

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RODRIGO BARRIVIERA**

**SISTEMA UPS *LINE-INTERACTIVE* MONOFÁSICO COM  
COMPENSAÇÃO ATIVA DE POTÊNCIA SÉRIE E PARALELA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2012**

**RODRIGO BARRIVIERA**

**SISTEMA UPS *LINE-INTERACTIVE* MONOFÁSICO COM  
COMPENSAÇÃO ATIVA DE POTÊNCIA SÉRIE E PARALELA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Câmpus Cornélio Procópio da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Ciências”.

Orientador: Prof. Dr. Maurício dos Santos Kaster

Co-orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2012**

---

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

B276 Barriviera, Rodrigo  
Sistema UPS *line-interactive* monofásico com compensação ativa de potência série e paralela / Rodrigo Barriviera. – 2012.  
135 p. : il. ; 30 cm

Orientador: Prof. Dr. Maurício dos Santos Kaster.  
Coorientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto da Silva.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2012.

Bibliografia: p. 125-131.

1. Fonte de energia ininterrupta. 2. Amplificadores de potência. 3. Harmônicos (ondas elétricas). 4. Fator de potência. 6. Engenharia elétrica – Dissertações. I. Kaster, Maurício dos Santos. orient. II. Silva, Sérgio Augusto da, coorient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

---

Biblioteca da UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio



Ministério da Educação  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Campus Ponta Grossa

Nome da Diretoria  
Nome da Coordenação  
Nome do Curso



---

## TERMO DE APROVAÇÃO

SISTEMA UPS *LINE-INTERACTIVE* MONOFÁSICO COM COMPENSAÇÃO ATIVA  
DE POTÊNCIA SÉRIE E PARALELA

por

RODRIGO BARRIVIERA

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Ciências” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Cornélio Procópio, 31 de agosto de 2012.

---

Alessandro Goedel, Dr.  
Prof. UTFPR/CP – Coordenador do Curso

---

Maurício dos Santos Kaster, Dr.  
Prof. UTFPR/PG - Orientador

---

Sérgio Augusto Oliveira da Silva, Dr.  
Prof. UTFPR/CP - Co-Orientador

---

Ernane Antônio Alves Coelho, Dr.  
Prof. UFU - Membro titular

---

Claudinor Bitencourt Nascimento, Dr.  
Prof. UTFPR/PG - Membro titular

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso do Programa”

**À sabedoria e ao amor de Deus**

**A todos que de alguma forma,  
colaboraram na realização  
deste trabalho, como minha  
família, amigos e professores.**

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que me concedeu o dom da fé, da sabedoria e do amor, para que confiante eu fosse capaz de realizar mais esse sonho.

A minha amada esposa, por todo apoio, paciência e amor, fatores esses que me ajudaram a perseverar e nunca desistir.

A minha família, meus pais Romildo e Celina, meu irmão Rodolfo e sua esposa Carol, meus sogros José e Isabel por acreditarem em mim, o que me deram força para lutar e alcançar mais esta vitória.

Ao meu orientador, o Prof. Dr. Maurício dos Santos Kaster, pelo apoio durante esta jornada, pelas orientações prestadas, além de um acompanhamento no percurso da construção e organização do trabalho, e pelo apoio e confiança depositados.

Ao meu co-orientador, o Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva, que sempre ético e comprometido, esteve me orientando com informações significativas de forma eficaz, durante toda a elaboração deste projeto. Com muita dedicação, e conhecimento amplo, me proporcionou maior segurança na construção e aperfeiçoamento do mesmo.

Aos professores Claudinor Bitencourt Nascimento e Ernane Antônio Alves Coelho, participantes da banca de avaliação.

A todos os docentes do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio, pela troca de conhecimentos que tanto enriqueceram os resultados obtidos nesse trabalho.

Aos meus amigos e colegas de curso, os alunos: Edson Junior Acordi, Leonardo B. G. Campanhol, Tiago Henrique dos Santos, Felipe Postali, William Salviano Gongora, Demerval Mizuyama, Celso Kawamura, Marcelo Dias Pedroso, Paulo Bronieira, Hugo Dias, o bolsista Vinicius Dário Bacon, e em especial ao professor Rodrigo Augusto Modesto, por toda cumplicidade, amizade e diversão, vivenciadas nesses dois anos e meio.

Aos meus amigos de trabalho do Instituto Federal do Paraná e da Copel, pela compreensão e companheirismo, sem as quais não seria possível manter meu empenho no decorrer do mestrado.

A todos os funcionários da UTFPR e ao Câmpus de Cornélio Procópio, pela atenção e dedicação destinada aos alunos.

Meus sinceros agradecimentos, a todos que contribuíram para a realização desta pesquisa.

“A minha meta está no alto, está no céu! Deixa passar o que passou, não olhe para trás. O céu é para quem sonha grande, pensa grande, ama grande e tem a coragem de viver pequeno. Isso é o céu!”

Rosemeri Barriviera.

## RESUMO

BARRIVIERA, Rodrigo. **Sistema UPS *line-Interactive* monofásico com compensação ativa de potência série e paralela**. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Cornélio Procópio, 2012.

Este trabalho apresenta o projeto e implementação de um sistema *UPS (Uninterruptible Power Supply) Line-Interactive* monofásico com compensação ativa de potência série e paralela, o qual realiza a supressão de harmônicos e compensação de afundamentos e elevações da tensão da rede elétrica, além de manter a tensão na carga regulada. Adicionalmente, a UPS atua na compensação de potência reativa e supressão dos harmônicos de corrente da carga, resultando em uma efetiva correção do fator de potência. Desse modo, com a rede elétrica presente, a UPS opera como filtro ativo universal realizando a compensação da corrente de entrada, bem como da tensão de saída. Quando a rede elétrica está ausente, a UPS alimenta a carga com tensão regulada e com baixa taxa de distorção harmônica. Para este fim, dois conversores monofásicos *PWM* são empregados, sendo estes chamados de filtro ativo série (FAS), o qual atua como fonte de corrente senoidal e o filtro ativo paralelo (FAP), o qual atua como fonte de tensão senoidal, ambos controlados para operar em fase com a tensão da rede. Com o objetivo de extrair a corrente de referência senoidal de compensação, usada no controle do FAS, é utilizado um algoritmo baseado no sistema de eixo de referência síncrona (*SRF-Synchronous Reference Frame*). Para a obtenção da referência da tensão senoidal de saída, assim como as coordenadas do vetor unitário síncrono utilizados pelo algoritmo SRF, um sistema de detecção de ângulo de fase (*PLL-Phase Locked Loop*) monofásico é utilizado. Ensaio experimentais, bem como simulações computacionais são realizados a fim de confirmar o desenvolvimento teórico e avaliar o desempenho dinâmico e estático do sistema UPS.

**Palavras-chave:** Sistema UPS. Filtro Ativo de Potência. Compensação de Potência Reativa. Supressão de Harmônicos de Corrente e Tensão. Correção do fator de Potência.



## ABSTRACT

BARRIVIERA, Rodrigo. **A Single-Phase Line-Interactive UPS Systems with Series and Parallel Active Power-Line Conditioning**. 2012. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR). Cornélio Procópio, 2012.

This work presents a single-phase Line-interactive UPS System implementation with series and parallel active power-line compensation, which performs harmonic suppression and voltage sag/swell compensation of the utility voltage, as well as maintaining the output voltage regulated. Additionally, the UPS performs reactive power compensation and harmonic suppression of the load current, resulting in an effective power-factor correction. Thereby, when the incoming power grid is present, the UPS works as a universal active power filter compensating the input current and output voltage. On the other hand, when an outage occurs, the UPS feeds the load with regulated and harmonic free voltage. For this purpose, two single-phase PWM converters are employed, which are referred as series active power filter (SAPF), which acts as a sinusoidal current source, and parallel active power filter (PAPF), which acts as a sinusoidal voltage source. Both the APFs are controlled to be in phase with the input voltage. In order to extract the sinusoidal compensation reference current, used in SAPF control, an algorithm based on synchronous reference frame (SRF) is used. The sinusoidal output voltage reference and the coordinates of the synchronous vector are obtained by using a phase-locked loop (PLL) algorithm. Experimental results and computational simulations are presented to confirm the theoretical development and evaluate both the dynamic and steady state behavior of the UPS system.

**Keywords:** UPS system, Active Power Filter. Reactive Power Compensation. Voltage and Current Harmonic Suppression. Power Factor Correction.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Diagrama de blocos de um sistema UPS convencional .....	33
Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema UPS de Dupla Conversão de Energia .....	35
Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema UPS <i>Off-Line</i> .....	37
Figura 4 – Diagrama de blocos de um sistema UPS <i>Line-interactive</i> convencional..	38
Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema UPS <i>Line-interactive Tri-port</i> .....	39
Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema UPS <i>Line-interactive Ferro-ressonante</i> .....	40
Figura 7 – Diagrama de blocos de um sistema UPS de simples conversão de energia monofásico com condicionamento ativo paralelo .....	41
Figura 8 – Diagrama de blocos de um sistema UPS de dupla conversão de energia monofásico com condicionamento ativo série e paralelo .....	42
Figura 9 – Diagrama de blocos da UPS <i>Line-interactive</i> .....	46
Figura 10 – Topologia da UPS <i>Line-interactive</i> .....	47
Figura 11 – PWM senoidal bipolar – Dois níveis .....	49
Figura 12 – PWM senoidal unipolar – Três níveis .....	50
Figura 13 – Diagrama de blocos do algoritmo SRF trifásico para compensação de harmônicos .....	51
Figura 14 – Diagrama de blocos do algoritmo SRF trifásico .....	53
Figura 15 – Algoritmo SRF para geração da referência de corrente .....	54
Figura 16 – Diagrama de blocos do sistema p-PLL monofásico .....	56
Figura 17 – Circuito do conversor série monofásico .....	58
Figura 18 – Circuito equivalente considerando as impedâncias de dispersão do transformador .....	59
Figura 19 – Circuito equivalente do conversor série .....	59
Figura 20 – Modelo do conversor série .....	60
Figura 21 – Diagrama de blocos das malhas de controle de corrente do conversor série .....	62
Figura 22 – Diagrama de blocos de laço aberto de controle de corrente do conversor série .....	63
Figura 23 – Diagrama de bloco da malha de controle da tensão do barramento CC	68
Figura 24 – Circuito do conversor paralelo de tensão .....	68
Figura 25 – Diagrama de blocos das malhas de controle de tensão e corrente do conversor paralelo .....	72
Figura 26 – Diagrama de blocos da malha interna do controle de corrente do conversor paralelo .....	72
Figura 27 – Diagrama de blocos da malha externa de tensão sem o controlador PI do conversor paralelo .....	73
Figura 28 – Diagrama de blocos da malha externa de tensão com o controlador PI do conversor paralelo .....	73

Figura 29 – Potências normalizadas: $k_b=0$ e $k_b=0.1$ ( $\cos \varphi_1=1$ ): (a) Conversor paralelo $ S_P / S_L $ ; Conversor série $ S_S / S_L $ .....	75
Figura 30 – Fluxo de potência: $V_S > V_L$ .e $k_b=0$ .....	76
Figura 31 – Fluxo de potência: $V_S < V_L$ .e $k_b=0$ .....	76
Figura 32 – Fluxo de potência: $V_S = V_L$ .e $k_b=0$ .....	77
Figura 33 – Fluxo de potência: $V_S = V_L$ .e $k_b=0.1$ .....	77
Figura 34 – Plano complexo com as coordenadas $G_c$ .....	80
Figura 35 – Resposta em frequência para $G_{CS}(s)$ .....	83
Figura 36 – Resposta em frequência para $G_{MAS_i}(s)$ .....	83
Figura 37 – Resposta em frequência para $G_{MFs_i}(s)$ .....	84
Figura 38 – Resposta em frequência para $G_P(s)$ .....	85
Figura 39 – Resposta em frequência para $G_{MA_{cc}}(s)$ .....	86
Figura 40 – Resposta em frequência para $G_{MF_{cc}}(s)$ .....	86
Figura 41 – Resposta em frequência para $G_{CP_i}(s)$ .....	88
Figura 42 – Resposta em frequência para $G_{MA_i}(s)$ .....	88
Figura 43 – Resposta em frequência para $G_{MF_i}(s)$ .....	89
Figura 44 – Resposta em frequência para $G_{MA_v^*}(s)$ .....	89
Figura 45 – Resposta em frequência para $G_{MA_v}(s)$ .....	90
Figura 46 – Resposta em frequência para $G_{MF_v}(s)$ .....	90
Figura 47 – Diagrama em blocos do sistema UPS simulado .....	96
Figura 48 – Corrente de referência do algoritmo SRF ( $i_{s\_ref}$ ); (Tempo (s)) .....	96
Figura 49 – Tensões de referência do sistema PLL ( $V_{ref\_cos}, V_{ref\_sen}$ ); (Tempo (s)) ..	97
Figura 50 – Correntes: (a) corrente da rede ( $i_s$ ); (b) corrente de compensação paralela ( $i_{cp}$ ); (c) corrente da carga ( $i_L$ ) (Tempo (s)).....	97
Figura 51 – Tensões: tensões de entrada ( $v_s$ ), saída ( $v_L$ ) e conversor série ( $v_c$ ) (Tempo(s)).....	98
Figura 52 – Tensão e corrente: tensão de entrada ( $v_s$ ) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (Tempo (s)).....	98
Figura 53 – Tensão e corrente: tensão de saída ( $v_L$ ) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (Tempo(s)).....	99

Figura 54 – Correntes com transições: (a) corrente de entrada ( $i_s$ ); (b) corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ); (c) corrente da carga ( $i_L$ ) (Tempo(s)) .....	100
Figura 55 – Tensões: (a) tensão de entrada ( $v_s$ ); (b) tensão do conversor série ( $v_c$ ); (c) tensão da carga ( $v_L$ ) (Tempo(s)) .....	101
Figura 56 – Tensões e potência: (a) tensão de entrada ( $v_s$ ) < que a tensão de saída ( $v_L$ ) e tensão de entrada ( $v_s$ ) > que a tensão de saída ( $v_L$ ); (b) tensão de saída ( $v_L$ ); (c) Potência ativa instantânea através do conversor série (Tempo(s)).....	102
Figura 57 – Correntes: (a) corrente de entrada ( $i_s$ ); (b) corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ); (c) corrente da carga ( $i_L$ ) (Tempo(s)) .....	103
Figura 58 – Tensões: (a) tensão de entrada ( $v_s$ ); (b) tensão do conversor série ( $v_c$ ); (c) tensão de saída ( $v_L$ ); (Tempo(s)) .....	104
Figura 59 – Diagrama em blocos do protótipo da UPS .....	109
Figura 60 – Correntes: (a) corrente da rede ( $i_s$ ), corrente de compensação paralela ( $i_{cp}$ ) e corrente da carga ( $i_L$ ) (10A/div); Detalhe das correntes: (b) corrente da rede ( $i_s$ ), corrente de compensação paralela ( $i_{cp}$ ) e corrente da carga ( $i_L$ ) (10A/div – 10ms/div e 2.5ms/div) .....	110
Figura 61 – Tensões: Entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (50V/div – 10ms/div).....	110
Figura 62 – Tensão e corrente: (a) tensão de entrada ( $v_s$ ) (50V/div – 5ms/div) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (10A/div); (b) tensão de saída ( $v_L$ ) (50V/div) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (10A/div); .....	111
Figura 63 – Tensões: Entrada ( $v_s$ ), saída ( $v_L$ ) e compensação série ( $v_c$ ) (50V/div – 5ms/div).....	111
Figura 64 – Tensões: Afundamento - (a) ( $v_s$ ) < ( $v_L$ ) e compensação série ( $v_c$ ) (100V/div – 5ms/div); Elevação - (b) ( $v_s$ ) > ( $v_L$ ) e compensação série ( $v_c$ ) (50V/div – 5ms/div).....	112
Figura 65 – Tensões e correntes: Afundamento - (a) tensão de entrada ( $v_s$ ) < que a tensão de saída ( $v_L$ ) (50V/div – 5ms/div) e corrente de compensação série ( $i_s$ ) (10A/div – 5ms/div); Elevação - (b) tensão de entrada ( $v_s$ ) > que a tensão de saída ( $v_L$ ) e corrente de compensação série ( $i_s$ ) (10A/div – 5ms/div) .....	112
Figura 66 – Tensões e correntes: Afundamento e Elevação - (a) e (b) tensões do barramento CC ( $v_{cc}$ )(100V/div – 500ms/div), entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (200V/div – 500ms/div) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (20A/div – 5ms/div) .....	113
Figura 67 – Tensões e correntes: Variações de Carga - (a) e (b) tensão do barramento CC ( $v_{cc}$ ) (50V/div – 500ms/div), corrente de entrada ( $i_s$ ) (20A/div –	

500ms/div), corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) (10A/div / 20A/div – 500ms/div) e corrente da carga ( $i_L$ ) (20A/div – 500ms/div).....	114
Figura 68 – Tensão e correntes: Variações de Carga - (a) tensão do barramento CC ( $v_{cc}$ ) (100V/div – 500ms/div), corrente de entrada ( $i_s$ ) (20A/div – 500ms/div), corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) (10A/div – 500ms/div) e corrente da carga ( $i_L$ ) (20A/div – 500ms/div).....	114
Figura 69 – Correntes: Transitórios - (a) e (b) corrente de entrada ( $i_s$ ), corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) e corrente da carga ( $i_L$ ) (10A/div – 10ms/div) .....	115
Figura 70 – Correntes: Transitórios - (a) corrente de entrada ( $i_s$ ), corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) e corrente da carga ( $i_L$ ) (10A/div – 10ms/div) .....	115
Figura 71 – Tensões: Transitórios - (a) tensões de entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (100V/div – 250ms/div); (b) tensões do barramento CC ( $v_{cc}$ )(100V/div – 500ms/div), entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (200V/div – 500ms/div).....	116
Figura 72 – Amplitude dos harmônicos em porcentagem em relação à fundamental e DHT: (a) Tensão de entrada ( $v_s$ ); (b) Tensão de saída ( $v_L$ ); (c) Corrente de entrada ( $i_s$ ); (d) Corrente da carga ( $i_L$ ) .....	117
Figura 73 – Tensões e correntes: Entrada: (a) Fator de potência (PF), fator de deslocamento (DPF), potências em W, VAR e VA; Carga: (b) Fator de potência (PF), fator de deslocamento (DPF), potências em W, VAR e VA.....	117
Figura 74 – Amplitude dos harmônicos em porcentagem em relação à fundamental comparada com a recomendação IEEE 519-1992: Corrente de entrada ( $i_s$ ) .....	118
Figura 75 – Amplitude dos harmônicos em porcentagem em relação à fundamental comparada com a norma IEC 61000-3-2: Corrente de entrada ( $i_s$ ).....	118

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental) (IEEE Std. 519-1992, 1992).....	24
Tabela 2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) (IEEE Std. 519-1992, 1992).....	24
Tabela 3 – Limites de Distorção Harmônica Total em % da Tensão na Frequência fundamental (IEEE Std. 519-1992, 1992).....	25
Tabela 4 – Máxima Distorção Harmônica da Corrente em % de $I_L$ (SILVA, 2001; IEEE Std. 519-1992, 1992).....	26
Tabela 5 – Limite dos Harmônicos de Corrente da Norma IEC 61000-3-2 (IEC 1000-3-2, 1998).....	28
Tabela 6 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – fonte: PRODIST. ....	30
Tabela 7 – Especificações para projeto do controlador PI de corrente do conversor série .....	82
Tabela 8 – Ganhos do controlador PI da malha de corrente do conversor série.....	84
Tabela 9 – Especificações para projeto dos controlador PI de tensão do barramento CC .....	85
Tabela 10 – Ganhos do controlador PI da malha de tensão do barramento CC.....	87
Tabela 11 – Especificações para projeto dos controladores PI do conversor paralelo .....	87
Tabela 12 – Ganhos dos controladores PI do conversor paralelo.....	91
Tabela 13 – Parâmetros utilizados nas simulações .....	95
Tabela 14 – Parâmetros utilizados nos experimentos.....	107

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

### LISTA DE SIGLAS

UPS	Uninterruptible Power Supply
SEI	Sistema de Energia Ininterrupta
DSP	Digital Signal Processor
SRF	Synchronous Reference Frame
FAS	Filtro Ativo de Potência Série
FAP	Filtro Ativo de Potência Paralelo
DHT	Distorção Harmônica Total
PLL	Phase-Locked Loop
PI	Proporcional - Integral
PQC	Power Quality Conditioners
UPQC	Unified Power Quality Conditioners
iUPQC	Unified Power Quality Conditioners with Inverted Topology
APF	Active Power Filters
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEC	International Electrotechnical Commission
EMI	Interferência Eletromagnética
RFI	Interferência de Rádio Frequência
VSI	Voltage Source Inverter
DRV	Dynamic Voltage Restorer Systems
PWM	Pulse Width Modulation
FP	Fator de Potência
FPB	Filtro Passa Baixa
FPA	Filtro Passa Alta
TD	Transport Delay
TDD	Total Demand Distortion
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
P	Potência Ativa (W)
Q	Potência Reativa (VAr)

EA	Energia Ativa (W)
ER	Energia Reativa (VAr)
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua



## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>13</b>
1.1 PROBLEMA EM ENGENHARIA ELÉTRICA A SER PESQUISADO .....	16
1.2 OBJETIVO GERAL .....	18
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO .....	19
1.5 CONTRIBUIÇÃO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO .....	20
<b>2 QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS .....</b>	<b>21</b>
2.1 INTRODUÇÃO .....	21
2.2 TERMOS E DEFINIÇÕES RELACIONADOS À QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA .....	21
2.2.1 Tensão em Regime Permanente .....	22
2.2.2 Fator de Potência.....	22
2.2.3 Conceitos de Harmônicos .....	23
2.2.4 Desequilíbrios de Tensão .....	28
2.2.5 Flutuação de Tensão .....	29
2.2.6 Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD).....	29
2.2.7 Variação de Tensão de Longa Duração (VTLD) .....	30
2.2.8 Distorções na Forma de Onda da Tensão .....	31
2.2.9 Transitórios .....	31
2.2.10 Variação de Frequência.....	31
2.3 TOPOLOGIAS DOS SISTEMAS DE ENERGIA ININTERRUPTA (UPS).....	32
2.3.1 Tipos de sistemas de energia ininterrupta (UPS).....	32
2.3.2 Classe de Sistemas UPS .....	33
2.3.3 Topologias UPS e a Compensação Ativa de Potência .....	40
2.4 CONCLUSÃO .....	44
<b>3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DA TOPOLOGIA.....</b>	<b>45</b>
3.1 INTRODUÇÃO.....	45
3.2 UPS LINE-INTERACTIVE MONOFÁSICA.....	45
3.2.1 Topologia do Sistema UPS <i>Line-Interactive</i> .....	46
3.2.2 Modulação PWM.....	47
3.2.3 Algoritmos Baseados no Sistema de Referência Síncrona (SRF) .....	50
3.2.4 Algoritmo SRF Monofásico .....	53
3.2.5 Sistema PLL.....	55
3.3 MODELAGEM DA UPS .....	58
3.3.1 Modelo Matemático do Conversor Série .....	58
3.3.2 Malha de Controle de Corrente do Conversor Série .....	62
3.3.3 Modelo Matemático do Barramento CC.....	63
3.3.4 Modelo Matemático do Conversor Paralelo .....	68

3.3.5 Malha de Controle de Tensão do Conversor Paralelo .....	71
3.4 FLUXO DE POTÊNCIA NA UPS .....	74
3.5 CONCLUSÃO .....	78
<b>4 PROJETO DOS CONTROLADORES .....</b>	<b>79</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	79
4.2 METODOLOGIA DE PROJETO DO CONTROLADOR PI .....	79
4.3 DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DO CONVERSOR SÉRIE DE CORRENTE .....	82
4.4 DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DO BARRAMENTO CC .....	84
4.5 DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DO CONVERSOR PARALELO DE TENSÃO – FAP .....	87
4.6 DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR PI .....	91
4.7 CONCLUSÃO .....	92
<b>5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....</b>	<b>94</b>
5.1 INTRODUÇÃO .....	94
5.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA UPS SIMULADO .....	95
5.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO .....	96
5.4 CONCLUSÃO .....	104
<b>6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>106</b>
6.1 INTRODUÇÃO .....	106
6.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO .....	107
6.3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	109
6.4 CONCLUSÃO .....	119
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS..</b>	<b>120</b>
7.1 CONCLUSÕES .....	120
7.2 PROPOSTA DE CONTINUIDADE .....	122
7.3 PUBLICAÇÕES .....	123
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>125</b>
<b>APÊNDICE A – FOTOGRAFIAS DO PROTÓTIPO DA UPS .....</b>	<b>132</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos últimos anos com os avanços da tecnologia dos semicondutores, aumentou consideravelmente o desenvolvimento de equipamentos que utilizam a Eletrônica de Potência nas mais diversas aplicações voltadas para os consumidores industriais, comerciais e residenciais. Estes equipamentos caracterizam-se por drenarem da rede elétrica correntes não lineares que por sua vez contribuem para a degradação da qualidade de energia elétrica (KAMRAN; HABETLER, 1995; SILVA et al., 2003; BARRIVIERA et al., 2011). Pode-se citar algumas destas cargas, tais como retificadores controlados e não controlados, cicloconversores, inversores para o acionamento de máquinas CA, dentre outras.

As cargas não lineares conectadas ao sistema elétrico têm como característica a geração de harmônicos de corrente, contribuindo para a diminuição do fator de potência bem como causando problemas na rede elétrica, tais como interferências eletromagnéticas, aumento das perdas nos condutores elétricos, aumento das taxas de distorções harmônicas de tensão, aquecimentos excessivos de transformadores e aumento de ruídos na frequência audível (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 1996).

Algumas cargas críticas são mais vulneráveis aos distúrbios da rede e podem ter seu funcionamento comprometido, tais como computadores, controle de processos industriais, sistemas de controle de tráfego aéreo, equipamentos hospitalares, dentre outros (KAMRAN; HABETLER, 1995; SILVA et al., 2003).

Com a finalidade de limitar a inserção de harmônicos e distúrbios no sistema elétrico de potência alguns órgãos internacionais têm estabelecido normas e procedimentos para este fim, como é o caso do IEC (*International Electrotechnical Commission*) e IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) (IEC 1000-3-2, 1998; IEEE Std. 519-1992, 1992). No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) disponibilizou em 2008 os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) o qual estabelece os limites de harmônicos de tensão para as atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica (PRODIST, 2012)

No intuito de melhorar a qualidade de energia elétrica na rede, tem sido propostos diversos tipos de condicionadores de qualidade de energia elétrica podendo-se citar alguns deles: Condicionadores Unificados de Qualidade de Energia (UPQC – *Unified Power Quality Conditioner*), Filtros Ativos de Potência (APF – *Active Power Filters*) série, paralelo e híbridos, Restauradores Dinâmicos de Tensão (DVR – *Dynamic Voltage Restores*), assim como alguns Sistemas de Energia Ininterrupta (SEI's) ou mais comumente chamados de *Uninterruptible Power Supplies* (UPS's) – (MONTEIRO; CADAVAL; GONZÁLEZ, 2007; PIGAZO et al., 1880; BHATTACHARYA et al., 1996; GRIÑÓ et al., 2007; FUJITA; AKAGI, 1998; AREDES; FERNANDES, 2009; SILVA et al., 2010; KAMRAN; HABETLER, 1998; SILVA et al., 2002; NASIRI; AMAC; EMADI, 2004; JEON; CHO, 1997; KWON; CHOI; KIM, 2001). O condicionamento da energia elétrica significa alterar, transformar ou simplesmente adequar suas características para um objetivo específico (MARAFÃO, 2004), que no caso em questão resume-se em melhorar a qualidade da tensão disponibilizada às cargas e drenar da rede correntes senoidais com baixa taxa de distorção harmônica.

Atualmente com o desenvolvimento da eletrônica de potência, é possível desenvolver condicionadores de qualidade de energia especificamente para eliminar ou compensar determinados distúrbios.

Os filtros ativos de potência (FAP) série e paralelo utilizam conversores estáticos que tem como característica primordial compensar tensões e correntes. O FAP série é geralmente utilizado para compensar distúrbios de tensão da rede elétrica, fornecendo à carga, dependendo da estratégia de compensação adotada, tensões senoidais, reguladas, equilibradas e com baixas taxas de distorção harmônica. Já o FAP paralelo, também conhecido como FAP *shunt*, é utilizado na supressão das correntes harmônicas da carga e compensação de potência reativa, injetando na rede correntes de compensação as quais são calculadas por meio de algoritmos específicos capazes de executar tais tarefas (MONTEIRO; CADAVAL; GONZÁLEZ, 2007; PIGAZO et al., 1880; BHATTACHARYA et al., 1996; GRIÑÓ et al., 2007; FUJITA; AKAGI, 1998; AREDES; FERNANDES, 2009; SILVA et al., 2010; KAMRAN; HABETLER, 1998; SILVA et al., 2002; NASIRI; AMAC; EMADI, 2004; JEON; CHO, 1997; KWON; CHOI; KIM, 2001).

Os filtros ativos de potência série e paralelo combinados em uma única topologia são conhecidos na literatura como Condicionadores Unificados de

Qualidade de Energia (UPQC – *Unified Power Quality Conditioner*) (AREDES; HÄFNER; HEUMANN, 1995; FUGITA; AKAGI, 1996) e podem fazer a compensação simultânea tanto das correntes de entrada como das tensões de saída. No caso das topologias convencionais de UPQC, as referências de compensação de tensão e corrente são grandezas não senoidais.

Com o intuito de melhorar o desempenho do UPQC foi proposto em (DIAS et al., 2011; AREDES; FERNANDES, 2009) o iUPQC (*Unified Power Quality Conditioner with Inverted Topology*), ou seja, o condicionador de qualidade de energia unificado com topologia invertida o qual na prática poderia se chamar UPQC dual. Este apresenta várias vantagens em relação ao UPQC convencional, como por exemplo as referências de compensação tanto de corrente como tensão são senoidais, facilitando o projeto dos controladores e proporcionando um melhor desempenho dinâmico do sistema (SILVA et al.; 2011).

No UPQC convencional o filtro ativo série opera como uma fonte de tensão não senoidal, enquanto o filtro ativo paralelo opera como uma fonte de corrente não senoidal. Já no iUPQC o filtro ativo série opera como fonte de corrente senoidal, enquanto o filtro ativo paralelo opera como fonte de tensão senoidal.

Alguns trabalhos utilizados em aplicações de UPS *line-interactive* trifásicas (SILVA et al., 2002; JOU et al., 2004), e monofásicas (BARRIVIERA et al., 2011; KWON; CHOI; KIM, 2001; KAMRAN; HABETLER, 1995), tem utilizado a mesma estratégia de controle empregada no iUPQC. Neste trabalho, esta estratégia também será abordada.

