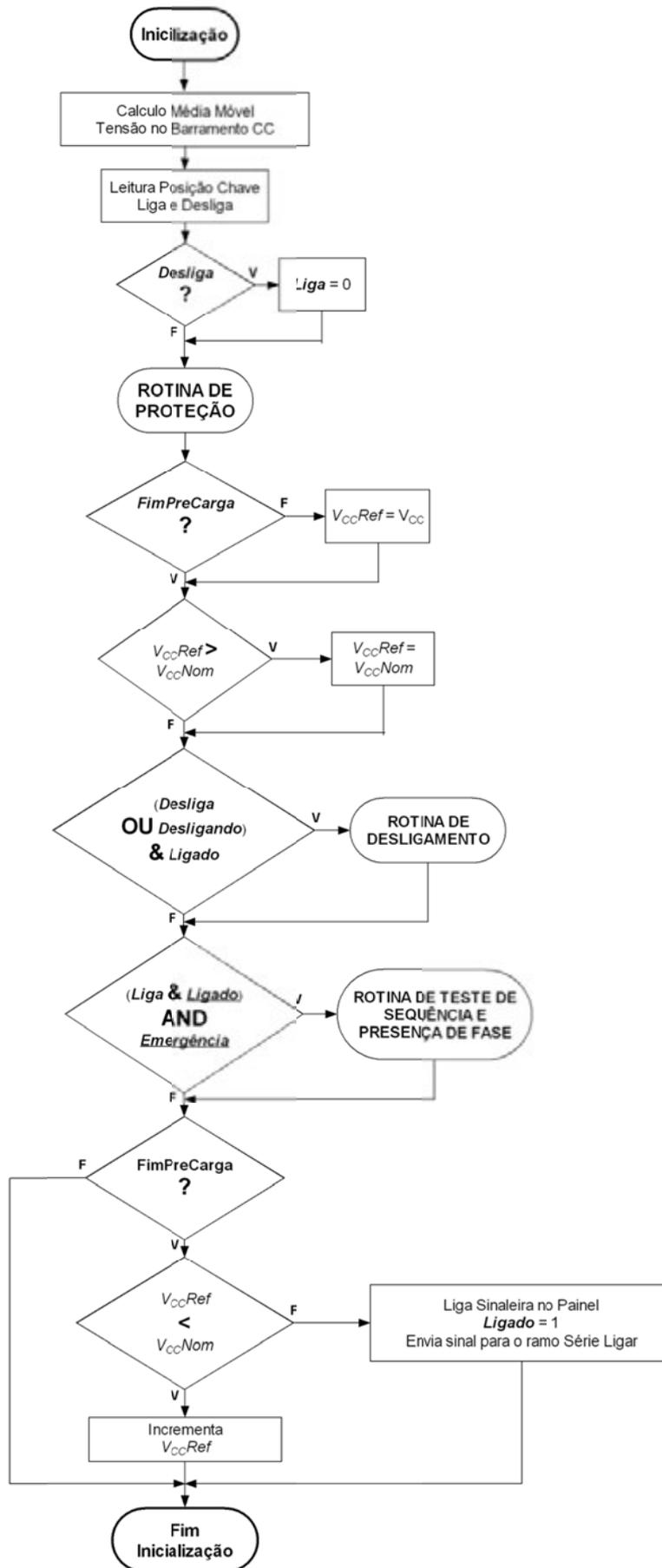


Figura 5.2 - Rotina de Inicialização do ramo Paralelo.

5.1.2. Detecção de Sequência e Presença de Fase

A Figura 5.3 traz o diagrama de testes de presença e sequência de fase. O algoritmo segue para a rotina de pré-carga e sinaliza se deve ou não iniciar a pré-carga com o erro de tensão, quando o erro de tensão é anulado é permitido o início do processo.

Um temporizador de 1,5 segundos é utilizado para aguardar o sincronismo do PLL, tempo mais que suficiente como demonstrado em 4.1.2. Enquanto o algoritmo espera o PLL sincronizar, são realizados os testes de presença de fase, calculando-se sequencialmente o valor eficaz de cada fase. Essa medida foi utilizada para não sobrecarregar o processamento.

Com o término do período de espera, os valores calculados de valor eficaz das tensões são comparados com valores de referência. No caso de não obter o valor mínimo um contador de erros de tensão é incrementado, o erro de tensão é mantido e o temporizador é reiniciado para um novo teste. Se ocorrer 5 erros de tensão a emergência é acionada.

Em seguida é realizado o teste de sequência de fase. Durante os ensaios foi observado que quando a sequência estava invertida o produto interno convergia para valor com média nula, porém com grande amplitude instantânea. Quando a sequência está correta o produto possui valor médio nulo e amplitude instantânea muito reduzida.

A média do módulo do produto interno é utilizada para determinar a sequência de fase, nos ensaios, em casos de sequência direta esse resultado não ultrapassa 0,04p.u. e nos casos de sequência invertida os resultados atingiram valores próximos de 0,7p.u.

No caso de sequência de fase invertida o erro de tensão é mantido, o que leva o algoritmo a inverter a sequência de fase (no mesmo instante o ramo Série recebe o sinal para inverter a sequência) e incrementar o contador de erros e reiniciar o temporizador.

5.1.3. Rotina de Pré Carga

O processo de pré-carga consiste em utilizar uma ponte retificadora não controlada limitada por um resistor série para iniciar a carga dos capacitores do barramento CC, acionado por um contator, a Figura 5.4 ilustra o digrama da rotina. A tensão no barramento deve ser elevada até um valor mínimo para possibilitar o controle pelo inversor (valor de pico da tensão de acoplamento).

Um temporizador de pré-carga é acionado no mesmo instante que o contator, no caso da tensão não atingir a tensão especificada no tempo esperado a emergência será acionada. Quando o valor é atingido o temporizador de pré-carga é zerado, o contator de pré-carga é desligado e o contator principal do ramo Paralelo é acionado.

Quando o contator principal é acionado um temporizador aguarda o tempo estimado para os contator realizar sua comutação e finalizar o processo de pré-carga e assim finalizando o processo de inicialização do ramo Paralelo, sinalizando o fim do pré carga e habilitando o funcionamento dos inversores e controladores.

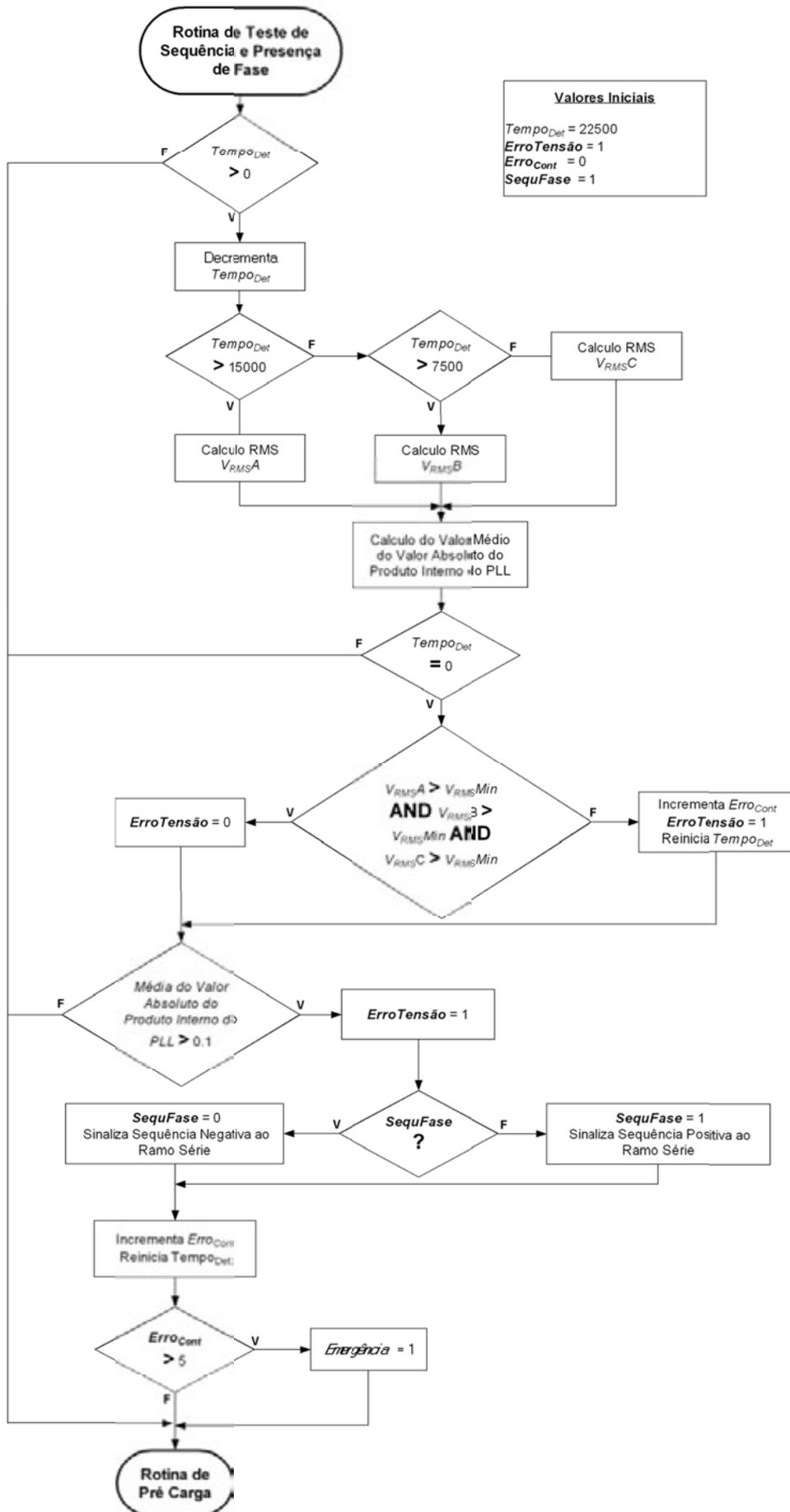


Figura 5.3 - Detecção de Presença e Sequência de Fase.

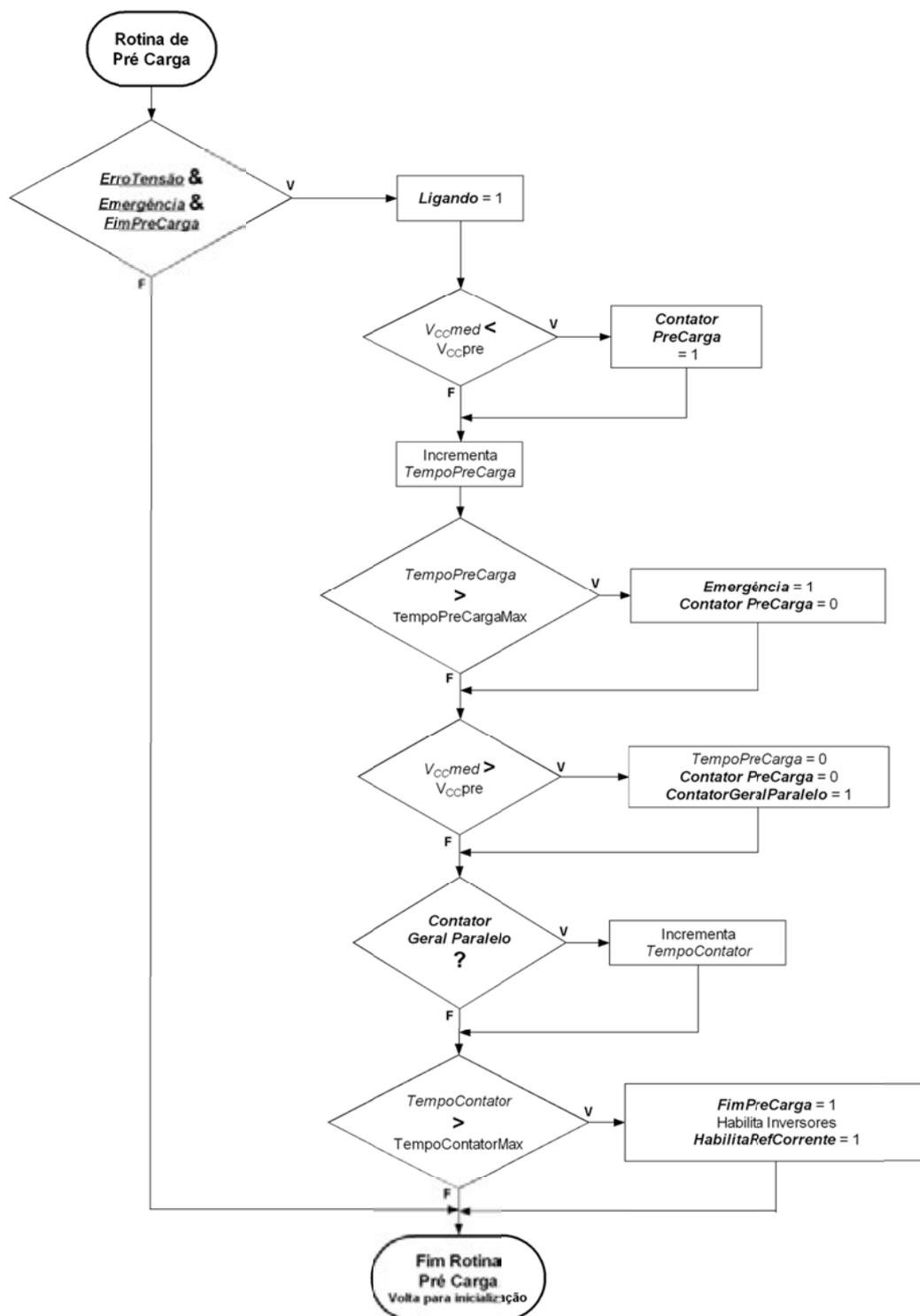


Figura 5.4 - Rotina de Pré-carga.

5.1.4. Rotinas de Desligamento

A rotina de desligamento deve, além de parar o funcionamento do protótipo, prepará-lo para a próxima inicialização, considerando os dois ramos. A Figura 5.5 ilustra o processo, que inicia anulando a referência de corrente.

A corrente não cessa imediatamente, o valor médio do absoluto das correntes é calculado e aguarda-se que este valor atinja valores seguros para

continuar o processo de desligamento, um temporizador assegura que o processo continue mesmo que a corrente não se comporte como esperado.

O processo continua abrindo o contator principal do Paralelo e enviando sinal para o ramo Série também desligar, ao mesmo tempo é acionado o resistor de proteção (Rprot) para descarregar os capacitores do barramento CC.

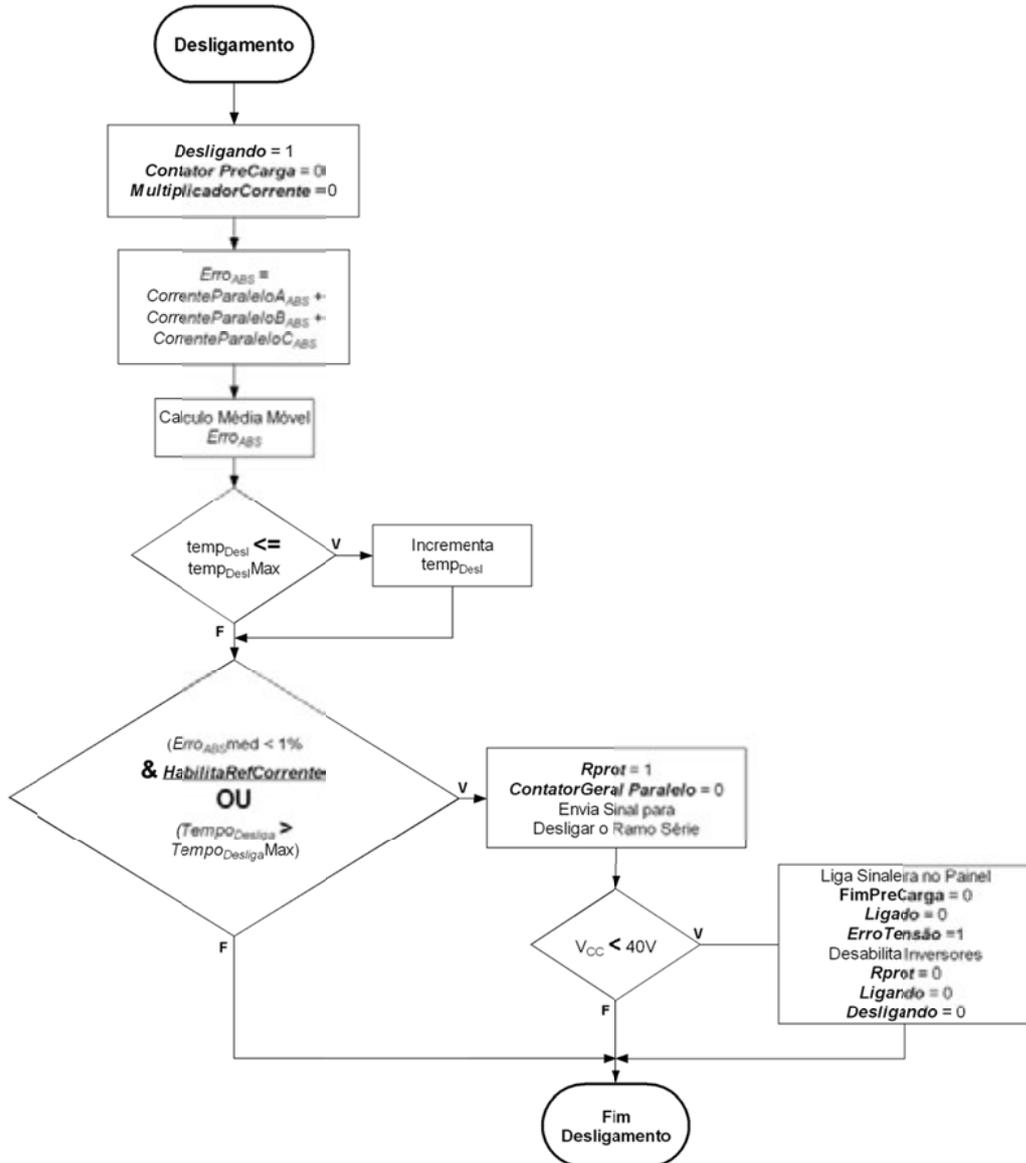


Figura 5.5 - Rotina de Desligamento do Ramo Paralelo.

O barramento CC pode receber energia durante o processo de desligamento do ramo Série, sendo que o Rprot fica acionado até a tensão do barramento CC atingir valores seguros. Por fim diversas variáveis são preparadas para que o próximo processo de inicialização ocorra sem problemas, diferente do resultado do desligamento por emergência.

5.1.5. Rotinas de Proteção

A função desta rotina é evitar que a tensão no barramento CC ultrapasse valores limites. Existe uma margem de controle onde a tensão pode variar sem

riscos, porém devido à proximidade com o valor crítico são necessários certos cuidados.

No caso da tensão ultrapassar o valor considerado aceitável o R_{prot} é acionado para dissipar energia do barramento CC, esse resistor deve ser utilizado com cautela, pois a energia total do barramento CC é muito superior a sua capacidade de dissipação, ocasionando risco de incêndio se não forem respeitadas suas restrições.

Foram realizados alguns ensaios para medir o tempo que o resistor leva para atingir sua temperatura nominal e para voltar à temperatura ambiente quando alimentado por uma tensão de 400V (tensão de operação do barramento CC). Levando em consideração esses valores, foi implementado um algoritmo que não permite o acionamento do resistor por tempo superior ao estabelecido e evita que o resistor seja acionado repetidas vezes sem resfriar de forma adequada.

O algoritmo utiliza um temporizador que é incrementado com uma velocidade quando o resistor está acionado e decrementado com uma velocidade bem menor quando o resistor não está acionado. Se mesmo assim a tensão ultrapassar o valor crítico a emergência é acionada. A Figura 5.6 ilustra o diagrama da rotina de proteção.

Outros eventos que resultam em emergência são erro nos disparadores e erro oriundo do ramo Série. A emergência desliga o protótipo imediatamente, abrindo todos os contatores e desabilitando inversores, impossibilitando o próximo processo de inicialização.

5.2. Rotinas do Ramo Série

O ramo Série deve lidar com o circuito de passagem (*bypass*), que permite que o protótipo seja inserido, ou retirado, sem que a carga deixe de ser alimentada. Também deve lidar com eventos de sobrecorrente na carga, por exemplo, durante a partida de motores.

5.2.1. Inicialização

A Figura 5.7 ilustra a rotina de Inicialização do ramo Série, que aguarda o sinal de inicialização do ramo Paralelo para dar seguimento ao processo de inicialização. O processo não se inicia caso o ramo Série já esteja ligado ou esteja ocorrendo sobrecorrente ou que a tensão no barramento CC esteja com valores muito reduzidos.

No caso do ramo Série estiver ligado e o ramo Paralelo sinalizar o desligamento a informação será armazenada para dar início ao processo de desligamento. Com todos os requisitos cumpridos o processo continua acionando a chave estática e o contator (que é normalmente fechado, ou seja, será aberto).

A chave estática é utilizada por ser mais veloz e ter capacidade de comutar correntes elevadas, seu uso evita que a comutação da chave mecânica influencie o funcionamento do equipamento, ela e o contator de *bypass* são acionados no

mesmo instante, porém, ela mantém a condução da corrente somente enquanto o contator abre ou fecha o circuito, deixando de conduzir fora deste período.

Um temporizador aguarda este tempo para continuar a inicialização, a chave estática volta a ser aberta, neste ponto a rampa da referência do inversor é incrementada até liberar totalmente o funcionamento dos inversores do ramo Série que já funcionava com referência nula.