Sistemas UPS podem atuar não só no fornecimento de energia ininterrupta à carga, no momento de uma falta na rede, mas também no condicionamento da energia elétrica oriunda dos sistemas de alimentação, realizando proteção contra distúrbios de tensão quando a rede elétrica está presente. Resumidamente, a UPS pode atuar como um UPQC ou iUPQC, realizando supressão de harmônicos de correntes, compensação de potência reativa, supressão de harmônicos, afundamentos e elevações da tensão da rede elétrica, dentre outros (SILVA, 2001; SILVA et al.; 2002; JOU; WU, 1994; CHEUNG et al.; 1996).

Neste trabalho, uma estrutura de *UPS line-interactive* monofásica similar à apresentada em (JEON; CHO, 1997; KWON; CHOI; KIM, 2001; DIAS et al., 2011; AREDES; FERNANDES, 2009) será estudada e implementada, considerando o condicionador de qualidade de energia unificado com topologia invertida, ou seja,

dois conversores PWM realizarão as funções de filtros ativos de potência série e paralelo. O conversor PWM série atua como um filtro ativo série de potência, o qual opera como uma fonte de corrente senoidal em fase com a tensão da rede elétrica. O outro conversor PWM paralelo atua como um filtro ativo paralelo de potência, o qual opera como uma fonte de tensão senoidal, também em fase com a tensão da rede elétrica, fornecendo à carga tensões estabilizadas com baixa taxa de distorção harmônica (DHT), tanto com a rede elétrica presente como ausente. Tanto o conversor PWM série quanto o paralelo serão controlados por DSP com ponto flutuante (Digital Signal Processor).

Como contribuição deste trabalho, o sistema UPS *Line Interactive* monofásico com compensação ativa de potência série e paralela será capaz de eliminar ou reduzir os níveis harmônicos de tensão e corrente, elevar o fator de potência e compensar afundamentos e elevações de tensão. Em outras palavras a UPS deverá drenar da rede elétrica uma corrente senoidal e com baixa taxa de distorção harmônica (DHT), assim como fornecer à carga tensão senoidal, regulada e com baixa DHT. Algoritmos de compensação são propostos para gerar as referências de corrente e tensão da UPS. A referência de corrente é obtida usando um algoritmo baseado no sistema de eixos de referência síncrona SRF (*Synchronous Reference Frame*) (SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2002; SILVA et al., 2010). Já a referência de tensão, assim como as coordenadas do vetor unitário síncrono utilizadas pelo algoritmo SRF são obtidas usando um sistema PLL (*Phase Locked-Loop*) monofásico baseado na teoria de potência ativa instantânea (SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008).

## 1.1 PROBLEMA EM ENGENHARIA ELÉTRICA A SER PESQUISADO

Diversos tipos de cargas críticas podem ser diretamente influenciadas pela baixa qualidade da energia elétrica disponibilizada no sistema elétrico em certos momentos. Pode-se citar alguns problemas relacionados com a qualidade de energia que interferem diretamente no adequado funcionamento de cargas críticas, como sendo:

- Afundamentos de tensão (sags);
- Elevações de tensão (swell);
- Desequilíbrios de tensão;
- Flutuação de tensão (flicker);
- Variações de tensão de curta ou longa duração;
- Oscilações transitórias.

Com o objetivo de melhorar a qualidade da energia fornecida às cargas críticas, vários sistemas UPS monofásicos e trifásicos têm sido usados para o fornecimento de energia elétrica ininterrupta de boa qualidade para os diversos tipos de cargas críticas existentes, protegendo-as dos distúrbios oriundos da rede elétrica (KAMRAN; HABETLER, 1995; NASIRI; AMAC; EMADI, 2004; KWON; CHOI; KIM, 2001; JEON; CHO, 1997; SILVA et al., 2002; LIN; JOOS; LINDSAY, 1993; SILVA; MODESTO; BARBOSA, 2007). Os sistemas UPS devem controlar as correntes drenadas da rede, de forma que as mesmas sejam senoidais e possuam baixa DHT, contribuindo para a obtenção de um elevado fator de potência, além de minimizar a poluição harmônica na rede elétrica.

Em (JOU; WU, 1994; CHEUNG et al.; 1996; LIN; JOOS; LINDSAY, 1993) sistemas UPS monofásicos e trifásicos foram implementados para realizar a eliminação harmônica de corrente e compensação de reativos. No entanto, as correntes de entrada e as tensões de saída não podem ser controladas simultaneamente, o que não representa um atrativo. Com tensões de saída e correntes de entrada simultaneamente controladas, uma UPS monofásica foi proposta em (JEON; CHO, 1997) bem como trifásicas em (KAMRAN; HABETLER, 1995; SILVA et al., 2002). Em (KAMRAN; HABETLER, 1995), algumas vantagens, como o condicionamento universal de potência, são evidenciadas quando comparadas com sistemas UPS *off-line*, *on-line* e *line-interactive* convencionais. Além disso, a principal vantagem das topologias apresentadas em (KAMRAN; HABETLER, 1995; JEON; CHO, 1997; SILVA et al., 2002), é que o dimensionamento do conversor PWM série se situa entre 20 e 25% de toda a potência nominal da UPS, o que implica em aumento da eficiência e do custo do sistema. Em (JEON; CHO, 1997), o sistema UPS monofásico com condicionamento ativo de potência série e paralelo é proposto, no qual uma alta qualidade da corrente

de entrada e tensão de saída é obtida. Neste trabalho, uma estrutura de UPS monofásica similar à apresentada em (KWON; CHOI; KIM, 2001) e (JEON; CHO, 1997) é estudada, também considerando o condicionamento universal de potência, onde dois conversores PWM realizam as funções de filtros ativos de potência.

Este trabalho, através da implementação do sistema *UPS* com condicionamento ativo de potência, apresenta uma estratégia de controle alternativa voltada à elevação do fator de potência e, conseqüentemente, economia de energia e preservação das características elétricas do sistema elétrico de potência.

## 1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo principal deste trabalho baseia-se em estudar e implementar um sistema *UPS Line-interactive* monofásico com condicionamento ativo de potência série e paralelo com potência nominal de 1kVA, destinados ao condicionamento das tensões de saída e das correntes de entrada visando à elevação da qualidade da energia elétrica.

## 1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar os principais problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica presentes nos sistemas de distribuição de energia;
- Estudar as compensações ativas de potência, aplicáveis às topologias de Filtros Ativos Série (FAS) e Paralelo (FAP);
- Implementar estratégias de compensação ativa de potência série e paralela em sistemas UPS monofásicos;
- Verificar através de simulações computacionais e ensaios experimentais a aplicação das estratégias de controle do UPS por meio dos algoritmos propostos;



- Estabelecer uma análise comparativa entre uma UPS On-line convencional com estágio de entrada para a correção de fator de potência, com a UPS proposta;
- Analisar o algoritmo de geração de referências SRF monofásico e o sistema PLL monofásico, a serem utilizados na UPS;
- Discretizar e implementar o PLL monofásico proposto;
- Realizar a modelagem matemática dos filtros ativos série e paralelo, controladores das malhas de corrente, tensão, barramento CC e algoritmos de geração de referências.
- Projetar, discretizar e implementar os controladores de corrente e tensão da UPS utilizando um processador digital de sinal (DSP) - TMS320F28335, (TEXAS INSTRUMENTS);
- Realizar os testes experimentais estáticos e dinâmicos da UPS *Line-interactive* monofásica com compensação ativa série e paralela, através da implementação de um protótipo.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é organizado da seguinte forma:

No capítulo 2 são apresentados os principais conceitos sobre qualidade de energia, além das recomendações no Brasil do PRODIST e internacional IEEE, a norma internacional do IEC. É realizado um estudo sobre os sistemas UPS convencionais para classificá-los quanto às suas características principais apresentando suas vantagens e desvantagens. As principais soluções para os problemas de qualidade de energia a partir da definição e justificativa da topologia de UPS a ser implementada neste trabalho é apresentada.

No capítulo 3 são apresentados os métodos de compensação ativa de potência baseado no sistema de eixos de referência síncrona (SRF) (SILVA et al., 2010; SILVA et al., 2002; SILVA et al., 2010). Além disso a estratégia para a obtenção da referência de tensão de saída a partir de um sistema (PLL) é mostrada

(SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008). O modelo matemático das plantas dos conversores série e paralelo e o fluxo de potência que circula através dos conversores PWM série e paralelo são abordados.

No capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos através de simulações computacionais da UPS *Line-interactive* monofásica, considerando o método de compensação ativa de potência série e paralela apresentado no capítulo 3.

No capítulo 5 são apresentados os resultados experimentais obtidos através da implementação prática do UPS *Line-interactive*. Os testes realizados utilizando cargas monofásicas não lineares serão usados nos ensaios o que permitirá a verificação do desempenho estático e dinâmico da UPS. Neste capítulo também é incluída a análise harmônica das correntes compensadas de entrada da UPS e os resultados comparados com a norma Européia IEC 61000-3-2.

O capítulo 6 apresenta as conclusões do trabalho, além de sugestões para trabalhos futuros.

## 1.5 CONTRIBUIÇÃO E RELEVÂNCIA DO TRABALHO

O trabalho busca contribuir com alternativas para a elevação da qualidade de energia entregue às cargas críticas, através da utilização de sistemas UPS monofásicos, com capacidade de condicionamento universal de potência, obtidos pelo controle da corrente drenada da rede e tensão entregue à carga. A comprovação através de simulações computacionais e implementações práticas/experimentais representa um avanço tecnológico para a área em questão.

Cabe apontar como parte relevante deste trabalho, que o contexto relacionado à qualidade de energia tem um papel significativo na atualidade. Posto que inúmeras pesquisas sobre o assunto vêm sendo publicadas, ora para a proteção do sistema elétrico, através da minimização dos harmônicos na rede, ora para a proteção da carga através da entrega de energia elétrica de qualidade.

## 2 QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS ELÉTRICOS

### 2.1 INTRODUÇÃO

Com a evolução da tecnologia dos últimos tempos houve um aumento na utilização de cargas não lineares, como por exemplo, retificadores controlados e não controlados, inversores de tensão e de corrente, cicloconversores, dentre outros, provocando distúrbios na rede elétrica, como transitórios, variações de tensão de curta e longa duração, desequilíbrios de tensão e distorções da forma de onda causados por condições anormais de funcionamento do sistema elétrico.

Este capítulo descreve alguns critérios para análise da energia elétrica, a fim de se obter padrões que possam qualificá-la. É apresentada a norma internacional IEC e as recomendações internacionais IEEE e o PRODIST da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que estabelecem condições relativas às perturbações da forma de onda da tensão e estabelecem procedimentos relativos aos indicadores de continuidade.

É apresentado um estudo sobre os sistemas UPS convencionais, tipos de topologias existentes, bem como suas principais características especificando suas vantagens e desvantagens. Também é apresentada a UPS *Line Interactive* monofásica com compensação ativa de potência série e paralela, onde destaca-se seu princípio de funcionamento, suas vantagens e desvantagens e um estudo comparativo com a UPS *On-line*.

### 2.2 TERMOS E DEFINIÇÕES RELACIONADOS À QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Existem diversos distúrbios existentes no sistema de alimentação de energia elétrica que contribuem para mau funcionamento de máquinas e equipamentos comerciais e industriais (SILVA, 2001; MODESTO, 2007; FERACIN NETO, 2009).

Alguns deles, como tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrios e flutuações de tensão, variações de tensão de curta ou longa duração, distorções na forma de onda de tensão e corrente, transitórios e variação de frequência são definidos em (SILVA, 2001; IEEE Std. 519-1992, 1992; PRODIST, 2012), respectivamente. Estes definem conceitos e parâmetros para estabelecer indicadores de qualidade de energia definidas nas seções seguintes.

### 2.2.1 Tensão em Regime Permanente

Para atender os níveis de tensão em regime permanente, são propostos limites adequados, precários e críticos, indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão elétrica, critérios de medição e registro, prazos para regularização e de compensação ao consumidor, considerando que as medições de tensão excedem os limites dos indicadores. A medição deve ser apropriada e ter uma metodologia padronizada para comparação com o valor de referência de contratação e os limites de regulação permitidos que são diferentes com o nível de tensão contratado (PRODIST, 2012).

### 2.2.2 Fator de Potência

O valor do fator de potência é obtido através de valores registrados das potências ativa (P) e reativa (Q) ou por suas respectivas energias ativa (EA) e reativa (ER). Tais valores são adquiridos por instrumentos de medição adequados, preferencialmente eletrônicos e aprovados por órgão responsável pela conformidade metrológica.

A partir dos valores coletados, o cálculo deve ser feito de acordo com a equação 2.1. Os limites admitidos devem estar compreendidos entre 0,92 e 1 indutivo e entre 1 e 0,92 capacitivo, que também dependem do nível de tensão contratado, que neste caso está abaixo de 230kV (PRODIST, 2012).

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \text{ ou } \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (2.1)$$

### 2.2.3 Conceitos de Harmônicos

Harmônicos podem ser definidos como o conteúdo de um sinal, seja de tensão ou corrente senoidal, cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sistema tipicamente de 50 ou 60Hz (PRODIST, 2012). Ao decompor formas de onda distorcidas periodicamente tem-se uma soma da componente fundamental e seus harmônicos.

A distorção harmônica é analisada através da taxa de distorção harmônica total da tensão (DHT) definida na equação 2.2 (PRODIST, 2012):

$$DHT_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\% \quad (2.2)$$

Onde:

$V_h$  = Amplitude das componentes harmônicas individuais (valor eficaz);

$h$  = Ordem das harmônicas;

$V_n$  = Tensão nominal do sistema (valor eficaz).

Os valores de referência para as distorções harmônicas totais estão mostrados na tabela 1, bem como devem estar dentro dos valores das distorções harmônicas individuais indicados na tabela 2.

Tabela 1 – Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da tensão fundamental) (IEEE Std. 519-1992, 1992)

Tensão nominal do Barramento (Ponto de Acoplamento Comum – PAC)	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

Tabela 2 – Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) (IEEE Std. 519-1992, 1992)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1kV$	$1kV < V_n \leq 13,8kV$	$13,8kV < V_n \leq 69kV$	$69kV < V_n < 230kV$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5
	>21	1	0,5	0,5	0,5
Pares	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

### 2.2.3.1 Recomendação IEEE 519-1992

A norma IEEE 519-1992 (IEEE Std. 519-1992, 1992) apresenta sugestões práticas e requisitos para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de

potência, indicando os limites de injeção de harmônicos pelo consumidor. Além de limitar os harmônicos de tensão fornecidos pelo sistema de potência, as recomendações presentes nesta norma não são voltadas para equipamentos individuais.

As tabelas 3 e 4 apresentam os limites de distorção harmônica de corrente e de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) de sistemas de baixa, média e alta tensão. Os limites dependem do nível de curto circuito do PAC e do nível de tensão.

A amplitude da corrente de curto-circuito  $I_{SC}$ , em relação à corrente da carga, está sujeita à impedância do sistema. Portanto, quanto maior a corrente de curto-circuito, maiores serão as distorções de correntes admissíveis. À medida que se eleva o nível de tensão, menores são os limites aceitáveis.

A tabela 3 relata os limites de distorção harmônica individual e total no ponto de acoplamento comum (PAC) do barramento de tensão, para diversos níveis de tensão do sistema de potência.

**Tabela 3 – Limites de Distorção Harmônica Total em % da Tensão na Frequência fundamental (IEEE Std. 519-1992, 1992)**

<b>Tensão no Barramento no PCC (<math>V_n</math>)</b>	<b>Distorção Harmônica Individual da Tensão (%)</b>	<b>Distorção Harmônica Total da Tensão – DHT<sub><math>V_n</math></sub> (%)</b>
$V_n \leq 69kV$	3,0	5,0
$69kV < V_n \leq 161kV$	1,5	2,5
$V_n > 161kV$	1,0	1,5

A DHT <sub>$V_n$</sub>  é calculada a partir da tensão nominal e frequência da componente fundamental do sistema e não o valor da tensão no momento da medição, como normalmente é calculado.

A tabela 4 relata os limites de distorção harmônica de corrente impostos pela norma para os níveis de tensão no ponto de acoplamento comum (PAC) de sistemas de baixa, média e alta tensão.

**Tabela 4 – Máxima Distorção Harmônica da Corrente em % de  $I_L$  (SILVA, 2001; IEEE Std. 519-1992, 1992)**

Ordem individual das harmônicas (harmônicas ímpares)						
$120 \leq V_n \leq 69kV$						
$I_{sc} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
$69kV < V_n \leq 161kV$						
<20*	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50-100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100-1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
$V_n > 161kV$						
$I_{sc} / I_L$	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$	TDD
<50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75
Harmônicas pares são limitadas em 25% dos limites das harmônicas ímpares acima.						
Distorções de corrente que resultam em <i>offset cc</i> , por exemplo, conversores de meia onda, não são admissíveis.						
* Todo equipamento de geração de energia é limitado a estes valores de distorção de corrente, independente da relação $I_{SC} / I_L$ .						
Onde: $I_{SC}$ = Máxima corrente de curto circuito no PAC, $I_L$ = Máxima corrente de demanda da carga (componente na frequência fundamental) no PAC. TDD = Distorção harmônica da corrente em % da máxima demanda da corrente na carga.						

As tabelas 3 e 4 estabelecem valores de referência e servirão como base de consulta e comparação durante todo desenvolvimento da dissertação.



### 2.2.3.2 Norma IEC 61000-3-2

Esta norma aplica-se a equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada de até 16A por fase e tensões alternadas entre 220 a 415V com frequência de 50 ou 60Hz. Para tensões inferiores, os limites não foram estabelecidos, por tratar-se de uma norma europeia onde os limites utilizados estão na faixa especificada.

Os equipamentos são classificados em 4 classes:

- **Classe A:** Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada, aparelhos de uso doméstico, excluindo os da classe D, ferramentas, menos as portáteis, *dimmers* para lâmpadas incandescentes, equipamentos de áudio e todos os demais que não estão incluídos nas outras classes;
- **Classe B:** Ferramentas portáteis;
- **Classe C:** Dispositivos de iluminação com potência ativa de entrada maior que 25W;
- **Classe D:** Monitores de vídeo, computadores pessoais e aparelhos de televisão. A potência ativa de entrada deve ser maior de 75W e menor que 600W.

Na tabela 5 estão especificados os limites máximos dos harmônicos de corrente pares e ímpares até a ordem 40. Segundo a classe de equipamentos da norma IEC 61000-3-2.

Tabela 5 – Limite dos Harmônicos de Corrente da Norma IEC 61000-3-2 (IEC 1000-3-2, 1998)

<b>Classes</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>	<b>D</b>
<b>Ordem do Harmônicos, n ímpares</b>	<b>Ampères [A]</b>	<b>Ampères [A]</b>	<b>% da corrente de entrada fundamental</b>	<b>mA/W</b>
3	2,30	3,45	30xFator de Potência	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,155	7	1,0
9	0,40	0,60	5	0,5
11	0,33	0,495	3	0,35
13	0,21	0,315	3	0,296
$39 \geq n \geq 15$	$2,25/n$	$3,375/n$	3	$3,85/n$
<b>Ordem do Harmônicos, n pares</b>	<b>Ampères [A]</b>	<b>Ampères [A]</b>	<b>% da corrente de entrada fundamental</b>	<b>mA/W</b>
2	1,08	1,62	2	-
4	0,43	0,645	-	-
6	0,30	0,45	-	-
$40 \geq n \geq 8$	$1,84/n$	$2,76/n$	-	-

#### 2.2.4 Desequilíbrios de Tensão

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno associado a alterações dos padrões trifásicos do sistema de distribuição (PRODIST, 2012). A partir das relações de suas componentes simétricas de tensão de sequência negativa ou a componente de sequência zero pela componente de sequência positiva resultando no valor percentual de desequilíbrio (SILVA, 2001).

Pode-se citar alguns tipos de desequilíbrios de tensão como cargas monofásicas conectadas a circuitos trifásicos, assimetria de transformadores de distribuição e rompimento de um fusível em uma das fases de um banco de capacitores trifásicos.

### 2.2.5 Flutuação de Tensão

A flutuação de tensão é caracterizada por uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão. Sua determinação da qualidade da energia elétrica tem como objetivo analisar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa em consumidores de baixa tensão (PRODIST, 2012), sendo verificada quanto à intensidade da oscilação luminosa e a repetitividade da mesma. Portanto, possui metodologia de medição específica que considera variações de até 10% do valor nominal da tensão.

O desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão é classificado como adequado, precário ou crítico, de acordo com os valores de referência para as categorias (PRODIST, 2012). Pode-se citar como exemplo de flutuação de tensão o referido *flicker* que é causado normalmente pela operação de fornos a arco (SILVA, 2001).

### 2.2.6 Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD)

Tem-se variações no valor eficaz da tensão de alimentação a níveis superiores ao nível padrão chamadas de *swell* (sobretensão) caracterizadas por elevação do valor eficaz de tensão e a níveis inferiores ao padrão chamadas de *sag* (subtensão) caracterizadas por quedas no valor nominal da tensão. As principais causas do *swell* estão vinculadas com a desenergização de grandes cargas, energização de grandes bancos de capacitores à faltas no sistema elétrico. Já as causas do *sag* estão atreladas à faltas no sistema elétrico, energização de cargas indutivas como transformadores e motores de grande porte (SILVA, 2001).

Variações de tensão de curta duração são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. As variações de tensão de curta duração em função da amplitude da tensão em relação à tensão de referência e do período de duração dessa variação são classificadas de acordo com a tabela 6:

Tabela 6 – Classificação das Variações de Tensão de Curta Duração – fonte: PRODIST.

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

### 2.2.7 Variação de Tensão de Longa Duração (VTLD)

Variações de tensão de longa duração são as variações que ocorrem no valor eficaz da tensão de alimentação a níveis superiores e inferiores ao nominal durante um período de tempo maior que a um minuto (SILVA, 2001).

No caso das sobretensões (*swell*) é um aumento da tensão eficaz para valores maiores que 0,1 pu, podendo ser causada pela desativação de cargas de alta potência ou pelo acoplamento de grandes bancos de capacitores. Também tem-se as subtensões (*sag*) que é a redução da tensão eficaz para valores menores que 0,1 pu, podendo ser causada pelo acionamento de cargas de alta potência ou pelo desacoplamento de grandes bancos de capacitores.

### 2.2.8 Distorções na Forma de Onda da Tensão

Dentre outros distúrbios tem-se o *notching* que é uma deformação periódica a um pequeno corte na forma de onda de tensão. Normalmente o efeito *notching* é ocasionado pela comutação de componentes semicondutores de potência.

Também há os ruídos que são definidos como sinais elétricos que contém um amplo conteúdo espectral de banda larga relacionados com as interferências eletromagnéticas (EMI) e interferências de rádio frequência (RFI) que se sobrepõem à tensão de alimentação, sendo causados tipicamente por dispositivos de eletrônica de potência, sistema de controle, equipamentos de solda, fontes chaveadas e transmissores de rádio, dentre outros. Os problemas com ruídos podem ser minimizados através de filtros, transformadores de isolamento e condicionadores (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 1996).

### 2.2.9 Transitórios

Os transitórios acontecem quando há uma mudança brusca de tensão, corrente ou ambos, em um curto período de tempo, caracterizado como sendo impulsivo ou oscilatório e usualmente chamado de *surge*. É causado principalmente por descargas atmosféricas e a energização de bancos de capacitores e transformadores (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 1996).

### 2.2.10 Variação de Frequência

As devidas faixas de variações de frequência são estabelecidas para sistemas de distribuição em regime permanente e em distúrbios transitórios, no caso, em que haja ou não corte de geração ou de carga, para restabelecimento do sistema (PRODIST, 2012).

Para os sistemas de distribuição em condições normais de operação e em regime permanente, a frequência deve ser mantida entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (PRODIST, 2012).

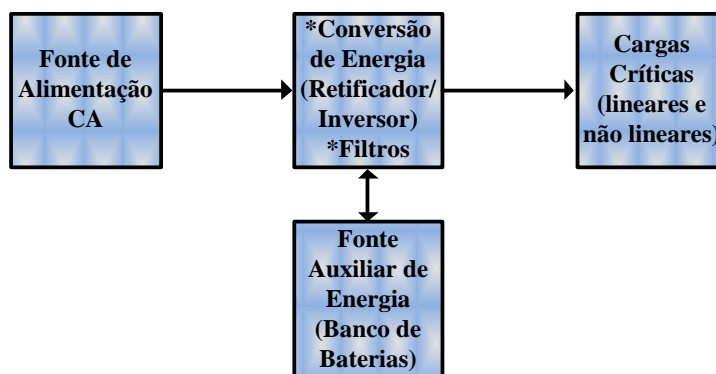
## 2.3 TOPOLOGIAS DOS SISTEMAS DE ENERGIA ININTERRUPTA (UPS)

### 2.3.1 Tipos de sistemas de energia ininterrupta (UPS)

Basicamente existem dois tipos de UPS disponíveis atualmente, ou seja:

- UPS Rotativo – Utilização de máquinas rotativas para conversão de energia mecânica em elétrica através do acoplamento mecânico da máquina girante a um gerador síncrono. O gerador pode ser acionado por um motor de corrente contínua ou um motor de combustão interna (PLATTS; AUBYN, 1992). Este tipo de equipamento é mais caro do que os demais em relação aos custos de instalação e manutenção do grupo motor diesel-gerador, sendo apropriado para potências de operação acima de 300kVA, e também são muito ruidosos. Os sistemas rotativos UPS são mais confiáveis do que os sistemas UPS estáticos e fornecem isolamento elétrico completo, mas exigem muito mais manutenção e tem tamanho e peso muito maior (RASHID, H. MUHAMMAD, 2007). Normalmente sua utilização é comum em grandes centrais telefônicas, indústrias, hospitais e outros. Este tipo de UPS rotativo não será abordado neste trabalho.
- UPS Estático – Este tipo de sistema utiliza conversores estáticos de potência para converter energia elétrica alternada para contínua e vice-versa. Com a evolução da Eletrônica de Potência tem sido possível cada vez mais desenvolver equipamentos com potências maiores, e com tamanho, peso e volume reduzidos. São apropriados para potências

abaixo de 400kVA, apresentando uma melhor resposta dinâmica, baixíssimo ruído acústico, melhor regulação de tensão e de frequência na carga, instalações simples, interação com a rede elétrica para compensação harmônica da corrente de entrada (FILHO, 1998). Tem como base a frequência de 50 ou 60 Hz com uma variação de  $\pm 0.5\%$  (IEEE Std. 446-1995, 1995). O sistema é composto por duas partes principais: um módulo de armazenamento de energia que normalmente é composto por um banco de baterias e outro módulo de conversão de energia e filtragem, além de um módulo de monitoramento e controle, conforme mostrado na figura 1.



**Figura 1 – Diagrama de blocos de um sistema UPS convencional**

Os sistemas UPS devem garantir o fornecimento de energia elétrica a cargas críticas em condições normais e anormais da rede elétrica (IEEE Std. 446-1995, 1995).

Em alguns casos devido a grandes cargas instaladas tem-se aplicações utilizando o UPS rotativo em conjunto com o UPS estático devido à autonomia do banco de baterias ser limitada (IEEE Std. 446-1995, 1995).

### 2.3.2 Classe de Sistemas UPS

De acordo com as normas *IEEE Std 446-1995* (IEEE Std. 446-1995, 1995), duas classes de sistemas UPS são definidas:

1. Sistemas UPS de Dupla Conversão de Energia;
2. Sistemas UPS de Simples Conversão de Energia

### 2.3.2.1 Sistema UPS de Dupla Conversão de Energia

A dupla conversão de energia é caracterizada por processar a energia em linha até a carga, ou seja, a energia total da carga flui através dos dois conversores estáticos da UPS durante o modo normal de funcionamento. Nestes sistemas a primeira conversão é feita pela transformação CA para CC através de um retificador que fornece energia continuamente para o barramento CC. Na segunda conversão é realizada a conversão CC para CA através de um inversor de tensão. Uma fonte auxiliar de energia primária (banco de baterias) é conectada em paralelo com o barramento CC (IEEE Std. 446-1995, 1995).

São utilizados muitos tipos de conversores CA-CC e CC-CA, através de topologias e modos de operação diferentes. Este tipo de sistema também é conhecido como UPS Online, conforme representado pelo diagrama de blocos da figura 2.

No modo standby os dois conversores estão em funcionamento, ou seja, o conversor CA/CC carrega o banco de baterias e também fornece energia para a carga através do conversor CC/CA, o modo backup o banco de baterias fornece a energia necessária para o conversor CC/CA que alimenta a carga. O conversor CC/CA funciona continuamente nos modos standby bem como no backup.

Dentre as vantagens da topologia on-line pode-se citar:

- Tempo de transferência tanto na falta quanto no retorno da rede elétrica é imperceptível, devido à carga estar sempre alimentada pelo inversor;
- Tensão de saída pode ser senoidal e com baixo conteúdo harmônico;
- Há um elevado grau de isolamento contra distúrbios da rede elétrica.

Dentre as desvantagens pode-se citar:

- Rendimento baixo em função da dupla conversão de energia;



- O retificador deve ser dimensionado para um potência em torno de 150% da potência nominal da carga, pois além de sintetizar toda potência consumida pela carga e suprir as perdas do estágio inversor, deve sintetizar a energia necessária para a carga das baterias e as perdas por comutação (SILVA, 2001).

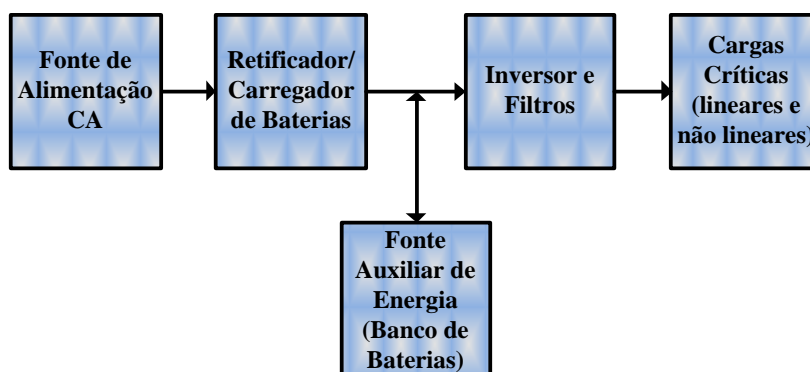


Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema UPS de Dupla Conversão de Energia

### 2.3.2.2 Sistema UPS de Simples Conversão de Energia

A simples conversão de energia é diferenciada por enviar a potência CA diretamente para a carga através de um indutor em série ou mesmo por transformadores lineares ou ferro-ressonantes, devido a ausência de um estágio retificador destinado a fornecer tensão CC para o estágio inversor. A bateria é carregada através de um carregador de baterias do qual adquire uma pequena parcela de potência da rede elétrica. A bateria envia energia à carga através do inversor de tensão na falta da rede elétrica por estar conectado em paralelo. Existem várias classes de sistemas UPS de simples conversão de energia, tais como: *Off-Line* chamado também de *Standby*, *Line interactive* convencional, *Tri-port* e Ferro-ressonante. Na sequência são descritas suas características (IEEE Std. 446-1995, 1995).