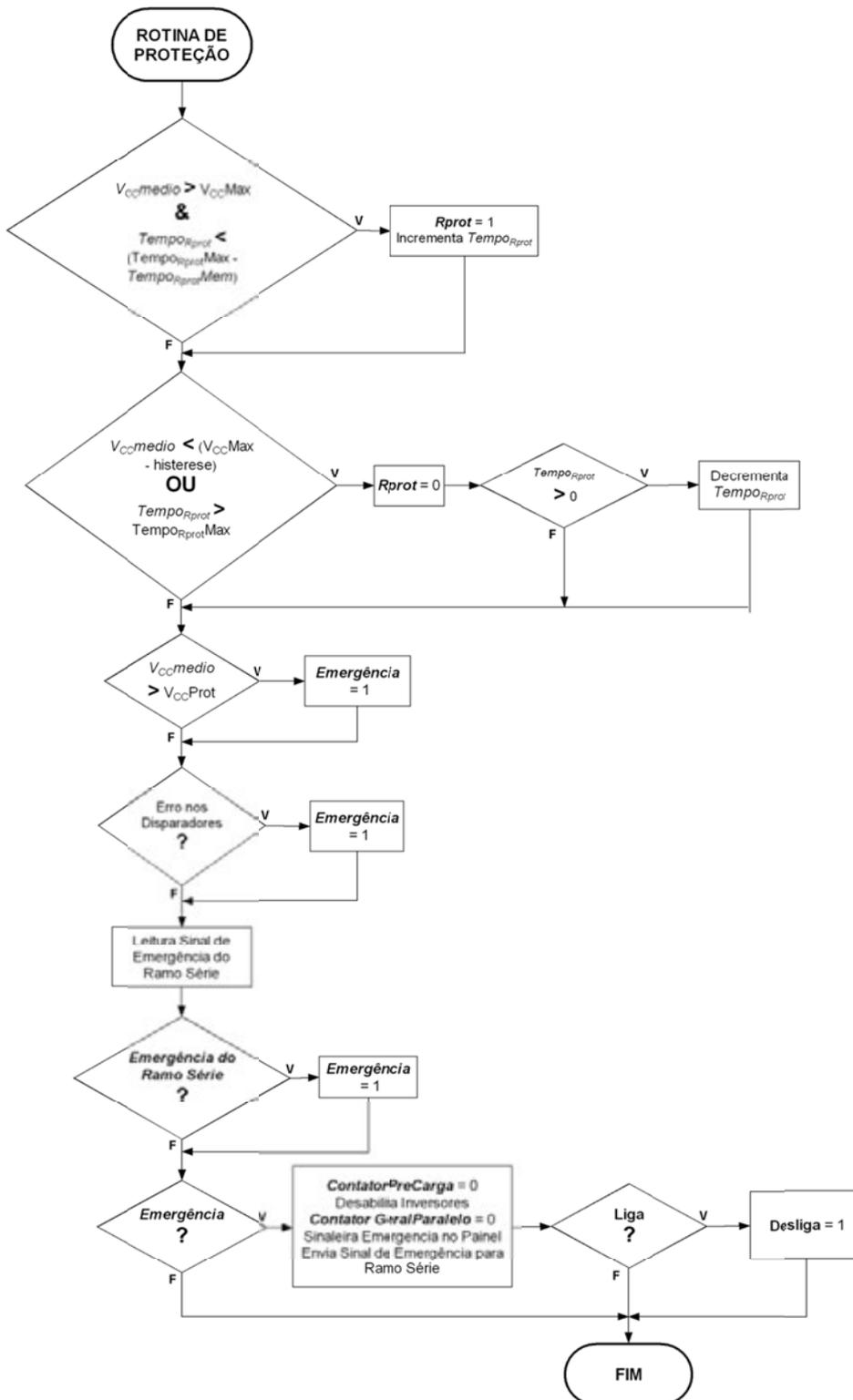


Figura 5.6 - Rotina de Proteção do Ramo Paralelo.

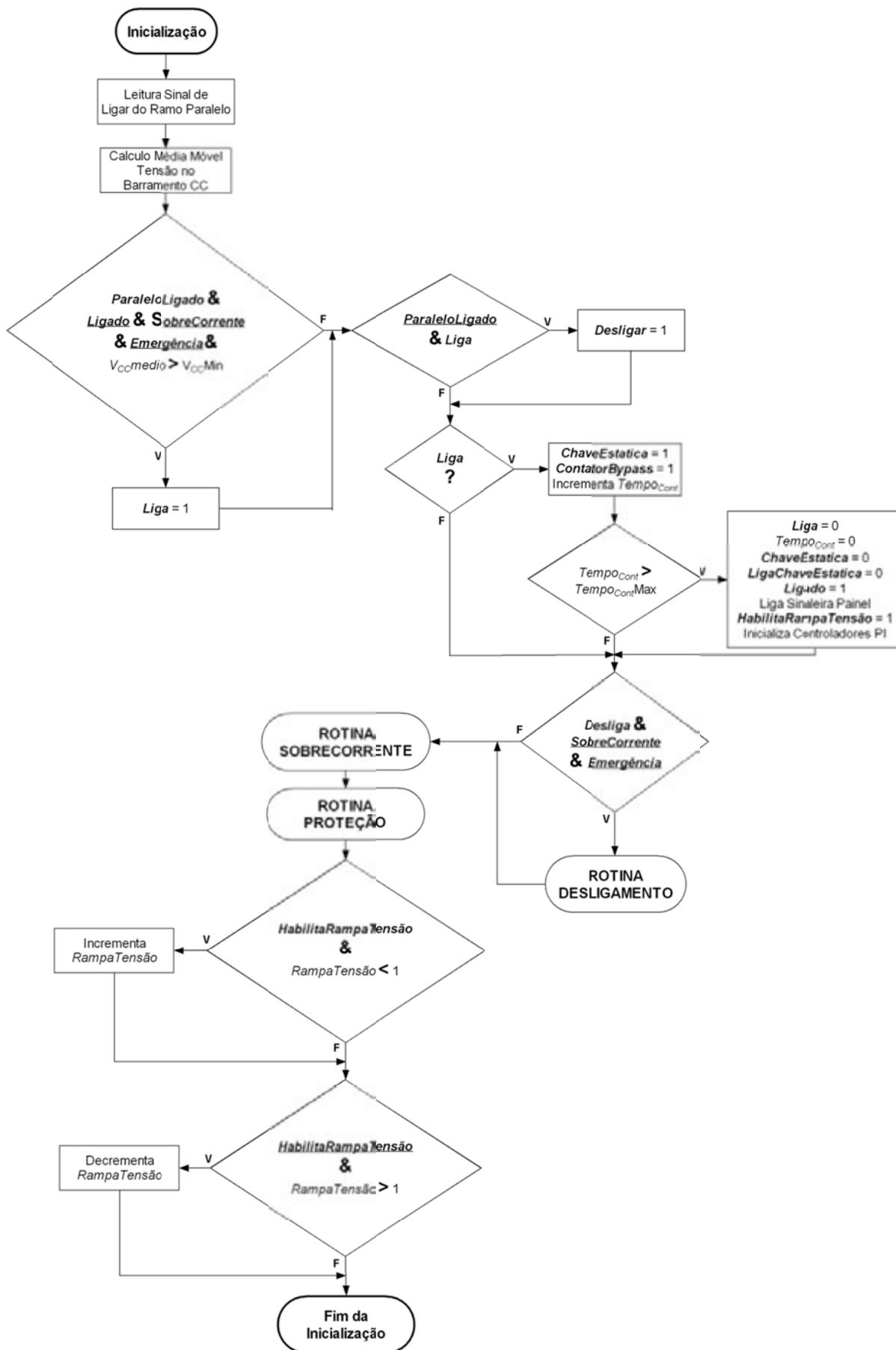


Figura 5.7 - Rotina de Inicialização do ramo Série.

5.2.2. Rotina de Sobre Corrente

Por filosofia de projeto, o CUQE não deve interferir em um evento transitório de sobrecorrente de carga, por exemplo uma partida de motor, ou curto circuito da carga, respeitando limitações dos IGBTs. Enquanto o ramo Série estiver acionado e houver um evento de sobrecorrente na carga, por um curto espaço de tempo o ramo Série deve se desligar por algum tempo para proteger os inversores.

O diagrama desta rotina é ilustrado na Figura 5.8. Quando ocorre algum evento de sobrecorrente, ele termina por reinicializar a placa de erros, neste momento é verificado se a sobrecorrente se mantém, no caso de cinco tentativas a emergência é acionada.

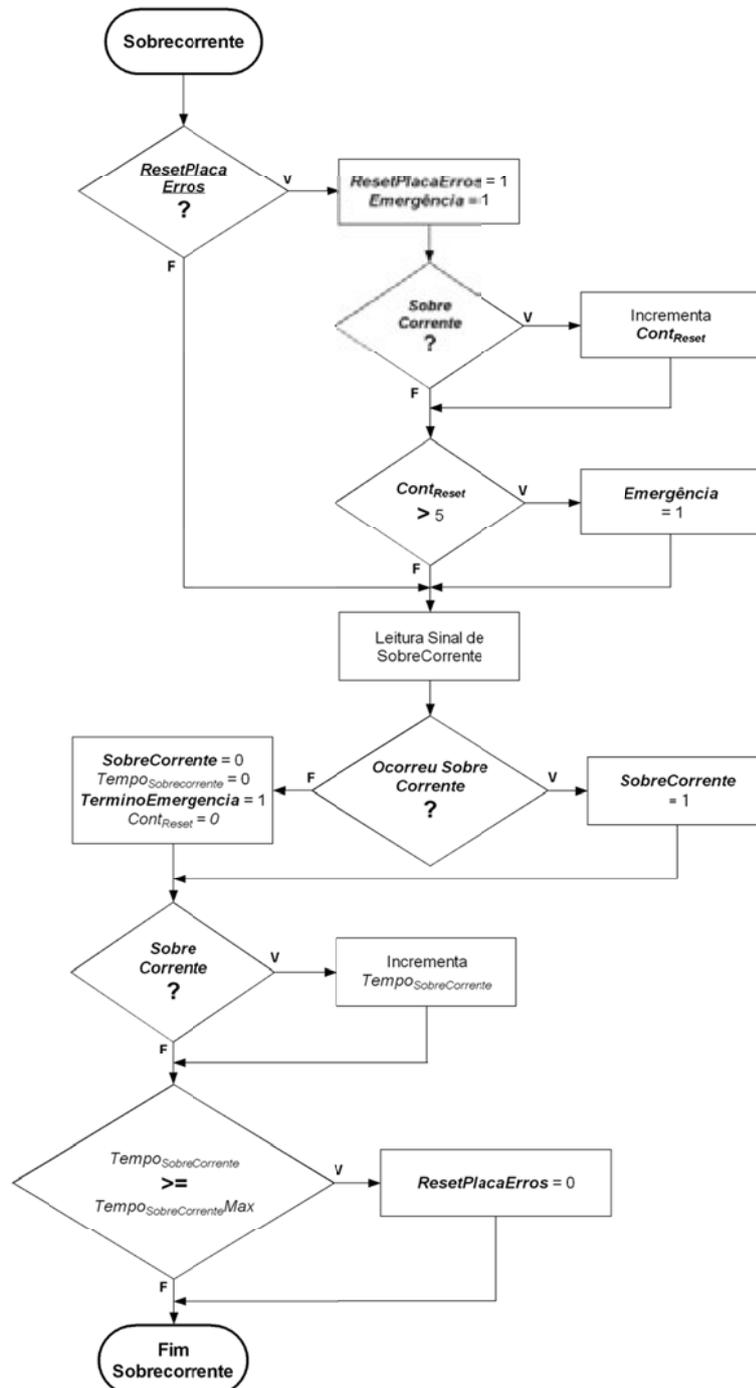


Figura 5.8 - Diagrama da rotina de Sobrecorrente.

Caso o ramo Paralelo não consiga devolver toda a energia, a tensão no barramento CC começa a sofrer elevação, quando ultrapassa o valor limite, o multiplicador da referência de tensão passa decrescer, proporcionalmente ao aumento da tensão no barramento, se essa for a causa da elevação do barramento CC a elevação deve cessar.

Em um caso oposto, onde um AMT exige que o ramo Série retire tensão do barramento CC, caso o ramo Paralelo não seja capaz de recompor a tensão e o barramento CC decaia a um valor limite, a emergência é acionada.

Outras fontes de emergência são: emergência do Paralelo, erro nos disparadores e sobretensão no barramento CC. A emergência aciona os contadores e a chave estática, além de anular a referência de tensão. A chave estática volta a ser aberta depois de algum tempo, mantendo o circuito fechado através dos contadores. A Figura 5.10 ilustra a rotina de proteção.

5.3. Conclusão

Os algoritmos propostos neste capítulo foram testados em protótipo e funcionaram como esperado, no entanto, os processos de inicialização e desligamento costumam levar 20 segundos e 2 minutos respectivamente tornando complicada a coleta de resultados.

Durante a coleta dos resultados, expostos no Capítulo 7, o protótipo foi inicializado e desligado inúmeras vezes para troca de carga. O ajuste fino dos controladores eventualmente levava os níveis de tensão no barramento CC para valores perigosos, quando as rotinas de proteção atuaram.

Mesmo assim, como proteção adicional, é aconselhada a utilização de um relé eletromecânico para proteger o barramento CC contra sobretensões, no caso de falhas no processador ou alguma situação não prevista no algoritmo.

As rotinas de proteção discutidas neste capítulo não dispensam a utilização de disjuntores ou fusíveis para proteção contra curto circuito e sobrecorrente na carga, apenas apresentado proteções contra danos ao protótipo.

Um motor foi utilizado para verificar o funcionamento do algoritmo de sobrecorrente, gerando um pico de corrente de curta duração durante sua partida, onde o ramo Série se desligou por proteção e voltou a funcionar depois de algum tempo.

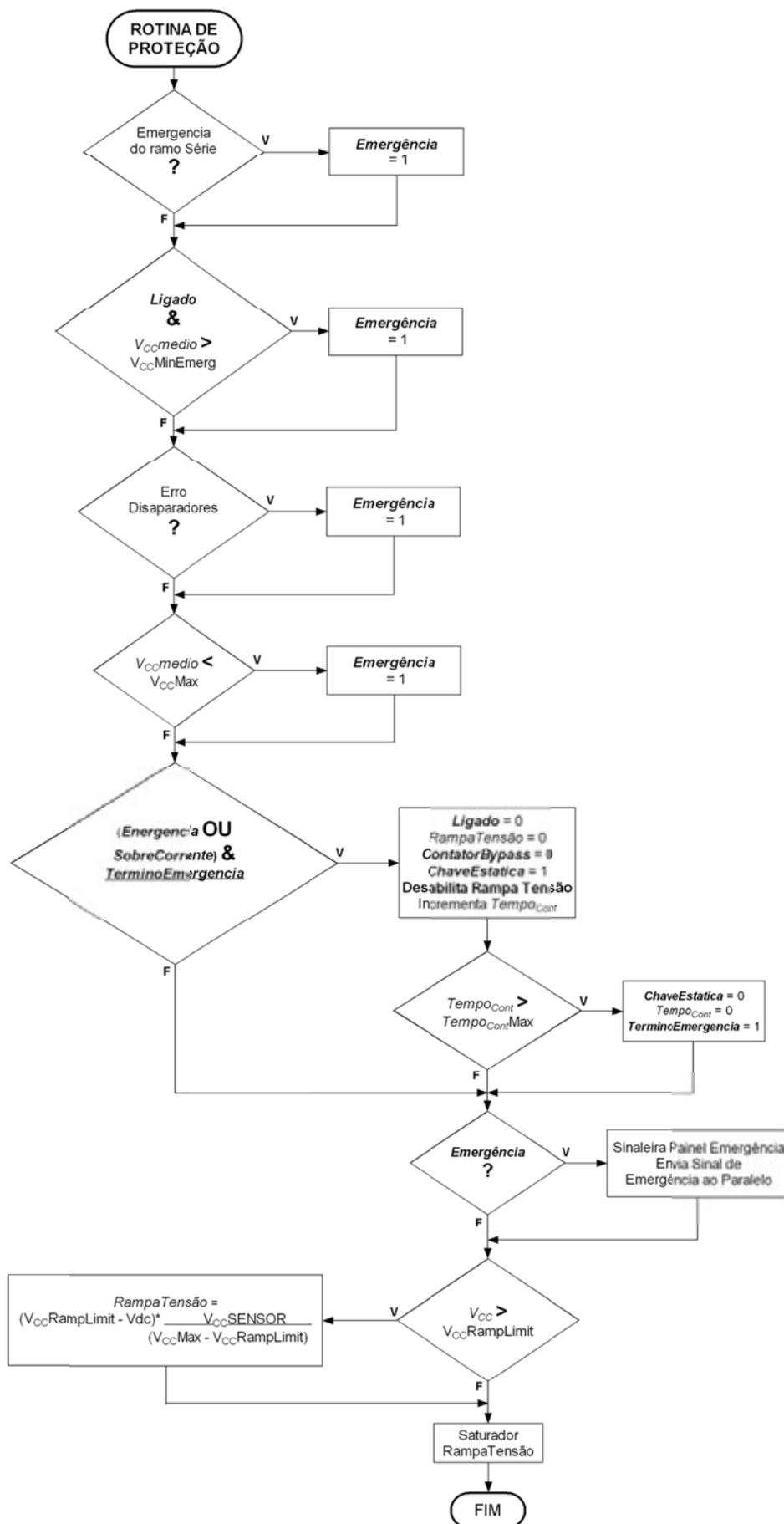


Figura 5.10 - Rotina de Proteção do Ramo Série.

6. Protótipo do CUQE

Neste capítulo são apresentados detalhes e especificações do protótipo de CUQE utilizado. Também são apresentadas e comentadas as malhas e técnicas de controle utilizadas para o controle das tensões e correntes do CUQE.

A potência de um equipamento CUQE pode variar desde algumas dezenas de kVAs, para compensação de equipamentos específicos, até dezenas de MVA, protegendo e compensando indústrias inteiras. O protótipo utilizado neste trabalho e descrito a seguir possui potência para atuar em cargas da ordem de 75 kVA. As especificações do protótipo se encontram na Tabela 6.1.

Tabela 6.1 - Parâmetros para o protótipo.

Ligação	Trifásica sem neutro
Tensão Nominal	$380V_{\text{linha}}/220V_{\text{fase}}$
Corrente ramo Paralelo	77A
Potência aparente da carga.	$S_{3\phi\text{carga}} = 75kVA$
Máxima corrente na carga	114A
Mínima tensão da rede nas três fases durante AMTs.	$V_{sag3\phi} = 0,65pu$
Mínima tensão da rede em uma das fases durante AMTs.	$V_{sag1\phi} = 0,5pu$
Duração máxima dos AMTs.	$\Delta t = 0,5s$

Os elementos que constituem o protótipo, tais como: indutores, transformadores, capacitores e chaves semicondutoras foram especificados com base nos parâmetros da Tabela 6.1. Outros elementos que fazem parte do subsistema de controle, tais como: microcontroladores e sensores também serão descritos nas seções a seguir, além das malhas de controle.

6.1. Detalhes do protótipo

A Figura 6.1 apresenta o diagrama esquemático do protótipo. Semelhante a topologia discutida no Capítulo 3, o ramo paralelo conta com um auto

transformador abaixador de tensão para o acoplamento com a rede, possibilitando o uso de tensão reduzida no barramento CC (maior segurança).

Também são utilizados transformadores monofásicos para acoplamento do ramo Série, permitindo que os inversores deste ramo trabalhem com tensões reduzidas, sendo importante em casos de afundamentos severos, onde a tensão do barramento CC tenha sua tensão reduzida.

A figura apresenta a posição de cada elemento. Na Figura 4.1 são apresentados os elementos de inicialização e proteção, como circuito de *Bypass*, pré-carga e resistores para dissipação de energia. Detalhes do dimensionamento dos elementos se encontram no anexo A.

O protótipo não conta com proteção contra curto circuito na carga, por filosofia do projeto, sendo que as proteções como disjuntores e fusíveis devem ser efetuadas no barramento anterior, para proteger tanto o protótipo, como o equipamento (instalação) que ele estaria compensando.

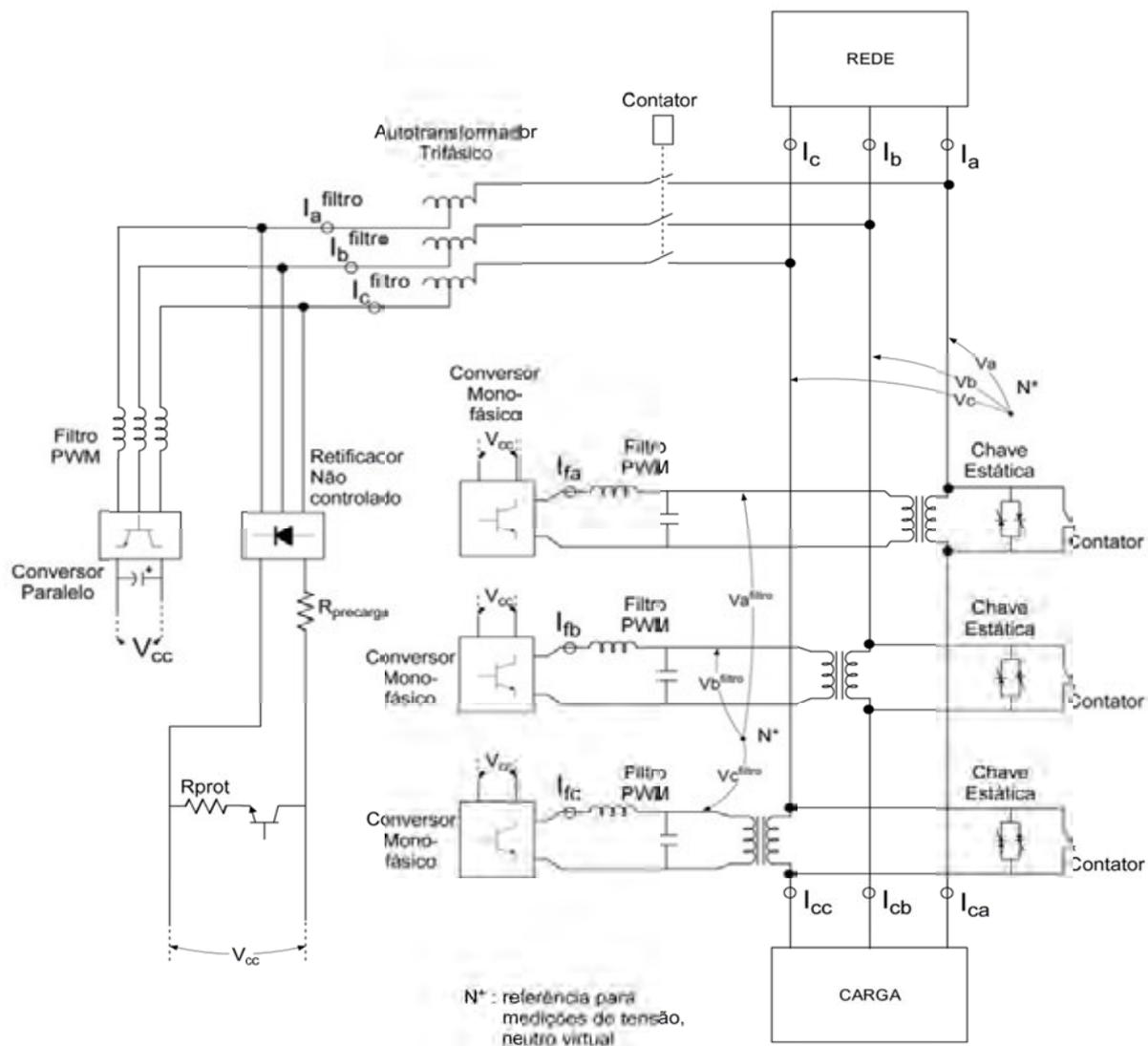


Figura 6.1 - Diagrama esquemático completo do CUQE implementado.

6.2. Componentes

A Tabela 6.2 apresenta os valores dos componentes passivos do protótipo. O detalhamento dos cálculos pode ser consultado no apêndice A, bem como em [20], [30], [31], [32], [33] e [34].

O ramo Paralelo é constituído por um inversor trifásico conforme a Figura 2.1c, formado por módulos da Semikron modelo SKM 145 GB 123 D (1200V e 145A) e disparador modelo SKPC22A.

No ramo Série são utilizados inversores monofásicos para cada fase, conforme diagrama da Figura 2.1a, formado por módulos da Semikron modelo SKM 145 GB 123 D (1200V e 145A) e disparador modelo SKPC22A, existe uma chave adicional no ramo Série que é utilizada para controlar os resistores de proteção.

Os equipamentos de manobra são contadores de passagem livre, chave estática e contator do ramo Paralelo. A função do contator de passagem livre e da chave estática é permitir a entrada e retirada do CUQE, sem que uma carga sensível deixe de ser alimentada.

Tabela 6.2 - Valores dos componentes do protótipo.