### 2.3.2.2.1 UPS Off-Line (Standby)

A UPS *Off-Line* mostrada na figura 3 é formada por um retificador/carregador para carregar as baterias (conversor CA/CC), um inversor de tensão (conversor CC/CA), que na ausência da rede elétrica fornecerá potência CA para a carga, banco de baterias, chave estática de transferência e um filtro passa-baixa passivo para remover a frequência de comutação da tensão de saída.

O carregador de baterias pode ser dividido em dois modos de operação: corrente constante que injeta uma corrente constante na bateria para carregar até 95% de sua capacidade e outro modo que é chamado de tensão constante o qual a corrente na bateria diminui exponencialmente até que a carga da bateria esteja totalmente carregada (RASHID, H. MUHAMMAD, 2007).

A carga é conectada diretamente à rede elétrica sem qualquer tipo de condicionamento de energia em condições normais da rede elétrica. A bateria é carregada através do retificador/carregador de baterias com uma potência inferior à potência nominal da carga quando há presença da rede elétrica.

Quando houver falha ou falta da rede elétrica, a chave estática comuta a carga da rede elétrica para o inversor de tensão que está em paralelo e que deve ser projetado para 100% da carga, estando de preferência sincronizado com a tensão da rede, de forma que a carga seja pouco afetada tanto na falta quanto no retorno da rede elétrica, normalmente o tempo de transição é cerca de um quarto do ciclo da rede elétrica (RASHID, H. MUHAMMAD, 2007).

Algumas vantagens deste tipo de sistema:

- Alto rendimento pelo fato do inversor operar a vazio ou desligado;
- Projeto simples, baixo custo e tamanho reduzido;
- Possibilidade de sincronismo com a rede elétrica.

Algumas desvantagens deste tipo de sistema:

- Injeção de harmônicos de corrente na rede elétrica quando cargas não lineares são alimentadas, por falta do não condicionamento da corrente de entrada;

- Na presença da rede elétrica não há um condicionamento da tensão de saída;
- Carga não isolada da rede elétrica;
- Tempo de transferência na ausência da rede elétrica e no retorno da mesma, que algumas cargas críticas podem não tolerar.

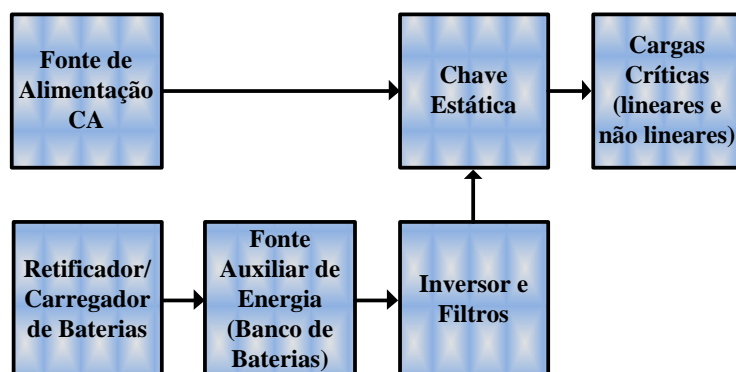


Figura 3 – Diagrama de blocos de um sistema UPS *Off-Line*

#### 2.3.2.2.2 UPS Line interactive convencional

A UPS Line-interactive convencional é composta por uma chave estática, um indutor série, um conversor bidirecional em potência, filtro passa-baixa passivo e um banco de baterias. Neste sistema existe uma interação do inversor com a rede elétrica para manter a tensão na carga estabilizada. Não há um retificador somente para carregar as baterias, pois isso é realizado pelo inversor de tensão por ser bidirecional em potência. Na presença da rede elétrica o inversor carrega o banco de baterias, está ligado em paralelo com a carga e pode atuar no controle do fator de potência de entrada (LIN; JOOS; LINDSAY, 1993). Com a ausência da rede elétrica o UPS abre a chave estática e fornece potência CA para carga, conforme mostrado na figura 4.

Algumas vantagens podem ser destacadas neste tipo de sistema:

- Bom rendimento com menor custo;
- Tensão na carga é estabilizada;

- Condicionamento da corrente de entrada simultaneamente com a carga das baterias;
- Fator de potência unitário.

Algumas desvantagens podem ser destacadas neste tipo de sistema:

- Não é possível fazer um controle independente da corrente de entrada e tensão de saída (LIN; JOOS; LINDSAY, 1993);
- Quando se utiliza uma chave estática *by-pass* não é possível se fazer uma transferência sem transientes, pelo fato da tensão de saída nunca estar em fase com a tensão de entrada devido à presença do indutor de acoplamento.

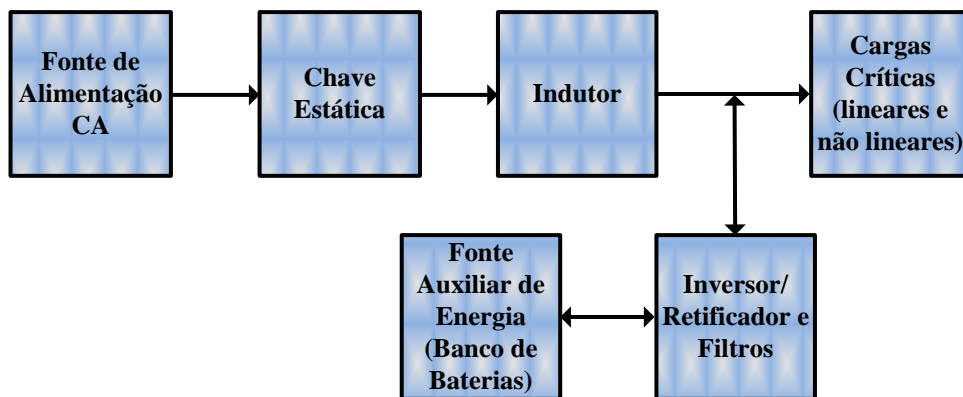


Figura 4 – Diagrama de blocos de um sistema UPS *Line-interactive* convencional

#### 2.3.2.2.3 UPS *Line interactive Tri-port*

Este tipo de sistema mostrado na figura 5 proporciona isolamento galvânico da carga através de um transformador de três enrolamentos. A indutância de dispersão deste tipo de transformador pode ser utilizada para substituir a indutância de acoplamento existente no *Line-interactive* convencional. Neste modo o inversor opera continuamente fornecendo tensão regulada e filtragem de saída. Em alguns casos, o inversor pode ser configurado para atuar como um carregador de baterias quando a rede elétrica estiver presente (IEEE Std. 446-1995, 1995).

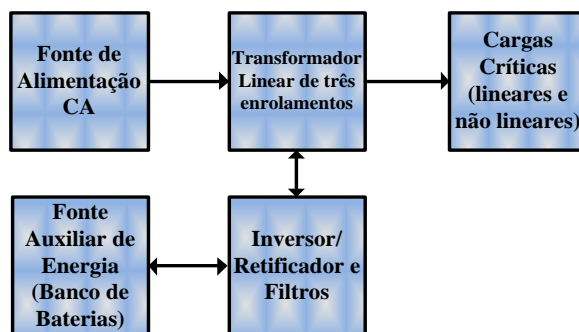


Figura 5 – Diagrama de blocos de um sistema UPS *Line-interactive Tri-port*

#### 2.3.2.2.4 UPS Line interactive Ferro-ressonante

A diferença básica entre os *Line-interactive Tri-port* e o Ferro-ressonante, mostrado na figura 6 é a forma construtiva do transformador e a forma de operação, que neste caso, o inversor não opera continuamente (IEEE Std. 446-1995, 1995).

A carga é alimentada pela rede através de um transformador ferro-ressonante com a principal função de estabelecer o isolamento galvânico da carga, regular e filtrar a tensão de saída.

Quando ocorrer uma falta da rede elétrica, o primário do transformador é desconectado da rede elétrica e o inversor de tensão é ligado automaticamente. Durante esta transferência de energia da rede elétrica para o inversor de tensão o transformador ferro-ressonante deve continuar fornecendo energia de modo que a carga não perceba qualquer interrupção no fornecimento.

Este sistema utiliza um pequeno retificador/carregador de baterias com potência inferior à potência nominal da carga para carregar o banco de baterias.

Uma das maiores desvantagens desta estrutura são o seu grande peso e volume devido ao transformador ferro-ressonante.

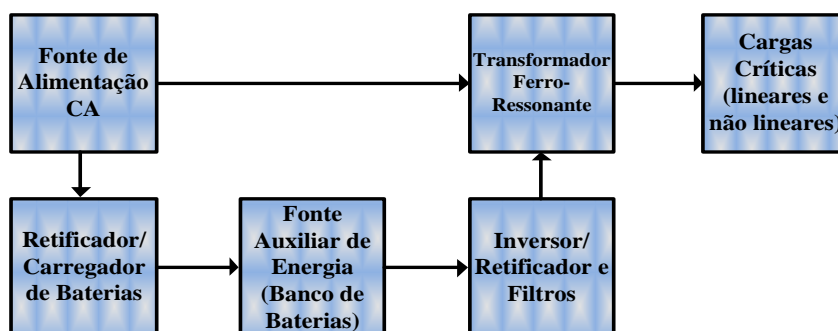


Figura 6 – Diagrama de blocos de um sistema UPS *Line-interactive Ferro-ressonante*

### 2.3.3 Topologias UPS e a Compensação Ativa de Potência

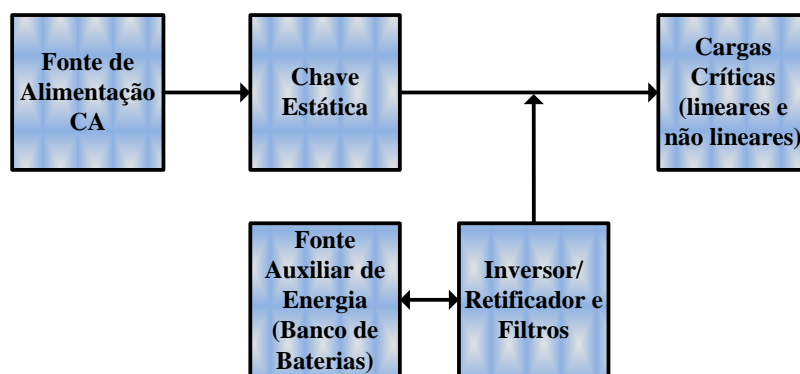
Com o surgimento de semicondutores com potências maiores, processadores de sinais capazes de efetuar funções praticamente em tempo real e com a queda nos custos destas tecnologias, os filtros ativos de potência aplicados em sistemas UPS (SILVA, et al. 2002; JOU; WU, 1994; KAMRAN; HABETLER, 1995; AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007) representam grande importância na área de qualidade de energia, considerando a exigência de fornecimento de energia elétrica confiável e de qualidade no setor elétrico, a partir do desenvolvimento desses equipamentos que garantam a entrega de energia da forma requerida, conforme apresentados a seguir:

#### 2.3.3.1 UPS de simples conversão de energia com compensação ativa de potência paralela

A UPS de simples conversão de energia monofásica com compensação ativa de potência paralela proposta em (JOU; WU, 1994) tem a finalidade de carregar o banco de baterias e injetar no sistema elétrico uma corrente equivalente à componente harmônica da corrente da carga para que a fonte de alimentação forneça ao sistema elétrico apenas a componente fundamental a fim de compensar os reativos e suprir os harmônicos na presença da rede elétrica. Porém, com a rede

presente esta topologia não consegue realizar o condicionamento da tensão de saída.

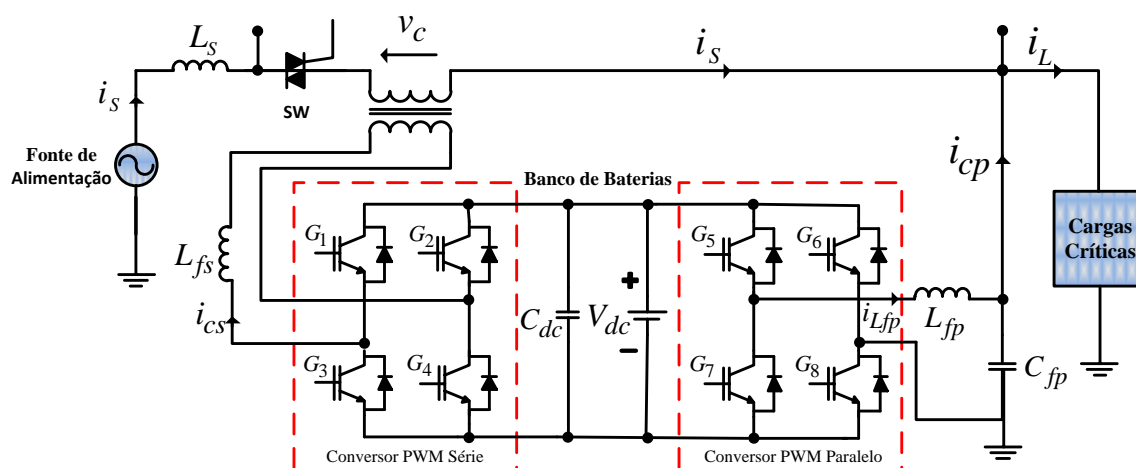
Na ausência da rede elétrica a UPS é desconectada por uma chave de transferência e o conversor bidirecional de potência paralelo opera como inversor de tensão fornecendo à carga tensões reguladas com baixo conteúdo harmônico, conforme mostrado na figura 7.



**Figura 7 – Diagrama de blocos de um sistema UPS de simples conversão de energia monofásico com condicionamento ativo paralelo**

### 2.3.3.2 UPS *Line interactive* com compensação ativa de potência série e paralela proposta

O sistema proposto neste trabalho é apresentado na figura 8 (BARRIVIERA et al., 2011), o qual é constituído por um conversor série e um paralelo que são interligados pelo barramento CC, chamado de conversores *back-to-back*. O conversor denomina-se série porque é conectado através de um transformador monofásico em série com o sistema elétrico. O conversor paralelo é conectado em paralelo com a carga, sendo denominado de conversor paralelo, similar a iUPQC proposto em (DIAS et al., 2011; AREDES; FERNANDES, 2009).



**Figura 8 – Diagrama de blocos de um sistema UPS de dupla conversão de energia monofásico com condicionamento ativo série e paralelo**

O conversor série opera como fonte de corrente senoidal e em fase com a componente fundamental da tensão da rede elétrica. Sua amplitude depende da demanda de potência ativa da carga e às perdas da estrutura física. O conversor série representa um caminho de alta impedância para os harmônicos presentes na corrente da carga além de realizar o carregamento do banco de baterias (SILVA, et al., 2002).

O conversor paralelo opera como uma fonte de tensão senoidal fornecendo tensão regulada à carga com baixo conteúdo harmônico. Os harmônicos presentes na corrente da carga circulam através do conversor paralelo por apresentar um caminho de baixa impedância para esses harmônicos.

A UPS *Line interactive* funcionando no modo *standby* tem por finalidade:

- Atuar como filtro ativo de potência série e paralelo com controles independentes de tensão da carga e corrente de entrada;
- Eliminar os harmônicos de tensão de entrada, bem como torná-la regulada, para a alimentação da carga;
- Eliminar os harmônicos de corrente de carga para corrigir o fator de potência, tornando a corrente de entrada senoidal e com baixa DHT;
- Carregar o banco de baterias através dos conversores série e paralelo.

Quando a rede elétrica não está presente (Modo Backup) a chave estática (sw) se abre e o conversor série é inibido. No entanto, o conversor paralelo continua



em operação fornecendo tensão senoidal e regulada com baixa distorção harmônica. No retorno da rede elétrica às condições normais, a chave estática (sw) é fechada e o conversor série é habilitado. Em qualquer uma das condições de transição, os conversores série e paralelo estão sincronizados com a rede através do sistema PLL (SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008), de forma que as transições não interfiram no funcionamento das cargas, haja visto que o conversor paralelo está sempre em operação tanto no modo *standby* como *backup*.

Realizando uma comparação com o sistema UPS *On-line*, o rendimento do UPS *Line-interactive* de dupla conversão de energia pode ser maior, considerando que o conversor série pode ser dimensionado para uma potência entre 20 a 25% da potência nominal da carga (JEON; CHO, 1997) e o conversor paralelo, no modo *standby* pode controlar uma quantidade menor de potência em função de operar apenas na supressão dos harmônicos da corrente de carga, além de considerar a parcela de energia destinada à carga das baterias para ambos os conversores.

São utilizados algoritmos alternativos para gerar as referências de corrente e tensão da UPS. A referência de corrente é obtida usando o controlador baseado no algoritmo SRF (*Synchronous Reference Frame*) (SILVA et al., 2010; SILVA et al, 2002; SILVA, et al., 2010), e a referência de tensão, assim como as coordenadas do vetor unitário síncrono utilizadas pelo algoritmo SRF são obtidas usando sistema PLL (*Phase Locked-Loop*) monofásico baseado na teoria de potência ativa instantânea (SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008).

Algumas vantagens deste sistema:

- Controle independente da corrente de entrada e tensão de saída;
- Alto fator de potência;
- Eliminação de harmônicos e/ou reativos da carga;
- Tensão de saída senoidal regulada e com baixo conteúdo harmônico;
- Corrente de entrada senoidal e com baixo conteúdo harmônico;
- Potência baixa do conversor série, aproximadamente de 10 a 20% da potência nominal da carga.

## 2.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os termos e definições relacionados à qualidade de energia elétrica. Também foram apresentados, a norma IEC 1000-2-3, a recomendação do IEEE 519-1992 e o PRODIST os quais trazem requisitos para o controle dos harmônicos tanto em sistema de potência como para emissão destes harmônicos dos equipamentos, bem como a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado.

Foram apresentadas duas classes de UPS, definidas segundo as normas do IEEE Std 446-1995 (IEEE Std. 446-1995, 1995). Essas classes são divididas em sistemas de simples e dupla conversão de energia, de que fazem parte os sistemas *Off-Line*, *Line interactive*, *Tri-port*, *Ferro-ressonante* e *On-Line*. Também são apresentadas suas principais características especificando suas vantagens e desvantagens.

Foi apresentada a UPS *Line Interactive* monofásica com compensação ativa de potência série e paralela, onde destaca-se as características mais significativas, seu princípio de funcionamento e suas vantagens e desvantagens em relação à UPS *On-line*. Este sistema é capaz de controlar simultaneamente a partir de controles independentes a tensão de saída e a corrente de entrada fornecendo à carga tensão regulada e com baixo conteúdo harmônico além de eliminar o conteúdo harmônico de corrente gerado por cargas não lineares.

O sistema UPS *Line-interactive* monofásico proposto é atrativo pelo fato que a potência dos conversores pode ser dimensionada para uma potência nominal da carga bem inferior aos dos sistemas UPS *On-line*.

### 3 DESCRIÇÃO E MODELAGEM DA TOPOLOGIA

#### 3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo é apresentada a topologia de UPS monofásica, a qual é composta por dois inversores de tensão monofásicos em ponte completa. Estes desempenham, simultaneamente, as funções de filtro ativo série e paralelo e compartilham um mesmo barramento CC formado por um banco de baterias e capacitores eletrolíticos. O indutor  $L_s$  representa a indutância da rede de alimentação. Também é discutida a modulação utilizada nos inversores. Em seguida é mostrado o algoritmo utilizado para obtenção da referência de corrente senoidal de compensação, o qual é baseado no sistema de eixos de referência síncrona (algoritmo SRF), bem como um sistema PLL responsável por gerar a referência de tensão senoidal para o conversor paralelo. É apresentado o modelo matemático da topologia da UPS, a descrição das malhas de controle de compensação de corrente e tensão, bem como da malha de controle do barramento CC. Por fim, são apresentadas as curvas normalizadas que descrevem o fluxo de energia através dos conversores série e paralelo da UPS.

#### 3.2 UPS LINE-INTERACTIVE MONOFÁSICA

O diagrama de blocos da UPS *Line-interactive* monofásica com compensação ativa de potência série e paralela está apresentada na figura 9. A estrutura pode ser dividida em: estrutura de potência dos conversores série e paralelo; elementos passivos de filtragem; modulador PWM; algoritmos de geração das referências de compensação de corrente e tensão e controladores da malha de corrente do conversor série, malha de tensão do conversor paralelo, bem como da malha de tensão do barramento CC.

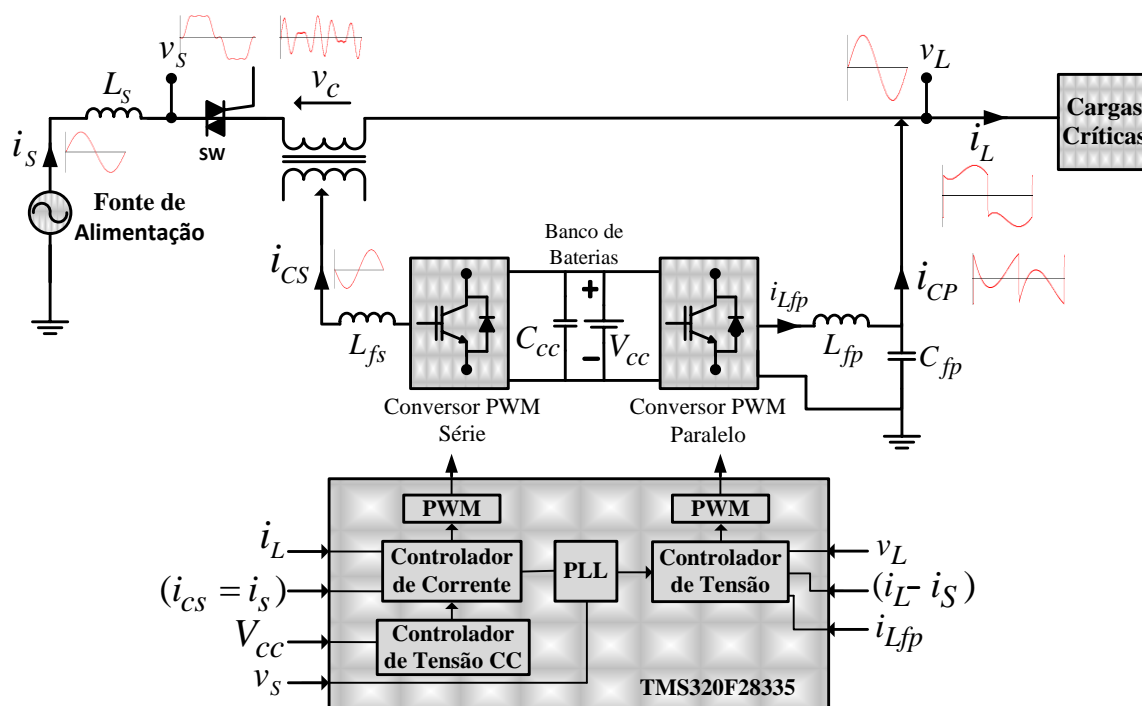


Figura 9 – Diagrama de blocos da UPS Line-interactive

Serão discutidos nos próximos itens a estrutura de potência da UPS, a modulação PWM utilizada, o algoritmo de geração da referência de corrente, o sistema PLL monofásico utilizado na geração da referência de tensão, as modelagens dos conversores série e paralelo e barramento CC, bem como as malhas de controle do sistema UPS.

### 3.2.1 Topologia do Sistema UPS *Line-Interactive*

A topologia da UPS é composta por dois inversores monofásicos em ponte completa, como mostrado na figura 10, sendo eles denominados conversores série e paralelo. Os conversores são acoplados a um mesmo barramento CC de tensão e executam as funções de filtro ativo série (FAS) e paralelo (FAP). O barramento CC é composto por um banco de baterias e capacitores. Além disso, a chave estática 'sw' (tiristores em anti-paralelo) tem a função de proteger a carga proporcionando uma desconexão rápida entre a UPS e a rede mediante uma condição anormal de funcionamento, ou seja, quando houver uma elevação ou um afundamento acima do especificado ou até mesmo uma falta da rede elétrica. Nestas situações, 'sw' pode

ser aberta e o conversor série inibido. Enquanto isso, o conversor paralelo permanece em funcionamento normal, sem que haja qualquer tempo de transferência que poderia influenciar a carga, ou seja, a UPS *line-interactive* se comporta como uma verdadeira UPS *on-line* (KAMRAN; HABETLER, 1998; REINERT et al., 2011; LINARD et al., 2010).

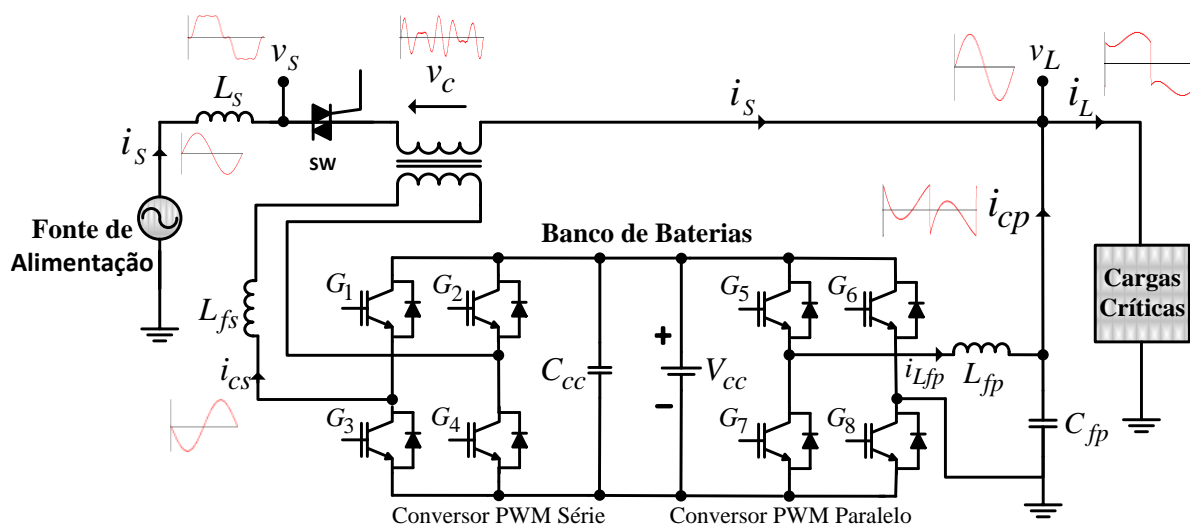


Figura 10 – Topologia da UPS *Line-interactive*

### 3.2.2 Modulação PWM

O princípio de funcionamento do inversor de tensão está ligado a uma estratégia de modulação que caracteriza-se pela mudança de estado dos componentes eletrônicos em um conversor estático. Existem diversas estratégias de modulação propostas, entre as quais pode-se citar a modulação por pulso único, por largura de pulsos múltiplos e iguais entre si, por largura de pulsos otimizada (PWM otimizada) e por largura de pulso senoidal (SPWM), propostas na literatura em (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 1995; HOLTZ, 1992; PERIN, 2000).

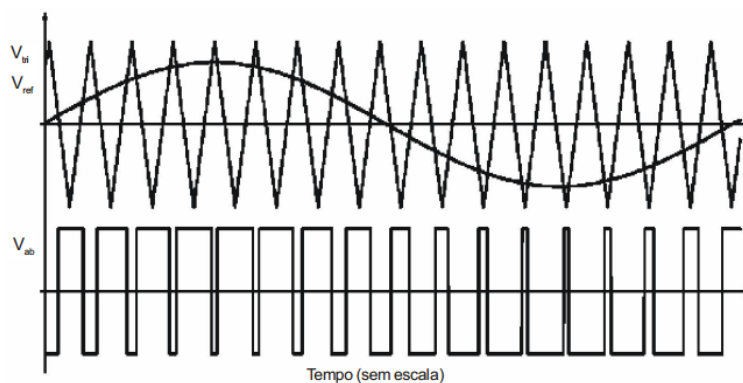
Na modulação por largura de pulsos a razão cíclica dos pulsos é modulada por um sinal de entrada dentro de uma faixa preestabelecida de valores. Na modulação por pulso ativo-alto, quanto maior o valor do sinal de entrada, maior a largura de pulso de nível alto. Na modulação por pulso ativo-baixo ocorre o contrário. Esses pulsos são aplicados aos interruptores em uma alta frequência de comutação,

com o objetivo de suprir uma determinada tensão ou corrente de baixa frequência na saída, ou seja, tem como intenção criar uma sequência de pulsos que devem apresentar o mesmo valor fundamental de uma referência de entrada. No entanto, nesta sequência de pulsos existem componentes harmônicos indesejados que devem ser minimizados.

Atualmente nas mais diversas aplicações envolvendo eletrônica de potência, a utilização da SPWM vem crescendo e se destacando pelo seu modo de operação em frequência fixa e o conteúdo harmônico deslocado para altas frequências utilizando-se uma portadora (onda triangular). O emprego de frequência fixa facilita o projeto dos componentes magnéticos, tendo em vista que em aplicações onde a frequência é variável os componentes magnéticos devem ser projetados para toda a faixa de frequência utilizada. Quando o conteúdo harmônico se concentra nas altas frequências tem-se uma diminuição de dimensão, peso e custo dos componentes do filtro.

A modulação por largura de pulso senoidal (SPWM) de dois níveis, conhecida também como SPWM bipolar, o sinal de referência ( $V_{ref}$ ) (sinal modulante) é comparado com um sinal triangular ( $V_{tri}$ ) (triangular) na frequência de comutação de modo a se obter os pulsos de comando para os interruptores do inversor.

Em aplicações, como inversor em ponte completa, quando o valor de referência é maior do que o valor da portadora, o braço comandado é comutado para o valor da tensão contínua do barramento de entrada. Quando o valor de referência é menor que o valor da portadora tem o valor da tensão de entrada invertido na saída do estágio inversor. A figura 11 mostra a comparação dos sinais ( $V_{tri}$ ) e ( $V_{ref}$ ) e a tensão ( $V_{ab}$ ) na saída do bloco inversor, respectivamente.

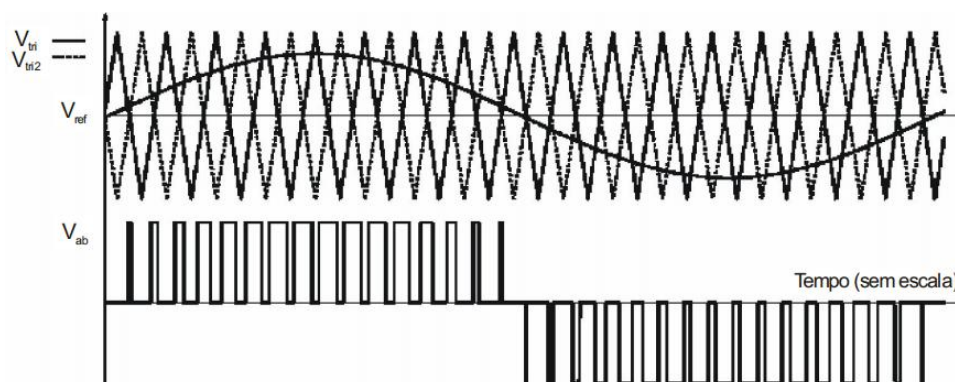


**Figura 11 – PWM senoidal bipolar – Dois níveis**

A modulação de dois níveis apresenta a característica de possuir um único comando para cada dois interruptores, como por exemplo, G1 e G4. Nos outros dois interruptores pode-se usar, um comando complementar. A largura dos pulsos transmitidos para os interruptores depende da amplitude da referência de tensão senoidal, fazendo com que a tensão ( $V_{ab}$ ) tenha uma componente fundamental na mesma frequência da tensão de referência e os harmônicos deslocados em torno da frequência da portadora ( $V_{tri}$ ).

A modulação por largura de pulso senoidal de três níveis, ou SPWM unipolar, visa deslocar o conteúdo harmônico para as altas frequências, de maneira similar à modulação por largura de pulso senoidal de dois níveis. A diferença é que os interruptores G1 e G2 ou G3 e G4 também podem conduzir simultaneamente.

Na SPWM unipolar, o sinal de referência ( $V_{ref}$ ) (modulante) é comparado com um sinal triangular ( $V_{tri}$ ) (portadora) na frequência de comutação para obter os pulsos de comando para os interruptores de um braço do inversor, G1 e G3, por exemplo. Já os pulsos de comando para o outro braço são obtidos através da comparação do sinal de referência ( $V_{ref}$ ) com uma outra portadora triangular ( $V_{tri2}$ ), complementar a ( $V_{tri}$ ). A modulação por largura de pulso senoidal unipolar é apresentada na figura 12.



**Figura 12 – PWM senoidal unipolar – Três níveis**

Pode ser observado nas figuras 11 e 12 que o número de pulsos na tensão ( $V_{ab}$ ) é duas vezes maior na modulação três níveis do que o encontrado na modulação de dois níveis, para a mesma frequência de comutação.

Neste trabalho optou-se pela utilização da modulação por largura de pulso de três níveis de acordo com suas vantagens apresentadas.

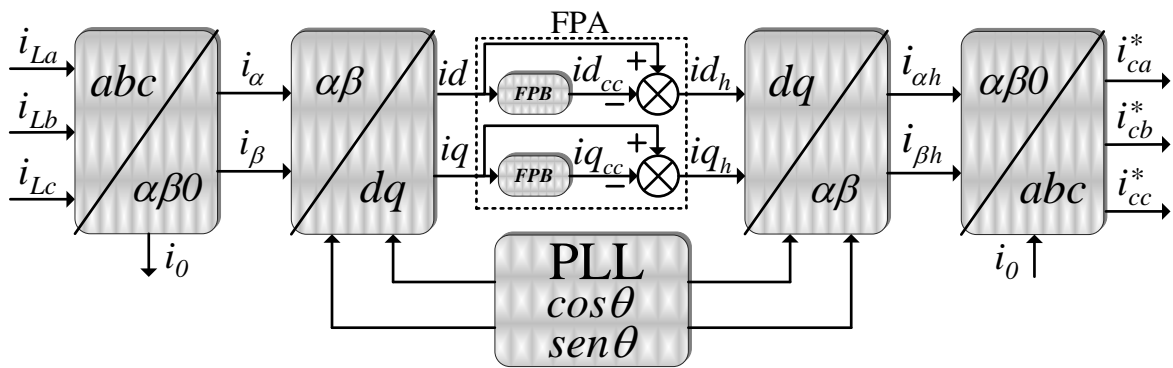
### 3.2.3 Algoritmos Baseados no Sistema de Referência Síncrona (SRF)

Controladores baseados no sistema de eixos de referência síncrona (SRF – *Synchronous Reference Frame*), foram inicialmente utilizados em uma aplicação trifásica de um filtro ativo série híbrido (BHATTACHARYA; DIVAN; BANERJEE, 1996), o qual atuava como um isolador harmônico entre a fonte de alimentação e a carga. Neste trabalho também será utilizado um algoritmo de compensação baseado no sistema de eixos de referência síncrona conforme proposto por (MODESTO, 2007; FERACIN NETO, 2009; SILVA et al., 2010; SILVA; MODESTO, 2008).

O algoritmo SRF se baseia na transformação das grandezas de tensão/corrente do sistema de eixos estacionário  $abc$  em grandezas contínuas no sistema de eixos síncrono  $dq$ , no qual estes giram à velocidade síncrona em relação aos vetores espaciais de tensão/corrente. Os termos correspondentes às parcelas harmônicas de tensão ou corrente nos eixos  $dq$  que possuem frequências diferentes da síncrona, ou seja, da frequência fundamental do sistema elétrico, são representados por formas de onda alternadas superpostas ao termo contínuo



fundamental. Desse modo, as parcelas fundamentais são facilmente extraídas através da utilização de filtros passa-baixa (FPB), sendo este ajustado para uma frequência de corte de uma década abaixo da menor frequência encontrada no eixo síncrono. A ortogonalidade necessária para o funcionamento ideal do algoritmo SRF é obtida por meio da geração das coordenadas do vetor unitário síncrono  $\text{sen}\theta$  e  $\text{cos}\theta$ , utilizando um circuito PLL (*Phase-Locked Loop*), sincronizado com a frequência do sistema elétrico. O diagrama de blocos do algoritmo SRF convencional utilizado para extrair as componentes harmônicas das correntes trifásicas ( $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  e  $i_{Lc}$ ) é mostrado na figura 13.



**Figura 13 – Diagrama de blocos do algoritmo SRF trifásico para compensação de harmônicos**

Inicialmente são medidas as três correntes drenadas pela carga ( $i_{La}$ ,  $i_{Lb}$  e  $i_{Lc}$ ) e transformada do sistema elétrico trifásico  $abc$  para o sistema bifásico estacionário  $\alpha\beta 0$ , através da transformada de Clarke apresentada pela equação (3.1).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \\ i_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Uma vez encontradas as correntes ( $i_{\alpha}$  e  $i_{\beta}$ ) no sistema de eixos estacionário bifásico, estas são transformados para o sistema de eixos bifásicos síncrono  $dq$  através da equação (3.2), utilizando a transformada de Park. O ângulo

de fase  $\theta = \omega t$  representa a posição angular do sistema de eixos de referência síncrona,  $\omega = 2\pi f$  representa a frequência angular do sistema elétrico com frequência fundamental  $f$  e as coordenadas  $\cos\theta$  e  $\sin\theta$  definem as coordenadas do vetor unitário síncrono.

$$\begin{bmatrix} id \\ iq \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

As correntes na frequência angular fundamental  $\omega$  a partir de agora são grandezas contínuas e os harmônicos são transformados em grandezas oscilantes que podem ser facilmente extraídas utilizando filtros passa-baixa (FPB). As correntes na saída dos FPB  $id_{cc}$  e  $iq_{cc}$  representam as parcelas ativas e reativas da corrente da carga na frequência fundamental, respectivamente. Para compensar somente a parcela harmônica do sistema, é necessário subtrair as parcelas contínuas  $id_{cc}$  e  $iq_{cc}$  de  $id$  e  $iq$ , respectivamente, conforme mostrado na figura 13.

Afim de se obter as correntes de compensação, é utilizada a matriz de transformação inversa do sistema de eixos de referência síncrona  $dq$  para o sistema de eixos estacionário bifásico  $\alpha\beta$  conforme a equação (3.3).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} id_h \\ iq_h \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

Caso seja necessário compensar além dos harmônicos da carga, também a parcela reativa da mesma, o filtro passa alta da figura 13 do eixo  $iq$  é retirado como mostrado na figura 14.

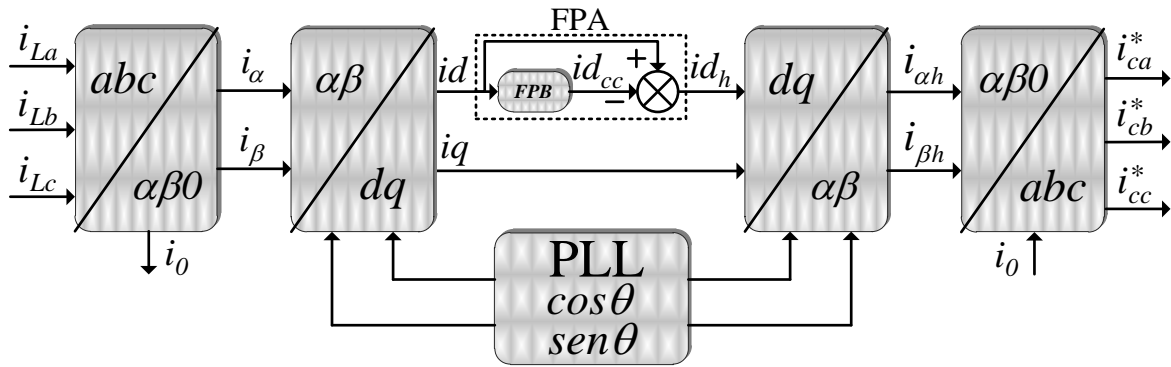


Figura 14 – Diagrama de blocos do algoritmo SRF trifásico

Assim tem-se a parcela no eixo de referência síncrona que representa os harmônicos da parte ativa e reativa da corrente da carga e a equação (3.3) e que pode ser substituída pela matriz de transformação apresentada pela equação (3.4).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\text{sen} \theta \\ \text{sen} \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} id_h \\ iq \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Finalmente, as correntes bifásicas ( $i_{\alpha}$  e  $i_{\beta}$ ) são transformadas para o sistema trifásico  $abc$  através da matriz inversa de Clark (equação 3.1) que é dada pela equação (3.5), sendo as correntes de referência de compensação  $i_{ca}^*, i_{cb}^*, i_{cc}^*$ .

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha h} \\ i_{\beta h} \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

### 3.2.4 Algoritmo SRF Monofásico

No caso da UPS proposta neste trabalho, por se tratar de um sistema monofásico, algumas modificações devem ser feitas para se utilizar o algoritmo SRF (MODESTO, 2007). A principal delas é gerar um sistema trifásico fictício,

representado por um sistema bifásico no eixo de coordenadas estacionárias  $\alpha\beta$ . O algoritmo SRF utilizado neste trabalho está mostrado na figura 15.

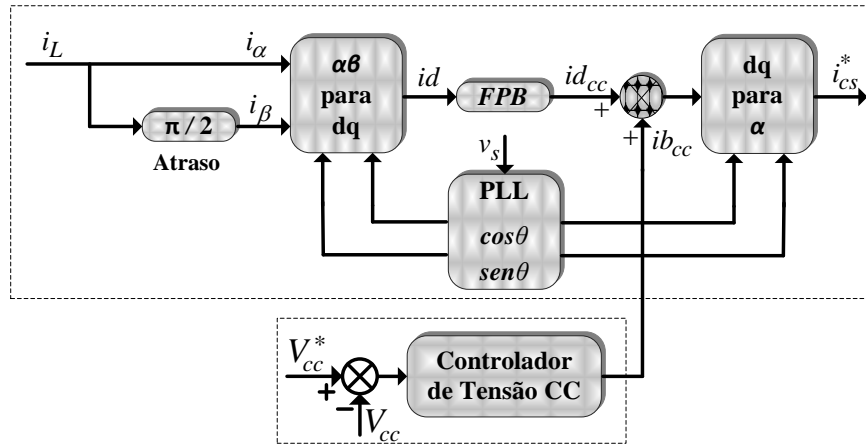


Figura 15 – Algoritmo SRF para geração da referência de corrente

Medindo-se apenas a corrente de carga  $i_L$  duas correntes em quadratura no sistema de eixos estacionário  $\alpha\beta$  são obtidas, ou seja,  $i_\alpha$  e  $i_\beta$ , onde  $i_\alpha$  é a própria corrente da carga medida  $i_L$  e  $i_\beta$  é obtida realizando um atraso de fase de  $\pi/2$  radianos em relação a  $i_L$ , obtendo-se, desta forma, correntes bifásicas fictícias representadas pela equação (3.6).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_L(\omega t) \\ i_L(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

No eixo síncrono, a corrente direta  $id$  é obtida pela equação (3.7) e usando um FPB sua componente CC  $id_{cc}$  pode ser encontrada, onde esta representa a parcela ativa da corrente da carga.

$$id = i_\alpha \cos \theta + i_\beta \sin \theta \quad (3.7)$$

Portanto, a referência senoidal de corrente do conversor série  $i_{cs}^*$  é obtida diretamente utilizando a equação (3.8), onde o ângulo de fase  $\theta$ , obtido a partir do PLL, deverá ser idêntico ao ângulo de fase da rede.

$$i_{cs}^* = (id_{cc} + ib_{cc}) \cos \theta \quad (3.8)$$

O sinal  $ib_{cc}$  representa o sinal de saída do controlador PI do barramento CC, cujos ganhos proporcional e integral são definidos por  $K_{p_{cc}}$  e  $K_{i_{cc}}$ , respectivamente. O controle do barramento CC é feito pelo controle da amplitude da corrente de referência  $i_{cs}^*$ . Este tem a finalidade de equilibrar o fluxo de potência da UPS, seja para compensar a diferença de tensão entre a entrada e a saída, seja para compensar as perdas nos interruptores de potência e dos elementos passivos de filtragem.

Através do algoritmo da figura 15, consegue-se gerar a referência senoidal adequada para eliminar os harmônicos da corrente da carga bem como compensar a potência reativa da carga.

### 3.2.5 Sistema PLL

A frequência e o ângulo de fase da rede elétrica adquiridos para geração das coordenadas dos vetores unitários síncronos ( $\cos\theta$  e  $\sin\theta$ ) utilizados tanto no algoritmo SRF bem como na referência do controlador de tensão do conversor paralelo, são obtidos por meio de sistemas PLL (*Phase-Locked-Loop*). Na literatura tem sido propostas diversas topologias monofásicas (SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008; FILHO et al., 2008; SILVA et al., 2004; SILVA et al., 2009).

Neste trabalho as coordenadas  $\sin\theta$  e  $\cos\theta$ , bem como a referência de tensão de saída da UPS são obtidas por meio do p-PLL monofásico mostrado na figura 16 e descrito em detalhes em (SILVA; NOVOCHADLO; MODESTO, 2008).

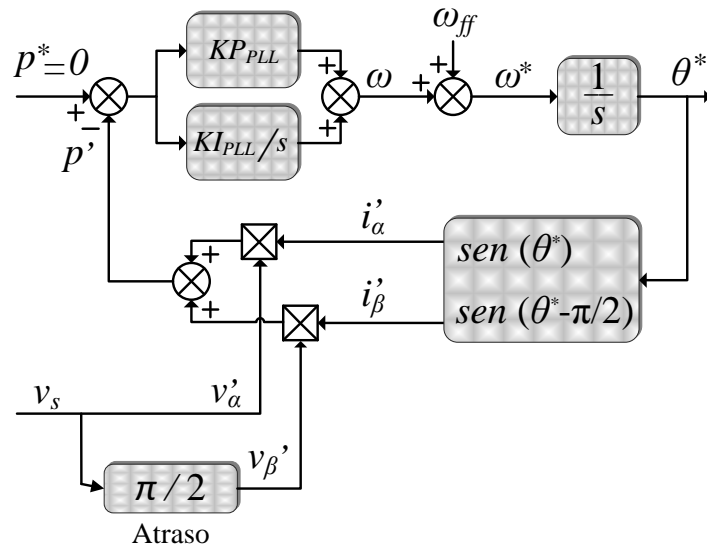


Figura 16 – Diagrama de blocos do sistema p-PLL monofásico

Uma vez que o respectivo PLL é baseado na teoria de potência ativa instantânea trifásica e o mesmo é utilizado em sistemas monofásicos, novamente um sistema trifásico fictício deve ser criado, o qual será representado pelo sistema de eixos estacionário bifásico  $\alpha\beta$ . Assim, a tensão da rede  $v_s$  é assumida como a tensão direta do eixo bifásico estacionário, ou seja,  $v_s = v_\alpha$ . Já a tensão em quadratura fictícia  $v_\beta$  é obtida pela introdução de um atraso de fase de  $\pi/2$  radianos na tensão medida da rede ( $v_s$ ) bem como ( $V_{pk}$ ) é a tensão de pico da rede elétrica. A equação (3.9) apresenta a matriz que representa o eixo estacionário bifásico  $\alpha\beta$  fictício.

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha(\omega t) \\ v_\alpha(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t) \\ \sqrt{2}V \text{sen}(\omega t - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

O princípio de operação do PLL consiste em cancelar a componente CC ( $\bar{p}'$ ) da potência fictícia trifásica  $p'$ . Portanto, quando a  $p'$  for anulada, o sinal do PLL estará atracado, ou seja, sincronizado com a componente de frequência fundamental do sinal de entrada. A dinâmica do PLL irá determinar na saída do controlador PI a frequência angular de referência ( $\omega^* = 2\pi f$ ), onde  $f$  é a frequência da rede elétrica. O ângulo de fase  $\theta^* = \omega^* t$  é obtido pela integração da

frequência angular  $\omega^*$  que será idêntica à frequência angular da rede  $\omega$ . Assim,  $\theta^*$  é usado para calcular as correntes de realimentação bifásicas fictícias  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$ , representadas pela equação (3.10).

$$\begin{bmatrix} i'_\alpha \\ i'_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_a(\theta^*) \\ i_a(\theta^* - \pi/2) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Sendo assim, para cancelar a componente CC de  $p'$  ( $\bar{p}'$ ),  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$  devem ser ortogonais às respectivas tensões  $v_\alpha$  e  $v_\beta$ . A frequência  $\omega_{ff}$  é usada para melhorar a dinâmica inicial do PLL, o qual é a frequência fundamental. A potência ativa instantânea fictícia  $p'$  do PLL pode ser representada pela equação (3.11).

$$p' = V_{pk} \text{sen}(\omega t) \text{sen}(\theta^*) + V_{pk} \text{sen}(\omega t - \pi/2) \text{sen}(\theta^* - \pi/2) \quad (3.11)$$

A referência da tensão de saída ( $v_L^*$ ) é obtida diretamente do algoritmo PLL. Esta é definida na equação (3.12), onde ( $V_L$ ) é a amplitude da requerida tensão de saída e  $\theta^*$  é o ângulo de fase do PLL.

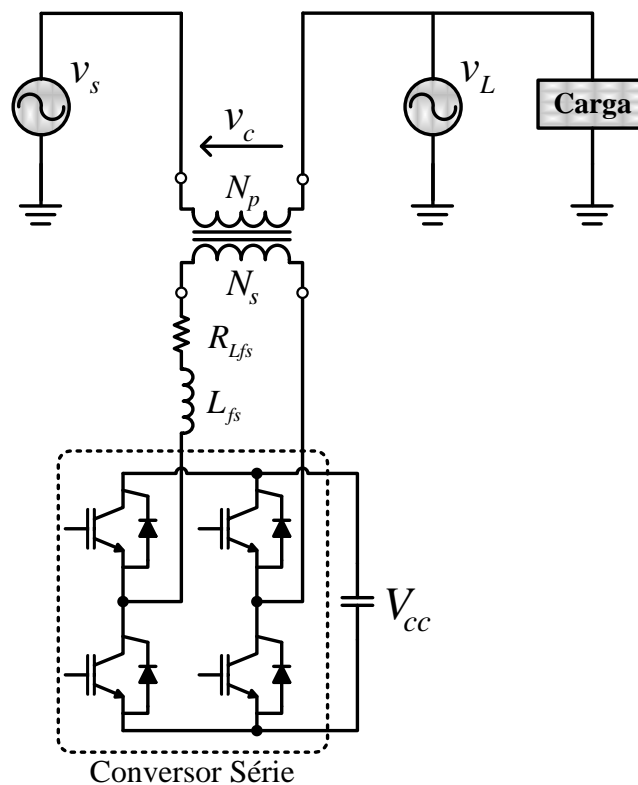
$$v_L^* = V_L \cos(\theta^*) \quad (3.12)$$

Uma vez que a tensão de saída da UPS é sempre senoidal e regulada, as perturbações de rede, tais como harmônicos, afundamentos e elevações de tensão, são naturalmente absorvidas pelo transformador do conversor série. Desse modo, não há necessidade de cálculo de qualquer outra referência de tensão de compensação, haja visto que os distúrbios de tensão da rede elétrica são indiretamente compensados.

### 3.3 MODELAGEM DA UPS

#### 3.3.1 Modelo Matemático do Conversor Série

Seja o conversor estático de potência monofásico, chamado por conversor série, operando como fonte de corrente senoidal, mostrado na figura 17.



**Figura 17 – Circuito do conversor série monofásico**

O transformador de isolamento apresenta indutância de dispersão do primário e do secundário ( $L_{dp}, L_{ds}$ ), resistência de dispersão do primário e do secundário ( $R_{dp}, R_{ds}$ ) (FITZGERALD; JR., UMANS, 2006; SANTOS, 2012) bem como ( $V_{cc}$ ) representa a tensão da bateria e é assumida ser constante para um determinado período de comutação. É representado pela figura 18, o circuito equivalente do conversor série, considerando o conversor paralelo como uma fonte de tensão senoidal ideal.



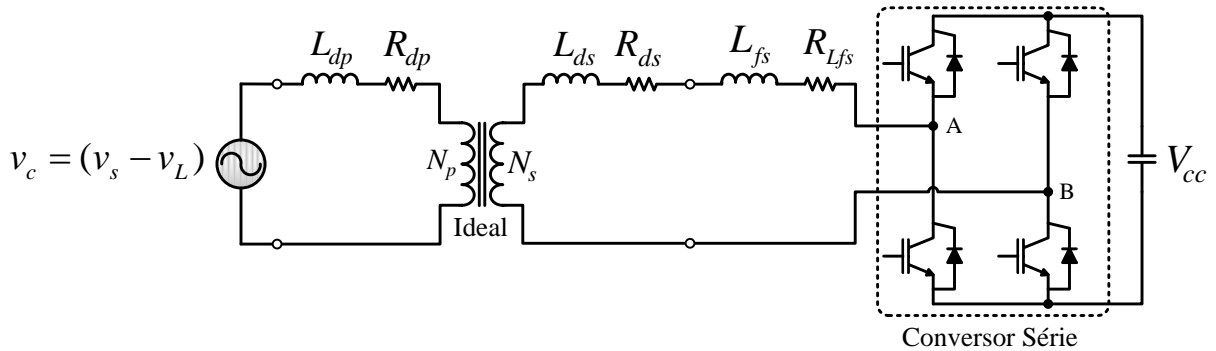


Figura 18 – Circuito equivalente considerando as impedâncias de dispersão do transformador

Considerando as indutâncias e resistências totais de dispersão, bem como as equações (3.13, 3.14 e 3.15), as impedâncias e a tensão sobre o transformador série ( $v_c$ ) são refletidas do lado secundário para o lado primário do transformador. Podendo assim obter o circuito equivalente do conversor série, conforme a figura 19.

$$n = \frac{N_p}{N_s} \quad (3.13)$$

$$V_{\text{primário}} = V_{\text{secundário}} \cdot n \quad (3.14)$$

$$Z_p = Z_s \cdot n \quad (3.15)$$

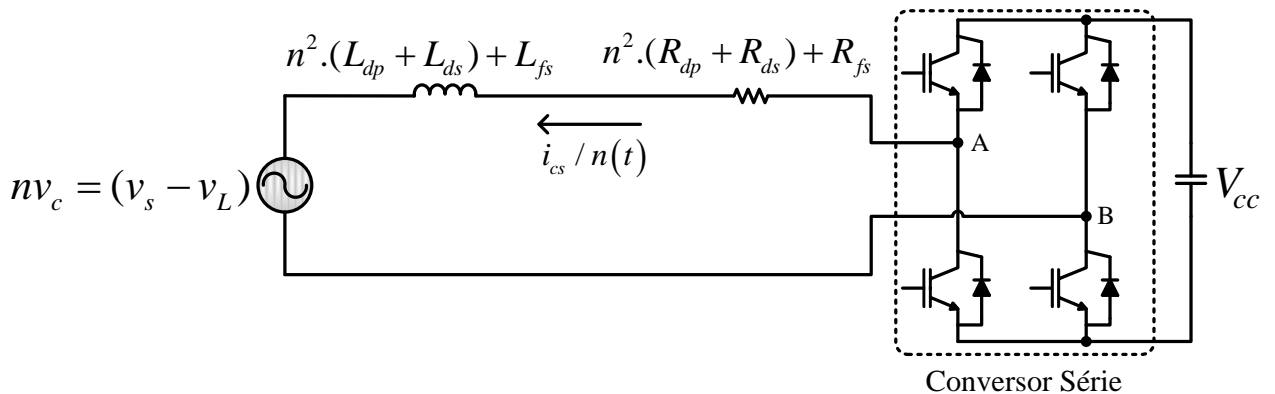


Figura 19 – Circuito equivalente do conversor série

Nos pontos A e B ( $v_{AB}$ ) onde são sintetizados os pulsos dos interruptores, com modulação a três níveis, a tensão varia entre zero e  $(+V_{cc})$ , e entre zero e

( $-V_{cc}$ ). Assim pelas equações (3.16 e 3.17) pode ser calculado para ambos os valores de ( $v_{AB}$ ), o valor médio de tensão (PÖTTKER, 2000):

$$\langle v_{AB}(t) \rangle = d_s(t) \cdot V_{cc} \quad (3.16)$$

$$\langle v_{AB}(t) \rangle = -d_s(t) \cdot V_{cc} \quad (3.17)$$

onde  $d_s(t)$  representa a razão cíclica dos comandos dos interruptores.

A partir da figura 20 pode-se obter o modelo do circuito equivalente do conversor série. Assim a relação de transformação unitária do transformador como  $n^2 = 1$ , bem como  $L_{eq_s} = L_{dp} + L_{ds} + L_{fs}$  e  $R_{eq_s} = R_{dp} + R_{ds} + R_{Lfs}$  pode ser representado respectivamente.

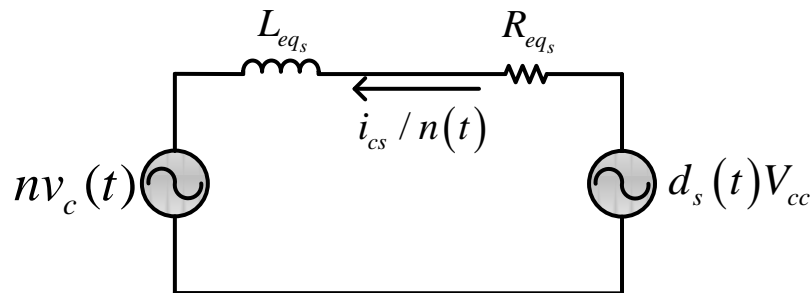


Figura 20 – Modelo do conversor série

Considerando o valor médio das grandezas de corrente e tensão, do modelo do conversor série, tem-se a seguinte expressão:

$$d_s(t)V_{cc} = L_{eq_s} \frac{d\langle i_{cs}(t) \rangle}{dt} + R_{eq_s} \langle i_{cs}(t) \rangle + \langle v_c(t) \rangle \quad (3.18)$$

Uma vez que a frequência da rede elétrica é muito menor que a frequência de comutação, pode-se considerar que a tensão  $v_c(t)$  seja constante em um período de comutação. Dessa forma, a tensão sobre o transformador pode ser representada por uma grandeza CC ( $V_C$ ), conforme mostra a equação (3.19) (SANTOS, 2012):

$$\langle v_c(t) \rangle = V_C \quad (3.19)$$

Do modelo que pequenos sinais, aplicando perturbações na razão cíclica  $d_s(t)$  e na corrente média  $\langle i_{cs}(t) \rangle$  do circuito, estas podem ser reescritas conforme mostrado as equações (3.20) e (3.21), respectivamente (DIRK, 2003; PÖTTKER, 2000):

$$d_s(t) = D_s + \hat{d}_s(t) \quad (3.20)$$

$$\langle i_{cs}(t) \rangle = I_{cs} + \hat{i}_{cs}(t) \quad (3.21)$$

onde  $D_s$  e  $I_{cs}$  representam as componentes CC e  $\hat{d}_s(t)$  e  $\hat{i}_{cs}(t)$  representam as componentes oscilantes da razão cíclica e da corrente do circuito, respectivamente.

Substituindo (3.19), (3.20) e (3.21) na equação (3.18), têm-se:

$$D_s V_{cc} + \hat{d}_s(t) V_{cc} = L_{eq_s} \frac{dI_{cs}}{dt} + L_{eq_s} \frac{d\hat{i}_{cs}(t)}{dt} + R_{eq_s} I_{cs} + R_{eq_s} \hat{i}_{cs}(t) + V_C \quad (3.22)$$

Para se obter o modelo CA do circuito equivalente do conversor série é preciso desprezar os termos CC da equação (3.22) que referem-se à resposta em regime permanente do sistema, como mostrado na equação (3.23).

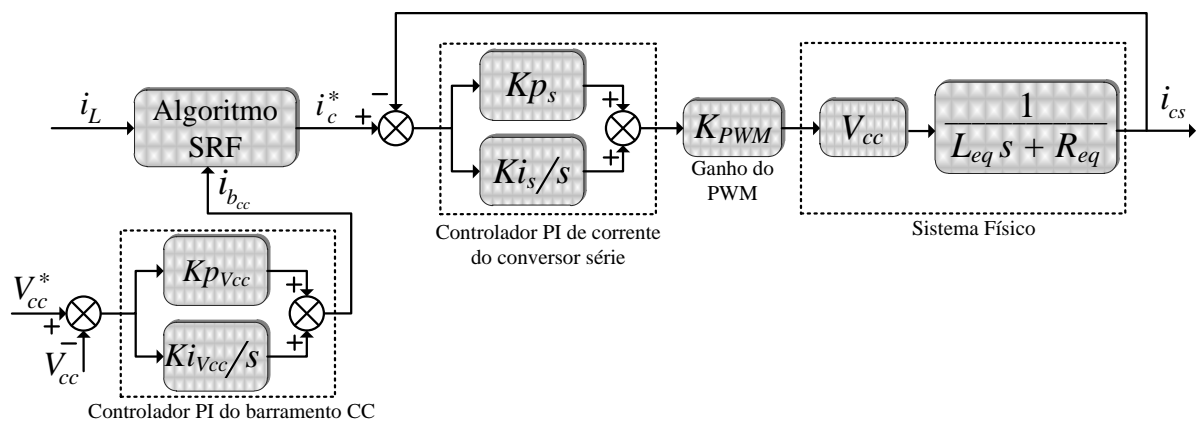
$$\hat{d}_s(t) V_{cc} = L_{eq_s} \frac{d\hat{i}_{cs}(t)}{dt} + R_{eq_s} \hat{i}_{cs}(t) \quad (3.23)$$

Agora no intuito de se obter a função de transferência do conversor série a partir do modelo da figura 20 e da equação (3.23), aplica-se a transformada de Laplace, ou seja:

$$G_{CS}(s) = \frac{I_{cs}(s)}{D_s(s)} = \frac{V_{cc}}{L_{eq_s} s + R_{eq_s}} \quad (3.24)$$

### 3.3.2 Malha de Controle de Corrente do Conversor Série

A figura 21 mostra o diagrama de blocos da malha de controle de corrente do conversor série, também chamado de filtro ativo de potência série. Esta tem o objetivo de garantir que a corrente injetada no sistema elétrico, seja a mais próxima possível da corrente de referência senoidal obtida pelo algoritmo SRF mostrado na figura 15.