Componentes do Ramo paralelo	
Transformador	29,1KVA
	380V/160V
	Autotransformador Trifásico
Indutor de filtro PWM	441 μ H
Componentes do Ramo Série	
Transformador	20,5KVA
	180V/380V
	Monofásico
Indutor de filtro PWM	687 μ H
Capacitor de filtro PWM	102 μ F
Componentes de Manobra	
Contator de <i>Bypass</i>	25A
	monofásico
	normalmente fechado
Chave estática	355A
Outros componentes	
Banco de Capacitores	169,2 μ F
Resistores de proteção	25,81 Ω
Resistores de pré-carga	19,7 Ω

6.3. Elementos de Controle

O sistema de controle utiliza medições das tensões e correntes e processador de sinais para identificar os distúrbios e controlar os inversores. O processador utilizado foi o DSP Texas, com as características na Tabela 6.3.

Para fazer a interface com os sensores e com os inversores são utilizadas circuitos de pré condicionamento de sinais, também contando com um circuito conversor digital para analógico, com saída de -2,5V até +2,5V utilizado para verificar o funcionamento das variáveis internas do microprocessador.

Tabela 6.3 - Especificações do Processador.

Processador Texas Instruments	TMS320F2812
Frequência de Operação	150MHz
Memória RAM	36KB
Memória Flash	256 KB
PWM	16 Canais
	16 Canais
Conversor Analógico/Digital (A/D)	12 Bits de precisão
	Faixa entre 0-3V
Entradas/Saídas Digitais (E/S)	56 canais
	Tensão E/S 3,3V

Os sensores, de tensão e de corrente, fornecem o sinal proporcional ao medido na faixa de -5V a +5V, o circuito de pré condicionamento leva a faixa para 0V a 3V, com limitadores para proteção das entradas analógicas do processador. Para medição das correntes foram utilizados LEMs de corrente da Tabela 6.4, dimensionados com uma margem de 20% para evitar saturação, as especificações se encontram na Tabela 6.5.

Tabela 6.4 - Sensores de corrente.

Modelo	Máxima corrente medida	Relação de transformação	Frequência de operação
LA 125 P	125 A _{RMS}	1:1000	CC .. 100KHz
LA 200 P	200 A _{RMS}	1:2000	CC .. 100KHz

Tabela 6.5 - Detalhes dos Sensores de corrente.

Medida	Transdutor	Grandeza medida	Calibração	Resistor de medição	Fundo de escala
Corrente do ramo Série	LA 125 P	93A _{RMS}	157,83A _{Pico}	15,84Ω	149,7A _{pico}
Corrente do ramo Paralelo	LA 125 P	76A _{RMS}	129A _{pico}	19,38Ω	124,2A _{pico}
Corrente de Carga	LA 200 P	114A _{RMS}	193,5A _{PICO}	25,84Ω	181,9A _{pico}

Para medição das tensões foram utilizados sensores de efeito Hall (fabricante LEM) de tensão. Novamente foi utilizada uma margem de 20%. O modelo do sensor utilizado pode medir de 20 a 500V com tempo de resposta de 40us e os detalhes dos ajustes são expostos na Tabela 6.6.

Tabela 6.6 - Detalhes dos Sensores de tensão.

Medida	Transdutor	Grandeza medida	Calibração	Resistor de medição	Fundo de escala
Tensão da rede	LV 20 P	380V _{RMS}	373,4V _{RMS}	71,57Ω	370,1V _{RMS}
Tensão na carga	LV 20 P	380V _{RMS}	373,4V _{RMS}	71,57Ω	372,7V _{RMS}
Tensão Barramento CC	LV 20 P	400V _{cc}	440V	100,57Ω	441,6V _{RMS}

6.4. Controladores

Uma vez definida a topologia e as estratégias de compensação de acordo com o Capítulo 3, os dois ramos são controlados independentemente, porém compartilham os capacitores de barramento CC. O controle da tensão no barramento CC é responsabilidade do ramo Paralelo, sendo que sua topologia permite que a energia excedente seja devolvida para a rede CA.

Diversas técnicas poderiam ser utilizadas para o controle, no caso do Ramo Série a opção utilizada se baseia em pesquisas anteriores relatadas em [35], [5], [36] e [37], contando com aplicações em equipamentos tipo DVR e Fontes Ininterruptas de Energia (*Uninterruptible Power Supply* UPS), que apresentam comportamento semelhante ao ramo Série do CUQE.

A estratégia baseia-se na realimentação da tensão no capacitor e da corrente do indutor de filtro de saída, utilizando filtros sintonizados e ganhos diferentes para cada frequência de interesse.

O controle do ramo Paralelo utiliza a realimentação da corrente do filtro indutor (saída do inversor) para garantir a corrente desejada. O ramo Paralelo também deve manter a tensão no barramento CC por outra malha, que é multiplicada por uma referência senoidal. Como a malha de corrente deve ser rápida e a de tensão lenta as duas podem ser modeladas separadamente.

O ramo Paralelo funciona como retificador de alto fator de potência para controlar a tensão no barramento CC e como Filtro Ativo Paralelo gerando a corrente inversa aos distúrbios da corrente da carga.

6.4.1. Ramo Série

O Ramo Série é formado por três pontes H (uma em cada fase) na Figura 6.1, operando como conversores CC/CA. Formados também por filtros LC e transformador de acoplamento.

As tensões nos secundários dos transformadores se somam às da fonte de modo que as tensões na carga sejam senoidais e balanceadas. Os conversores utilizam técnicas PWM de três níveis, com frequência elevada (12kHz), para gerar a tensão exigida pelo GRT.

(I_{fn}) e do secundário (I_{cn}), sendo que o controlador PI trabalha para atenuar qualquer diferença. O resultado deste PI será somado a referência do GRT.

O projeto do controlador não foi abordado neste trabalho, os ganhos do controlador foram obtidos empiricamente, sabendo-se que a resposta dinâmica desse controlador deveria ser lenta, os valores utilizados estão na Tabela 6.8

Tabela 6.8 - Ganhos Aplicados na Malha Anti-Saturação do Transformador.

Ganho	Valor
K_P	0,3
K_I	10,8

6.4.2. Ramo Paralelo

O Ramo Paralelo (Figura 6.1) é formado pelo inversor trifásico ligado em paralelo à carga, próximo à fonte, outros componentes deste ramo são os indutores em cada fase e o transformador de acoplamento, além do capacitor CC compartilhado com o ramo Série.

Os conversores atuam como VSI utilizando modulação PWM de dois níveis para atuar na corrente, de forma que a corrente da fonte seja senoidal, equilibrada e em fase com a tensão. Atuando corrigindo os distúrbios da corrente da carga (filtro ativo paralelo) e na manutenção da tensão no barramento CC. O diagrama da Figura 6.3 apresenta a malha de tensão do barramento CC e na Figura 6.4 a malha de corrente

Nas duas malhas são aplicadas técnicas de controle PI e a Tabela 6.9 traz os ganhos para os controladores. As malhas são desacopladas em função das frequências, permitindo seu desenvolvimento independente. O desenvolvimento dos controladores é detalhado no anexo B e em [34] e [35].

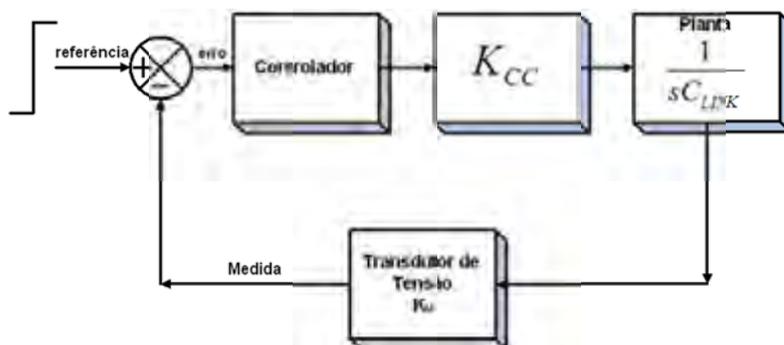


Figura 6.3 - Diagrama de blocos da malha de tensão CC[3].

Tabela 6.9 - Ganhos do Ramo Paralelo.

Ganho	Valor
Malha de Tensão	
K_P	5
K_I	675
Malha de Corrente	
K_P	2.2
K_I	1650

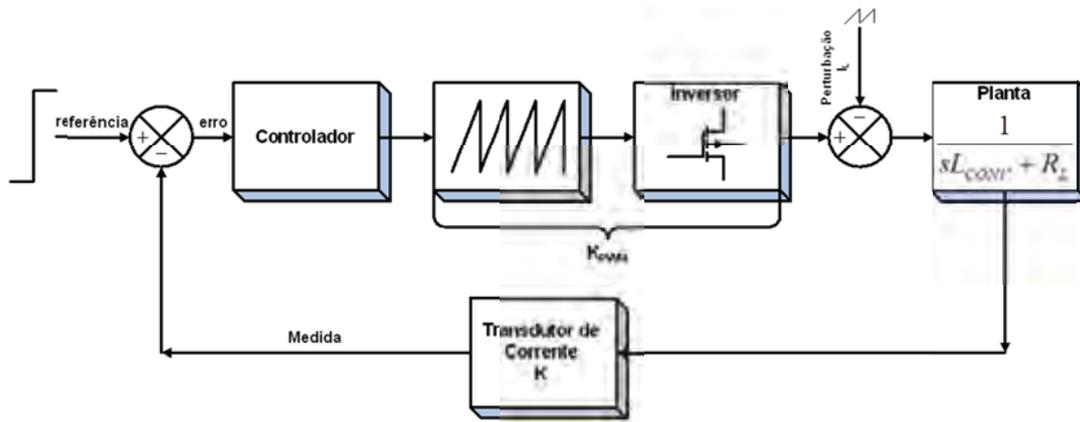


Figura 6.4 - Diagrama de blocos da malha de corrente[3].

6.5. Ilustrações do Protótipo

Neste tópico são apresentadas ilustrações do protótipo. A Figura 6.5 apresentam os detalhes da parte frontal, pode-se observar que as placas de controle (um conjunto para cada ramo) foram alocadas em uma caixa metálica para evitar influências eletromagnéticas.

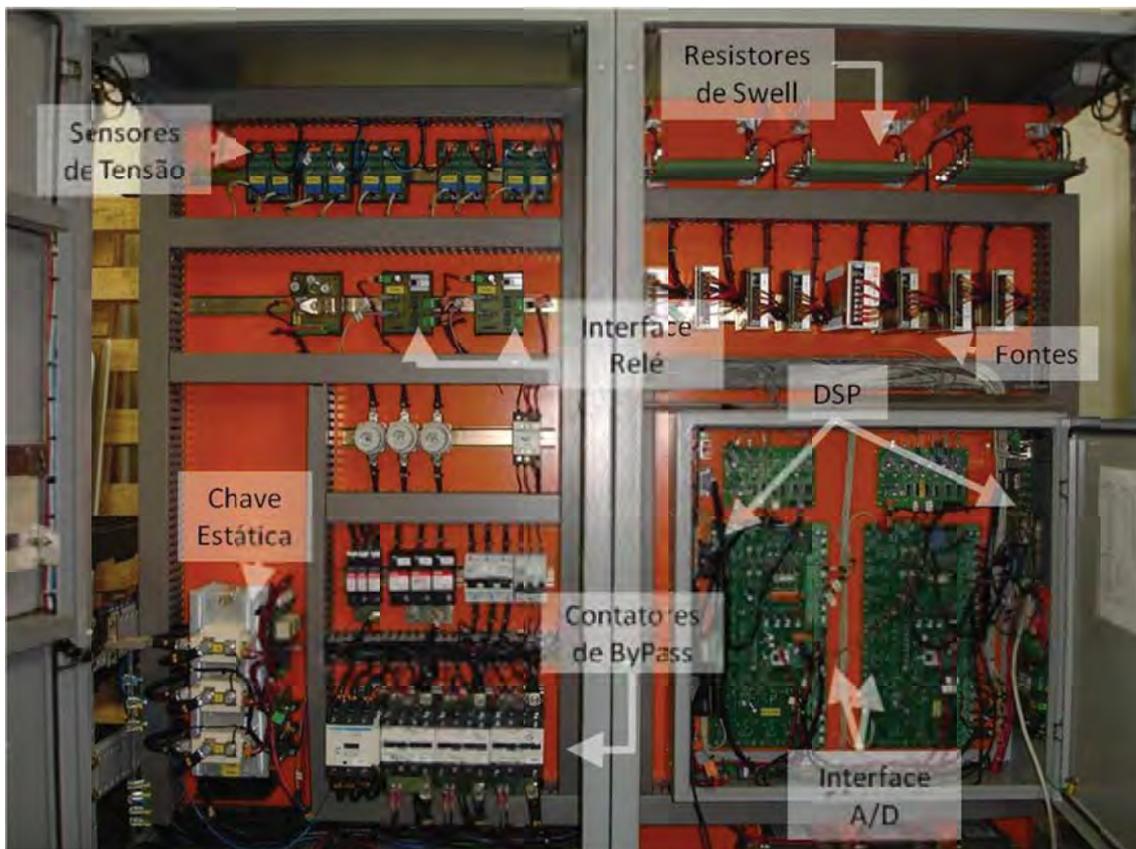


Figura 6.5 - Parte frontal, portas abertas.

Ainda pode ser observado o conjunto de fontes, os sensores de tensão, os contatores de passagem (*Bypass*) e Chave Estática, além do contator de pré carga do barramento CC, ao lado dos fusíveis e, o contator principal do ramo Paralelo.

Nas Figura 6.6a e b podem ser observados os inversores de cada ramo, as placas de disparadores acopladas em cima de cada braço de IGBT nos dois ramos, e os sensores de corrente por ramo.

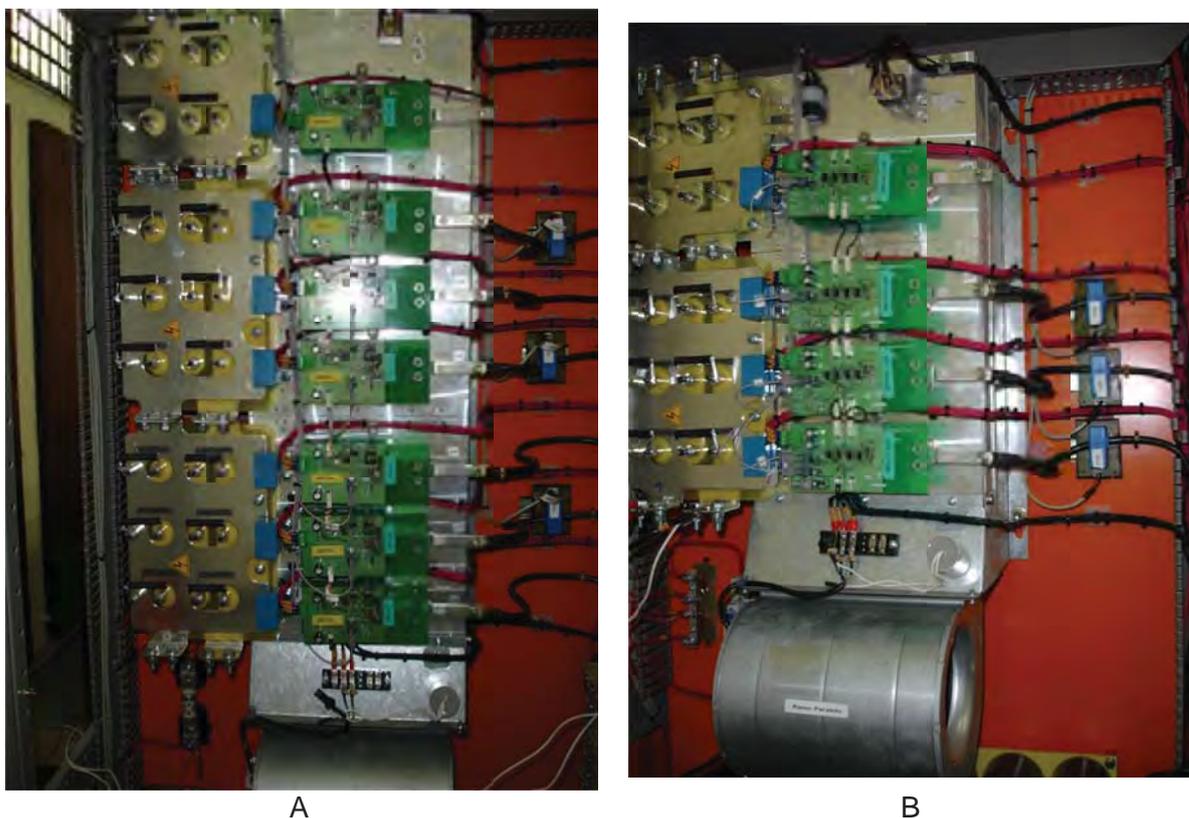


Figura 6.6 - Conversores da parte traseira, A - Conversor ramo Série; B - Conversor Ramo Paralelo.

Na Figura 6.7 observam-se os barramentos e os sensores de corrente de saída, localizado abaixo do inversor do ramo Série e acima dos indutores de filtro PWM.



Figura 6.7 - Barramento de acoplamento com a carga.

Os transformadores de injeção estão localizados na parte inferior do painel, na Figura 6.8 podem ser observados dois transformadores do ramo Serie, o terceiro fica atrás e ao lado o auto transformador do ramo Paralelo.

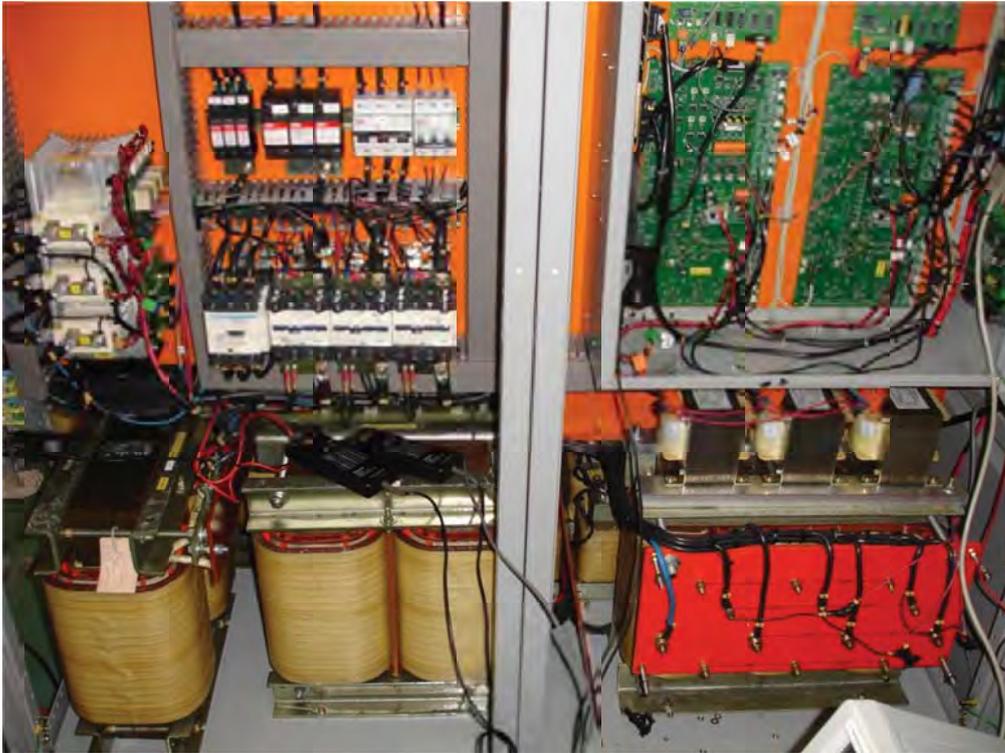


Figura 6.8 - Transformadores de Injeção.

6.6. Conclusão

Neste capítulo foram apresentados parâmetros, topologia e valores adotados para os elementos do protótipo. O protótipo foi apresentado em algumas figuras, permitindo visualizar o posicionamento dos elementos.

As malhas de controle foram resumidamente explicadas e os ganhos dos controladores apresentados. Durante a implementação foi realizado o ajuste fino dos controladores. No Capítulo seguinte são apresentados os resultados experimentais que validam o protótipo e os controladores implementados.

7. Resultados Experimentais

Neste capítulo são apresentados resultados obtidos com o protótipo, comprovando o funcionamento dos algoritmos propostos no Capítulo 4. São apresentados os equipamentos utilizados na obtenção dos resultados, assim como detalhes da bancada de testes utilizada. Parte dos ensaios foi realizada no Laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI) da UNESP de Sorocaba e parte no Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP) da Escola Politécnica da USP. Alguns resultados da certificação do protótipo, pelo Instituto de Engenharia Elétrica IEE/USP, também são apresentados e comentados.

Inicialmente, o funcionamento do GRT e do GRC é comprovado com a ajuda do protótipo. Alguns ensaios foram realizados sem a etapa de potência, chamados de ensaios em malha aberta verificando detalhes do funcionamento do algoritmo. O desempenho dos ensaios em malha fechada pode ser limitado em função do comportamento dos controladores de tensão e corrente. Porém, os resultados em malha fechada trazem credibilidade aos algoritmos propostos nesta dissertação.

Para a coleta dos dados foram utilizados dois osciloscópios sincronizados, ponteiras diferenciais de tensão, ponteiras de corrente para medição direta dos sinais e pontas de provas comuns para medir as variáveis internas do algoritmo, através de um conversor digital analógico.

Algumas figuras foram obtidas capturando diretamente a tela do osciloscópio (Figuras 7.12 e 7.15) e outras foram capturadas os pontos para depois, de forma mais flexível, criar a curva utilizando o software MatLab (Figuras 7.4, 7.5, 7.6, 7.7, 7.8, 7.9, 7.10, 7.11, 7.13, 7.14, 7.16, 7.17, 7.18 e 7.19).

Para os ensaios com o CUQE de 75 kVA, em tensão nominal (380V), um auto transformador trifásico de 30kVA foi utilizado para a realização dos ensaios, uma vez que o Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP) da USP não dispõe de

tais tensões em seu barramento. Isto limitou os ensaios a potência do transformador.

7.1. Bancada de Testes

Os osciloscópios Tektronix são do modelo DPO 3014 (100MHz e 2,5GS/s) e MSO 2014 (100MHz e 1GS/s) que podem ser sincronizados, permitindo a utilização dos 8 canais ao mesmo tempo.

Foram utilizadas ponteiras diferenciais Tektronix do modelo P5200, com tensão de isolamento de 1000 V e máxima tensão entre as pontas de 1300 V, com largura de banda até 100MHz e, ponteiras de corrente Tektronix do modelo A622, com corrente máxima de 100 A_{pico} e largura de banda até 100MHz.

Como carga linear foi utilizada um conjunto de 3 resistores por fase, ligados em estrela, com o centro flutuando ilustrado na Figura 7.1a. Os disjuntores foram utilizados para alterar o valor da resistência, independentemente em cada fase.

A configuração da carga não linear é ilustrada na Figura 7.1b, formada por três retificadores monofásicos em cada fase, com centro flutuando. Esta topologia foi utilizada por representar um caso extremo em termos de descontinuidade da corrente (não linearidade), mesmo que pouco provável de ser encontrada em instalações reais.