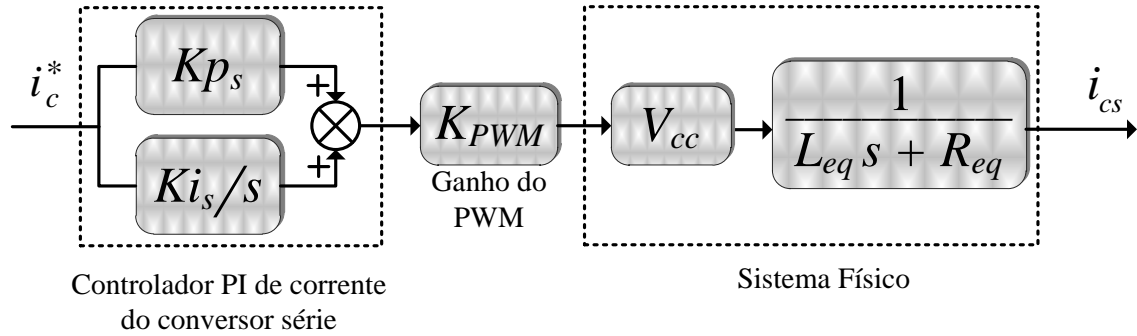


**Figura 21 – Diagrama de blocos das malhas de controle de corrente do conversor série**

A partir do diagrama de bloco da figura 21, pode-se observar a malha de corrente, sendo  $Kp_s$  e  $Ki_s$  os respectivos ganhos proporcional e integral do controlador de corrente [ $G_{P_{cs}}$ ], equação (3.25),  $L_{eq_s}$  é a indutância equivalente total de filtragem do conversor série e  $R_{eq_s}$  representa a sua resistência total.

$$G_{P_{cs}}(s) = \frac{Kp_s s + Ki_s}{s} \quad (3.25)$$

A função de transferência de laço aberto de corrente,  $G_{MA_s_i}(s)$ , é mostrada na figura 22 e na equação (3.26).



**Figura 22 – Diagrama de blocos de laço aberto de controle de corrente do conversor série**

$$G_{MA_{Si}}(s) = G_{Pcs}(s) K_{PWM} G_{CS}(s) \quad (3.26)$$

$$G_{MA_{Si}}(s) = \frac{Kp_s K_{PWM} V_{cc} s + Ki_s K_{PWM} V_{cc}}{L_{eq} s^2 + R_{eq} s} \quad (3.27)$$

A partir da figura 21, pode-se observar o ganho do modulador PWM ( $K_{PWM}$ ), que pode ser calculado conforme a equação (3.28) (DIRK, 2003).

$$K_{PWM} = \frac{2}{P_{PWM}} \quad (3.28)$$

onde  $P_{PWM}$  é o valor de pico da triangular (portadora).

### 3.3.3 Modelo Matemático do Barramento CC

A partir de um sistema monofásico, onde  $v_s$  e  $i_s$  representam a tensão e corrente de entrada, cuja potência ativa instantânea é dada por:

$$p = p_{in} = v_s i_s \quad (3.29)$$

Considerando a tensão e a corrente de entrada da UPS senoidais, a potência ativa instantânea na entrada, representada no sistema SRF monofásico é dada por:

$$p = \frac{v_d}{\sqrt{2}} \cdot \frac{i_d}{\sqrt{2}} = \frac{v_d i_d}{2} = p_{in} \quad (3.30)$$

onde  $v_d$  e  $i_d$  são grandezas contínuas de tensão e corrente no eixo síncrono direto, respectivamente.

Uma vez que  $v_d$  e  $i_d$  são grandezas contínuas a potência ativa instantânea pode ser reescrita por (3.31) onde o índice “ $m$ ” representa as respectivas componentes médias, ou seja, (SILVA, 2001):

$$p = p_{in} = \frac{v_d i_d}{2} = \frac{v_{dm} i_{dm}}{2} = p_m \quad (3.31)$$

Considerando a corrente sem compensação no eixo síncrono  $i_{dL} = (i_{dLm} + i_{dLh})$ , onde o índice “ $h$ ” representa as componentes oscilantes, a potência ativa instantânea de saída da UPS é dada por:

$$p_{out} = \frac{v_d i_{dL}}{2} = \frac{v_d (i_{dLm} + i_{dLh})}{2} \quad (3.32)$$

ou

$$p_{out} = \frac{v_d i_{dLm} + v_d i_{dLh}}{2} \quad (3.33)$$

Onde:

$$p_m = v_d i_{dLm} \quad (3.34)$$

e

$$p_{out} = p_m + \frac{v_d i_{dLh}}{2} = p_m + p_h \quad (3.35)$$

Pelas equações (3.31) e (3.32), e sabendo-se que  $i_{dLm}$  é igual a  $i_{dm}$ , e  $(p_{in})$  é igual a  $(p_m)$ , a parcela de potência, que flui da rede para o conversor paralelo  $(p_{sc})$  é dada por:

$$P_{sc} = P_{in} - P_{out} \quad (3.36)$$

ou

$$P_{sc} = P_m - \left( P_m + \frac{v_d i_{dLh}}{2} \right) = \frac{v_d i_{dLh}}{2} = P_h \quad (3.37)$$

Considerando a existência de uma parcela ativa de potência  $(p_{cm})$  fluindo entre a rede e o conversor paralelo, de forma a compensar as perdas dos conversores série e paralelo, as parcelas de corrente ativa  $(i_{cm})$  e oscilante de compensação  $(i_{ch})$  circulam pelo conversor paralelo. Assim a expressão (3.37) pode ser reescrita por:

$$P_{sc} = \frac{v_d i_{cm}}{2} + \frac{v_d i_{ch}}{2} = P_{cm} + P_h \quad (3.38)$$

Assumindo que  $(p_{cm})$  é igual à potência no lado CC  $(p_{cc})$ , tem-se:

$$P_{cm} = \frac{v_d i_{cm}}{2} = v_{cc} i_{cc} = P_{cc} \quad (3.39)$$

onde,  $(v_{cc})$  e  $(i_{cc})$  são a tensão e a corrente do barramento CC, respectivamente. Assim a corrente  $(i_{cc})$ , considerando que o barramento CC pode ser representado por uma capacitância elevada  $(C_{cc})$ , é dada por:

$$i_{cc} = C_{cc} \frac{dv_{cc}}{dt} \quad (3.40)$$

$$i_{cc} = \frac{v_d i_{cm}}{2v_{cc}} \quad (3.41)$$

Através de (3.40) e (3.41) obtém-se:

$$\frac{dv_{cc}}{dt} = \frac{1}{2C_{cc}} \frac{v_d i_{cm}}{v_{cc}} \quad (3.42)$$

Adotando a modelagem por pequenos sinais, a equação (3.42) pode ser escrita considerando os valores médios instantâneos das grandezas ( $v_{cc}$ ) e ( $i_{cm}$ ), uma vez que a variação de tensão do barramento CC é pequena, assim tem-se:

$$\langle v_{cc}(t) \rangle \frac{d\langle v_{cc}(t) \rangle}{dt} = \frac{1}{2C_{cc}} v_d \langle i_{cm}(t) \rangle \quad (3.43)$$

Aplicando perturbações em ( $v_{cc}$ ) e ( $i_{cm}$ ) encontra-se (3.44) e (3.45), respectivamente:

$$\langle v_{cc}(t) \rangle = V_{cc} + \hat{v}_{cc}(t) \quad (3.44)$$

$$\langle i_{cm}(t) \rangle = I_{cm} + \hat{i}_{cm}(t) \quad (3.45)$$

A equação (3.43) pode ser reescrita por:

$$[V_{cc} + \hat{v}_{cc}(t)] \left[ \frac{dV_{cc}}{dt} + \frac{d\hat{v}_{cc}(t)}{dt} \right] = \frac{1}{2C_{cc}} [v_d (I_{cm} + \hat{i}_{cm}(t))] \quad (3.46)$$

Manipulando (3.46), tem-se:

$$\frac{V_{cc} dV_{cc}}{dt} + \frac{V_{cc} d\hat{v}_{cc}(t)}{dt} + \frac{\hat{v}_{cc}(t) dV_{cc}}{dt} + \frac{\hat{v}_{cc}(t) d\hat{v}_{cc}(t)}{dt} = \frac{1}{2C_{cc}} [v_d I_{cm} + v_d \hat{i}_{cm}(t)] \quad (3.47)$$



Desconsiderando os termos CC e o termo AC não linear de (3.47), tem-se:

$$\frac{V_{cc} d\hat{v}_{cc}(t)}{dt} + \frac{\hat{v}_{cc}(t)dV_{cc}}{dt} = \frac{1}{2C_{cc}} v_d \hat{i}_{cm}(t) \quad (3.48)$$

Como a derivada de uma constante é nula de (3.48), obtêm-se:

$$\frac{V_{cc} d\hat{v}_{cc}(t)}{dt} = \frac{1}{2C_{cc}} v_d \hat{i}_{cm}(t) \quad (3.49)$$

Realizando as manipulações matemáticas em (3.49) e aplicando a Transformada de Laplace, obtêm-se a função de transferência da planta do barramento CC é dada por:

$$G_{pV_{cc}}(s) = \frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{i}_{cm}(s)} = \frac{v_d}{2C_{cc} V_{cc} s} \quad (3.50)$$

Seja a função de transferência do controlador PI do barramento CC dada por:

$$G_{piV_{cc}}(s) = \frac{Kp_{V_{cc}}s + Ki_{V_{cc}}}{s} \quad (3.51)$$

Portanto, a função de transferência em malha aberta do sistema é dada pela equação (3.52), respectivamente.

$$G_{MA_{V_{cc}}}(s) = \frac{v_d Kp_{V_{cc}}s + v_d Ki_{V_{cc}}}{2C_{cc} V_{cc} s^2} \quad (3.52)$$

O diagrama de blocos apresentado na figura 23 mostra a malha de controle de tensão do barramento CC da UPS, onde, como dito anteriormente, o banco de

baterias foi representado por uma capacitância ( $C_{cc}$ ). O objetivo principal desta malha de controle é manter a tensão do barramento constante de acordo com o valor de referência especificado. A tensão no barramento CC pode variar em função da descarga do banco de baterias, da diferença entre as tensões de entrada e saída da UPS e também em função das perdas existentes nos conversores e nos elementos passivos de filtragem. A resposta dinâmica deste controlador deve ser lenta, a fim de não interferir e conseqüentemente distorcer a corrente de referência da malha de corrente do conversor série.

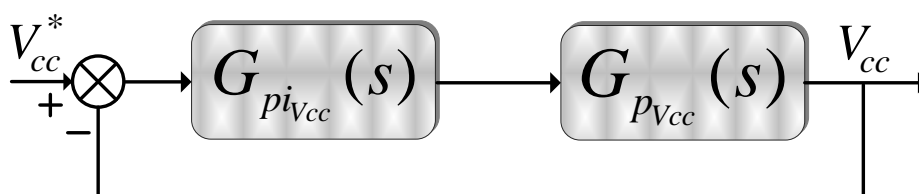


Figura 23 – Diagrama de bloco da malha de controle da tensão do barramento CC

### 3.3.4 Modelo Matemático do Conversor Paralelo

O circuito de potência do conversor paralelo é composto pelo inversor de tensão monofásico mostrado na figura 24.

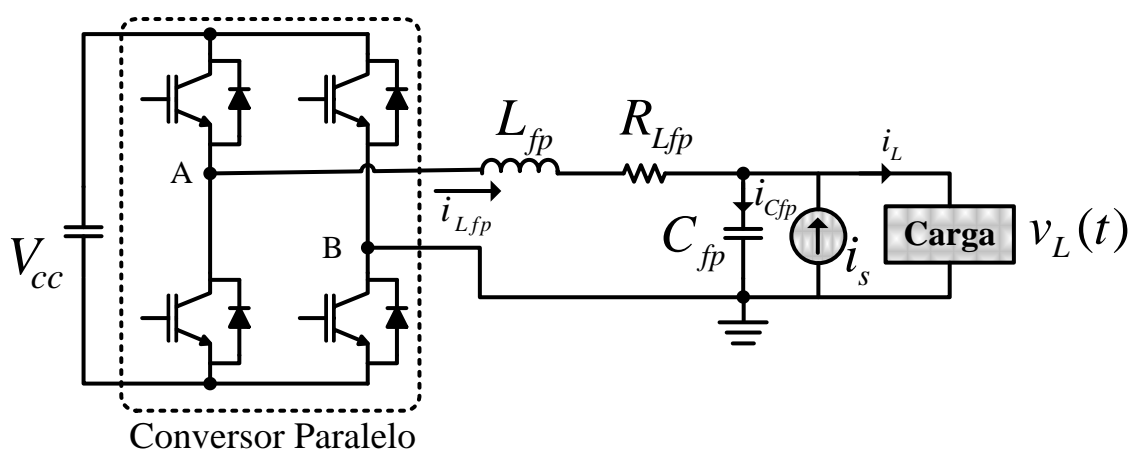


Figura 24 – Circuito do conversor paralelo de tensão

O inversor de tensão monofásico será analisado sem a influência direta das impedâncias do conversor série de corrente, da impedância de dispersão do transformador de acoplamento, impedância de rede, bem como a corrente do conversor série ( $i_s$ ) é assumida como uma fonte de corrente senoidal ideal. Para o modo *backup* a fonte de corrente ( $i_s$ ) deve ser suprimida. A diferença entre ( $i_L - i_s$ ) representa um distúrbio para o sistema. Na saída do conversor paralelo existe apenas um indutor  $L_{fp}$ , um resistor referente à resistência interna do indutor  $R_{Lfp}$ , um capacitor  $C_{fp}$  e a carga em paralelo com o capacitor. O conversor paralelo também utiliza a modulação três níveis em seu modo de operação. A tensão entre os pontos A e B é representada por uma fonte de tensão com valor igual ao valor médio para um período de comutação mostrada na equação (3.53).

$$\langle v_{AB}(t) \rangle = V_{cc} d_p(t) \quad (3.53)$$

As equações que definem o circuito são (MOHAN; UNDELAND; ROBBINS, 1995; OGATA, 2003, KEMMERLY; HAYT; DURBIN, 2008):

No circuito da figura 24 será analisado considerando a tensão sobre o capacitor ( $v_{Cfp}(t)$ ), corrente no indutor ( $i_{Lfp}(t)$ ), tensão no resistor ( $v_{R_{Lfp}}$ ), bem como a tensão na carga ( $v_L(t)$ ). Aplicando-se a Lei de Kirchhoff, tem-se:

$$V_{cc} d_p(t) = L_{fp} \frac{di_{Lfp}(t)}{dt} + R_{Lfp} i_{Lfp}(t) + \frac{1}{C_{fp}} \int i_{Lfp}(t) dt \quad (3.54)$$

$$v_L(t) = \frac{1}{C_{fp}} \int i_{Lfp}(t) dt \quad (3.55)$$

Uma vez que a frequência da carga é muito menor que a frequência de comutação, pode-se considerar que a tensão da carga  $v_L(t) = v_{Cfp}(t)$  é constante em um período de comutação. Dessa forma, a tensão da carga pode ser

representada por uma grandeza CC ( $V_L$ ), conforme mostra a equação (3.56) (SANTOS, 2012):

$$\langle v_L(t) \rangle = V_L \quad (3.56)$$

Aplicando perturbações na razão cíclica  $d_p(t)$  e na corrente média  $\langle i_{Lfp}(t) \rangle$  do circuito, estas podem ser reescritas conforme mostrado nas equações (3.57) e (3.58), respectivamente (DIRK, 2003; PÖTTKER, 2000):

$$V_{cc} d_p(t) = D_p V_{cc} + \hat{d}_p(t) V_{cc} \quad (3.57)$$

$$\langle i_{Lfp}(t) \rangle = I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t) \quad (3.58)$$

onde  $D_p V_{cc}$  e  $I_{Lfp}$  representam as componentes CC e  $\hat{d}_p(t)$  e  $\hat{i}_{Lfp}(t)$  representam as componentes oscilantes da razão cíclica e da corrente no indutor de filtragem, respectivamente.

Substituindo (3.56), (3.57) e (3.58) nas equações (3.54) e (3.55), têm-se:

$$V_{cc} D_p + V_{cc} \hat{d}_p(t) = L_{fp} \frac{d(I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t))}{dt} + R_{Lfp} (I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t)) + \frac{1}{C_{fp}} \int (I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t)) dt \quad (3.59)$$

$$v_L(t) = \frac{1}{C_{fp}} \int (I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t)) dt \quad (3.60)$$

O modelo CA do circuito equivalente é mostrado nas equações (3.61) e (3.62).

$$V_{cc} \hat{d}_p(t) = L_{fp} \frac{d \hat{i}_{Lfp}(t)}{dt} + R_{Lfp} \hat{i}_{Lfp}(t) + \frac{1}{C_{fp}} \int \hat{i}_{Lfp}(t) dt \quad (3.61)$$

$$v_L(t) = \frac{1}{C_{fp}} \int \hat{i}_{Lfp}(t) dt \quad (3.62)$$

A função de transferência da planta do circuito mostrado na figura 24 ( $G_{CP}$ ) é definida pela relação entre a tensão de saída pela razão cíclica. Substituindo as equações (3.61) e (3.62), e aplicando *Laplace*, considerando nulas as condições iniciais, tem-se:

$$V_{cc} D_p(s) = L_{fp} I_{Lfp}(s) + R_{Lfp} I_{Lfp}(s) + \frac{1}{sC_{fp}} I_{Lfp}(s) \quad (3.63)$$

$$V_L(s) = \frac{1}{sC_{fp}} I_{Lfp}(s) \quad (3.64)$$

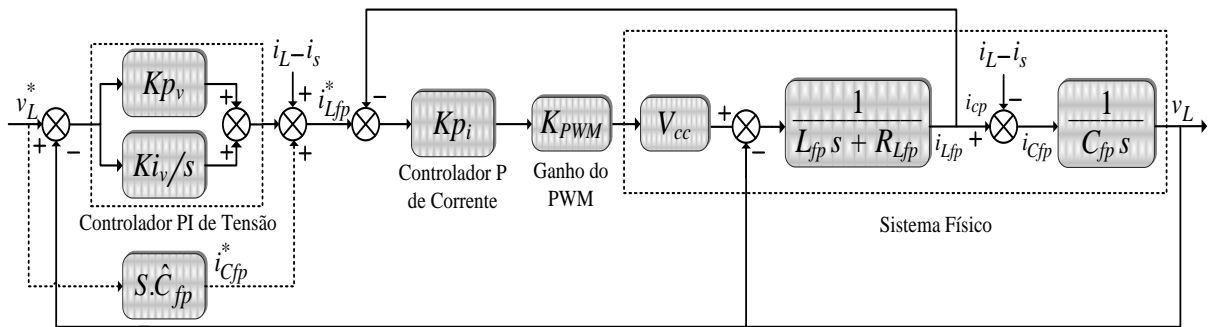
Rearranjando a equação (3.64) e substituindo em (3.63), tem-se:

$$G_{CP} = \frac{V_L(s)}{D_p(s)} = \frac{V_{cc}}{(L_{fp} C_{fp} s^2 + R_{Lfp} C_{fp} s + 1)} \quad (3.65)$$

### 3.3.5 Malha de Controle de Tensão do Conversor Paralelo

A figura 25 mostra o diagrama de blocos da malha de controle de tensão e corrente do conversor paralelo. Esta tem o objetivo de garantir que a tensão na carga seja senoidal, regulada e com baixo conteúdo harmônico. A referência de tensão é obtida pelo sistema PLL. Este controlador tem duas malhas de controle sendo uma malha interna de corrente, que regula a corrente no indutor de filtragem através de um regulador proporcional de corrente ( $P_{ci}$ ), cuja função de transferência é definida por [ $G_{P_{ci}}$ ]. A outra malha externa de tensão responsável por regular a tensão de saída do conversor paralelo através de um regulador proporcional-integral

de tensão ( $PI_{cv}$ ) com função de transferência definida por  $[G_{Pcv}]$ , que fornece referência de corrente  $i_{Lfp}^*$  para a malha interna. Para ajustar os controladores destas malhas, define-se que a malha interna é muito mais rápida que a malha externa afim de o sistema não entrar em instabilidade.



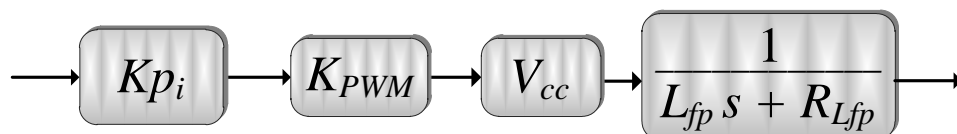
**Figura 25 – Diagrama de blocos das malhas de controle de tensão e corrente do conversor paralelo**

A partir do diagrama de bloco da figura 25, pode-se observar a malha de corrente (malha interna) e a malha de tensão (malha externa). Os controladores  $[G_{Pci}]$  e  $[G_{Pcv}]$  são dados pelas equações (3.66) e (3.67).

$$G_{Pci}(s) = K_p i \quad (3.66)$$

$$G_{Pcv}(s) = \frac{K_{pv}s + K_{iv}}{s} \quad (3.67)$$

A função de transferência de laço aberto de corrente,  $G_{MA_i}(s)$ , é mostrada na figura 26 e na equação (3.68). A função de transferência de corrente em malha fechada,  $G_{MF_i}(s)$ , é dada pela equação (3.69).



**Figura 26 – Diagrama de blocos da malha interna do controle de corrente do conversor paralelo**

$$G_{MA_i}(s) = \frac{Kp_i K_{PWM} V_{cc}}{L_{fjp} s + R_{Lfjp}} \quad (3.68)$$

$$G_{MF_i}(s) = \frac{Kp_i K_{PWM} V_{cc}}{L_{fjp} s + R_{Lfjp} + Kp_i K_{PWM} V_{cc}} \quad (3.69)$$

Do ponto de vista do controle de tensão, a função de transferência de laço aberto é representada na figura 27 e na equação (3.70), considerando nula a perturbação da carga.

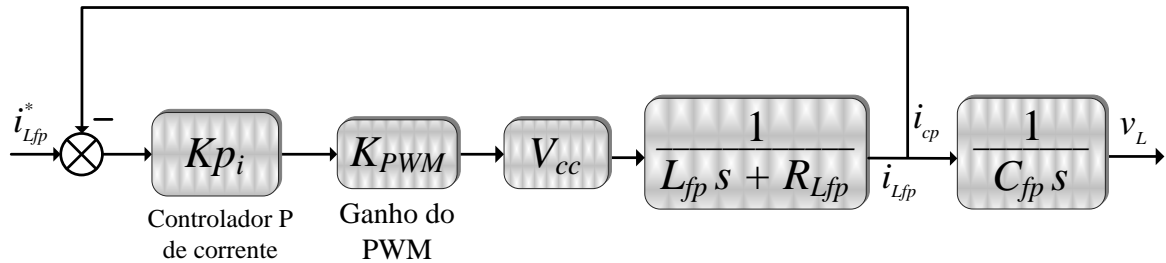


Figura 27 – Diagrama de blocos da malha externa de tensão sem o controlador PI do conversor paralelo

$$G_{MA_{v^*}}(s) = \frac{v_L}{i_{Lfp}^*} = \frac{Kp_i K_{PWM} V_{cc}}{L_{fjp} C_{fjp} s^2 + (C_{fjp} Kp_i K_{PWM} V_{cc} + C_{fjp} R_{Lfjp}) s + 1} \quad (3.70)$$

A função de laço aberto da malha externa de tensão da figura 28 considerando nula a perturbação da carga e o controlador PI da equação (3.67) é dada por:

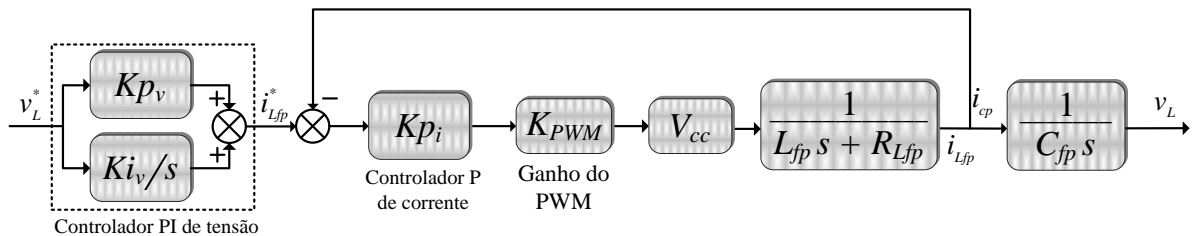


Figura 28 – Diagrama de blocos da malha externa de tensão com o controlador PI do conversor paralelo

$$G_{MA_v}(s) = \frac{Kp_v Kp_i K_{PWM} V_{cc} s + Ki_v Kp_i K_{PWM} V_{cc} s}{L_{fjp} C_{fjp} s^3 + [C_{fjp} (Kp_i K_{PWM} V_{cc} + R_{Lfjp})] s^2 + s} \quad (3.71)$$

### 3.4 FLUXO DE POTÊNCIA NA UPS

As potências aparentes dos conversores série e paralelo,  $S_p$  e  $S_s$ , respectivamente, dependem diretamente da relação entre os valores eficazes das tensões da UPS ( $V_L / V_S$ ), do fator de deslocamento ( $\cos \varphi_1$ ), da DHT da corrente de carga  $i_L$  ( $DHT_{i_L}$ ) e do fator de carga do banco de baterias ( $k_b = P_b / P_L$ ), onde  $P_b$  é a potência ativa para carregar as baterias e  $P_L$  é a potência ativa consumida pela carga.

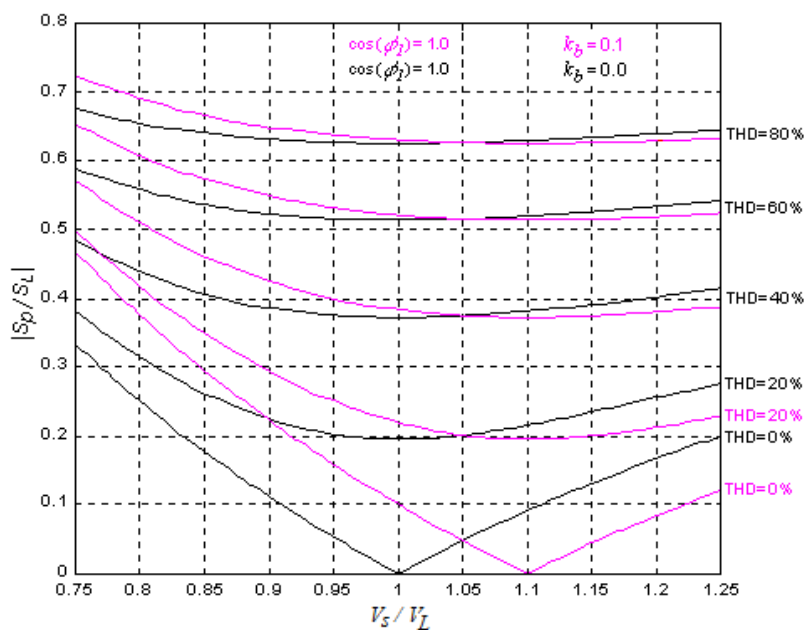
Assumindo que as tensões de entrada e saída, assim como a corrente de entrada da UPS são grandezas senoidais, em regime permanente, as potências aparentes dos conversores série e paralelo, normalizadas em função da potência aparente da carga são dadas pelas equações (3.72) e (3.73) (SILVA, 2001), respectivamente.

$$\left| \frac{S_s}{S_L} \right| = \frac{\cos \varphi_1 \sqrt{[(1+k_b)(1-V_L/V_S)]^2}}{\sqrt{1+TDH_{i_L}^2}} \quad (3.72)$$

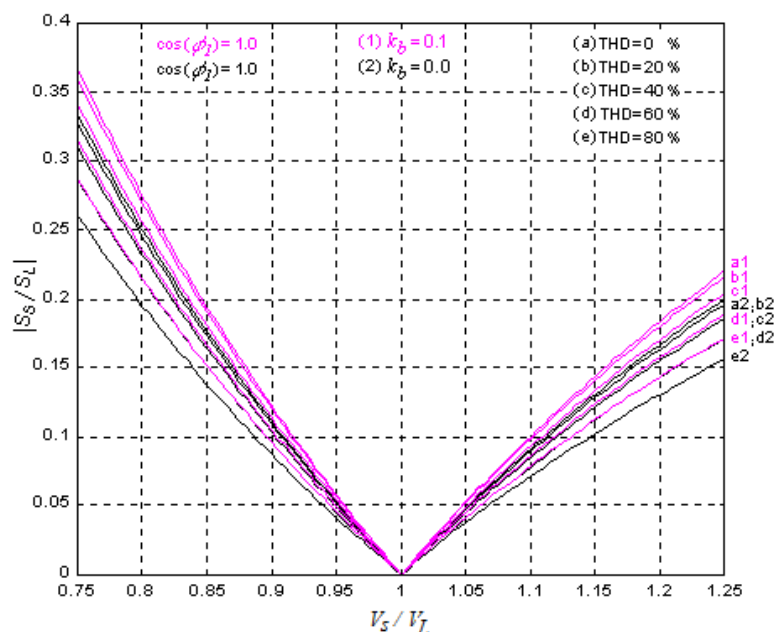
$$\left| \frac{S_p}{S_L} \right| = \sqrt{\frac{\cos^2 \varphi_1 \frac{V_L}{V_S} (1+k_b) \left( \frac{V_L}{V_S} (1+k_b) - 2 \right)}{1+TDH_{i_L}^2}} + 1 \quad (3.73)$$

Considerando ( $\cos \varphi_1$ ) igual ao valor unitário, as potências normalizadas dos conversores série e paralelo, para dois valores distintos de  $k_b$ , são mostrados nas figuras 29 (a) e 29 (b), as quais são traçadas em função de  $V_S / V_L$  e da  $DHT_{i_L}$ . Analisando a figura 29 percebe-se que o sentido do fluxo de potência da UPS depende da diferença de tensão entre as entrada e a saída da UPS, bem como do fator de carga  $k_b$ .





(a)



(b)

Figura 29 – Potências normalizadas:  $k_b=0$  e  $k_b=0.1$  ( $\cos \varphi_1=1$ ): (a) Conversor paralelo

$|S_p/S_L|$ ; Conversor série  $|S_s/S_L|$ .

As figuras 30, 31, 32 e 33 mostram o sentido do fluxo das potências ativas instantâneas na UPS, onde a potência da rede, do conversor série, do conversor paralelo e da carga são representadas por  $p_s$ ,  $p_{cs}$ ,  $p_{cp}$  e  $p_L$ , respectivamente, onde  $p_o = p_L - p_{cp} = p_s - p_{cs}$ .