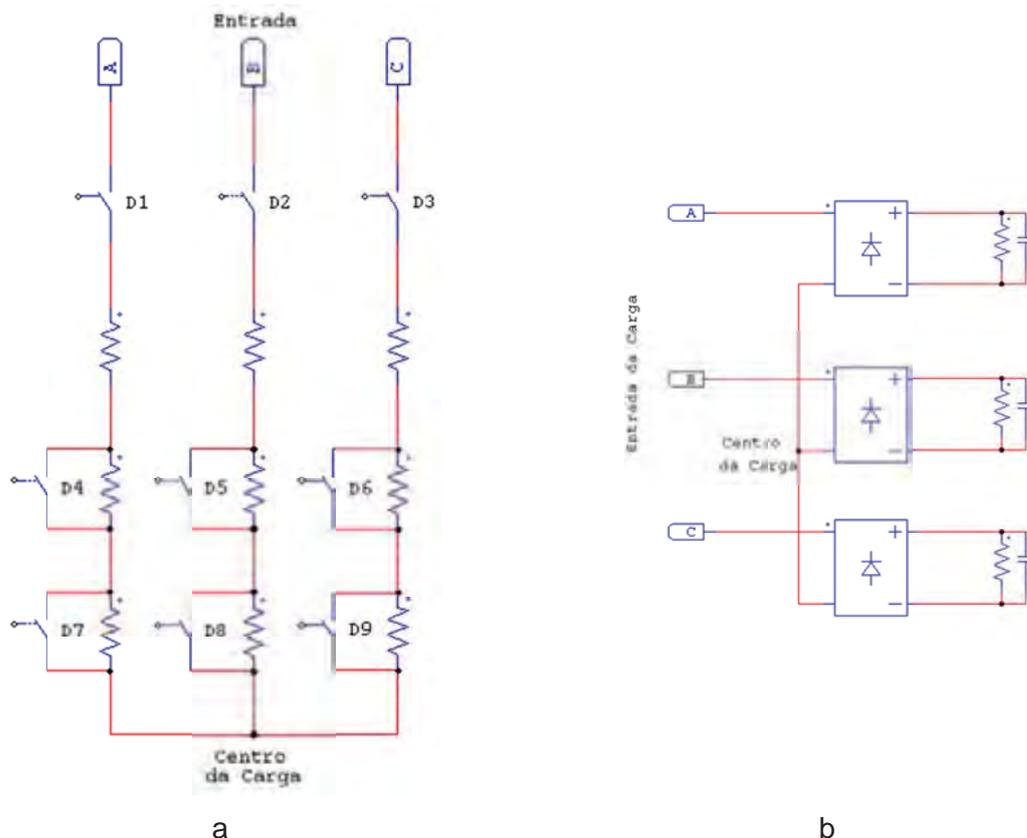


Figura 7.1 - a: Carga resistiva; b: Carga não linear.

7.1.1. Fonte de Potência Programável

Nos ensaios preliminares do protótipo foi utilizado uma fonte arbitrária de tensão, (de marca *California Instruments*, modelo 9000Ls/2, de potência 9 KVA),

ilustrada na Figura 7.2. Tal fonte está disponível no laboratório do Grupo de Automação e Sistemas Integráveis (GASI/Sorocaba), onde parte do protótipo foi implementado e testado.



Figura 7.2 - Fonte California.

A fonte é capaz de fornecer uma tensão alternada máxima de $270V_{RMS}$ (fase - neutro) com resolução de 0,1V e corrente eficaz de 38,4A no caso monofásico ou 12,8A, em cada fase, no caso trifásico.

A frequência pode ser configurada entre 45 Hz até 1000 Hz, também podem ser elaboradas formas de onda contendo múltiplas frequências, com amplitudes determinadas, criando formas de onda com conteúdo harmônico específico, além de criar afundamentos e elevações momentâneas controladas.

7.1.2. Porto Sag

Para gerar VTCDs de forma controlada, com tensões e potências mais próximas dos valores nominais do protótipo, foi utilizado o equipamento PortoSag, fabricado pelo EPRI (*The Electric Power Research Institute*) e ilustrado na Figura 7.3.



Figura 7.3 – PortoSag.

O equipamento pode trabalhar com tensões de $100V_{RMS}$ até $277V_{RMS}$ (fase - neutro), corrente até $200A_{RMS}$ e frequência 50 ou 60Hz. Ele utiliza um sistema de chave estática para alterar momentaneamente a tensão na carga com transições rápidas. São utilizados transformadores com diversos níveis para gerar a variação de tensão, independente em cada fase, podendo variar de 0% até 125% da tensão de entrada, em passos de 5%, com duração máxima de 3 segundos.

7.2. Resultados em Malha Aberta do GRT

Estes testes foram realizados com a ajuda da fonte Califórnia e tensões reduzidas para facilitar a obtenção dos resultados, o valor nominal da tensão da fonte foi 180Vpico (100%).

A Figura 7.4 demonstra a acomodação do filtro para uma variação sustentada de tensão, de 171Vpico (95%) para 185Vpico (103%), o FPB tem um atraso de 18s para absorver a variação.

Este aspecto deve ser levado em consideração para o projeto do FPB, pois nos momentos em que o FPB está convergindo, o equipamento irá atuar desnecessariamente. No entanto, sem o FPB o equipamento iria atuar o tempo todo corrigindo a amplitude para uma referência fixa.

Em outro experimento, a alimentação parte do valor nominal e sofre um AMT, tendo a tensão variado para 135Vpico (75%) por 166ms. Na Figura 7.5 pode-se observar que, durante o evento, o FPB permanece constante. Após o término do evento o FBP reflete o afundamento em uma alteração na curva.

Para casos onde a alimentação contendo harmônicas, Figura 7.6 com dados na Tabela 7.1, os resultados são apresentados nas Figuras 7.7 e 7.8.

Tabela 7.1 - Protótipo em malha aberta com harmônicas.

1º caso: Tensão trifásica = 127 Vrms (180Vpico) sem desequilíbrio				
Harmônicas	3h (180Hz)	5h (300Hz)	7h (420Hz)	11h (660Hz)
	10%	10%	5%	5%
Afundamento trifásico, tensão cai para 75% (135Vpico), No instante 0,044s ocorre o afundamento, duração de 83,3ms.				

Casos com desequilíbrios são apresentados nas Figuras 7.9, 7.10 e 7.11, com os valores na Tabela 7.2. Sendo que no instante 0,23s ocorre o afundamento monofásico.

Tabela 7.2 - Protótipo em malha aberta com desbalanço.

2º caso: Tensão trifásica = 127 Vrms sem harmônicas			
Desequilíbrio	Fase A	Fase B	Fase C
	102%	105%	93%
A tensão da fase A cai para 50%, duração de 83,3ms			

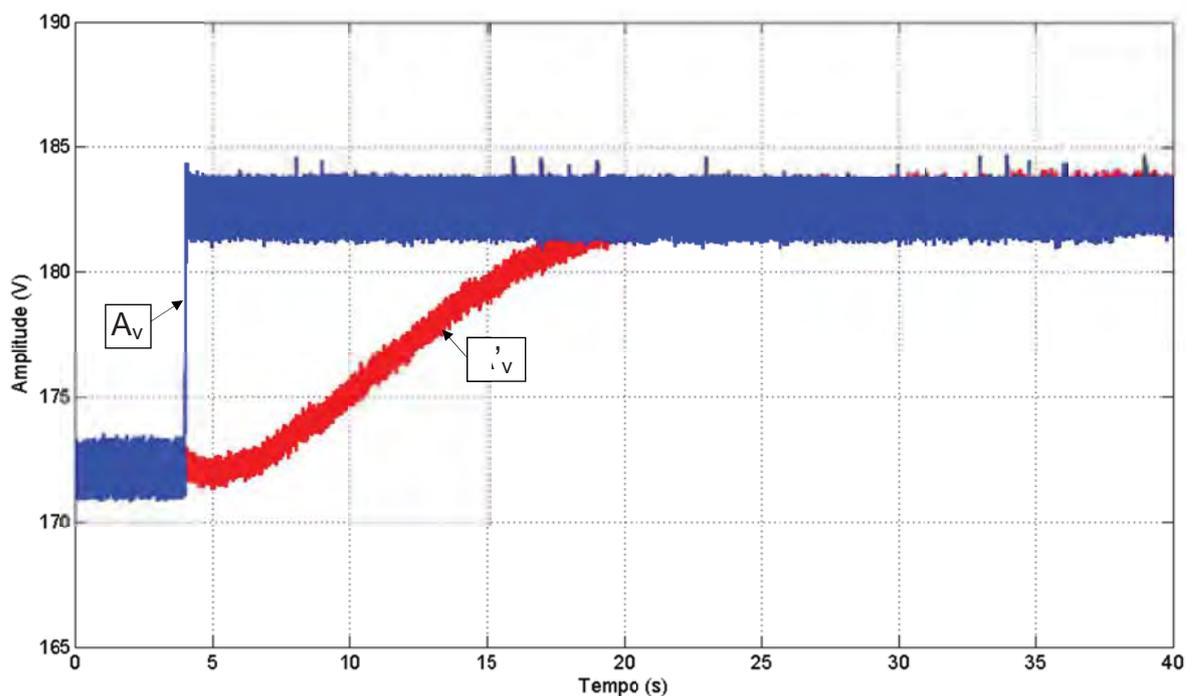


Figura 7.4 - Comportamento experimental do VRG durante flutuação de tensão.

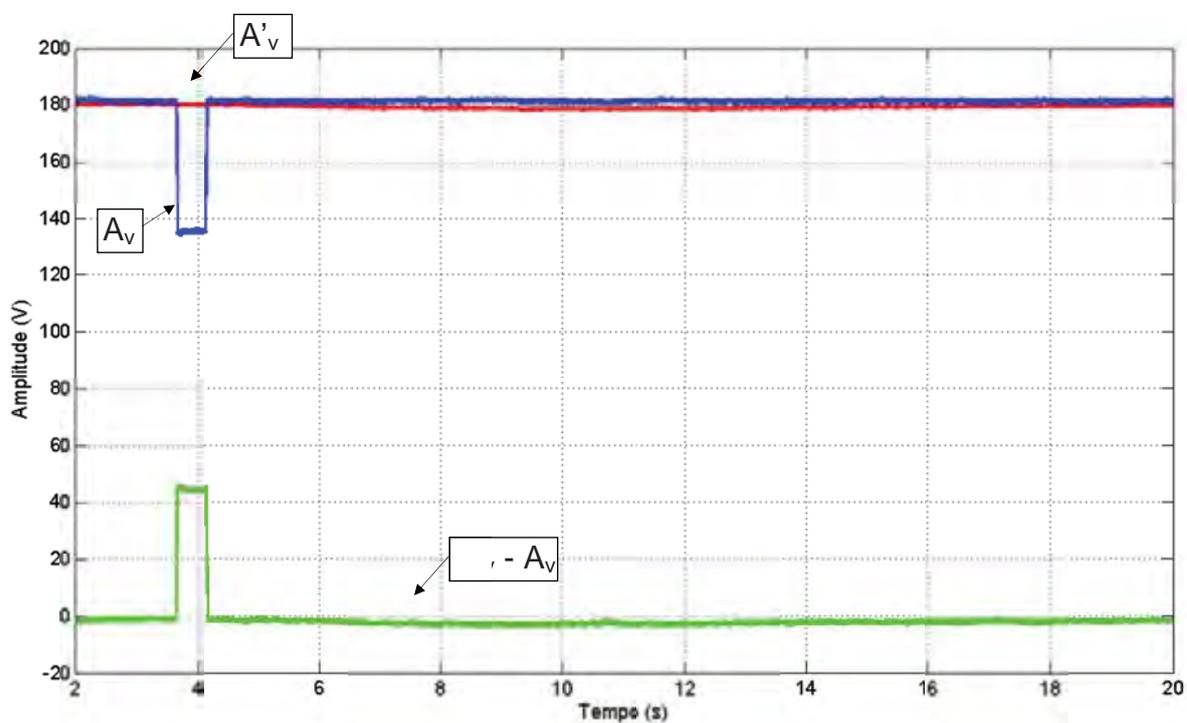


Figura 7.5 - Comportamento experimental do VRG quando ocorre um AMT.

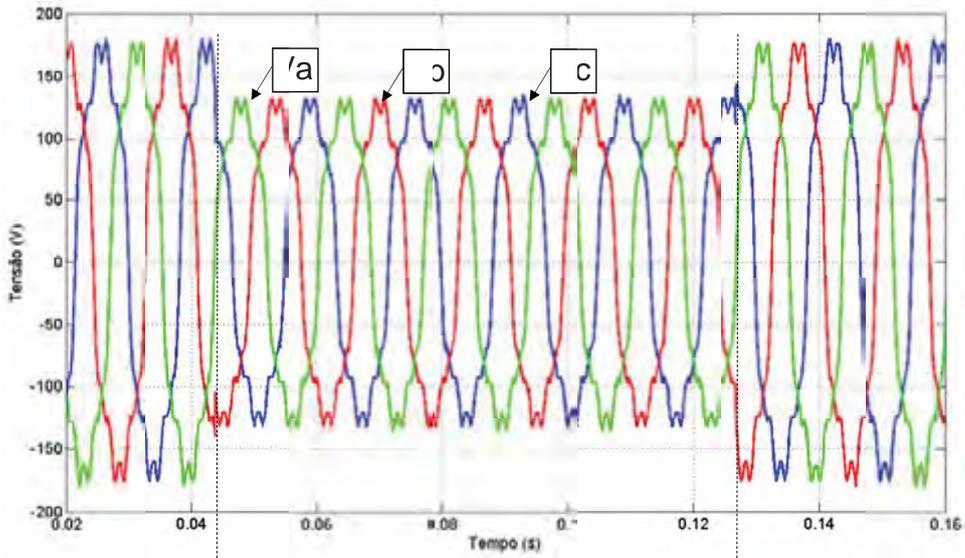


Figura 7.6 - Tensão da rede.

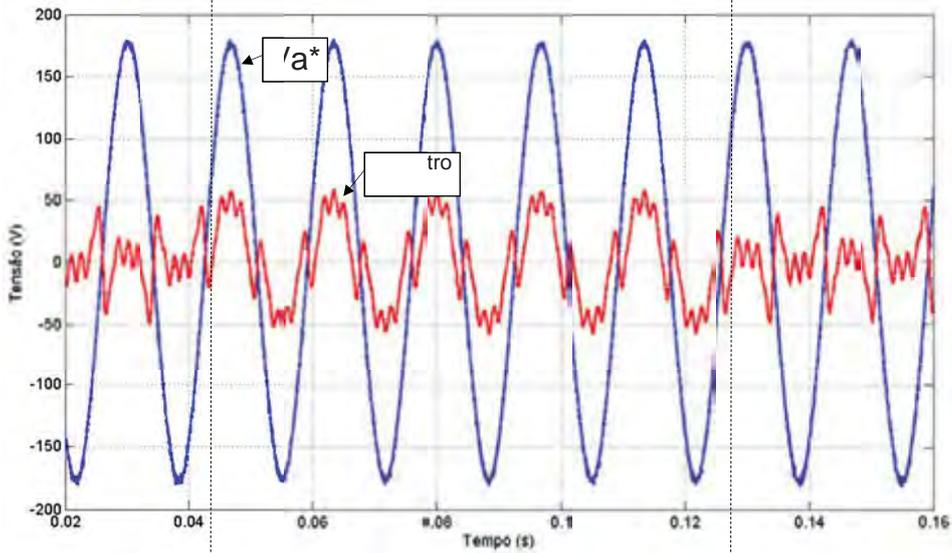


Figura 7.7 - Resultado do VRG para fase A.

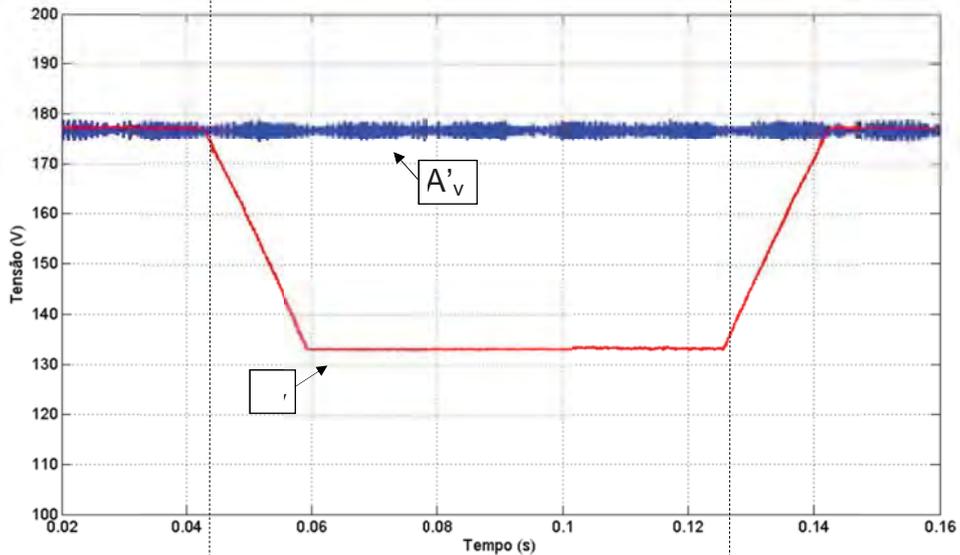


Figura 7.8 - Resultado do detector de amplitude e FPB.

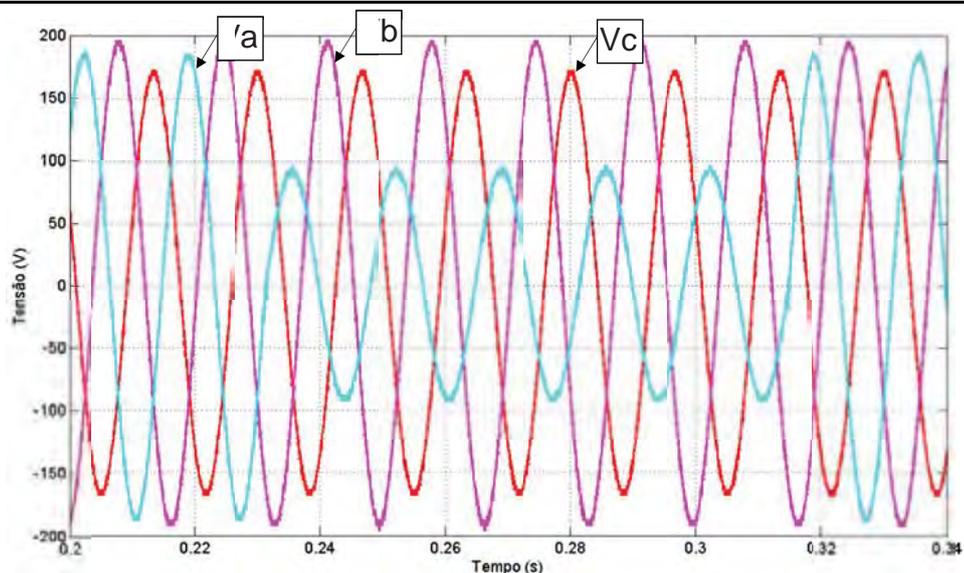


Figura 7.9 - Tensão da rede.

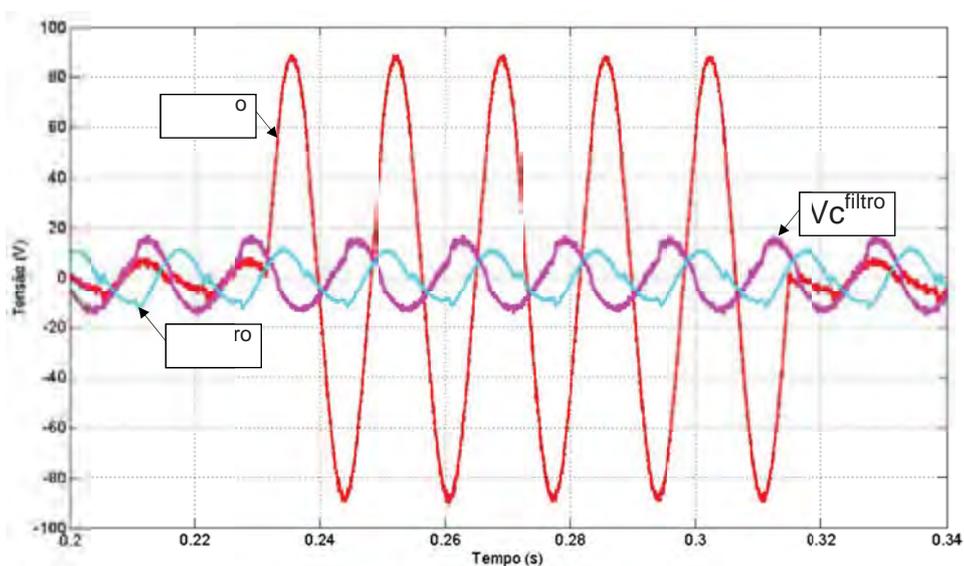


Figura 7.10 – Referência para o Inversor.

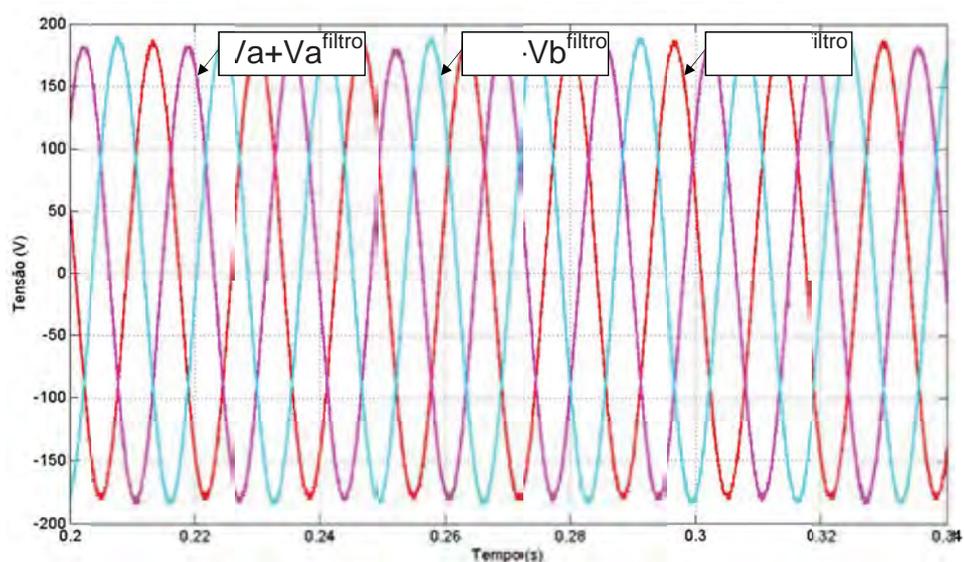


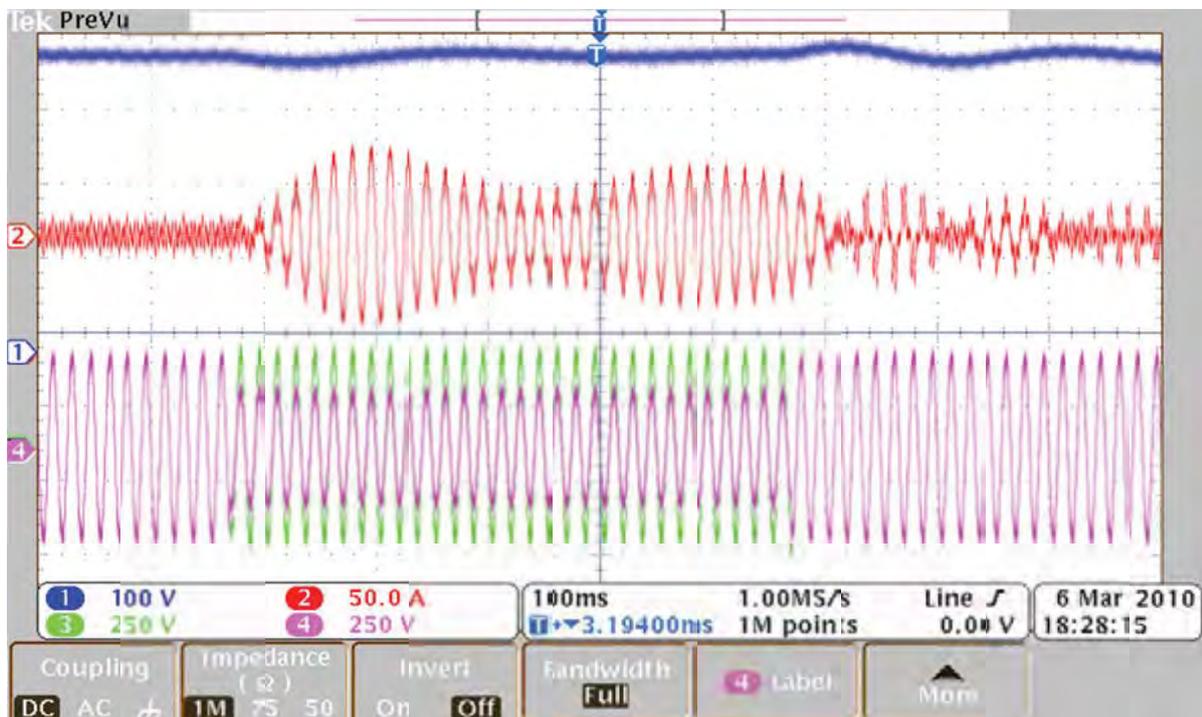
Figura 7.11 - Soma da referência do filtro e a tensão de entrada, para cada fase, com ajuda do Matlab.