Para  $k_b$  igual a zero, quando  $V_S$  é maior que  $V_L$ , a potência ativa flui da rede para o barramento CC via conversor série e do barramento CC para a carga via conversor paralelo, como mostrado na figura 30.

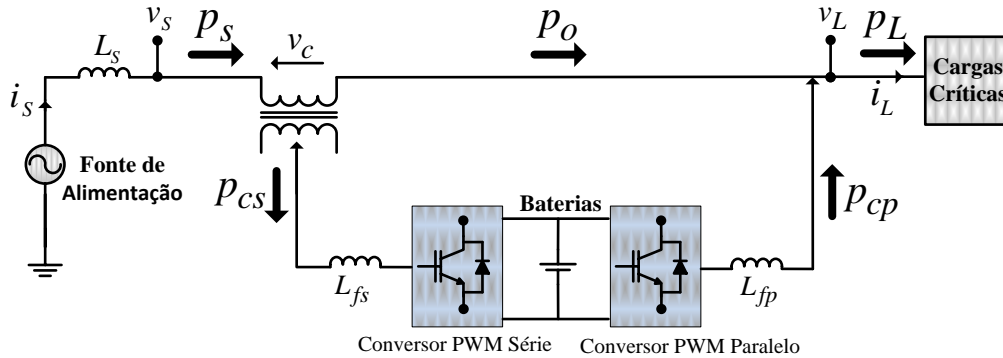


Figura 30 – Fluxo de potência:  $V_S > V_L$  .e  $k_b = 0$

Quando  $V_S$  é menor que  $V_L$ , a potência ativa flui da carga para o barramento CC via conversor paralelo e do barramento CC para a rede via conversor série, como mostrado na figura 31.

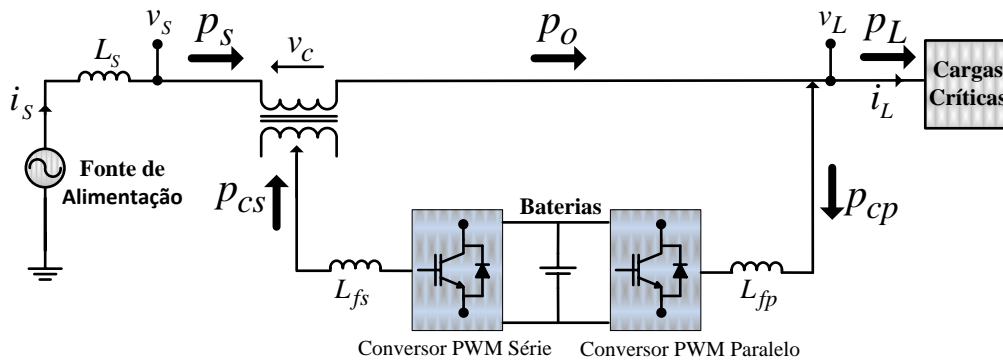


Figura 31 – Fluxo de potência:  $V_S < V_L$  .e  $k_b = 0$

Portanto, para realizar o equilíbrio da potência ativa no barramento CC, a amplitude da corrente de referência do conversor série deve ser controlada, a qual é realizada por meio de um controlador PI adicional no barramento CC, como mostrado na figura 15. Num caso particular, quando  $V_S$  é igual a  $V_L$  e a UPS está alimentando uma carga puramente resistiva, não existe potência ativa fluindo

através dos conversores série e paralelo, ou seja,  $p_s = p_o = p_L$ , como mostrado na figura 32.

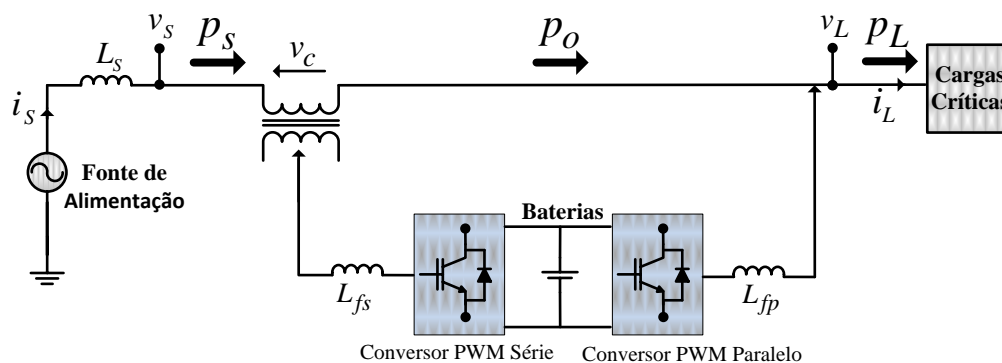


Figura 32 – Fluxo de potência:  $V_S = V_L$  e  $k_b = 0$

Por outro lado, a potência ativa relacionada com a carga do banco de baterias, bem com as perdas de comutação de ambos os conversores e dos elementos passivos de filtragem, é absorvida pelo conversor paralelo. Por exemplo, observando as figuras 29 (a) e 29 (b), quando  $V_L / V_S = 1$ ,  $\cos \varphi_1 = 1$ ,  $DHT_{i_L} = 0$ , e  $k_b = 0.1$ , as potências normalizadas  $|S_P / S_L| = 0.1$  e  $|S_S / S_L| = 0$ . Assim, para esta condição, o comportamento do fluxo de potência da UPS é mostrado na figura 33.

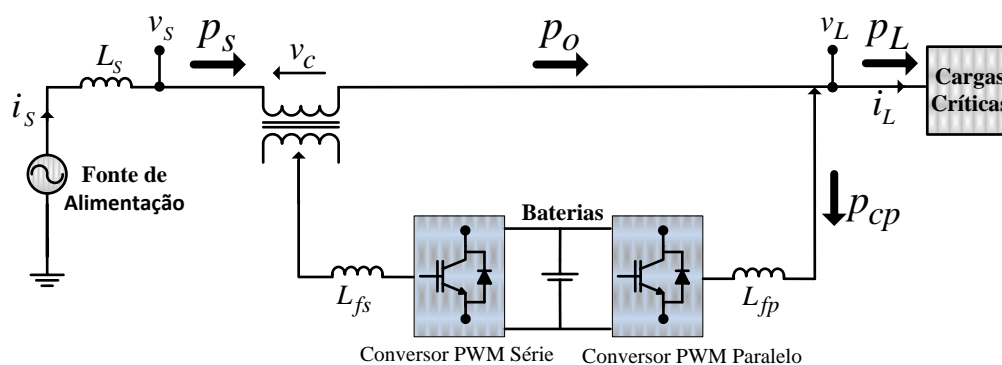


Figura 33 – Fluxo de potência:  $V_S = V_L$  e  $k_b = 0.1$

Mesmo que no modo *Standby* de operação da UPS o conversor paralelo opere com potência muito inferior à nominal da carga, como pode ser visto na figura 29(a), este deve ser dimensionado considerando a potência nominal, pelo fato do

mesmo ter que fornecer a potência total à carga no modo de operação *Backup*. Já para o dimensionamento do conversor série é necessário considerar, principalmente, os distúrbios como afundamentos e elevações de tensão existentes na rede que se deseja compensar. Durante estes distúrbios, uma componente fundamental de tensão aparece sobre os terminais do transformador de acoplamento série, a qual corresponde à diferença entre as componentes fundamentais das tensões de entrada e saída da UPS. Pelo fato da componente fundamental da corrente da rede compensada fluir através do mesmo transformador, resultará em uma potência média que será absorvida ou fornecida pelo conversor série.

Dependendo das amplitudes das variações da tensão de entrada que se deseja compensar, o conversor série pode ser dimensionado para uma potência entre 20 a 25% da potência nominal da carga (SILVA, 2001). Isto representa um atrativo quando comparado com os sistemas UPS *on-line*.

### 3.5 CONCLUSÃO

Este capítulo apresentou a topologia de UPS monofásica utilizada no condicionamento ativo de potência série e paralela. Também foi apresentado o algoritmo utilizado para obtenção da referência de corrente de compensação, que é baseado no sistema de eixo de referência síncrona (algoritmo SRF), e o sistema PLL responsável por gerar a referência de tensão para o conversor paralelo bem como as coordenadas do vetor unitário síncrono utilizadas pelo algoritmo SRF. Também foi apresentado o modelo matemático da topologia da UPS, a descrição das malhas de controle de compensação de corrente e tensão, bem como da malha de controle do barramento CC a fim servir como base para o projeto dos controladores dos conversores série e paralelo, ou seja, controlador PI de corrente do conversor série, controlador PI de tensão do barramento e os controladores PI (tensão) e P (corrente) do conversor paralelo de tensão. Por fim, foram apresentadas as curvas normalizadas que descrevem o fluxo de energia através dos conversores série e paralelo da UPS.

## 4 PROJETO DOS CONTROLADORES

### 4.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta a metodologia de projeto dos controladores P (proporcional) e PI (Proporcional-Integral). Também é apresentado o dimensionamento dos controladores que serão utilizados nas malhas de corrente e tensão da UPS, bem como o método utilizado para a discretização dos controladores.

### 4.2 METODOLOGIA DE PROJETO DO CONTROLADOR PI

Para projetar os controladores serão considerados como parâmetros à margem de fase do sistema compensado  $\varphi_d$ , bem como a frequência de cruzamento do sistema compensado  $\omega_c$ . A Estabilidade e o amortecimento do sistema está relacionado com a margem de fase  $\varphi_d$ , ou seja, quanto maior  $\varphi_d$  mais amortecido será o sistema (SILVA, 2001). Para sistemas comutados a margem de fase deve ficar entre 45° e 90° (BARBI, I., 2001). A função de transferência do controlador PI é mostrada na equação (4.1), onde existe a presença de um zero e um pólo na origem.

$$G_c(s) = K_p + \frac{Ki}{s} = \frac{K_p s + K_i}{s} \quad (4.1)$$

O tempo de resposta do sistema é dependente da frequência de cruzamento  $\omega_c$ , para que o tempo de resposta seja menor, maior será  $\omega_c$ . A limitação de  $\omega_c$  está justamente na frequência de comutação para que as ondulações impostas pela

comutação não interfiram no controle, portanto é recomendado que  $\omega_c$  fique entre um quarto e um décimo da frequência de chaveamento (SILVA et al., 2002).

A partir da função de transferência do controlador  $G_c(s)$  (equação (4.1)), mudando do plano  $s$  para o plano imaginário, tem-se:

$$G_c(j\omega_c) = \frac{Kp(j\omega_c) + Ki}{j\omega_c} \quad (4.2)$$

Rearranjando tem-se:

$$G_c(j\omega_c) = Kp - \frac{jKi}{\omega_c} \quad (4.3)$$

$$\text{tg}\phi_c = -\frac{Ki}{Kp.\omega_c} \quad (4.4)$$

A figura 34 mostra o plano complexo referente a equação (4.4), onde são mostradas suas componentes real e imaginária.

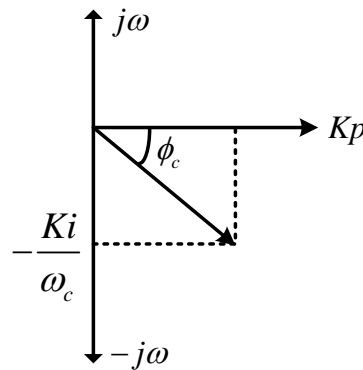


Figura 34 – Plano complexo com as coordenadas  $G_c$

Rearranjando tem-se:

$$-Ki = \text{tg}\phi_c Kp.\omega_c \quad (4.5)$$

Considerando o módulo da fase do controlador como  $M_c$ , rearranjando da equação (4.3), temos:

$$|G_c(s)|_{\omega=\omega_c} = Mc = \sqrt{Kp^2 + \left(\frac{Ki}{\omega_c}\right)^2} \quad (4.6)$$

Rearranjando, tem-se:

$$Kp^2 = \frac{Mc^2 \omega_c^2 - Ki^2}{\omega_c^2} \quad (4.7)$$

Substituindo a equação (4.5) em (4.7), tem-se:

$$Mc^2 = Kp^2 + Kp^2 \operatorname{tg}^2 \phi_c \quad (4.8)$$

Sabendo a fase do controlador PI na frequência de cruzamento através da equação (4.1) e (4.8), os ganhos  $Kp$  e  $Ki$  podem ser escritos por (4.9) e (4.10), respectivamente.

$$Kp = Mc \cdot \cos \phi_c \quad (4.9)$$

$$Ki = -Kp \cdot \omega_c \cdot \operatorname{tg} \phi_c \quad (4.10)$$

Onde  $Mc$  é o módulo do controlador da frequência de cruzamento desejada  $\omega_c$  e a margem de fase  $\phi_c$  que o controlador deve possuir na frequência de cruzamento desejada  $\omega_c$  mostrado na equação (4.11) afim que o sistema fique com a margem de fase desejada.

$$\phi_c = \phi_d - (\phi_g + 180^\circ) \quad (4.11)$$

#### 4.3 DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DO CONVERSOR SÉRIE DE CORRENTE

A tabela 7 mostra as especificações adotadas para o projeto do controlador PI, utilizado na malha de corrente do conversor série.

<b>Tabela 7 – Especificações para projeto do controlador PI de corrente do conversor série</b>	
<i>Frequência de comutação do conversor série</i>	$f_s = 20kHz$
<i>Indutância de acoplamento</i>	$L_{fs} = 3,14mH$
<i>Resistência série do indutor de acoplamento</i>	$R_{fs} = 0,38\Omega$
<i>Indutância total de dispersão do transformador</i>	$L_{dt} = 381,796\mu H$
<i>Resistência série total do enrolamento do transformador</i>	$R_{dt} = 0,1439\Omega$
<i>Tensão do barramento CC</i>	$V_{cc} = 300V$
<i>Ganho do modulador PWM</i>	$K_{PWM} = 5,333 \times 10^{-4}$
<i>Margem de fase desejada</i>	$MF_{d_s} = 80,5^\circ$
<i>Frequência de cruzamento desejada</i>	$\omega_c = 2 \cdot \pi \cdot f_s / 13$

A partir da figura 22 que representa a função de transferência da planta física do conversor série mostrada na equação (3.24), e a equação do sistema em malha aberta dada em (3.26). A função de transferência do controlador é dada em (3.25).

Para determinar o ganho do controlador  $Kp_s$  e  $Ki_s$ , utiliza-se a metodologia de projeto apresentada e a função de transferência em malha aberta, a qual é utilizada no diagrama de Bode para mostrar a resposta em frequência do controlador do conversor. Primeiramente é apresentado o diagrama de Bode da planta do sistema (equação 3.24) na figura 35.



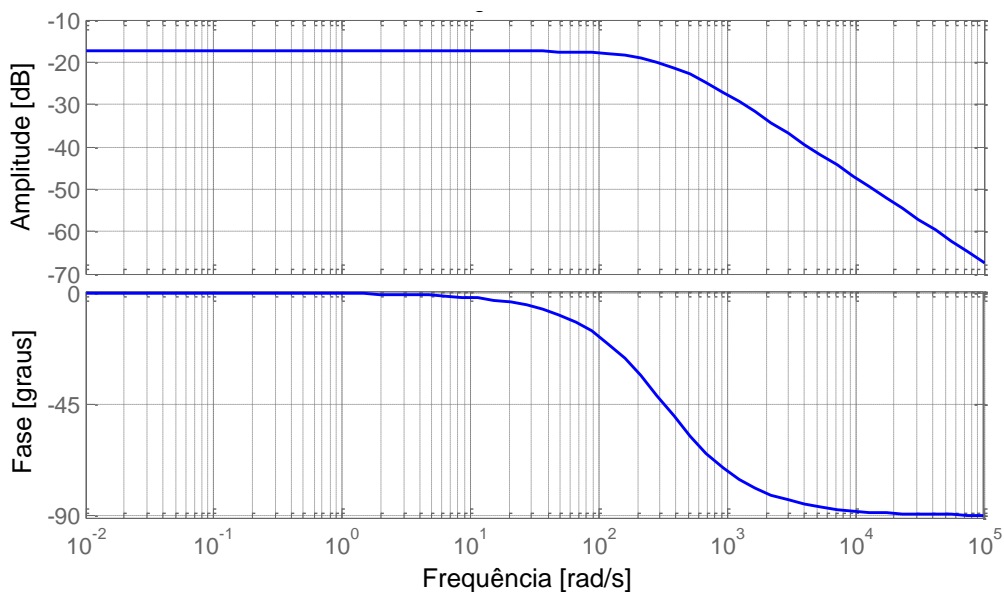


Figura 35 – Resposta em frequência para  $G_{CS}(s)$

A função de transferência do sistema com o ganho do modulador, do controlador e da planta física é dado em (3.27) e a resposta em frequência apresentada na figura 36. A partir da resposta em frequência pode-se observar o ganho em 0 dB e que a frequência de corte está em torno de  $9,66 \times 10^3$  rad/s, o que mostra que a frequência de cruzamento do sistema compensado  $\omega_c$  e a margem de fase está em  $80,5^\circ$  estão entre os limites indicado na tabela 7, comprovando que o controlador PI atende as especificações adotadas.

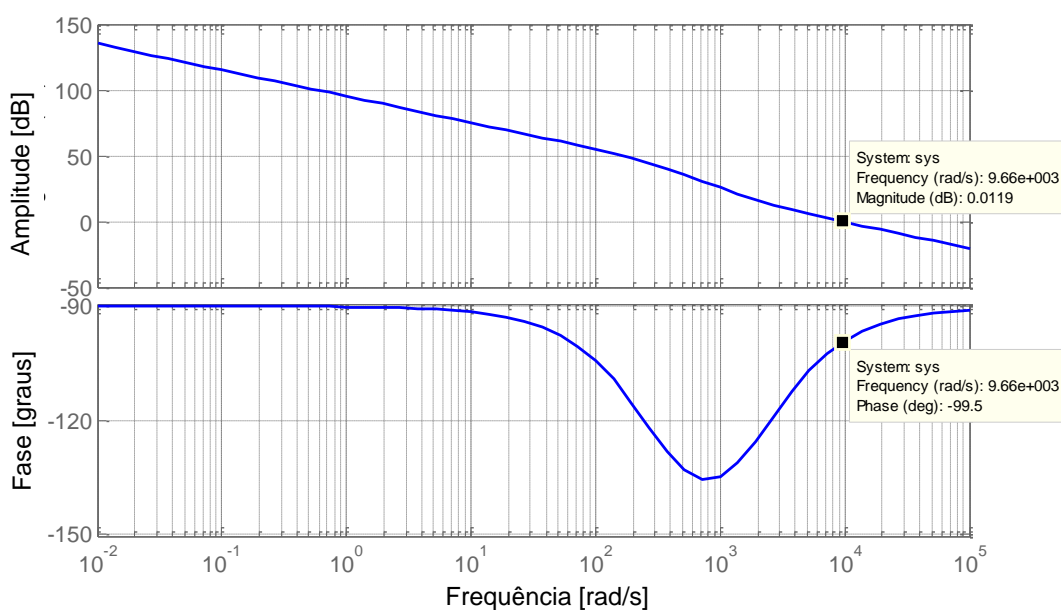
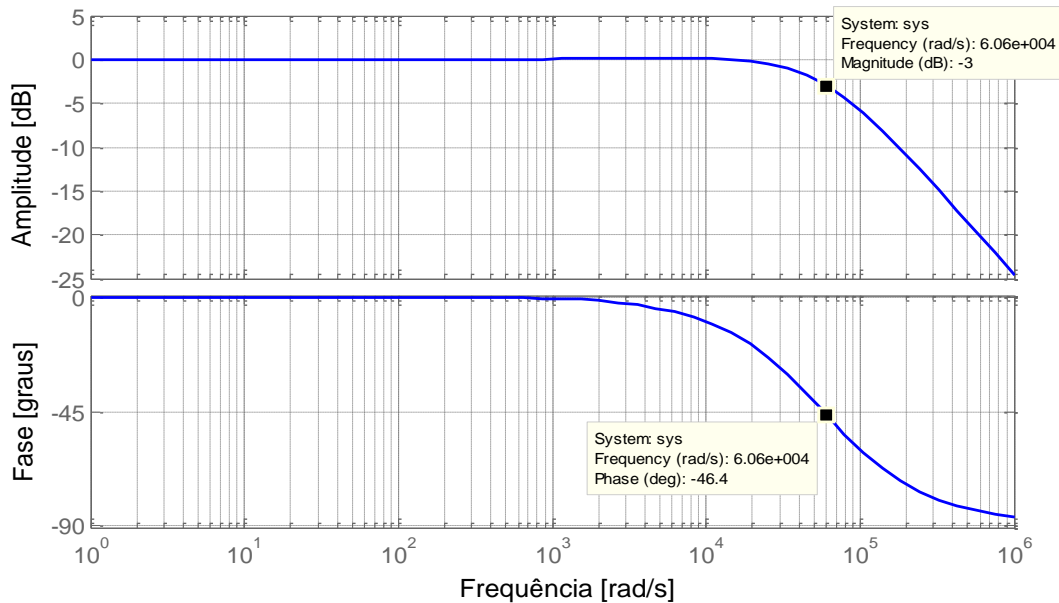


Figura 36 – Resposta em frequência para  $G_{MAS_i}(s)$

A fim de comprovar a resposta dinâmica do controlador foi traçada a resposta em frequência em malha fechada. Pode-se observar o ganho em  $-3 \text{ dB}$  a frequência de corte está em  $6,06 \times 10^4 \text{ rad/s}$ .



**Figura 37 – Resposta em frequência para  $G_{MFs_i}(s)$**

A tabela 8 mostra os ganhos obtidos através da metodologia de projeto adotada para o controlador PI da malha de corrente do conversor série.

**Tabela 8 – Ganhos do controlador PI da malha de corrente do conversor série**

$$Kp_s = 219,590\Omega$$

$$Ki_s = 424230\Omega / s$$

#### 4.4 DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DO BARRAMENTO CC

Para o projeto do controlador PI do barramento CC são consideradas a margem de fase e a frequência de cruzamento, para atender os parâmetros.

O procedimento mostrado no item 4.2 bem como o equacionamento utilizado para determinação dos parâmetros do controlador desta malha são os mesmos utilizados da malha de corrente, diferindo apenas a função de transferência da

planta do barramento CC. A tabela 9 mostra as especificações para o projeto do controlador.

Tabela 9 – Especificações para projeto dos controlador PI de tensão do barramento CC	
Ondulação do Barramento CC	$f_s = 120\text{Hz}$
Tensão do barramento CC	$V_{cc} = 300\text{V}$
Capacitor de filtragem	$C_{cc} = 940\mu\text{H}$
Margem de fase desejada	$MF_{d_s} = 87,5^\circ$
Frequência de cruzamento desejada	$\omega_c = 2.\pi.f_s / 18$

A figura 38 mostra a resposta em frequência da planta do barramento CC, observa-se que o ângulo da fase desta planta na frequência  $\omega_c$ , sendo  $\varphi_{c_{cc}} = -90^\circ$ .

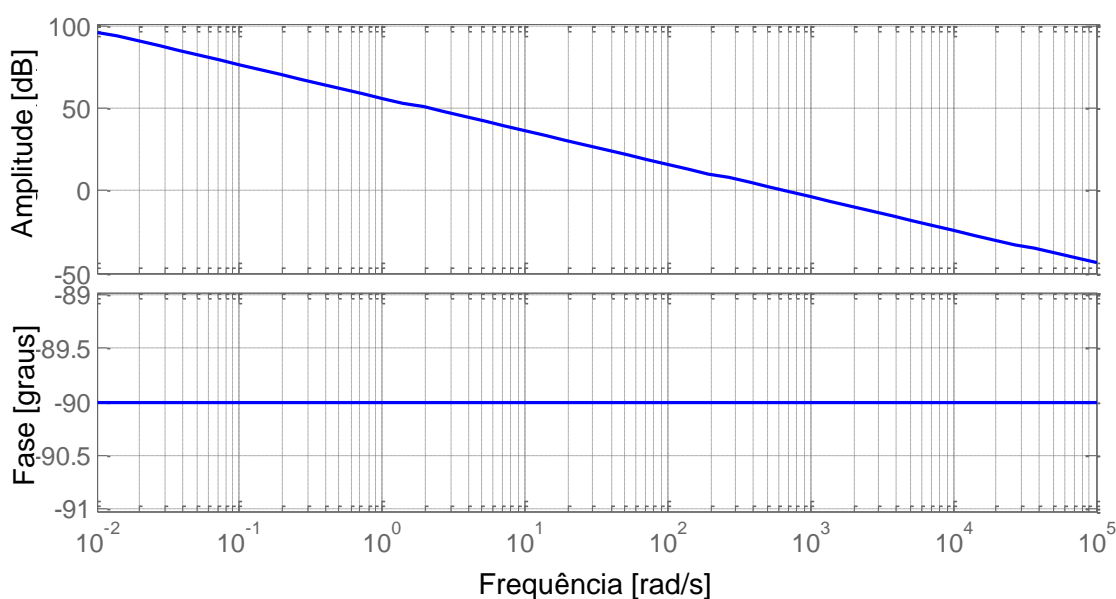


Figura 38 – Resposta em frequência para  $G_p(s)$

Através o diagrama de Bode mostrado na figura 39, observa-se que o sistema compensado apresenta ângulo de fase de  $-92,5^\circ$  em  $\omega_c$ , ou seja, o sistema teve um atraso de fase de  $2,5^\circ$ . O ramo de realimentação apresenta um ganho unitário. Com o sistema compensado o ganho ficou em  $0\text{ dB}$  e sua frequência de corte está em  $42\text{ rad/s}$ . Assim o projeto atende as especificações adotadas.

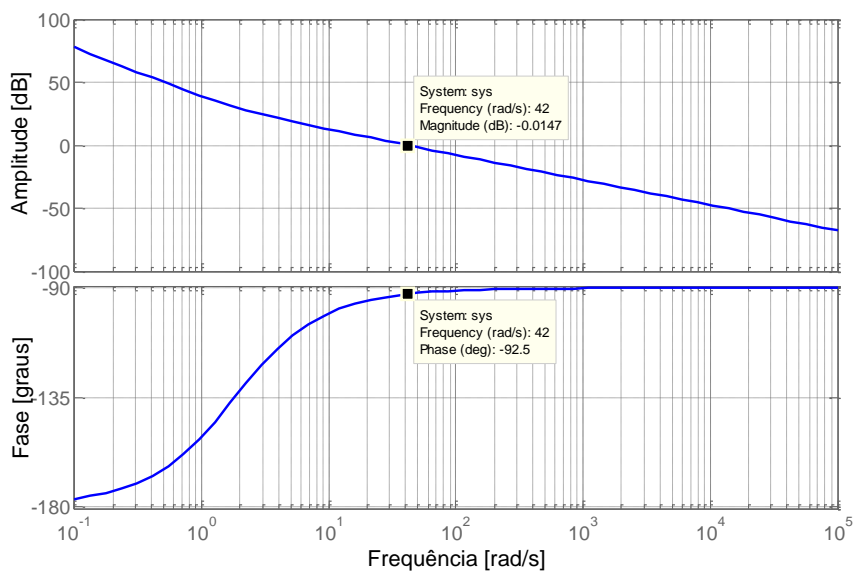


Figura 39 – Resposta em frequência para  $G_{MA_{cc}}(s)$

Na figura 40 é mostrado a resposta em frequência do sistema em malha fechada. Observa-se o ganho em -3 dB e frequência de corte está em 43,1 rad/s, representando a resposta dinâmica do sistema.

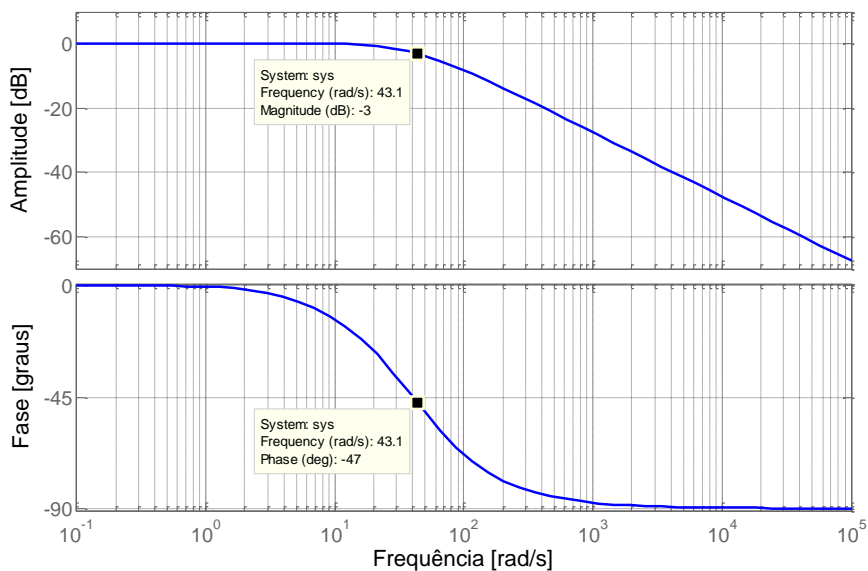


Figura 40 – Resposta em frequência para  $G_{MF_{cc}}(s)$

A tabela 10 mostra os ganhos obtidos através da metodologia adotada do controlador PI da malha de tensão do barramento CC.

**Tabela 10 – Ganhos do controlador PI da malha de tensão do barramento CC**

$$Kp_{vcc} = 0,0657\Omega$$

$$Ki_{vcc} = 0,1202\Omega / s$$

#### 4.5 DIMENSIONAMENTO DO CONTROLADOR DO CONVERSOR PARALELO DE TENSÃO – FAP

A tabela 11 mostra as especificações adotadas para o projeto dos controladores PI utilizadas na malha de controle. No conversor paralelo têm-se duas malhas de controle sendo uma malha de corrente interna e outra malha de tensão externa mostrados na figura 25.

A fim de obter os ganhos  $Kp_i$ ,  $Kp_v$  e  $Ki_v$  dos controladores referente às equações (3.66) e (3.67), a metodologia empregada de projeto foi utilizada conforme o item 4.2, funções de transferência em malha aberta, bem como o diagrama de Bode empregado para demonstrar a resposta em frequência dos controladores.

**Tabela 11 – Especificações para projeto dos controladores PI do conversor paralelo**

<i>Frequência de chaveamento do conversor paralelo</i>	$f_s = 20kHz$
<i>Indutância de acoplamento</i>	$L_{fs} = 354\mu H$
<i>Resistência série do indutor de acoplamento</i>	$R_{fs} = 0,12\Omega$
<i>Tensão do barramento CC</i>	$V_{cc} = 300V$
<i>Ganho do modulador PWM</i>	$K_{PWM} = 5,333 \times 10^{-4}$
<i>Margem de fase desejada da malha interna de corrente</i>	$MF_{d_{pi}} = 75^\circ$
<i>Frequência de cruzamento desejada da malha interna de corrente</i>	$\omega_{c_{pi}} = 2 \cdot \pi \cdot f_s / 8$
<i>Margem de fase desejada da malha externa de tensão</i>	$MF_{d_{pv}} = 45^\circ$
<i>Frequência de cruzamento desejada da malha externa de tensão</i>	$\omega_{c_{pv}} = 0,16\omega_{c_{pi}}$

Conforme a equação da planta física do sistema mostrado em (3.39)  $G_{C_{pi}}(s)$  para a malha interna de corrente, mostrado na figura 41. Através deste diagrama, verifica-se que o ângulo de fase do sistema está em  $-41,2^\circ$  em 0 dB.