7.3. Ramo Série

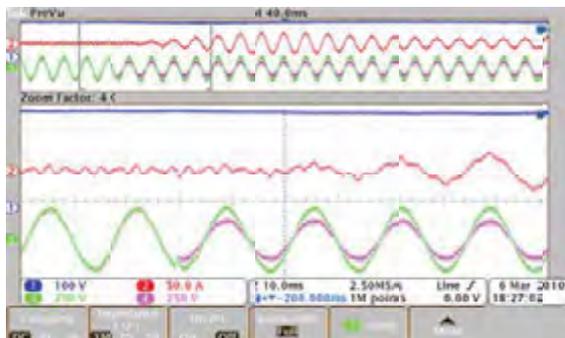
O funcionamento do ramo Série foi testado para condições nominais de tensão de alimentação, no entanto, a corrente foi limitada pela capacidade do laboratório. O PortoSag foi utilizado para gerar os afundamentos.

No primeiro ensaio foram verificadas as variáveis de uma das fases e do barramento CC, sendo observada a tensão da entrada, da carga e a corrente da entrada durante um AMT trifásico de 0,5 segundos e 75% da tensão nominal.

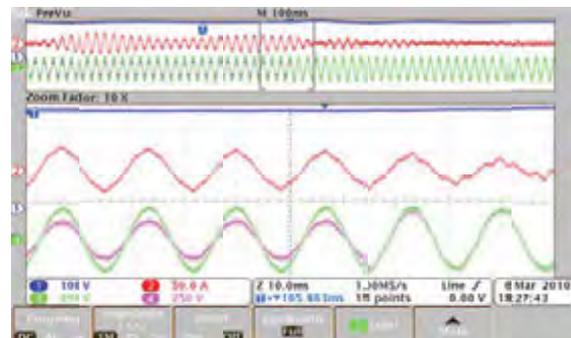
Pode-se observar na Figura 7.12 a tensão de entrada e a tensão corrigida da carga, levando menos de 2ms para atuar, a tensão no barramento CC se manteve constante sofrendo pouca oscilação e a corrente de entrada sofreu grande crescimento devido à manutenção da tensão no barramento CC. O ramo Paralelo funcionou como retificador de alto fator de potência.



a



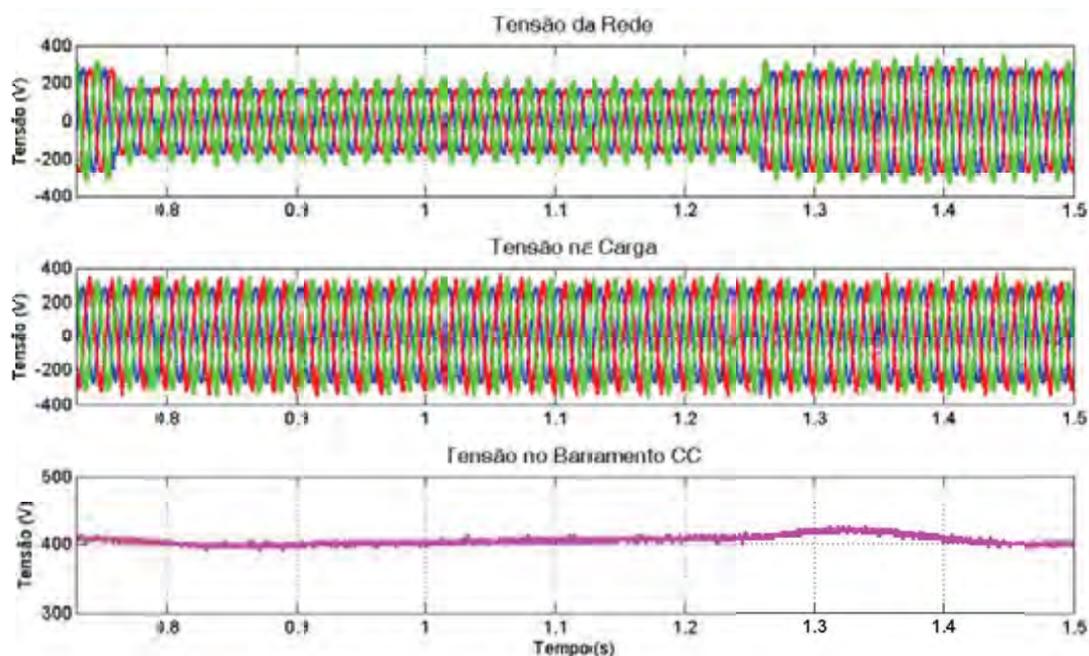
b



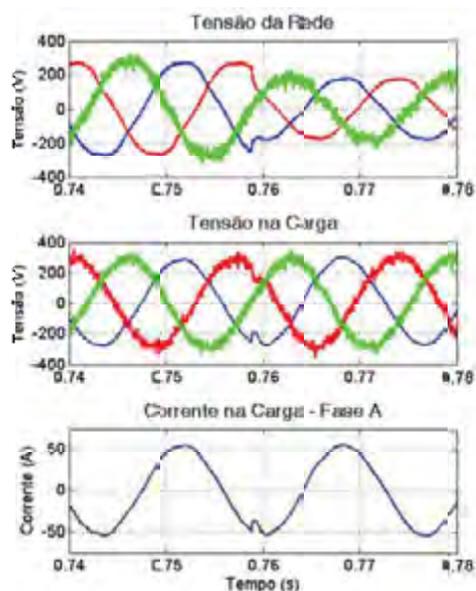
c

Figura 7.12 - Comportamento de uma fase durante SAG.

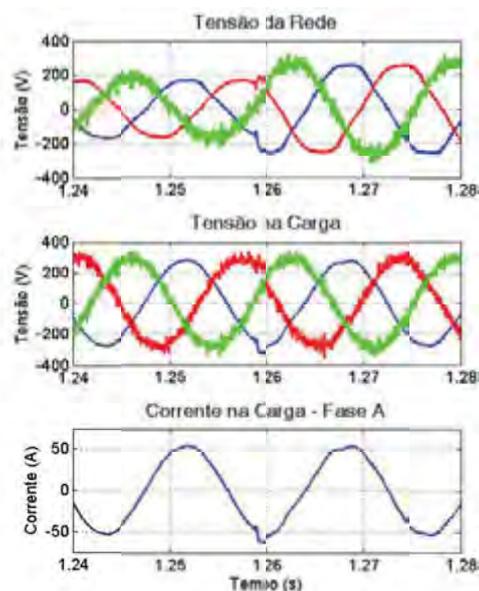
Em outro ensaio verificou-se o comportamento das três tensões de entrada e três tensões da carga com os osciloscópios acoplados. A Figura 7.13 mostra em detalhes o comportamento durante AMT trifásico de 65% da tensão nominal, com duração de 0,5 segundos.



a



b



c

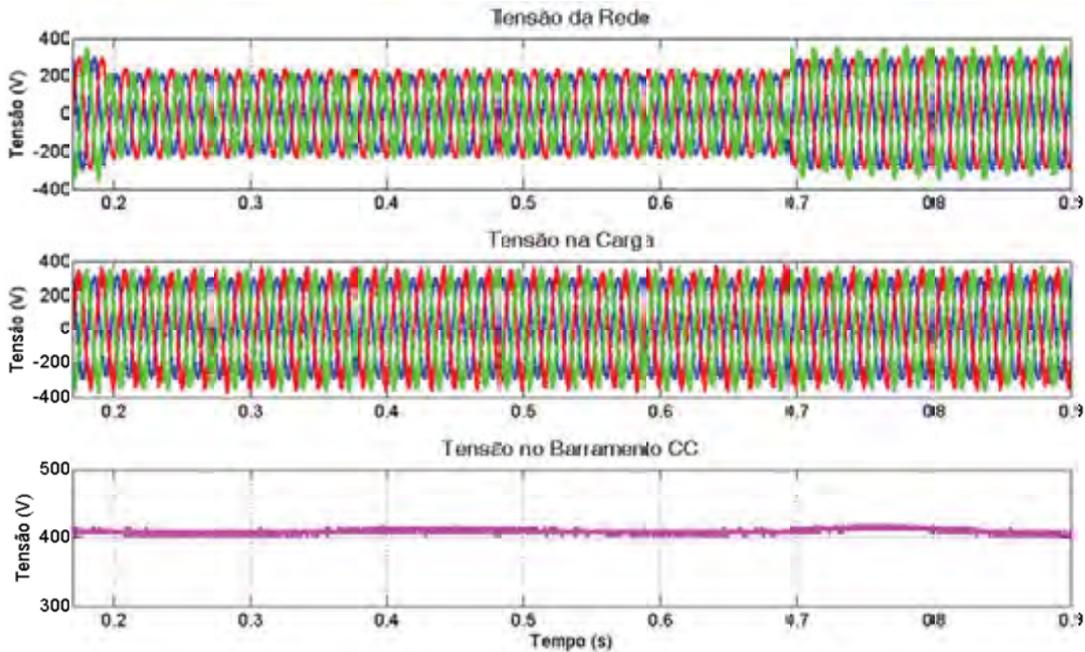
Figura 7.13 - Resultado para AMT, com carga resistiva equilibrada de 5Ω por fase. a: todo o evento; b: Detalhes do Início e C: Detalhes do término.

Pode notar nas Figura 7.13a e b, que o CUQE levou menos 2ms para atuar e que a corrente de carga não sofreu variações significativas mesmo durante o transitório. No fim do evento, quando a tensão de entrada volta ao valor nominal ocorre uma pequena sobretensão, Figura 7.13c, a qual não prejudicaria a carga.

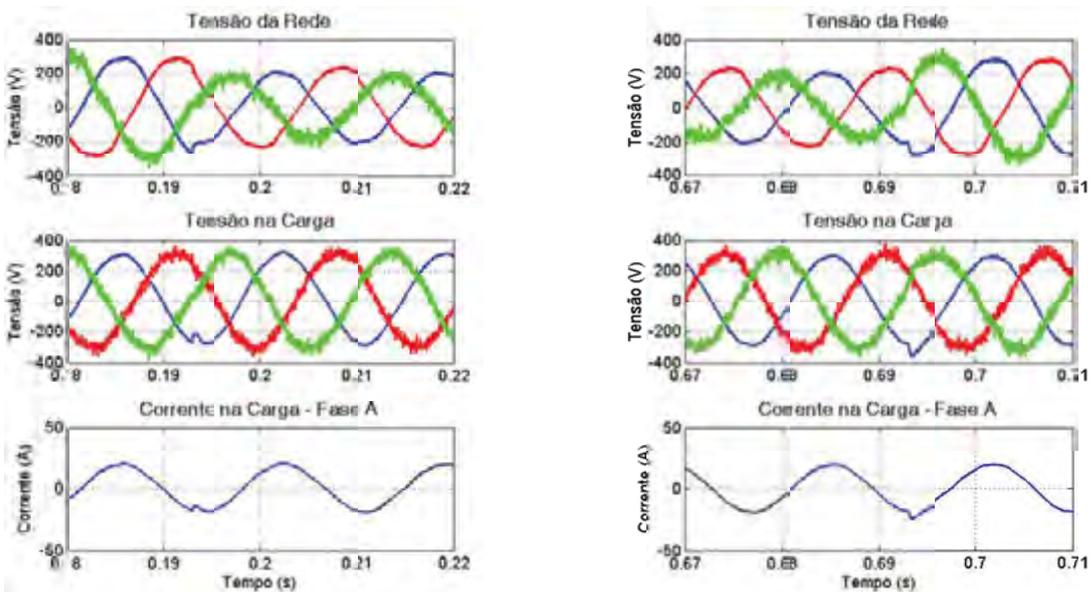
No caso de um afundamento desequilibrado a compensação é apresentada na Figura 7.14, neste evento o afundamento da fase A foi de 90%, fase B de 70% e fase C de 50%, porém, como as medições de tensão no CUQE são referenciadas

em ponto flutuante independente do PortoSag e da carga, as tensões observadas sofreram variações.

As medições foram referenciadas no neutro do CUQE, o que resultou em defasagem e um desequilíbrio menor. Mesmo assim, o equipamento corrigiu a tensão na carga para a amplitude anterior ao evento, sem defasagens.



a



b

c

Figura 7.14 - Resultado para AMT desequilibrado, com carga resistiva equilibrada de 15Ω por fase. a: todo o evento; b: Detalhes do Início e C: Detalhes do término.

Não foi possível testar o funcionamento do ramo Série atuando em harmônicas, devido à impossibilidade de gerar harmônicas de tensão de forma controlada durante os ensaios realizados no LEP, no entanto, esse aspecto foi verificado nos resultados da seção 4.2.4, através do uso da fonte programável no laboratório do GASI.

7.4. Ramo Paralelo

Na Figura 7.15 observa-se a compensação do ramo Paralelo para uma carga não linear, a Tabela 7.3 traz o conteúdo harmônico (medido no osciloscópio modelo DPO3014) antes e depois da compensação.

Como carga foi utilizada uma ponte retificadora trifásica, com uma carga RC (30Ω e $9400\mu\text{F}$) no lado CC, também contando com um reator trifásico (10mH) em série com o retificador.

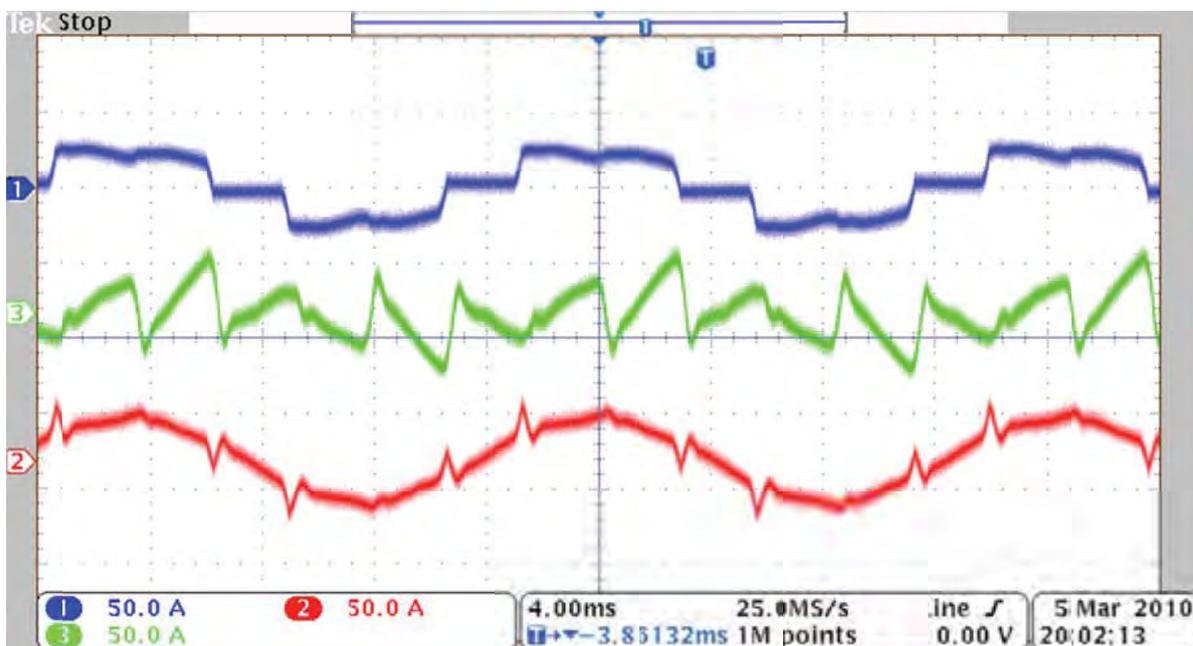


Figura 7.15 - Compensação de Corrente não linear.

Tabela 7.3 - Conteúdo Harmônico.

	Original	Corrigido
RMS (A)	18,9	20,5
DHT (%)	28,4	19,2
1h (A)	18,1	20
3h (A)	0,2	0,2
5h (A)	4,1	1,9
7h (A)	2	1,0
9h (A)	0,2	0,2

Utilizado outra carga, fortemente não linear, ilustrada na Figura 7.1b e como carga do retificador foram utilizados 15Ω de resistência e capacitância de $2350\mu\text{F}$.

A tensão da fase A, Figura 7.16, é utilizada como referência e os cruzamentos por zero de cada tensão são apontados na Figura 7.17 atestando o funcionamento da correção da corrente.

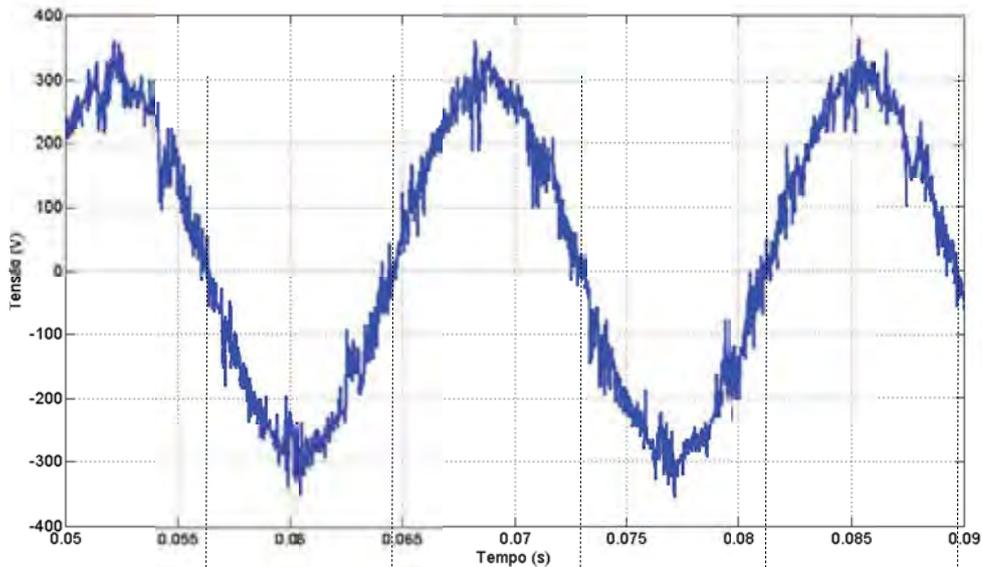


Figura 7.16 – Resultados para carga não linear, tensão de entrada fase A.

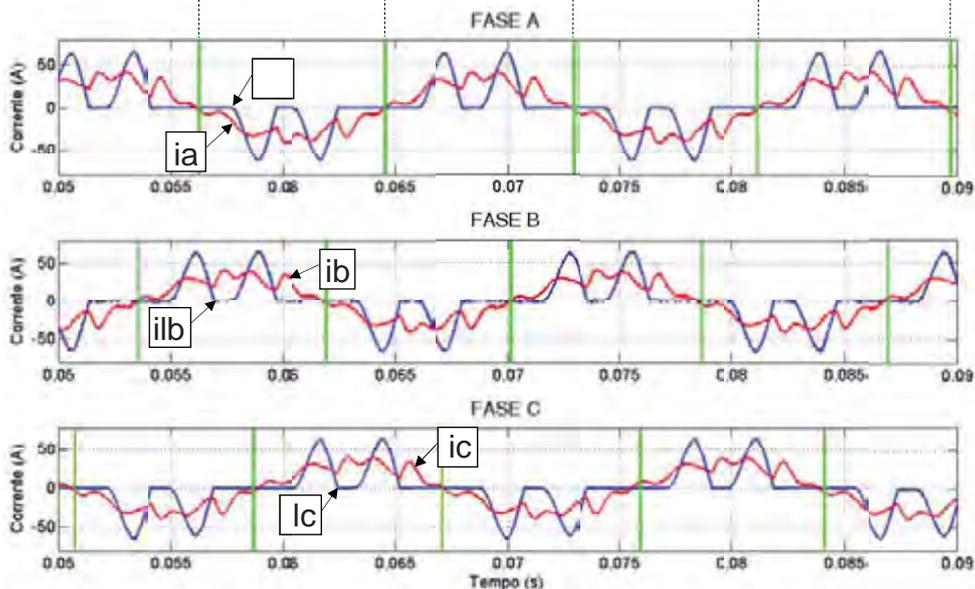


Figura 7.17 - Resultado para carga não linear, funcionamento do Ramo Paralelo, correntes de carga e de entrada.

Também foram realizados ensaios com uma carga desequilibrada. O esquema da Figura 7.1a ilustra a carga utilizada, onde as chaves foram organizadas a de forma que a fase A e C tenham 15Ω e a fase B tenha 5Ω .

Nesta configuração o centro da carga passa a flutuar e dessa forma, surge defasagem além do desequilíbrio. Novamente a fase A (Figura 7.18) foi utilizada como referência e em cada fase são apontados os cruzamentos por zero da respectiva tensão.

Nota-se na Figura 7.19 que as correntes de carga da fase A e C possuem defasagem e são ligeiramente menores que a corrente na fase B, com a atuação do ramo Paralelo as correntes de entrada se tornaram equilibradas e em fase com a tensão.