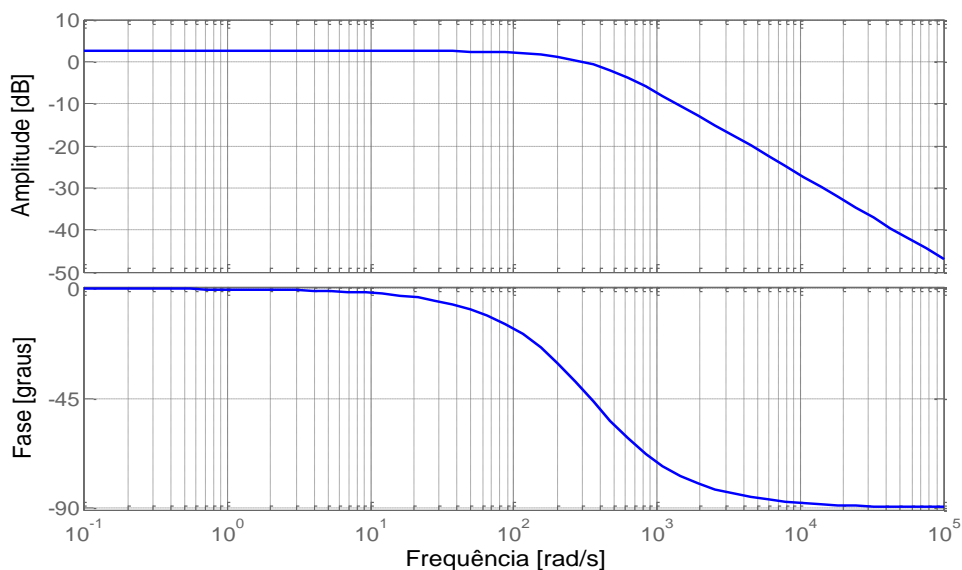


Figura 41 – Resposta em frequência para  $G_{CP_i}(s)$

O diagrama de bode que representa a resposta em frequência do sistema compensado  $G_{MA_i}$  em malha aberta dado por (3.68) é apresentado na figura 42. Pode-se observar que a planta teve um atraso de fase de  $48,6^\circ$  na frequência de cruzamento  $\omega_c$  em 0 dB.

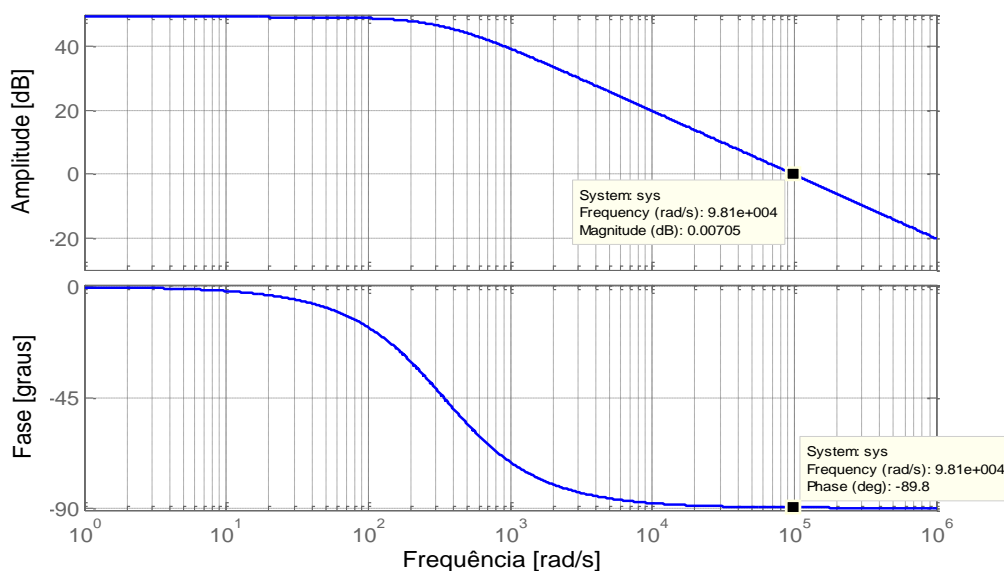


Figura 42 – Resposta em frequência para  $G_{MA_i}(s)$

A figura 43 apresenta a resposta em frequência do sistema em malha fechada  $G_{MF_i}$  da equação (3.69).

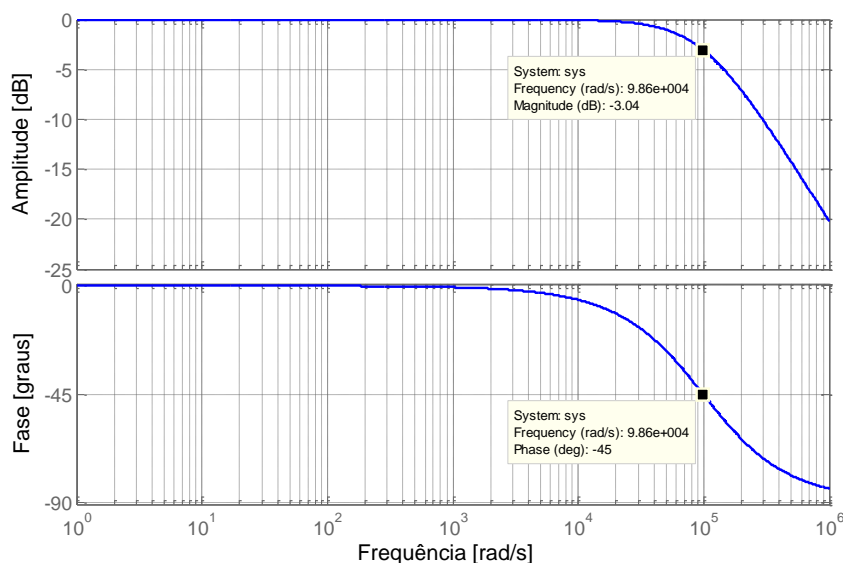


Figura 43 – Resposta em frequência para  $G_{MF_i}(s)$

Considerando que, com o ganho do controlador da malha de corrente ajustado, bem como realizado função de transferência em malha fechada e apresentando o diagrama de Bode do sistema, utiliza-se como base para o cálculo dos ganhos do controlador PI da malha externa de tensão conforme a figura 27. A seguir o diagrama de Bode é descrito na figura 44 como a planta do sistema  $G_{MA_v^*}(s)$  com ângulo de fase de  $-69,8^\circ$  na frequência de cruzamento  $\omega_c$  em  $0\text{ dB}$ .

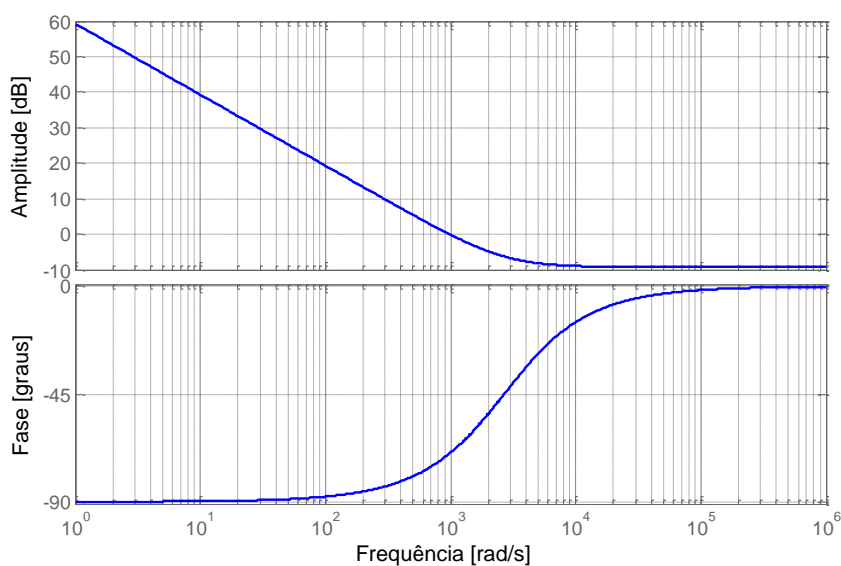


Figura 44 – Resposta em frequência para  $G_{MA_v^*}(s)$

A resposta do sistema compensado está na figura 45, pode-se observar que a frequência de cruzamento  $\omega_c$  está em  $2,5 \times 10^3$  rad/s e o sistema teve um atraso na fase de  $65,2^\circ$ , mudando para  $135^\circ$  em 0 dB conforme especificado.

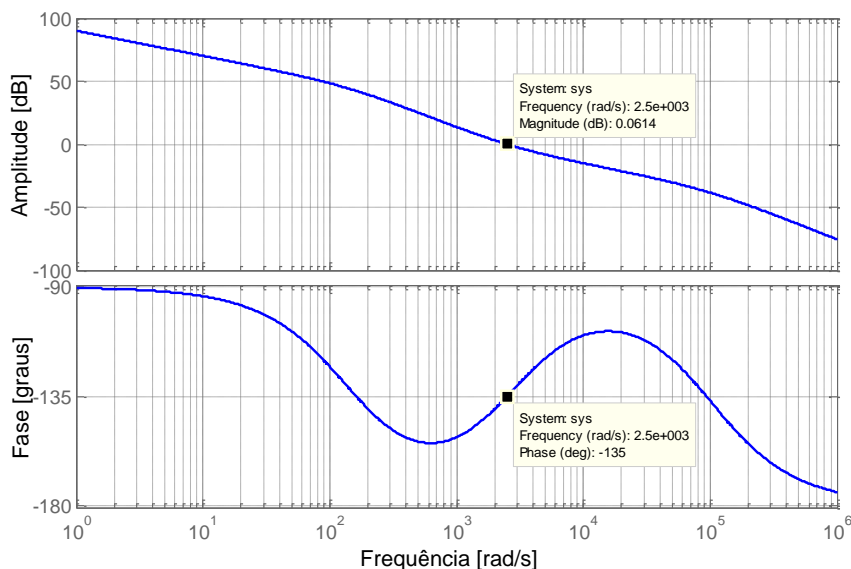


Figura 45 – Resposta em frequência para  $G_{MA_v}(s)$

Observa-se que o ganho com -3 dB e a frequência de cruzamento  $\omega_c$  de  $9,96 \times 10^4$  rad/s atende os parâmetros de projeto especificados. Conforme a resposta em frequência do diagrama de Bode em malha fechada a fim de comprovar a resposta dinâmica do sistema a figura 46 é apresentada.

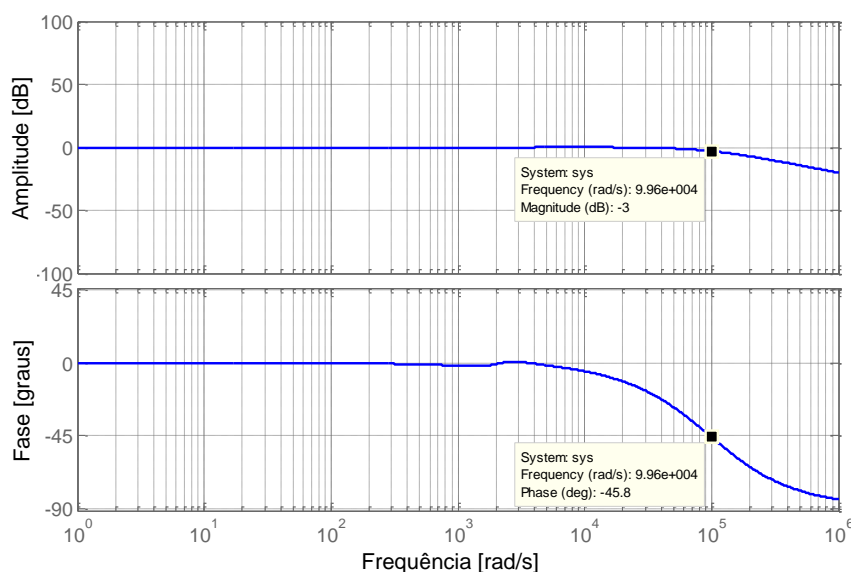


Figura 46 – Resposta em frequência para  $G_{MF_v}(s)$



Na tabela 12 tem-se os ganhos utilizados nos controladores PI da malha interna de corrente e da malha externa de tensão do conversor paralelo.

**Tabela 12 – Ganhos dos controladores PI do conversor paralelo**

---

$Kp_i = 34,762\Omega$
$Kp_v = 0,3454\Omega$
$Ki_v = 924,6388\Omega / s$

---

#### 4.6 DISCRETIZAÇÃO DO CONTROLADOR PI

Seja o controlador Proporcional-Integral contínuo representado pela sua função de transferência dada pela equação (4.12).

$$C_{PI}(s) = K_P \cdot \frac{(s + \omega_Z)}{s} \quad (4.12)$$

É realizada através do método da transformação de Tustin (Bilinear ou Trapezoidal) a discretização do controlador PI, a qual consiste em substituir a variável complexa 's' pelo equivalente no domínio 'z', dado em:

$$s = \frac{2}{T_s} \cdot \frac{z - 1}{z + 1} \quad (4.13)$$

Onde,  $T_s$  representa o período de amostragem. Assim, realizando a substituição de 's' dada pela equação (4.13) em (4.12) e deixando 'z' em evidência temos a equação (4.14).

$$C_{PI}(z) = \frac{K_P}{2} \cdot \left( \frac{z(2 + \omega_Z \cdot T_s) + (\omega_Z \cdot T_s - 2)}{(z - 1)} \right) \quad (4.14)$$

A equação do filtro digital que representa o controlador PI, é dada por (4.15).

$$C_{PI}(z) = \frac{K_P}{2} \cdot \left( \frac{B \cdot z + A}{z - 1} \right) \quad (4.15)$$

onde B e A são representadas por:

$$B = 2 + \omega_z \cdot T_{sa} \quad (4.16)$$

$$A = \omega_z \cdot T_s - 2 \quad (4.17)$$

A partir da equação (4.18), é possível obter o filtro no DSP através da equação a diferenças, multiplicando na equação  $z^{-1} / z^{-1}$ .

$$C_{PI}(z) = \frac{u(z)}{e(z)} = \frac{K_P}{2} \cdot \left( \frac{B + A \cdot z^{-1}}{1 - z^{-1}} \right) \quad (4.18)$$

Assim, aplicando a transformada-z inversa em (4.18) tem-se (4.19).

$$u(k) = \frac{K_P}{2} \cdot [B \cdot e(k) + A \cdot e(k-1)] + u(k-1) \quad (4.19)$$

Onde  $k$  representa a amostra atual de um sinal, e  $(k-1)$  a amostra com um período de atraso.

## 4.7 CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentada a metodologia para projetar os ganhos dos controladores Proporcional-Integral empregados nos conversores série e paralelo. No conversor série foi utilizado um controlador PI na malha de corrente. Já no

conversor paralelo de tensão foi empregado um controlador P na malha interna de corrente e um outro controlador PI na malha externa de tensão.

Esta metodologia permite adotar como parâmetros de projeto a margem de fase ( $\phi_d$ ) e a frequência de cruzamento ( $\omega_c$ ) do sistema compensado. Foi empregada esta metodologia no Software *Matlab*<sup>®</sup> para analisar e obter as respostas em frequência do sistema.

A partir da metodologia empregada, foram obtidos através da resposta em frequência dos sistemas bem como dos parâmetros especificados no projeto dos controladores, os ganhos, que atenderam as especificações do projeto.

A equação a diferenças dos controladores PI foi apresentada. Foi utilizada a equação a diferenças na implementação das malhas de controle de tensão e corrente da UPS, ambas implementadas em linguagem C no processador digital de sinal (DSP - Digital Signal Processing). A taxa de amostragem ( $t_a$ ) utilizada foi de 60ks/s e sincronizada com a frequência de chaveamento, assim têm-se  $T_s = 16,666\mu s$ .

## 5 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

### 5.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados das simulações numéricas da UPS *Line-interactive* monofásica, utilizando a ferramenta computacional PSIM 9.0<sup>®</sup>, a qual é adequada para realizar simulações de circuitos que envolvem eletrônica de potência empregando controle digital.

Foram implementados, além da estrutura de potência da UPS, os controladores das malhas de tensão e corrente do conversor paralelo, os controladores da malha de corrente do conversor série, o controlador de tensão do barramento CC, o algoritmo SRF para geração da corrente de referência do conversor série, o sistema PLL responsável pela geração da referência de tensão do conversor paralelo e das coordenadas do vetor unitário utilizada no algoritmo SRF. Todos os circuitos de controle foram discretizados de forma a tornar as simulações mais próximas possíveis dos resultados obtidos na prática utilizando DSP. Desta forma, foram considerados os atrasos nas aquisições das tensões e correntes introduzidos pelos filtros *anti-aliasing* da placa de condicionamento de sinais, o tempo morto existente nos *drivers* das chaves de potência e o atraso referente ao tempo de atuação dos conversores PWM.

As simulações da UPS operando nos modos *standby* e *backup*, foram realizadas levando-se em consideração a utilização de uma carga não linear, constituída por um retificador em ponte completa a diodos alimentando uma carga RL.

No modo *standby*, os comportamentos estático e dinâmico da UPS são verificados mediante a presença de distúrbios da rede elétrica, tais como harmônicos, elevações e afundamentos de tensão, bem como considerando degraus de carga.

O comportamento da UPS mediante as transições do modo *standby* para *backup*, e vice-versa, são também apresentados.

## 5.2 DESCRIÇÃO DO SISTEMA UPS SIMULADO

O diagrama de blocos que representa a UPS *Line-interactive* monofásica está representado na figura 47, a qual suas características estão descritas na tabela 13:

**Tabela 13 – Parâmetros utilizados nas simulações**

<i>Potência nominal da carga</i>	1kVA
<i>Valor eficaz da tensão de entrada</i>	$V_s = 127V$
<i>Valor eficaz da tensão de entrada do 5º e 7º harmônicos</i>	$V_5 = 19V, V_7 = 12V$
<i>Valor eficaz da tensão de saída</i>	$V_L = 127V$
<i>Tensão do barramento CC</i>	$V_{cc} = 300V$
<i>Frequência da rede de alimentação</i>	$f_s = 60Hz$
<i>Frequência de chaveamento dos conversores PWM série e paralelo</i>	$f_c = 20kHz$
<i>Pico da triangular do modulador PWM</i>	$P_{PWM} = 3750$
<i>Frequência digital de amostragem</i>	$f_a = 60kHz$
<i>Frequência de corte do filtro anti-aliasing</i>	$f_{caa} = 10kHz$
<i>Indutância do Alimentador</i>	$L_s = 10\mu H$
<i>Resistência do Alimentador</i>	$R_s = 3,76m\Omega$
<i>Relação de transformação do transformador de acoplamento série</i>	$n = 1$
<i>Resistência total de dispersão do transformador de acoplamento série</i>	$R_{dt} = 0,1439\Omega$
<i>Indutância de dispersão do transformador de acoplamento série</i>	$L_{dt} = 381,796\mu H$
<i>Indutância do conversor série</i>	$L_{fs} = 3,14mH$
<i>Resistência do indutor série</i>	$R_{fs} = 0,38\Omega$
<i>Indutância do conversor paralelo</i>	$L_{fp} = 354\mu H$
<i>Resistência do indutor paralelo</i>	$R_{fp} = 0,12\Omega$
<i>Capacitância do conversor paralelo</i>	$C_{fp} = 200\mu H$
<i>Capacitância do barramento CC</i>	$C_{cc} = 940\mu H$
<i>Resistência da carga</i>	$R = 16\Omega$
<i>Indutância da carga</i>	$L = 200mH$

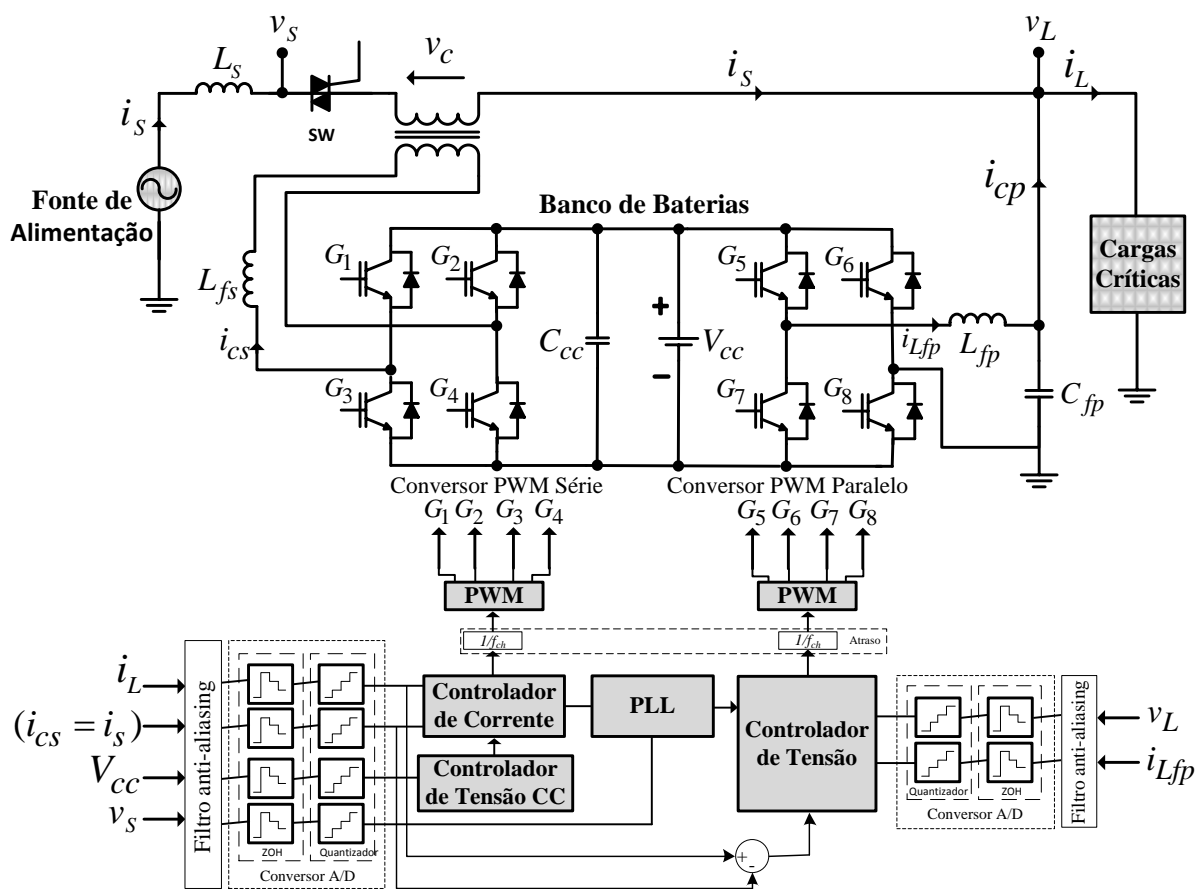


Figura 47 – Diagrama em blocos do sistema UPS simulado

### 5.3 RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A figura 48 mostra a referência de corrente senoidal obtida a partir do algoritmo SRF e do PLL utilizado como referência do conversor série.

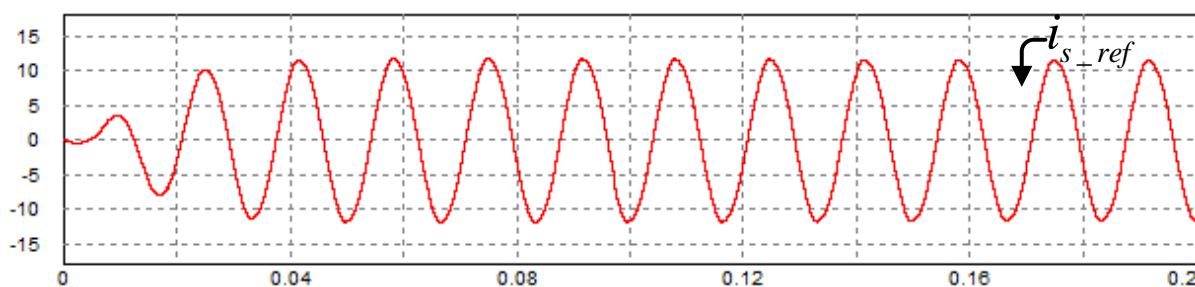


Figura 48 – Corrente de referência do algoritmo SRF ( $i_{s\_ref}$ ); (Tempo (s))

A figura 49 mostra as referências de tensão normalizadas do sistema PLL monofásico, onde se tem o cosseno e o seno defasados em  $90^\circ$ .

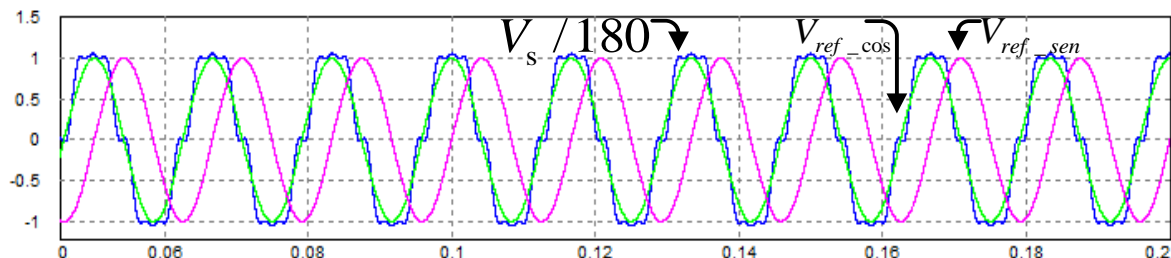


Figura 49 – Tensões de referência do sistema PLL ( $V_{ref\_cos}$ ,  $V_{ref\_sen}$ ); (Tempo (s))

A figura 50 (a), (b) e (c) mostra as correntes da UPS, ou seja, a corrente de entrada já compensada ( $i_s$ ), a corrente de compensação fornecida pelo conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) e a corrente de carga não compensada ( $i_L$ ).

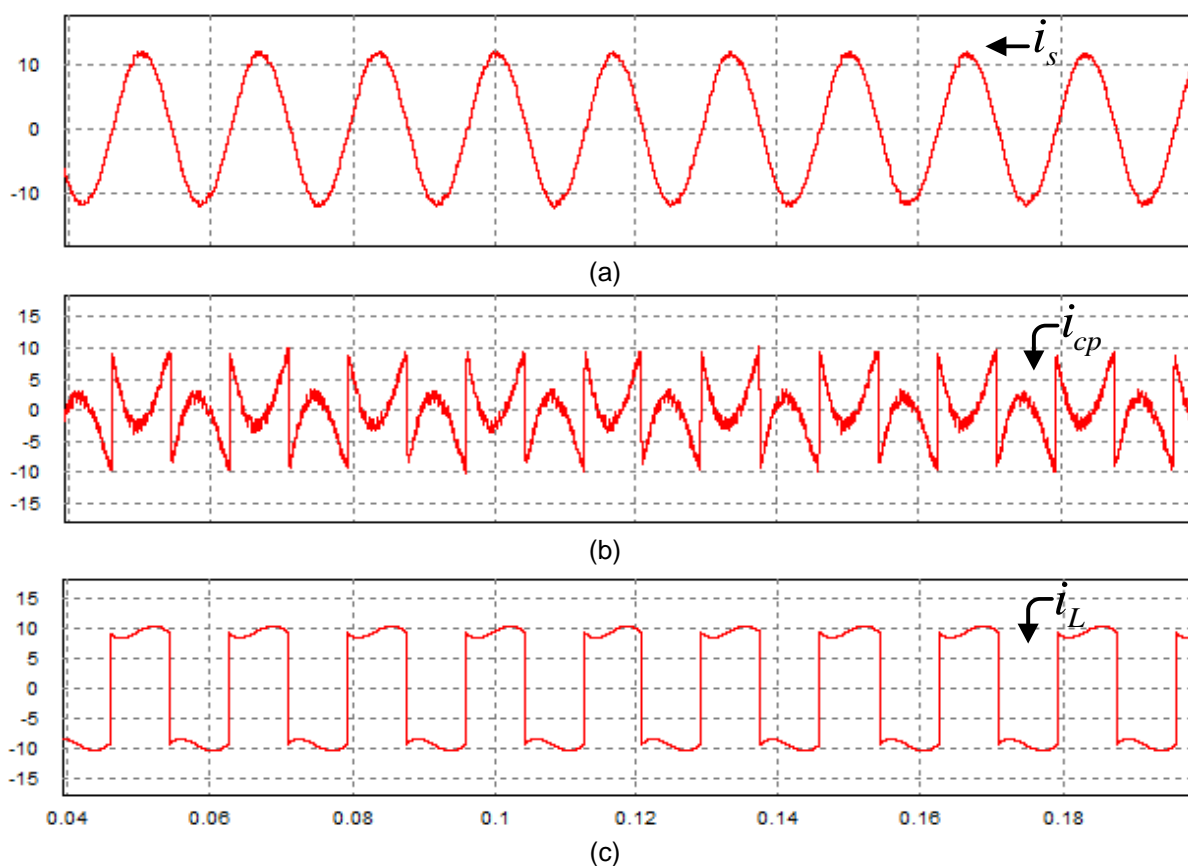
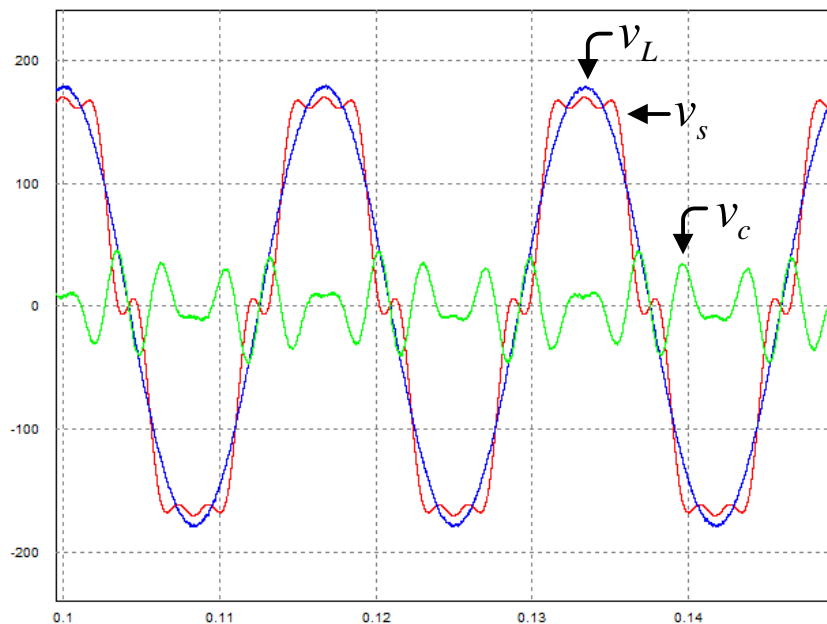


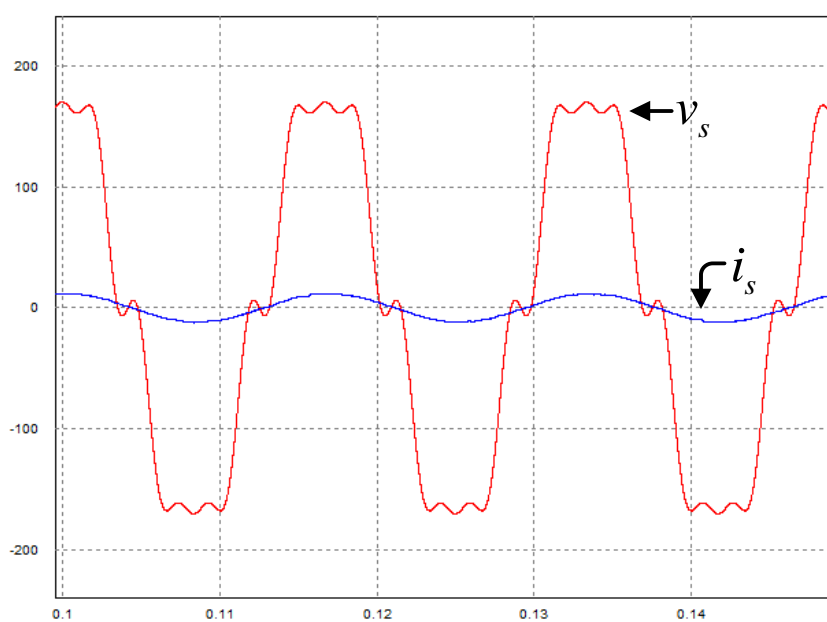
Figura 50 – Correntes: (a) corrente da rede ( $i_s$ ); (b) corrente de compensação paralela ( $i_{cp}$ ); (c) corrente da carga ( $i_L$ ) (Tempo (s))

A figura 51 mostra as tensões de entrada, do transformador de acoplamento série e saída da UPS, ou seja, ( $v_s$ ), ( $v_C$ ) e ( $v_L$ ), respectivamente.