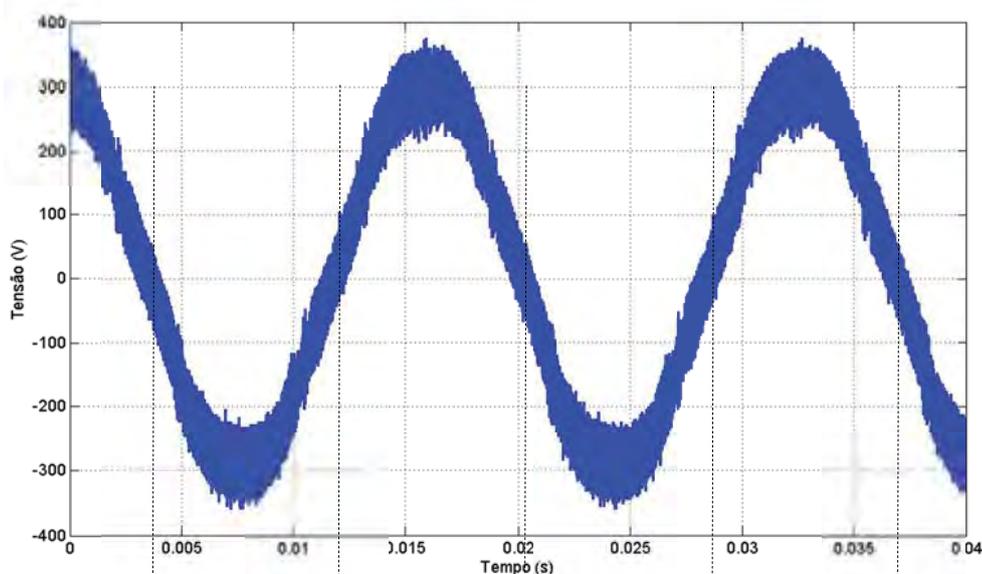


Figura 7.18 - Resultados para desequilibrada, tensão de entrada fase A.

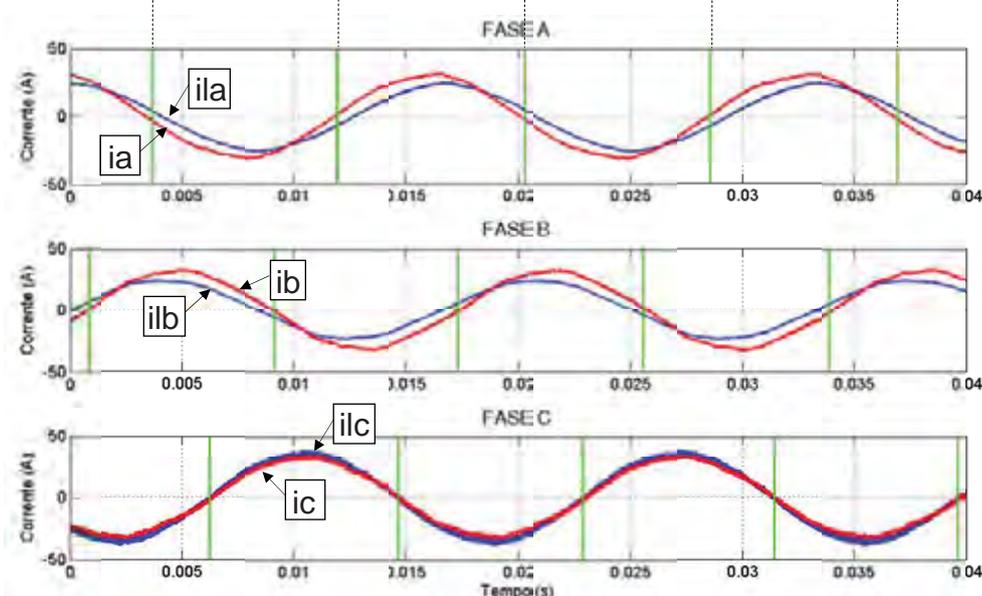


Figura 7.19 - Resultado para carga desequilibrada, funcionamento do Ramo Paralelo, correntes de carga e de entrada

7.5. Ensaios de Certificação (IEE/USP)

Como parte do projeto de desenvolvimento do protótipo contou com ensaios realizados com carga nominal no IEE/USP, os resultados de eficiência são listados na Tabela 7.4, sendo medido para cargas lineares e não lineares, considerando a potência de entrada e na carga.

Tabela 7.4 - Eficiência do protótipo.

Perfil de carga	Não linear	Linear	Linear
Potência da entrada (kW)	17,5	37,2	71,9
Eficiência (%)	88	94	95

Foram realizados diversos ensaios com carga nominal e meia carga, verificando-se o comportamento durante degraus de carga linear (entrada e saída

de carga), correção de AMTs e correção de harmônicos de corrente, obtendo-se resultados compatíveis com os apresentados nos tópicos 7.3 e 7.4.

7.6. Conclusão

Os resultados apresentados neste capítulo demonstraram o comportamento do protótipo cumprindo suas principais funções, tanto do ramo Paralelo como do ramo Série. Os algoritmos de geração de referência propostos foram validados através de resultados em malha aberta e malha fechada, utilizando-se o protótipo CUQE descrito no Capítulo 6.

Outros aspectos quanto ao funcionamento do CUQE não puderam ser testados, como a correção de harmônicos de tensão, por limitação de equipamentos no LEP, onde foram realizados a maioria dos ensaios.

Os resultado das Figuras 7.15 e 7.19 mostram o bom desempenho do ramo Paralelo na correção de distorções e desequilíbrios de corrente de cargas típicas. Já a Figura 7.17 indica que em casos extremos de não linearidades pode ser necessário o uso de técnicas de controle mais sofisticadas.

As perdas no funcionamento do protótipo, demonstradas na Tabela 7.4, são relacionadas aos transformadores e inversores eletrônicos, e como esperado foi maior para as cargas não lineares, já que nesta situação o ramo Paralelo atua na correção da corrente da carga resultando em mais perdas.

Parte da eficiência se deve ao funcionamento dos geradores de referência que no caso de obtenção inadequada dos valores ideais, acarretaria na utilização inadequada dos inversores, resultando em maiores perdas.

8. Conclusões

Neste capítulo são apresentadas as conclusões gerais do trabalho, considerando o material exposto em toda dissertação, assim como os resultados obtidos no Capítulo 7. Também são apresentadas propostas de trabalhos futuros.

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de algoritmos de geração de referência, proteção e inicialização de um Condicionador Universal de Qualidade de Energia (CUQE). A validação dos algoritmos propostos foi realizada através de simulações computacionais e ensaios experimentais considerando-se a implementação de um protótipo de CUQE, conforme descrito no Capítulo 6.

Os resultados apresentados no Capítulo 7 atestam a confiabilidade e a velocidade dos algoritmos propostos para obtenção das referências. Também se certifica da versatilidade para implementação em dispositivos reais, já que nestes casos existem limitações quanto ao processamento e memória.

Caso as referências calculadas não refletissem a corrente ativa utilizada pela carga ou a tensão ideal de fornecimento, a tensão no barramento CC seria afetada, resultando em circulação desnecessária de potência ativa pelo CUQE.

Também o fato do algoritmo GRT evitar que o CUQE atue como regulador de tensão resulta em menos utilização dos conversores e melhoria da eficiência. A Tabela 7.4 comprova a eficiência em regime, sendo que quando ligado a cargas não lineares a eficiência diminui por causa da correção da corrente da carga.

O algoritmo GRT evita, também, que a carga sofra degrau de tensão no momento de correção de AMT, o que aconteceria no caso da correção ser referenciada a um valor fixo e não ao valor da tensão de fornecimento daquele momento, considerando-se as variações de tensão permitidas pela ANEEL.

Durante a realização dos ensaios pode-se verificar o funcionamento das rotinas de inicialização, desligamento e proteção. Essas rotinas garantiram velocidade e praticidade para a operação do protótipo.

8.1. Proposta de Trabalhos Futuros

Com base nos estudos realizados e resultados obtidos, apresentam-se abaixo algumas propostas de trabalhos futuros.

- Estudo de técnicas de controle mais sofisticadas e de melhor desempenho dinâmico do que os controladores PI (Proporcional-Integral) utilizados no ramo Paralelo, especialmente quando corrigindo cargas fortemente não lineares;
- Utilização dos algoritmos de geração de referência desenvolvidos nesta dissertação, em dispositivos com outras topologias ou mesmo em conjunto com dispositivos passivos, como no caso de filtros híbridos;
- Adaptação dos conceitos de geração de referência em outras estratégias de compensação como no caso dos UPQCi e UPQC-Q.

Apêndices

A. Cálculo dos Elementos do Protótipo	101
A.1. Transformador de Acoplamento do ramo Série	101
A.2. Filtros PWM do ramo Série	102
A.3. Banco de Capacitores	102
A.4. Filtro PWM do ramo Paralelo	103
A.5. Auto Transformador do ramo Paralelo	103
B. Controladores.....	105
B.1. Ramo Paralelo	105
B.1.1. Controle da Tensão CC	105
B.1.2. Controle da Corrente CA.....	106
B.1.3. Resultados Experimentais	106
B.2. Ramo Série.....	108
B.2.1. Corrente CA, P + Ressonante e FeedForward	108
B.2.2. Malha interna de corrente	108
B.2.3. Malha de Tensão	110
B.2.4. Ganhos dos Controladores do Ramo Série	115

A. Cálculo dos Elementos do Protótipo

A especificação de condições de operação do protótipo é dada pelos parâmetros da Tabela 6.1. O projeto dos componentes deve ser considerado em função dos piores casos de carga e de afundamentos.

Em afundamentos monofásicos de 0,5p.u. o protótipo necessita de uma potência aparente de $S_{CUQE_{1\phi}} = 12,5KVA$ e para afundamentos trifásicos de 0,35p.u. necessita de $S_{CUQE_{1\phi}} = 26,25KVA$ conforme equações (A.1) e (A.2) respectivamente.

$$\frac{S_{CUQE_{1\phi}}}{S_{Carga_{3\phi}}} = \frac{0,5 \cdot V_{Rede} \cdot I_{Carga} / \sqrt{3}}{V_{Rede} \cdot I_{Carga} / \sqrt{3}} = \frac{1}{6} \quad (A.1)$$

$$\frac{S_{CUQE_{3\phi}}}{S_{Carga_{3\phi}}} = \frac{0,35 \cdot V_{Rede} \cdot I_{Carga} / \sqrt{3}}{V_{Rede} \cdot I_{Carga} / \sqrt{3}} = 0,35 \quad (A.2)$$

A.1. Transformador de Acoplamento do ramo Série

Foram utilizados transformadores monofásicos com relação de transformação de 2,11, com tensão no primário de 180V e secundário de 380V, capaz de suportar duas vezes o fluxo máximo (2B).

Sendo o pior caso o afundamento trifásico de 0,35p.u. A tensão injetada pelo CUQE é estimada em (A.3) e para máxima carga a corrente no primário é estimada em (A.4) sendo no primário necessário uma tensão de 162,04V e corrente de 53,98A para o pior caso de afundamento.

$$V_{CUQE} = 0,35 \cdot \frac{380}{\sqrt{3}} = 76,8V \quad (A.3)$$

$$I_{Carga} = \frac{75kVA}{\sqrt{3} \cdot 380V} = 113,95A \quad (A.4)$$

A.2. Filtros PWM do ramo Série

Adotando uma queda de tensão de 10% no indutor de filtro a tensão necessária no inversor deve ser de 198V (para 180V no transformador). Dos cálculos anteriores a corrente do secundário será 69,48A, considerando uma corrente de manutenção do capacitor de filtro de 10% a corrente do inverso será 76,43A.

A impedância de base do inversor é calculada pela eq. (A.5). As reatâncias do filtro PWM na base do inversor são dadas por (A.6) e (A.7), onde ω é a frequência fundamental.

$$Z_{Inv} = \frac{198V}{76,43A} = 2,59\Omega \quad (A.5)$$

$$X_L = X_{LPU} \cdot Z_{Inv} \rightarrow L_{Inv} = \frac{X_{LPU} \cdot Z_{Inv}}{\omega} \quad (A.6)$$

$$X_C = X_{CPU} \cdot Z_{Inv} \rightarrow C_{Inv} = \frac{1}{\omega \cdot X_{CPU} \cdot Z_{Inv}} \quad (A.7)$$

A frequência de ressonância do filtro LC é calculada em (A.8) e adotando $X_{CPU_{max}} = 10pu$ e $X_{LPU_{max}} = 0,1pu$ chega-se a (A.9), ou seja, a frequência de corte está uma década da frequência fundamental e a frequência de chaveamento está em 6KHz.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_{Inv} \cdot C_{Inv}}} = \frac{1}{\sqrt{\frac{X_{LPU} \cdot Z_{Inv}}{\omega} \cdot \frac{1}{\omega \cdot X_{CPU} \cdot Z_{Inv}}}} \rightarrow \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{1}{\sqrt{\frac{X_{LPU}}{X_{CPU}}}} \quad (A.8)$$

$$\frac{\omega_0}{\omega} = \sqrt{\frac{10}{0,1}} = 10 \rightarrow \omega_0 = 10 \cdot \omega \quad (A.9)$$

Assim chegamos a $X_L = 0,259\Omega$ e $X_C = 25,9\Omega$ para frequência nominal encontramos o valor do indutor 687 μ H e do capacitor 102 μ F.

A.3. Banco de Capacitores

A energia no capacitor do barramento CC é dada por (A.10), onde γ representa a mínima tensão em pu do barramento CC. Para a máxima injeção de potência ativa, a energia do CUQE é dada por (A.11), para um afundamento trifásico de 35%.

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \cdot C \cdot (V_{cc}^2 - V_{cc_{min}}^2) = \frac{1}{2} \cdot C \cdot V_{cc}^2 \cdot (1 - \gamma^2) \quad (A.10)$$

$$\varepsilon = P_{Carga} \cdot 0,35 \cdot \Delta t \quad (A.11)$$

Supondo toda energia fornecida pelo barramento CC chegamos a (A.12), porém na condição real metade da energia para compensar o afundamento deve vir do ramo Paralelo sobrando metade da potência para o barramento CC.

$$C = \frac{2 \cdot \varepsilon}{V_{cc}^2 \cdot (1 - \gamma^2)} = \frac{2 \cdot P_{carga} \cdot 0,35 \cdot \Delta t}{V_{cc}^2 \cdot (1 - \gamma^2)} \quad (\text{A.12})$$

Considerando $\gamma = 0,7$, $V_{cc} = 400$, $\Delta t = 0,5s$ e para metade da potência, encontramos a necessidade de 160mF nos capacitores da barramento CC.

A.4. Filtro PWM do ramo Paralelo

A necessidade de potência do ramo Paralelo é determinada pela porcentagem de potência a ser restituída ao barramento CC durante afundamentos.

É desejado que o ramo Paralelo sustentasse metade da potência do afundamento trifásico de 75% (ou seja, 13,125KVA) chegando a corrente de 76,4A. Para o projeto (eq.s (A.13) e (A.14)) é admitida uma queda de tensão de 10% no indutor e a tensão no transformador de $220/\sqrt{3}$.

$$X_{L220} = \frac{0,1 \cdot 220/\sqrt{3}}{76,4} = 0,166\Omega \quad (\text{A.13})$$

$$L = \frac{X_{L220}}{2 \cdot \pi \cdot 60} = 441\mu H \quad (\text{A.14})$$

A.5. Auto Transformador do ramo Paralelo

Mantendo a corrente de manutenção de tensão do barramento CC de 76,4A e adotando a relação de transformação 380V:220V, a corrente no primário será 44A. Estimando a potência monofásica em (A.15) e trifásica em (A.16), para o pior caso.

$$S_{AutoTrafo_{1\phi}} = \frac{380}{\sqrt{3}} \cdot 44 = 9,65KVA \quad (\text{A.15})$$

$$S_{AutoTrafo_{3\phi}} = 3 \cdot 9,7KVA = 29,1KVA \quad (\text{A.16})$$

B. Controladores

B.1. Ramo Paralelo

B.1.1. Controle da Tensão CC

O objetivo deste controlador é assegurar a estabilidade da tensão no barramento CC, conforme a referência desejada. Esse valor de referência deve ser ao menos 30% maior do que a tensão de pico de fase, para garantir boa dinâmica.

O diagrama da Figura 6.3 apresenta a malha de tensão CC, o valor de tensão no capacitor é medido por um sensor com ganho K_V , esse valor é comparado com o valor desejado fechando a malha de controle da tensão.

O valor K_{CC} pode ser definido levando-se em consideração o balanço de potência do elo CC que deve manter-se constante [3], ou seja, $P_{CC}=P_{CA}$, para o caso trifásico chegamos a eq. (B.1).

$$K_{CC} = 3 \cdot \frac{(V_{RMS}^S)^2}{V_{CC}} \quad (B.1)$$

Diversas técnicas de controle poderiam ser utilizadas. Neste tópico será discutido o uso de um controlador tipo PI, com função transferência na eq. (B.2). Onde K_{PCC} é o ganho proporcional e K_{ICC} é o ganho integral [40].

$$G_{PI}(s) = K_{PCC} + \frac{K_{ICC}}{s} \quad (B.2)$$

A dinâmica da tensão CC, que se deseja controlar, é bastante lenta, sendo relativamente fácil projetar um regulador PI que satisfaça as condições de dinâmica e estabilidade desejadas. Os cálculos dos ganhos foram extraídos de [3], sendo a eq. (B.3) o calcula do ganho proporcional e a eq. (B.4) do integral.

$$K_{PCC} = \frac{w_{CC}}{w_{sc}} = \frac{f_{CC}}{f_{sc}} \quad (B.3)$$

$$K_{ICC} = \frac{K_{PCC} \cdot w_{CC}}{\tan(mf)} \cdot T_a \quad (B.4)$$

Onde f_{sc} e f_{CC} são as frequências naturais em malha aberta, sem e com o controlador PI respectivamente. Para uma dinâmica lenta f_{CC} deve ser da ordem de poucos Hz (5-20Hz). Isto é suficiente para o elo CC, uma vez que a própria dinâmica do capacitor é bastante lenta, e ainda traz a vantagem de desacoplar dinamicamente o controle da corrente de saída do filtro ativo (que deve ser rápido).

A margem de fase mf foi escolhida tal que garanta a estabilidade do sistema. Em geral são assumidos valores em torno de 70° . As eq.s (B.5) e (B.6) descrevem o modelo da planta sem e com o controlador, respectivamente.

$$G_{SC}(s) = K_v \cdot K_{CC} \cdot \frac{1}{s \cdot C} = \frac{w_{SC}}{s} \quad (\text{B.5})$$

$$G_{CC}(s) = G_{SC}(s) \cdot PI(s) = \frac{w_{CC}}{s} \quad (\text{B.6})$$

B.1.2. Controle da Corrente CA

A função da malha de corrente CA assegura que a corrente do VSI siga a referência desejada, através da medição da corrente do filtro indutor (I_P). O diagrama de blocos do controle é apresentado na Figura 6.4.

O valor K_{PWM} refere-se ao ganho do conjunto inversor e pode ser definido levando-se em consideração o seguinte: a faixa de valores de saída do controlador deve estar em ± 1 , para ser comparado com a onda triangular com valor de pico unitário e a saída é de $\pm V_{CC}$, assim $K_{PWM} = V_{CC}$ [41].

As eq.s (B.7) e (B.8) modelam o sistema, sem e com controlador, sendo que o controlador utilizado é semelhante ao da eq. (B.2) da seção anterior e de forma semelhante, eq.s (B.3) e (B.4), os ganhos foram calculados.

$$G_{SC}(s) = K_i \cdot K_{PWM} \cdot \frac{1}{s \cdot L} = \frac{w_{SC}}{s} \quad (\text{B.7})$$

$$G_{CC}(s) = G_{SC}(s) \cdot PI(s) = \frac{w_{CC}}{s} \quad (\text{B.8})$$

A banda-passante do controlador de corrente do filtro ativo não pode ser muito baixa que impossibilite a síntese das correntes harmônicas necessárias, nem tão alta que torne o sistema instável. Quanto à margem de fase, são usuais valores entre $70^\circ \rightarrow 85^\circ$, para evitar que o sistema torne-se instável [3].

B.1.3. Resultados Experimentais

Durante a implementações foram utilizados os ganhos da Tabela 6.9, a tensão no barramento CC obteve comportamento estável mesmo quando foi ligado um resistor diretamente no barramento CC para gerar distúrbio, porém a malha de corrente não se mostrou eficiente para cargas fortemente não lineares.

A Figura B.1 apresenta o resultado do ramo paralelo para uma carga fortemente não linear, um retificador trifásico com uma carga RC ($R=10\Omega$, $C=2500\mu F$). Observa-se que o resultado do controlador PI melhorou a forma de onda, porém poderia ser ainda melhorado.

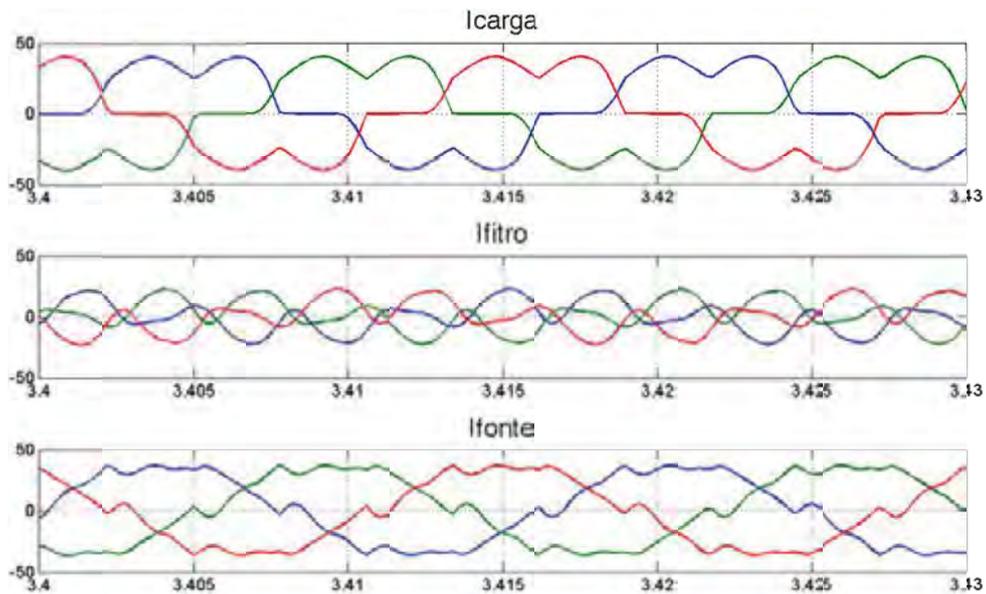


Figura B.1 - Simulação do Ramo Paralelo: controlador PI, azul - fase A; verde - fase B e vermelho - fase C.

Não foi possível realizar estudo detalhado para melhorar o desempenho, de forma empírica a técnica de P+Ressonante foi adaptada para atuar no controle do ramo Paralelo.

A Figura B.2 apresenta os resultados do ramo Paralelo com a mesma carga do caso anterior, agora com controlador P+Ressonante. Os ganhos do controlador P+Ressonante são apresentados na Tabela B.1.

Tabela B.1 - Ganhos do controlador P+Ressonante, para o ramo Paralelo.

Ganho	Valor
Malha de Corrente	
K	0,4
K1	20
K5	4
K7	4
K11	3
K13	4

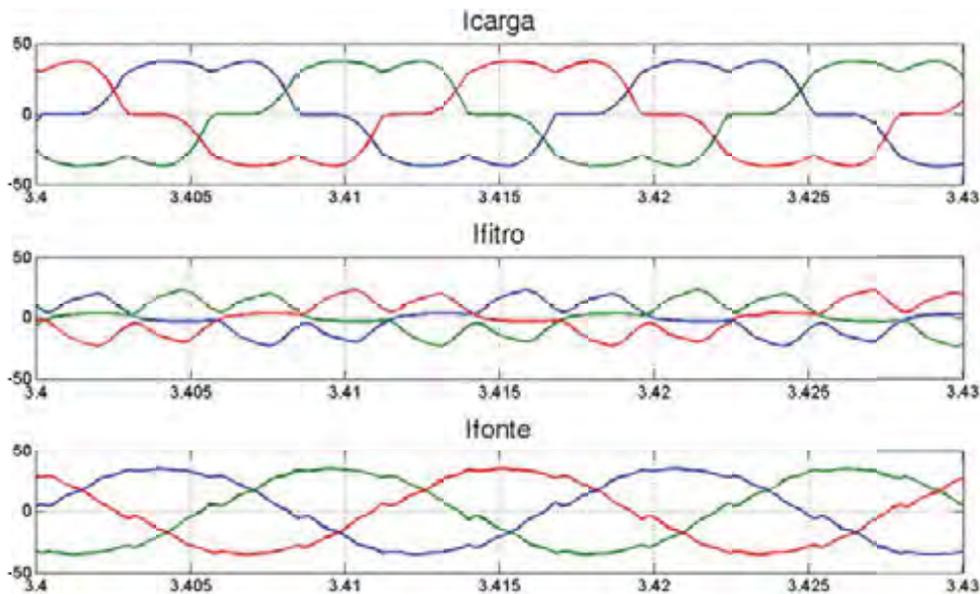


Figura B.2 -Resultados de Simulação do Ramo Paralelo, com controlador P+Ressonante, azul - fase A; verde - fase B e vermelho - fase C.

B.2. Ramo Série

Apesar dos conversores serem dispositivos não-lineares, afirma-se em [42] que quando a frequência de chaveamento é muito maior que a da tensão de saída e o circuito não opere na região de sobremodulação, o conversor pode ser considerado como um ganho. Também pode-se resumir a influência da rede trifásica (correntes de carga) a partir do transformador de acoplamento como perturbações.

Com isso, tem-se que o modelo de projeto simplificado é monofásico, linear e invariante no tempo, o que é adequado para ser usado em projetos de controle clássicos. Além disso, assume-se que o sistema de controle, que é realizado no plano discreto, será feito primeiramente em plano contínuo, posteriormente sendo discretizado através da Transformada Bilinear[43].

B.2.1. Corrente CA, P + Ressonante e FeedForward

As constantes K_{IF} e K_{VO} são ganhos dos sensores, o sistema com os controladores é detalhado na Figura 6.2. A malha mais interna consiste somente de um ganho de realimentação (K_{VFW}), a segunda consiste de um controlador PID enquanto que a terceira é um compensador sintonizado (ressonante).

B.2.2. Malha interna de corrente

Esta malha é baseada na corrente do indutor de saída, devido a este indutor a corrente de saída possui menos componentes de alta frequência, diminuindo problemas com amostragem.

As malhas Sys_gp e Sys_gf são as mais internas, apresentadas na Figura B.3. A primeira é representada pela eq. (B.9), a ultima contém o ganho K_{VFW} de feedforward e é apresentada na eq. (B.10).

$$I_F = \frac{s \cdot C_F}{C_F \cdot L_F \cdot s^2 + C_F \cdot R_F \cdot s + 1} R_2 + \frac{1}{C_F \cdot L_F \cdot s^2 + C_F \cdot R_F \cdot s + 1} I_L \quad (\text{B.9})$$

O sinal R_2 representa a tensão nos terminais do inversor e I_F a corrente no indutor. Já o sinal R_3 é uma variável interna do controle gerada pelo PID. Porém as técnicas tradicionais de obtenção dos ganhos não podem ser aplicadas neste caso porque a referência será composto por uma soma de sinais senoidais[35].

Por fim chegamos à malha de corrente, Figura B.4, uma forma de se fazer o projeto do PID seria fixar os dois zeros de modo a garantir uma banda passante pequena o suficiente para satisfazer a taxa de Nyquist e também colocá-los à esquerda de modo ter boa estabilidade relativa em malha fechada.

$$I_F = \frac{s \cdot C_F \cdot K_{PWM}}{(C_F \cdot L_F) \cdot s^2 + C_F \cdot R_F \cdot s + (1 - K_{PWM} \cdot K_{VFW} \cdot K_{V0})} R_3 + \frac{1 - K_{PWM} \cdot K_{VFW} \cdot K_{V0}}{(C_F \cdot L_F) \cdot s^2 + C_F \cdot R_F \cdot s + 1 - K_{PWM} \cdot K_{VFW} \cdot K_{V0}} I_L \quad (\text{B.10})$$

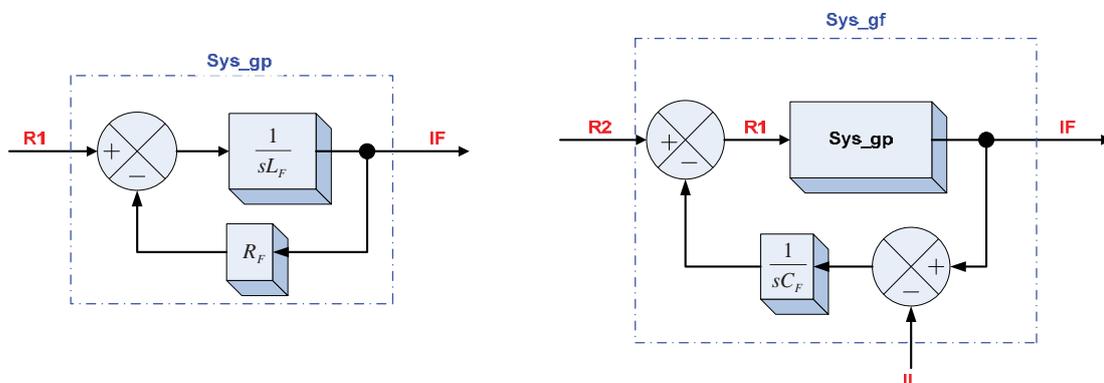


Figura B.3 - Malhas mais internas[35].

Estes polos de MF serão considerados de malha aberta para a malha de corrente, de modo que quanto mais à esquerda eles estiverem melhor será a estabilidade relativa, também para malha de tensão.

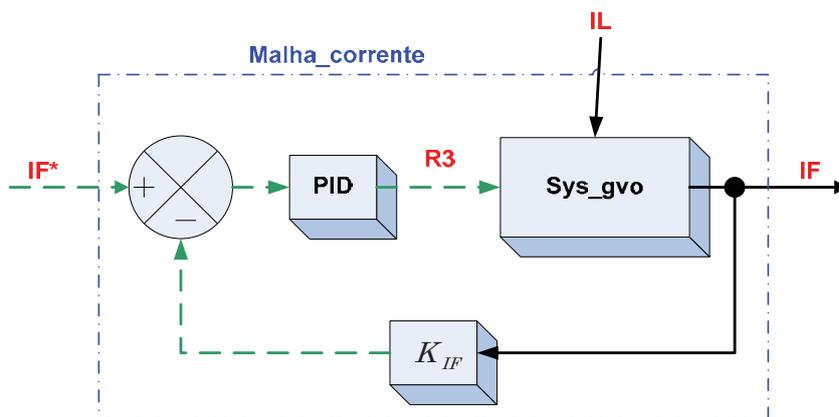


Figura B.4 - Malha de corrente de indutor[35].

Com um pouco de tratamento, a função transferência do bloco fica como na eq. (B.11). Os fatores K_P, I, D são respectivamente os ganhos proporcional, integral e derivativo.

$$I_F = \frac{g(s)}{h(s)} \cdot I_F^* + \frac{j(s)}{h(s)} \cdot I_L \quad (\text{B.11})$$

Onde:

$$g(s) = C_F \cdot K_{PWM} \cdot (K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I)$$

$$j(s) = 1 - K_{PWM} \cdot K_{VFW} \cdot K_{VO}$$

$$h(s) = (C_F \cdot L_F + C_F \cdot K_{PWM} \cdot K_{IF} \cdot K_D) \cdot s^2 + (C_F \cdot R_F + C_F \cdot K_{PWM} \cdot K_{IF} \cdot K_P) \cdot s + (1 - K_{PWM} \cdot K_{VFW} \cdot K_{VO} + C_F \cdot K_{PWM} \cdot K_{IF} \cdot K_I)$$

B.2.3. Malha de Tensão

A malha mais externa do sistema é considerada a malha de tensão, ilustrada na Figura B.5, sendo composta por um controlador proporcional + ressonante. O objetivo de introduzir o termo ressonante é selecionar determinadas frequências para atuar diretamente nas harmônicas de interesse.

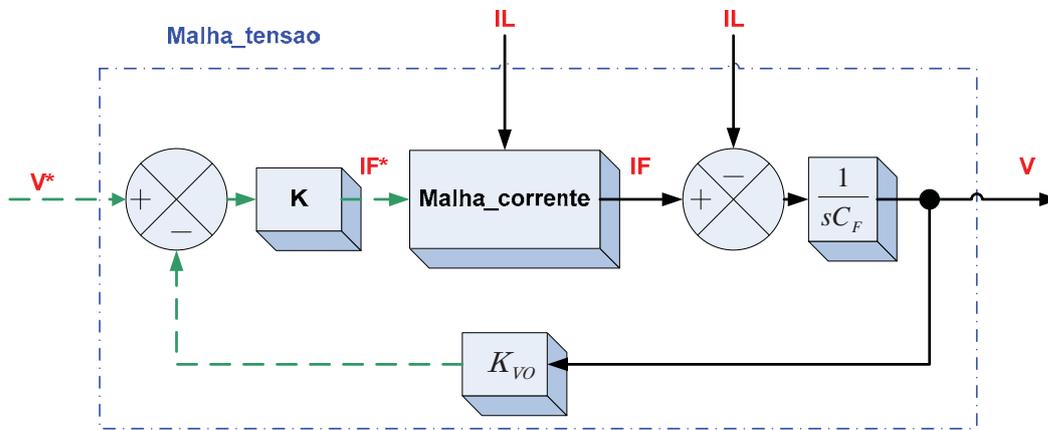


Figura B.5 - Malha mais externa (tensão)[35].

A função transferência relaciona a referência gerada pelo GRT com a tensão no capacitor e a corrente na carga, sendo expressa na eq. (B.12). A malha é fechada por um compensador cuja função de transferência é, a princípio, apenas um ganho proporcional K.

Manipulando a eq. (B.12) conclui-se que os zeros que forem fixados para a função de transferência de corrente serão os zeros para a função de transferência de tensão. O parâmetro K_{VFW} não influi na função transferência de distúrbio.

$$V = \frac{g(s) \cdot G_{ress}(s) \cdot K_{VO}}{s \cdot C_F \cdot h(s) + g(s) \cdot G_{ress}(s) \cdot K_{VO}} \cdot V^* + \frac{j(s) - h(s)}{s \cdot C_F \cdot h(s) + g(s) \cdot G_{ress}(s) \cdot K_{VO}} \cdot I_L \quad (\text{B.12})$$

Pode-se notar que quanto maior o módulo do ganho ressonante (K_η onde η é a ordem harmônica) numa determinada faixa de frequências, menor será a influência da corrente de carga na tensão do capacitor. A metodologia para determinação dos ganhos foi desenvolvida em trabalhos anteriores [5], [36] e [37].

Analisaremos a resposta para ganhos $K_{VFW} = 0,9$, $K_I = 100$, $K = 3,5$, $K_\eta = 30$ e variando K_p em $\{0,1 \ 1 \ 1,5 \ 2 \ 3 \ 5\}$. As relações entre corrente do indutor com sua referência e a tensão de saída com a sua referência, respectivamente,

são apresentadas nas Figuras B.6 e B.7, pode-se verificar que o ganho proporcional da malha interna aumenta a banda passante dessas funções de transferência, assim, ele fica restringido para que não resulte em altas bandas passantes.

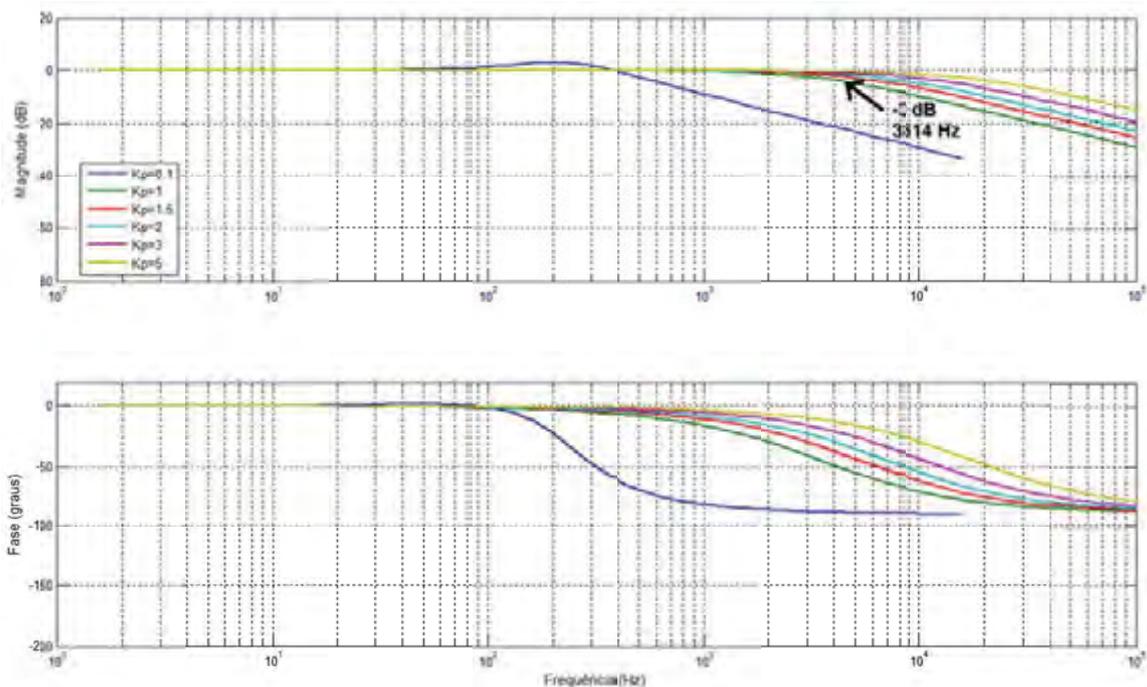


Figura B.6 - Resposta em frequência da função $I_L(s)/I_{Lref}(s)$ com variação de K_P [37].

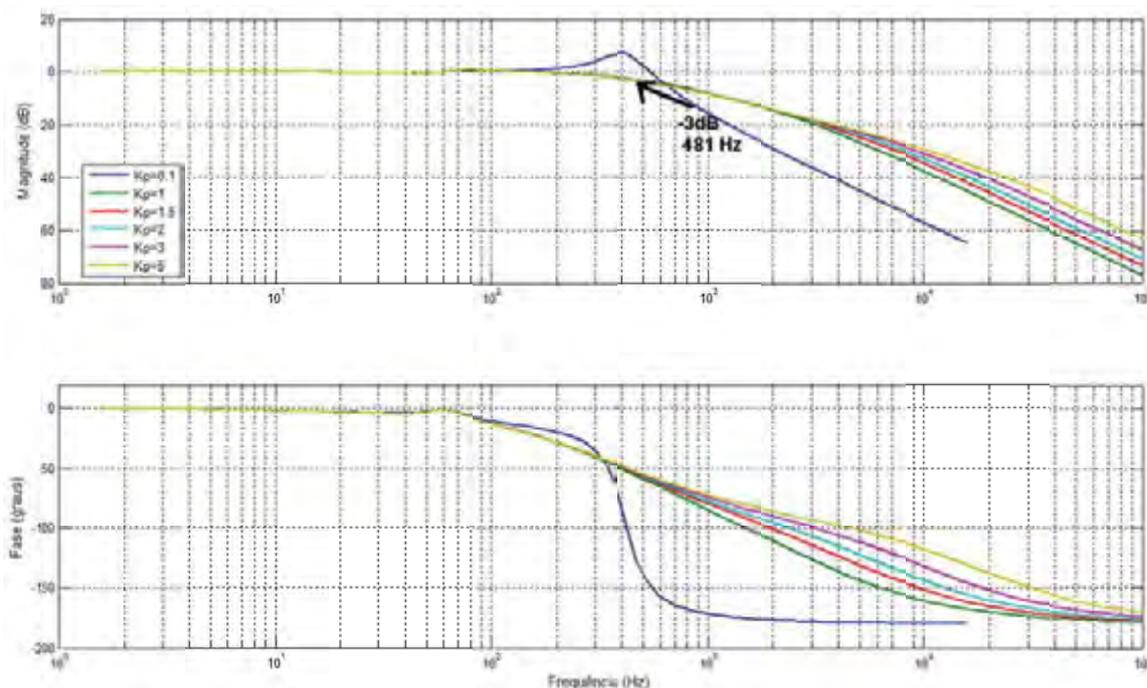


Figura B.7 - Resposta em frequência da função $V_0(s)/V_{0ref}(s)$ com variação de K_P [37].

Com isso, perde-se o poder de reduzir o ganho da interferência da corrente da carga na tensão, como é mostrado na Figura B.8. O termo ressonante consegue impor uma grande redução para essa função na frequência de ressonância (60 Hz), assim fica definido $K_P = 2$ para continuar a definição dos controladores.

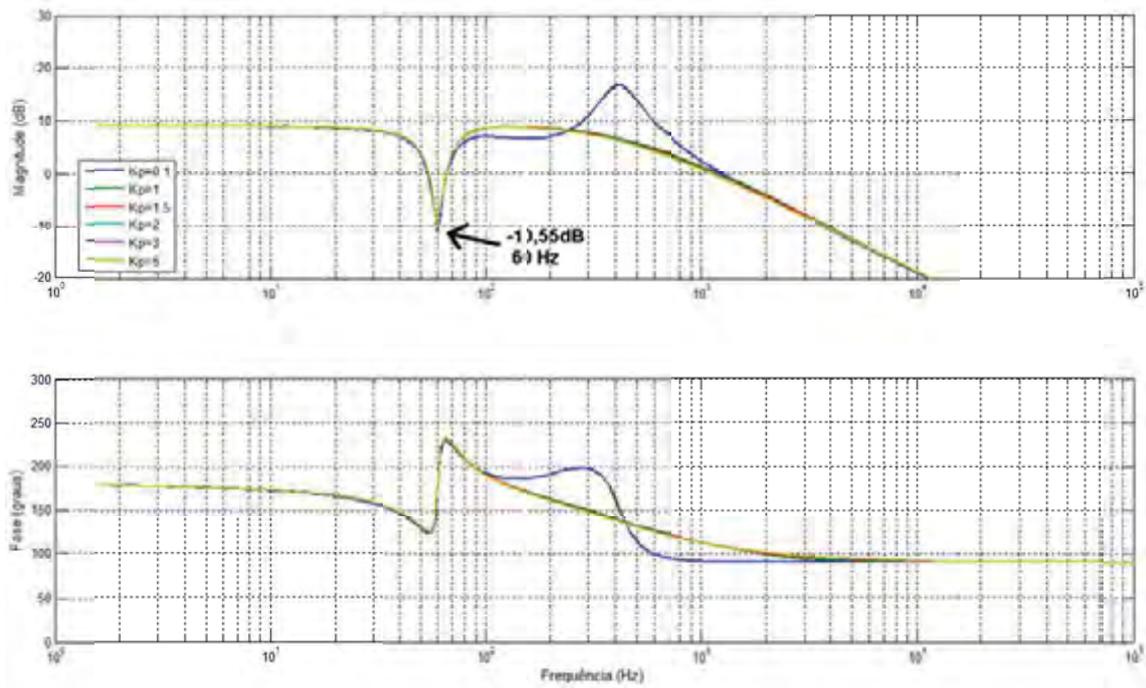


Figura B.8 - Resposta em frequência da função $V_O(s)/I_{LOAD}(s)$ com variação de K_P [37].

O mesmo tipo de análise é aplicado ao ganho K_I , mantendo os demais ganhos e variando K_I em $\{0,1 \ 1 \ 10 \ 100 \ 500 \ 1000\}$, obtemos as Figura B.9, Figuras B.10 e B.11. Nota-se que a variação deste parâmetro não resulta em alteração significativa da resposta em frequência.

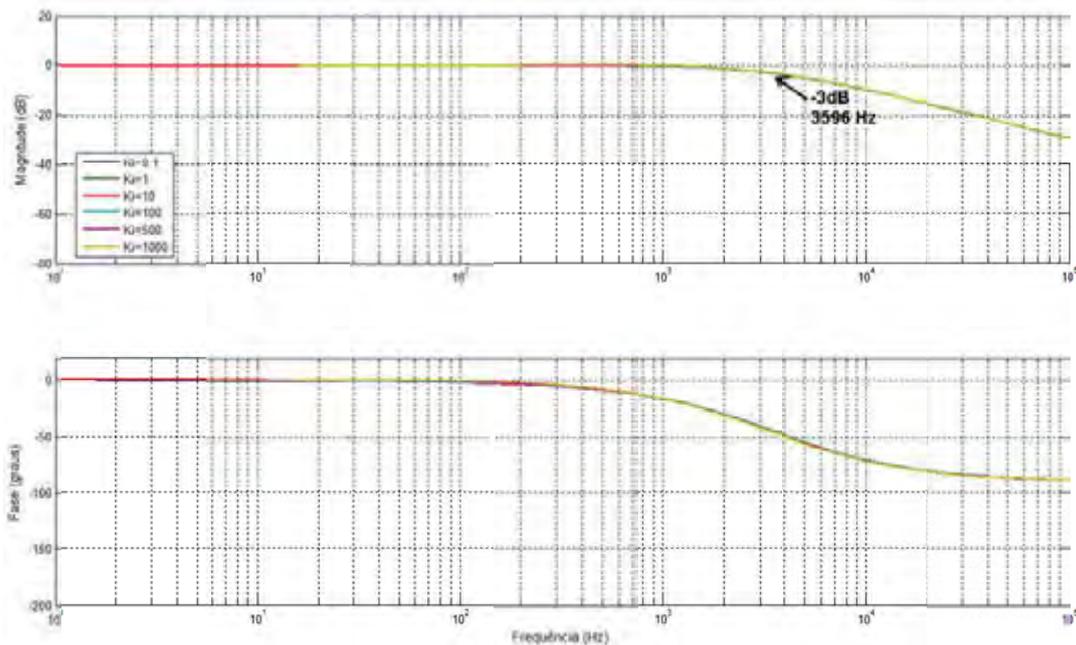


Figura B.9 - Resposta em frequência da função $I_L(s)/I_{Lref}(s)$ com variação de K_I [37].

O termo integral é importante para o regime transitório das funções estudadas, assim, optou-se por não eliminá-lo, deixando-o como definido para o outro controle, $K_I = 100$. Tendo a malha interna já projetada, resta analisar o controlador P+Ressonante da malha externa, a malha interna do controle com

corrente do indutor é muito robusta em relação a esse controlador, não sofrendo alterações com variação de seus ganhos.

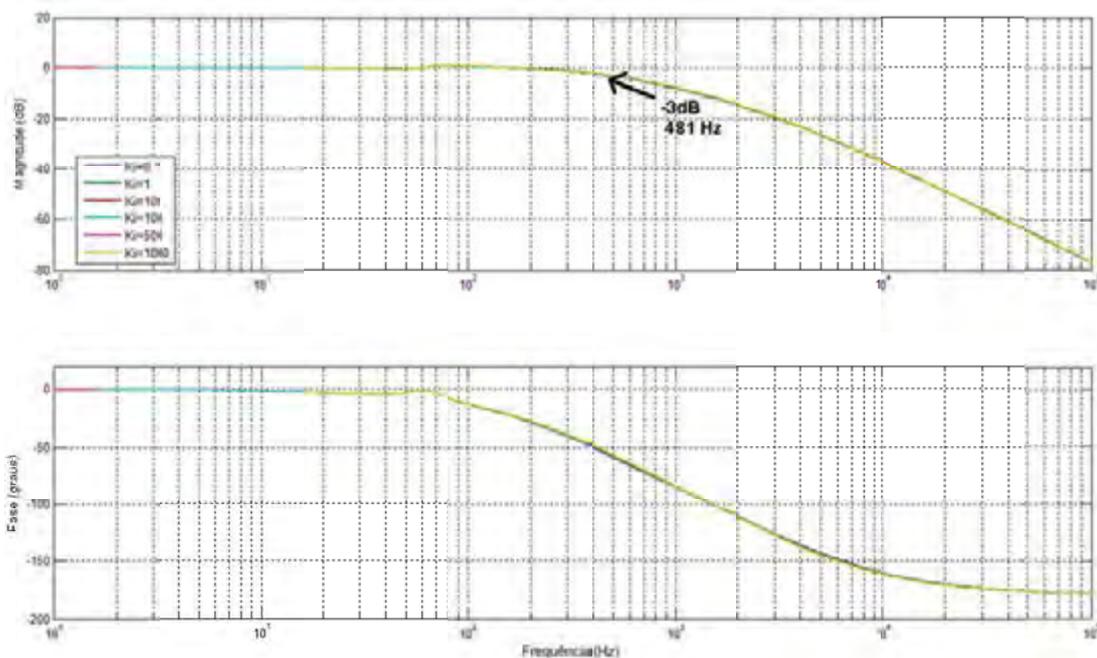


Figura B.10 - Resposta em frequência da função $V_O(s)/V_{Oref}(s)$ com variação de K_I [37].

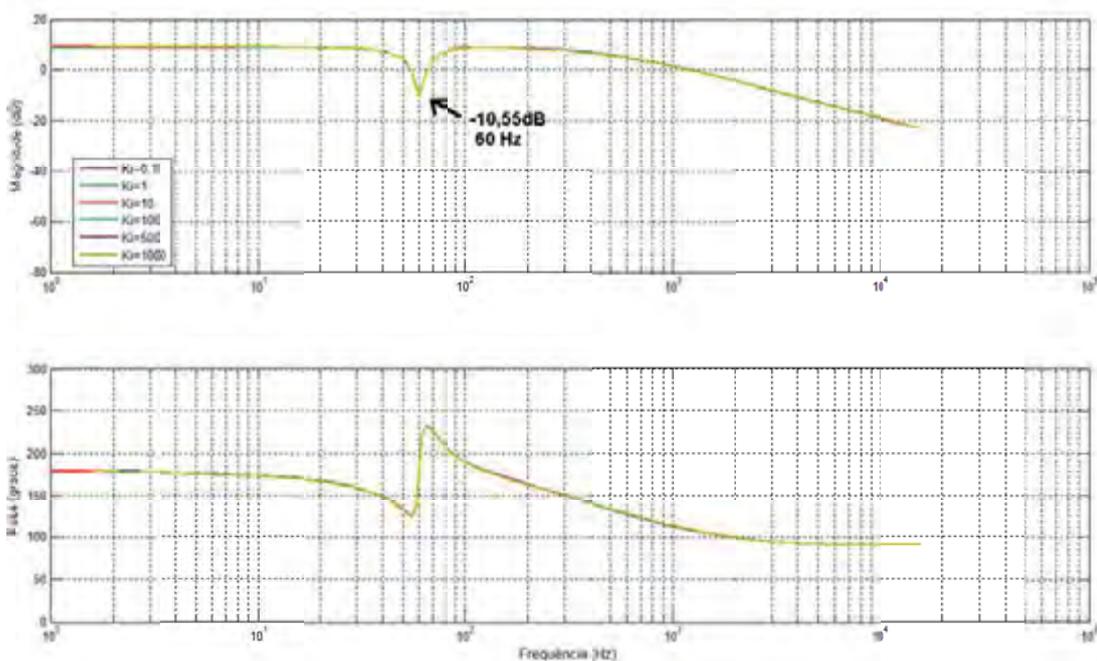


Figura B.11 - Resposta em frequência da função $V_O(s)/I_{LOAD}(s)$ com variação de K_I [37].

O controlador P+Ressonante será analisado da mesma forma, com os ganhos da malha interna fixados, primeiramente variamos o ganho proporcional do controlador P+Ressonante em $\{1,5 \ 2 \ 2,5 \ 3,5 \ 5 \ 10\}$, obtendo as Figuras B.12 e B.13.

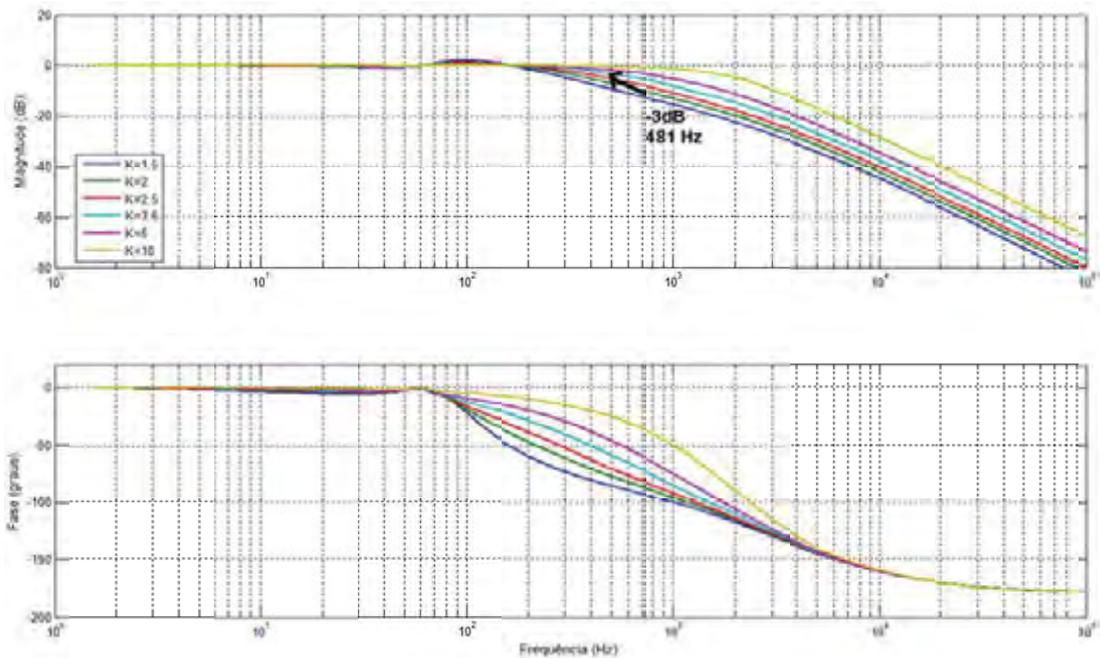


Figura B.12 - Resposta em frequência da função $V_O(s)/V_{Oref}(s)$ com variação de K [37].

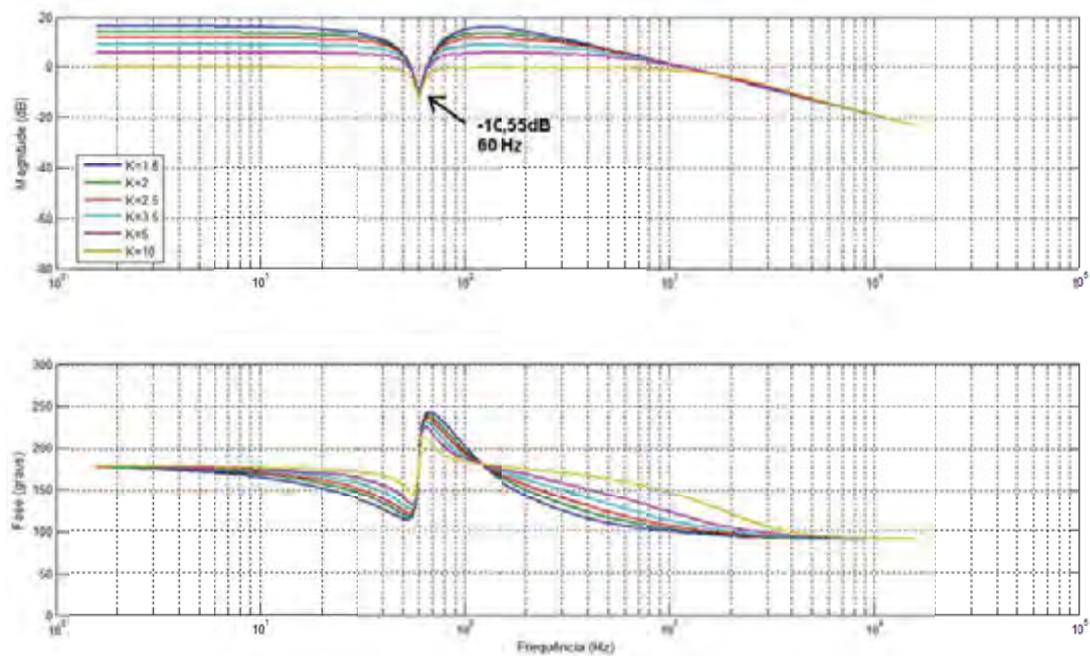


Figura B.13 - Resposta em frequência da função $V_O(s)/I_{LOAD}(s)$ com variação de K [37].

A influência do ganho proporcional K é praticamente a mesma do ganho proporcional da malha interna K_P . Quanto maior o seu valor, maior é a redução da influência da corrente de carga na tensão de saída, porém também aumenta a banda passante da função $V_O(s)/V_{Oref}(s)$.

Por última, analisaremos a influência do ganho ressonante, variando K_η em $\{1 \ 5 \ 10 \ 30 \ 50 \ 100\}$, essa variação não provoca grandes alterações na função $V_O(s)/V_{Oref}(s)$, provavelmente, devido à ação do ganho K . Portanto, só será mostrada a resposta em frequência da função $V_O(s)/I_{LOAD}(s)$, na Figura B.14.

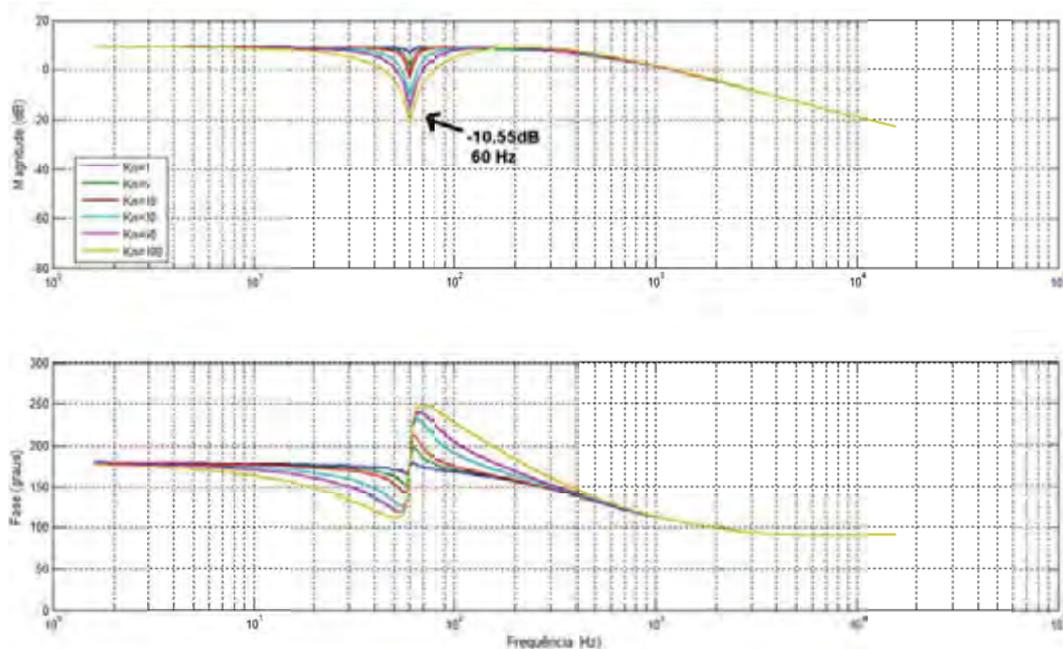


Figura B.14 - Resposta em frequência da função $V_0(s)/I_{LOAD}(s)$ com variação de K_η [37].

O ganho do termo ressonante é capaz de diminuir consideravelmente a interferência da corrente da carga sobre a tensão de saída na frequência de fundamental (60 Hertz). Apesar disso, não será escolhido o valor máximo estudado, por limitações numéricas de implementação, portanto, assume-se $K_\eta = 30$.

B.2.4. Ganhos dos Controladores do Ramo Série

Totalizando a análise na Tabela B.2, obtemos os valores que apresentaram melhor resposta para esta estrutura de controle.

Tabela B.2 - Ganhos Estimados do Ramo Série.

Ganho	Valor
Malha de Corrente	
K_P	1
K_I	100
K_{VFW}	0,9
Malha de Tensão	
K	3,5
K_η	30

Porém, durante a implementação dos controladores no protótipo algumas alterações foram necessárias, a Tabela B.3 traz os valores aplicados. O ganho integrativo K_I precisa ser multiplicado pelo período de amostragem T_{SH} para a discretização, resultando num valor muito pequeno para o DSP processar. Os ganhos Ressonantes geravam acréscimo de harmônicas em frequências diferentes da selecionada.

Tabela B.3 - Ganhos Aplicados da Malha de Tensão e Corrente.

Ganho	Valor
-------	-------

Malha de Corrente	
K_P	1,5
K_I	9000
K_{VFW}	1

Malha de Tensão	
K	0,2
K_1	15
K_3	2
K_5	2
K_7	2

Referências

- [1] Terrazas, T. M.; Serni, P. J. A.; Liberado, E. V.; Fraissat, F. B.; Marafão, F. P., "Observações Sobre Compensação Reativa em Sistemas com Cargas Não Lineares," in *IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, INDUSCON*, 2010.
- [2] Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Nabae, A., "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA 20, pp. 625-630, 1984.
- [3] Marafão, F. P., *Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais*, Tese de Doutorado, 2004.
- [4] Newman, M. J.; Holmes, D. G., "A universal custom power conditioner (UCPC) with selective harmonic voltage compensation," in *IEEE Annual Conference of the Industrial Electronics Society - IECON*, 2002, pp. 1261-1265.
- [5] Marafão, F. P.; Cólón, D.; Negretti, F. R.; Galassi, M.; Negri, C. A., "Projeto e Análise da Estratégia de Controle do DVR Baseado na Medida da Corrente no Indutor de Saída," CPFL, USP, UNESP, Expertise, Relatório Interno, P&D 171 2006.
- [6] Aredes, M.; Heumann, K.; Watanabe, E. H., "An universal active power line conditioner," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, pp. 545-551, 1998.
- [7] Marafão, F. P.; Deckmann, S. M.; Luna, E. K., "A Novel Frequency and Positive Sequence Detector for Utility Applications and Power Quality Analysis," , Barcelona, 2004.
- [8] Oliveira da Silva, S. A.; Donoso-Garcia, P. F.; Cortizo, P. C.; Seixas, P. F., "A comparative analysis of control algorithms for three-phase line-interactive UPS systems with series-parallel active power-line conditioning using SRF method," in *IEEE Power Electronics Specialists Conference - PESC*, 2000, pp. 1023-1028.
- [9] Aredes, M., *Active Power Line Conditioners*, Tese de Doutorado, 1996.

- [10] Hingorani, N. G.; Gyugyi, L.;, *Understanding FACTS : Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems* , 1st ed.: Wiley-IEEE Press , 2000.
- [11] R. C. Dugan, M. F. McGranaghan, H Wayne Beaty, and S. Santoso, "Electrical Power Systems Quality," , 1996.
- [12] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica - PRODIST, 2011, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.
- [13] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, Resolução n.o 456, 200.
- [14] IEEE, Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric, Std 1459, 2010.
- [15] de Almeida Filho, I. C. R., Estudos e Implementações de Topologias de Restauradores Dinâmicos de Tensão, Dissertação de Mestrado, 2007.
- [16] F. Z. Peng, "Harmonic Sources and Filtering Approaches," *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 18-25, 2001.
- [17] Akagi, H.; Watanabe, E. H.; Aredes, M.;, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning* , 1st ed.: Wiley-IEEE Press , 2007.
- [18] Aredes, M.; Fernandes, R. M., "A Unified Power Quality Conditioner With Voltage Sag/Swell Compensation Capability," in *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência COBEP*, 2009, pp. 218-224.
- [19] Basu, M.; Das, S. P.; Dubey, G. K., "Performance study of UPQC-Q for load compensation and voltage sag mitigation," in *IEEE Industrial Electronics Society IECON*, 2002, pp. 698-703.
- [20] Galassi, M., Projeto e Construção de um Restaurador Dinâmico de Tensão, Dissertação de Mestrado, 2006.
- [21] M. S. Pádua, S. M. Deckmann, and F. P. Marafão, "Frequency-adjustable Positive Sequence Detector For Power Conditioning Applications," , Recife, 2005.
- [22] Chang, G. W.; Shee, T. C., "A novel reference compensation current strategy for shunt active power filter control," *IEEE Transactions on Power Delivery*, pp. 1751-1758, 2004.
- [23] Marafão, F. P.; Paredes, H. K. M.; Pereira da Silva, L. C.;, "Critical evaluation of FBD, PQ and CPT current decompositions for four-wire circuits," in *Congresso*

Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP, 2009, pp. 277-286.

- [24] Marafão, F. P.; Liberado, E. V.; Paredes, H. K. M.; Pereira da Silva, L. C., "Three-phase four-wire circuits interpretation by means of different power theories," in *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation - ISNCC*, 2010, p. 168.
- [25] H. K. M. Paredes, F. P. Marafão, T. M. Terrazas, and P. J. A. Serni, "Harmonic, Reactive and Unbalance Compensation," in *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência, COBEP*, 2009, pp. 741-748.
- [26] Marafão, F. P.; Deckmann, S. M.; Pomilio, J. A.; Machado, R. Q., "Metodologia de Projeto e Análise de Algoritmos de Sincronismo PLL," *Eletrônica de Potência*, pp. 7-14, 2005.
- [27] S. Lee, J. Kim, and J. Choi, "A New Control Algorithm for Instantaneous Voltage Sag Corrector Using Series Compensator," in *Power Electronics and Drive Systems*, 2002, pp. 789-795.
- [28] Asadi, M.; Jalilian, A.; Farahani, H. F., "Compensation of Unbalanced Non Linear Load and neutral currents using stationary Reference Frame in Shunt Active Filters," , 2010.
- [29] L. Matakas Jr., F. O. Martinz, A. R. Giaretta, M. Galassi, and W. Komatsu, "Uma Abordagem Gráfica para um Algoritmo de PLL Baseado em Seqüência Positiva," , Salvador, 2006.
- [30] Ahn, S. U.; Matakas, L.; Jardini, J. A.; Komatsu, W.; Masuda, M.; Silva, F. A. T.; Galassi, M.; Camargo, J.; Zanetti, E. R.; Martinz, F. O., "Dispositivo Restaurador da Tensão com Funções de Compensação de Reativos e Filtro Ativo de Harmônicos," in *Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL*, 2003, pp. 885-890.
- [31] Jardini, J. A.; Ahn, S. U.; Matakas Jr., L.; Komatsu, W.; Camargo, J.; Masuda, M.; Silva, F. A. T.; Copeliovitch, S.; Galassi, M.; Martinz, F. O.; Zanetti, E. R., "Teste de Protótipo do Dispositivo Restaurador da Tensão com Função de Filtro Harmônico Ativo (Mini-DVR) - 1a Fase," in *Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica - SNPTEE*, 2005, pp. 1-8.
- [32] Matakas Jr., L.; Komatsu, W.; Jardini, J. A.; Masuda, M.; Silva, F. A. T.; Copeliovitch, S.; Galassi, M.; Martiz, F. O.; Ahn, S. U.; Zanetti, E. R.; Camargo, J., "A Low Power Dynamic Voltage Restorer with Voltage Harmonic Compensation," in *International Power Electronics Conference - IPEC*, 2005, pp. 475-481.
- [33] Masuda, M.; Komatsu, W.; Ahn, S. U.; Jardini, J. A.; Matakas Jr., L.; Silva, F. A.

- T.; Copeliovitch, S.; Maritz, F. O.; Galassi, M.; Oliveira, M. A.; Camargo, J.; Lima, E. G., "Desenvolvimento de Restauradores Dinâmicos de Tensão de Baixa Potência," in *Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica - CITENEL*, 2005, pp. 1-6.
- [34] Ahn, S. U.; Jardini, J. A.; Masuda, M.; Silva, F. A. T.; Copeliovitch, S.; Matakas, L.; Komatsu, W.; Galassi, M.; Ortiz, F. M.; Camargo, J.; Zanetti, E. R., "Mini-DVR Dynamic Voltage Restorer with Active Harmonic Filter (Tests of Prototype)," in *International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP*, 2004, pp. 1-8.
- [35] Marafão, F. P.; Cólón, D.; Jardini, J. A.; Komatsu, W.; Matakas Jr., L.; Galassi, M.; Ahn, S. U.; Bormio Jr., E.; Camargo, J. C.; Monteiro, T.; Oliveira, M. A., "Multiloop Controller and Reference Generator for a Dynamic Voltage Restorer Implementation," in *International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, 2008.
- [36] Pádua Filho, L. O., Estágio de saída de uma ups trifásica, Trabalho de Conclusão de Curso, 2008.
- [37] Lemes, L. R. P., Desenvolvimento de um dispositivo restaurador de tensão (dvr dynamic voltage restorer), Trabalho de Conclusão de Curso, 2010.
- [38] Vendrusculo, E. A.; Marafão, F. P.; Pomilio, J. A.; Machado, R. Q., "Digital Control of Single-Phase VSI for Transformer-based UPS," in *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP*, 2005.
- [39] Monteiro, T. C., Proposta de Modelo e Método para Determinação dos Parâmetros de Transformadores Operando em Saturação, Dissertação de Mestrado, 2011.
- [40] Ogata, K., *Engenharia de Controle Moderno*, 4th ed.: Prentice Hal, 2003.
- [41] Negreti, J. F. R., Estudo Comparativo de Algumas Arquiteturas de Filtros Ativos de Potência, Trabalho de Conclusão de Curso, 2008.
- [42] Loh, P. C.; Newman, M. J.; Zmood, D. N.; Holmes, D. G., "A Comparative Analysis of Multiloop Voltage Regulation Strategies for Single and Three-Phase UPS System," *IEEE Transaction on Power Eletronics*, pp. 1176-1185, 2003.
- [43] K. Ogata, *Discrete-Time Control Systems*, 2nd ed.: Prentice Hall, 1995.