**Figura 51 – Tensões: tensões de entrada ( $v_s$ ), saída ( $v_L$ ) e conversor série ( $v_c$ ) (Tempo(s))**

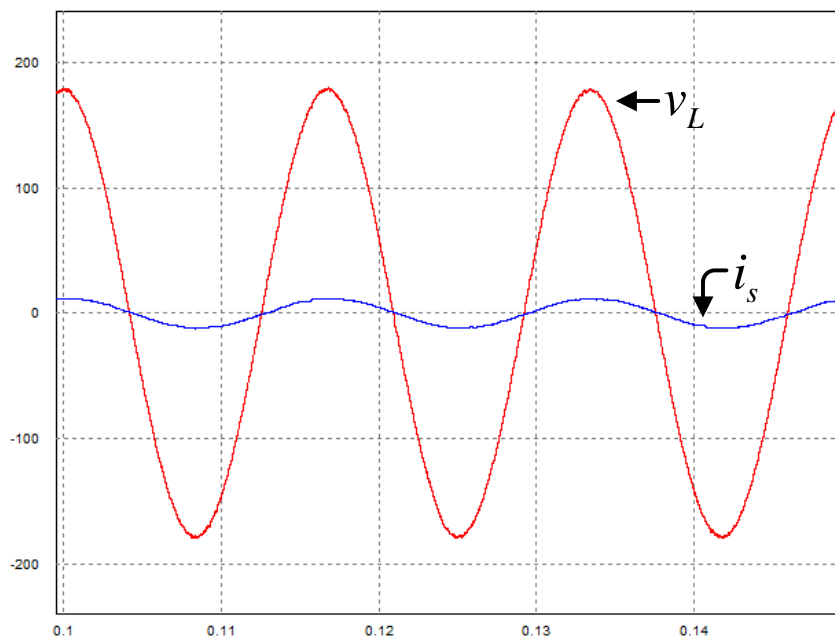
A figura 52 mostra a tensão ( $v_s$ ) e a corrente ( $i_s$ ) da entrada da UPS. Observa-se que a corrente de entrada é senoidal, bem como está em fase com a tensão de entrada.



**Figura 52 – Tensão e corrente: tensão de entrada ( $v_s$ ) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (Tempo (s))**

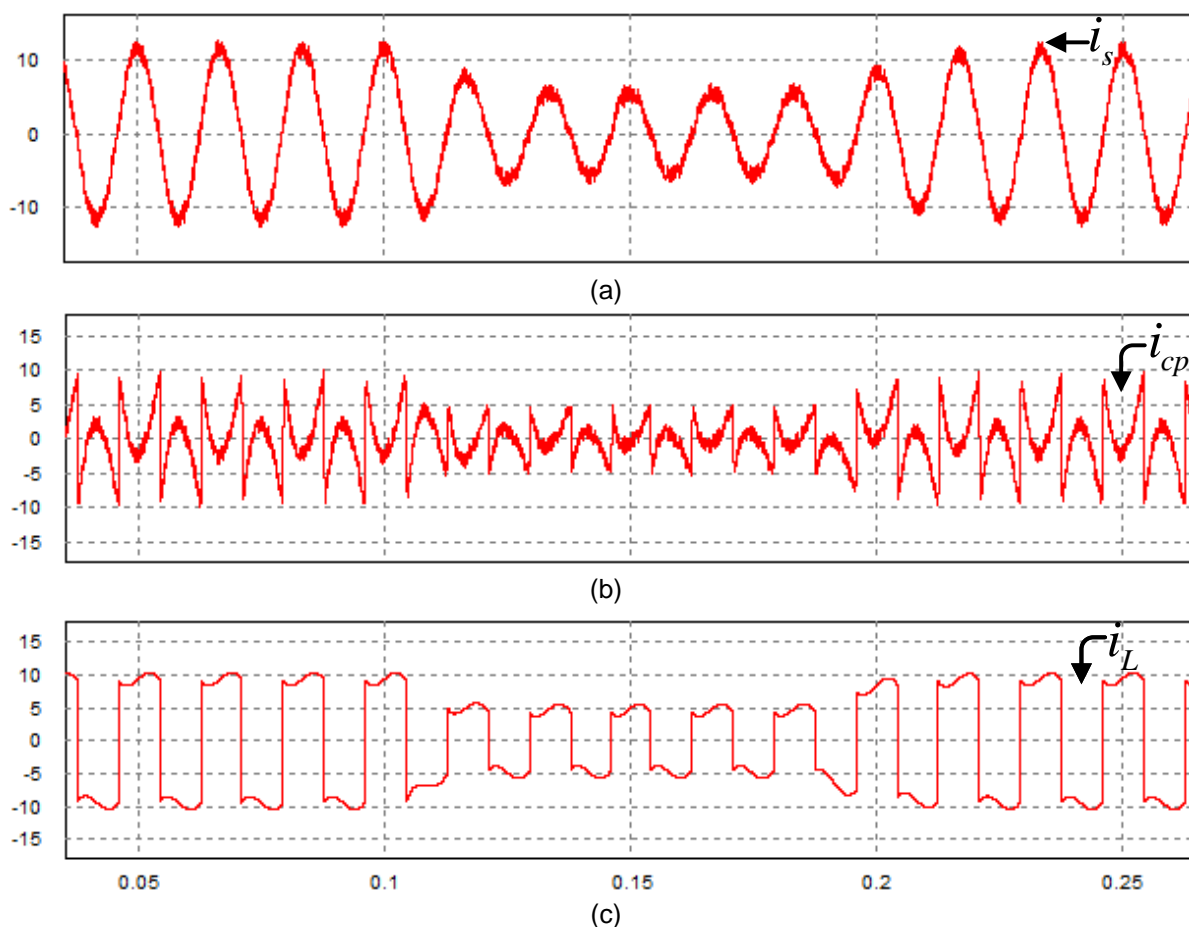


A figura 53 mostra a tensão de saída ( $v_L$ ) e a corrente ( $i_s$ ) de entrada da UPS. Tanto a tensão de saída como a corrente de entrada são senoidais.



**Figura 53 – Tensão e corrente: tensão de saída ( $v_L$ ) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (Tempo(s))**

As figuras 54 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente: corrente da rede, corrente de compensação do conversor paralelo e a corrente de carga, quando um transitório de carga ocorre. Primeiramente a carga está com 100% do seu valor nominal. Após 0,1s tem-se um degrau para de 100% para 50% e após 0,2s tem-se novamente um degrau de 50% para 100% da carga.

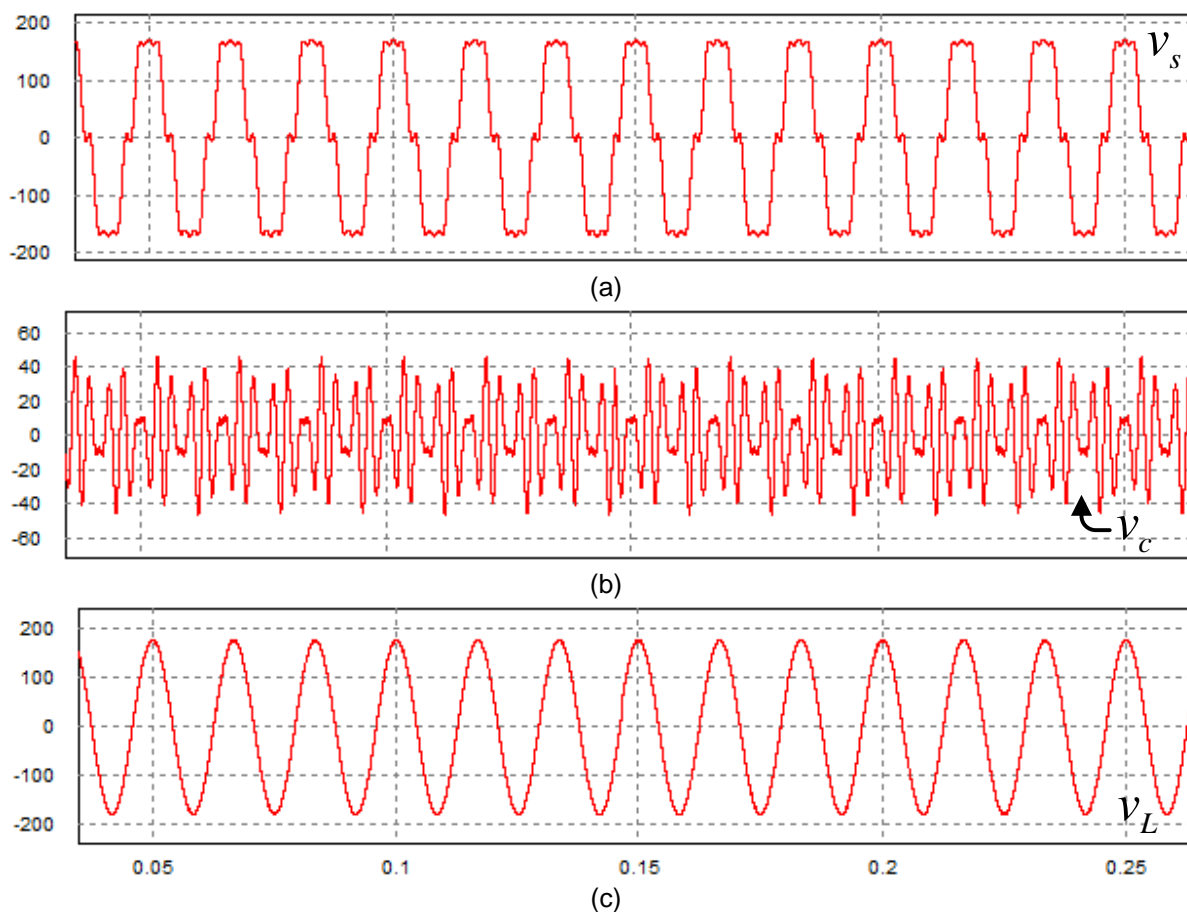


**Figura 54 – Correntes com transições: (a) corrente de entrada ( $i_s$ ); (b) corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ); (c) corrente da carga ( $i_L$ ) (Tempo(s))**

As figuras 55 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente: tensão da rede, tensão de compensação do conversor série e a tensão da carga, quando um transitório de carga ocorre. Primeiramente a carga está com 100%. Após 0.1s tem-se um degrau para de 100% para 50% e após 0.2s tem-se novamente um degrau de 50% para 100% da carga. Pode-se perceber que a tensão na carga não sofre nenhuma variação em nenhum dos momentos tanto na entrada de carga como na saída de carga, mantendo sempre a carga com tensão senoidal e regulada com baixa distorção harmônica. A tensão sobre o transformador do conversor série também não sofre nenhuma influência das variações de carga.

A tensão sobre o transformador série é o resultado da diferença entre a tensão de entrada e a tensão de saída. Enquanto se tem na tensão de entrada perturbações de rede, como harmônicos, afundamentos e elevações de tensão, a tensão na carga é sempre senoidal, regulada e com baixa taxa de distorção harmônica. Assim a diferença aparece em cima do transformador do conversor série,

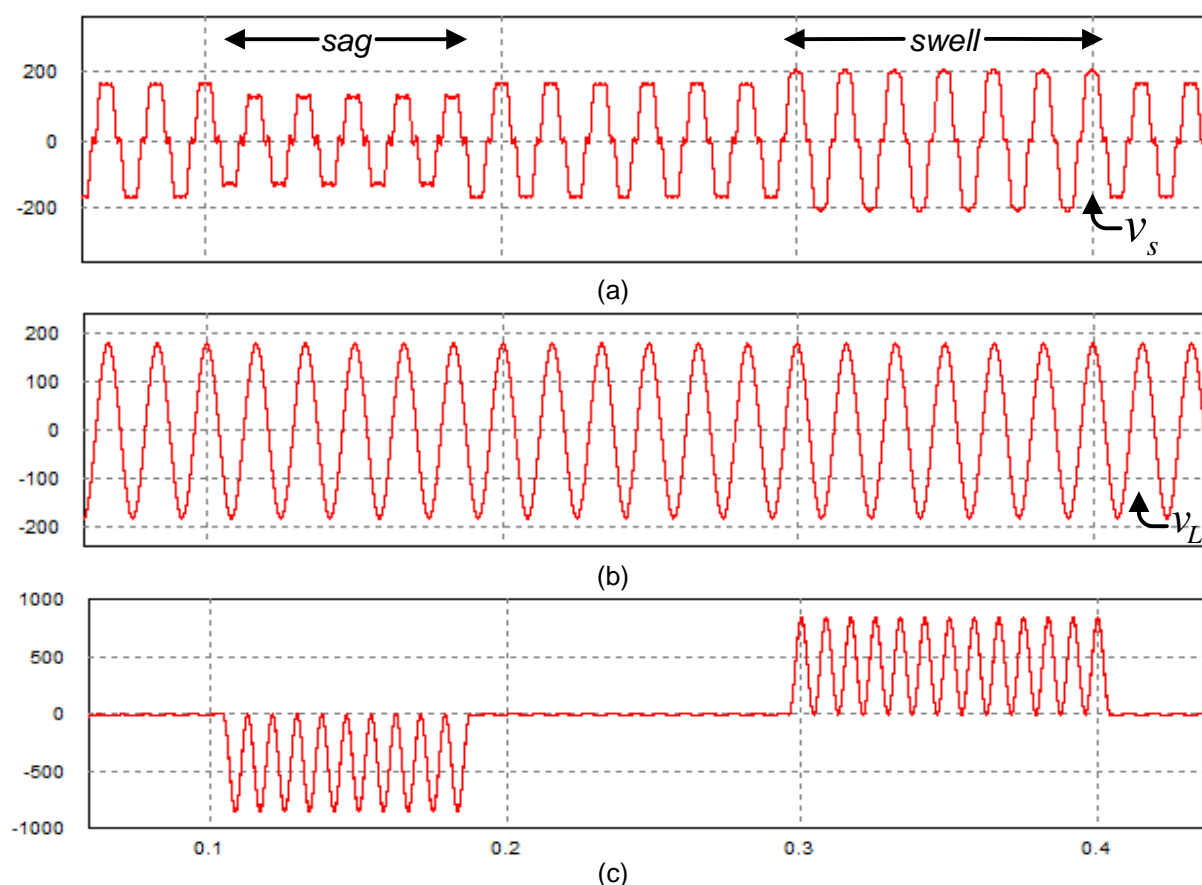
ou seja, mesmo não tendo um controle específico de tensão sobre o transformador série, o mesmo já é controlado indiretamente pelo conversor paralelo de tensão.



**Figura 55 – Tensões: (a) tensão de entrada ( $v_s$ ); (b) tensão do conversor série ( $v_c$ ); (c) tensão da carga ( $v_L$ ) (Tempo(s))**

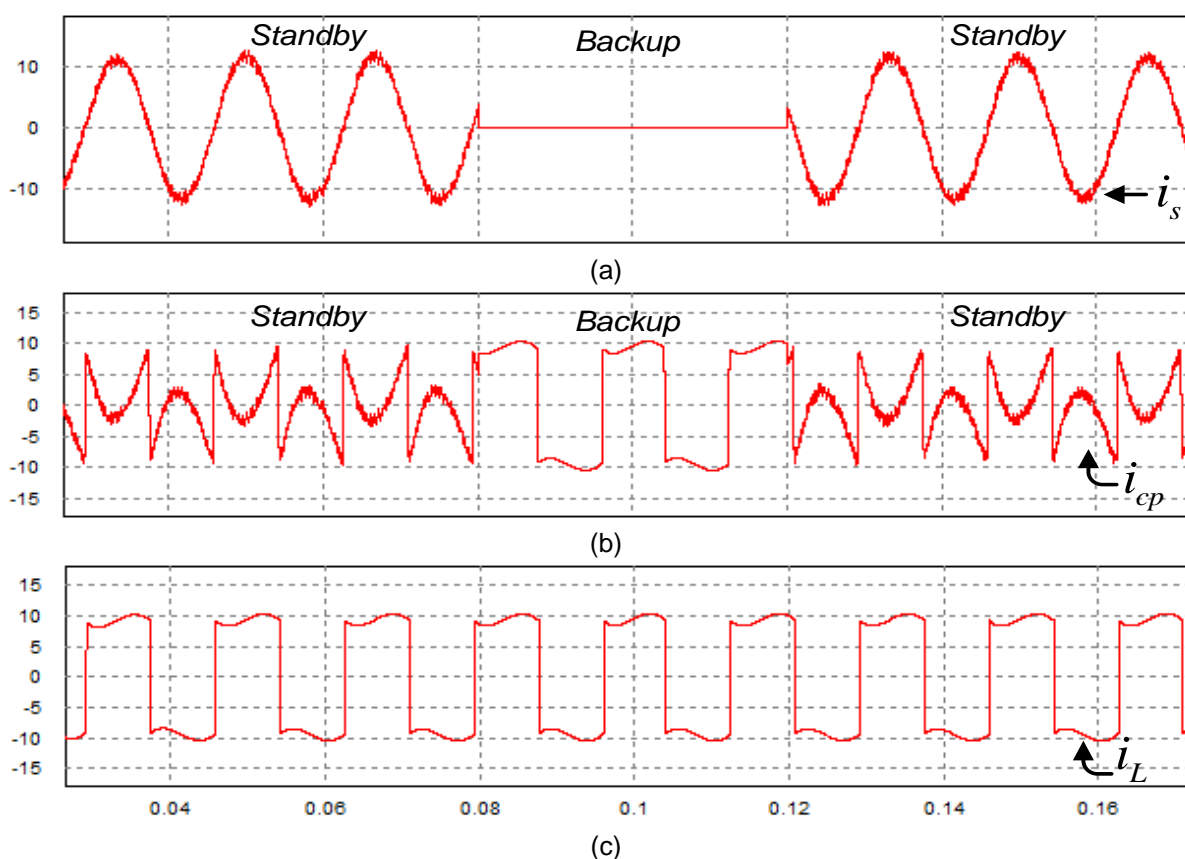
Pela figura 56 é possível verificar a regulação da tensão de saída da UPS mediante variações da tensão de entrada, bem como a potência ativa instantânea absorvida e fornecida pelo conversor série. A figura 56 (a) mostra a tensão de entrada da UPS ( $v_s$ ), para as condições de afundamento (sag) de 23% de ( $v_s$ ) entre os intervalos de tempo 0,1 a 0,2 segundos e elevação de tensão de 23% de ( $v_s$ ) entre os intervalos de tempo 0,3 a 0,4 segundos, ou seja,  $V_s < V_L$  e  $V_s > V_L$ . Na figura 56 (b) a tensão de saída é sempre regulada para um valor de pico de 180V, independente do valor da tensão de entrada. Na figura 56 (c), tem-se a potência ativa instantânea através do conversor série no momento do afundamento e elevação da tensão, ou seja, no momento do afundamento da tensão de entrada, uma potência ativa média é drenada do barramento CC e fornecida para a rede

através do conversor série, fazendo com que a tensão no barramento CC tenda a diminuir. O fluxo de potência, para esta condição é mostrado pela figura 31. No momento da elevação da tensão de entrada, uma potência ativa média é drenada da rede elétrica através do conversor série, fazendo com que a tensão no barramento CC tenda a se elevar. O fluxo de potência, para esta condição é mostrado na figura 30. Durante os distúrbios de afundamento e elevação de tensão, uma componente fundamental de tensão aparece sobre os terminais do transformador de acoplamento série, a qual corresponde à diferença entre as componentes fundamentais das tensões de entrada e saída da UPS. Pelo fato de existir uma componente fundamental da corrente da rede compensada fluindo através do mesmo transformador, resultará em uma potência média que será absorvida ou fornecida pelo conversor série.



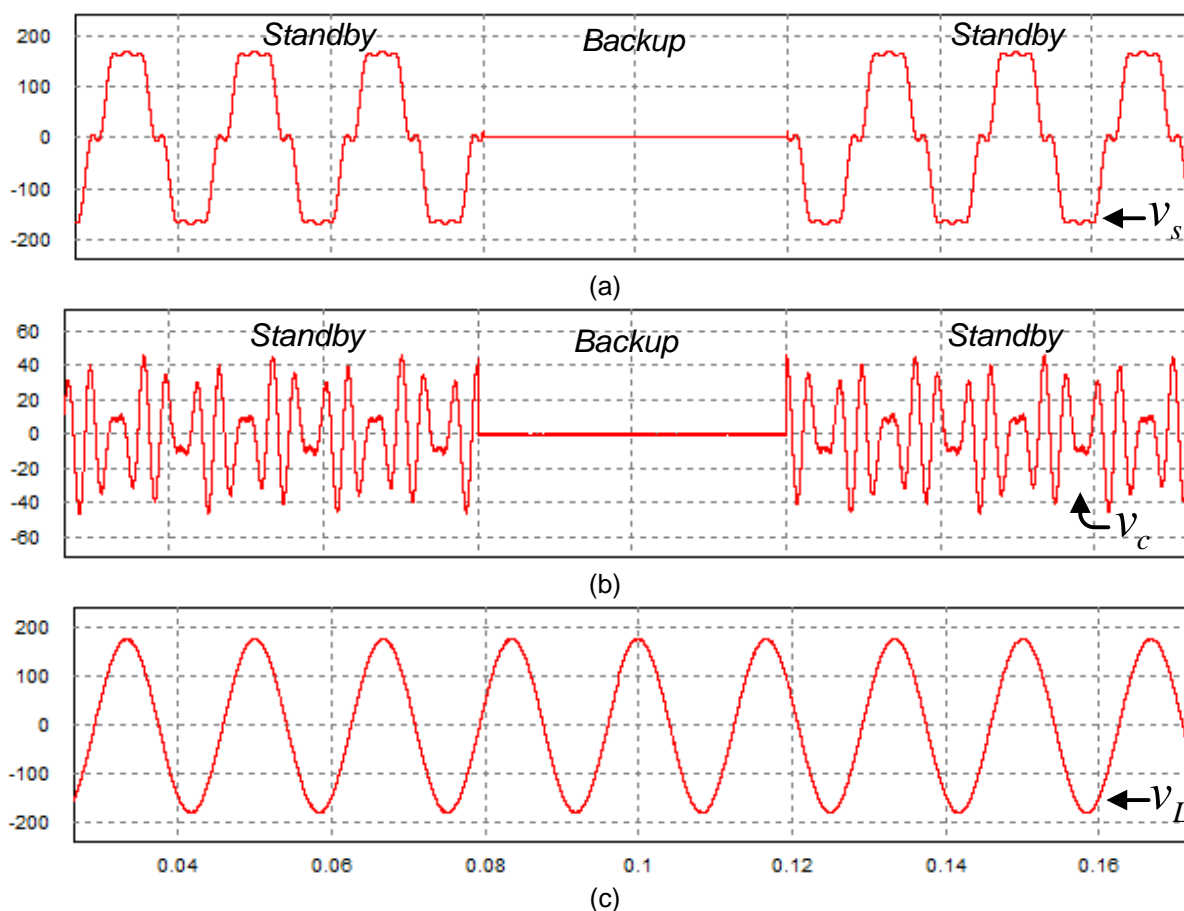
**Figura 56 – Tensões e potência: (a) tensão de entrada ( $v_s$ ) < que a tensão de saída ( $v_L$ ) e tensão de entrada ( $v_s$ ) > que a tensão de saída ( $v_L$ ); (b) tensão de saída ( $v_L$ ); (c) Potência ativa instantânea através do conversor série (Tempo(s))**

Nas figuras 57 e 58 são mostradas as correntes e tensões da UPS operando nos modos de operação standby e backup. Nas figuras 57 (a), (b) e (c) são mostradas: corrente da rede, corrente do conversor paralelo e a corrente de carga quando a transição standby-backup-standby ocorre.



**Figura 57 – Correntes: (a) corrente de entrada ( $i_s$ ); (b) corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ); (c) corrente da carga ( $i_L$ ) (Tempo(s))**

Nas figuras 58 (a), (b) e (c) são mostradas: tensão da rede, tensão do conversor série e a tensão de saída para as transições standby-backup-standby. Como pode ser observado, não existe tempo de transferência durante as respectivas transições.



**Figura 58 – Tensões: (a) tensão de entrada ( $v_s$ ); (b) tensão do conversor série ( $v_c$ ); (c) tensão de saída ( $v_L$ ); (Tempo(s))**

## 5.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados das simulações numéricas da UPS *Line-interactive* monofásica, onde as simulações foram realizadas utilizando a ferramenta computacional PSIM 9.0<sup>®</sup>.

No modo *standby*, o comportamento estático e dinâmico da UPS foi apresentado mediante a presença de distúrbios da rede elétrica, tais como harmônicos, elevações e afundamentos de tensão, bem como frente a degraus de carga.

O comportamento dinâmico da UPS se mostrou satisfatório perante distúrbios na rede de alimentação, bem como degraus de carga. A tensão de saída, ou seja, a

tensão na carga se manteve regulada e com valor de amplitude nominal durante o afundamento e elevação da tensão de entrada, bem como a variação de carga ocorrida entre 100% para 50% e posteriormente 50% para 100% da carga.

Uma vez que a tensão de saída da UPS é sempre senoidal e regulada, as perturbações de rede, tais como harmônicos, afundamentos e elevações de tensão, são naturalmente absorvidas pelo transformador do conversor série. Desse modo, não há necessidade de cálculo de qualquer outra referência de tensão de compensação do conversor série, haja visto que os distúrbios de tensão da rede elétrica são indiretamente compensados.

As simulações da UPS operando nos modos *standby* e *backup* foram realizadas levando-se em consideração a utilização de uma carga não linear, a qual é constituída por um retificador em ponte completa a diodos alimentando uma carga RL.

Pode ser observado através das simulações apresentadas, que a estratégia de compensação proposta baseada no sistema de eixo de referência síncrona (*SRF*) obteve um desempenho satisfatório na eliminação de harmônicos, assim como uma melhora significativa na resposta dinâmica da UPS. Também apresentaram um resultado significativo o sistema PLL utilizado para as referências do algoritmo SRF e para a referência do conversor paralelo de tensão.

## 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

### 6.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios experimentais da UPS *Line-interactive* monofásica apresentada neste trabalho, os quais são obtidos por meio da construção de um protótipo. As formas de onda de tensão e corrente foram coletadas a partir de um osciloscópio digital Tektronix TPS 2014. Já os espectros harmônicos e a taxa de distorção de harmônica foram obtidos por meio do medidor de qualidade de energia elétrica Fluke 43B.

Os ensaios da UPS operando nos modos *standby* e *backup*, cuja intenção é validar os estudos teóricos apresentados nos capítulos anteriores, são realizados levando-se em consideração a utilização de uma carga não linear, constituída por um retificador em ponte completa a diodos alimentando uma carga RL.

No modo *standby*, os comportamentos estático e dinâmico da UPS são avaliados mediante a presença de distúrbios da rede elétrica, tais como harmônicos, elevações e afundamentos de tensão, bem como frente a degraus de carga. Ainda no modo *standby*, o condicionamento de corrente é verificado levando-se em consideração a eliminação de harmônicos e compensação de reativos da carga. Adicionalmente, o fluxo de potência através dos conversores série e paralelo são verificados observando a variação de amplitude da corrente de entrada da UPS, a qual é controlada pelo controlador do barramento CC. O comportamento da UPS mediante as transições do modo *standby* para *backup*, e vice-versa, são também apresentados.

Finalmente, as distorções harmônica total da tensão da carga e da corrente da rede já compensada são comparadas com as apresentadas tanto a recomendação IEEE 519-1992, bem como na norma IEC-61000-3-2.



## 6.2 DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO

O protótipo da UPS está mostrado no apêndice A, o qual está representado pelo diagrama da figura 59. Suas características principais estão descritas a seguir:

Tabela 14 – Parâmetros utilizados nos experimentos

<i>Potência nominal da carga</i>	1kVA
<i>Valor eficaz da tensão de entrada</i>	$V_s = 127V$
<i>Valor eficaz da tensão de saída</i>	$V_L = 127V$
<i>Tensão do barramento CC</i>	$V_{cc} = 300V$
<i>Frequência da rede de alimentação</i>	$f_s = 60Hz$
<i>Frequência de chaveamento dos conversores PWM série e paralelo</i>	$f_c = 20kHz$
<i>Modulação dos conversores</i>	Três níveis
<i>Pico da triangular do modulador PWM</i>	$P_{PWM} = 3750$
<i>Frequência digital de amostragem</i>	$f_a = 60kHz$
<i>Frequência de corte do filtro anti-aliasing</i>	$f_{caa} = 10kHz$
<i>Indutância do Alimentador</i>	$L_s = 10\mu H$
<i>Resistência do Alimentador</i>	$R_s = 3,76m\Omega$
<i>Relação de transformação do transformador de acoplamento série</i>	$n = 1$
<i>Resistência total de dispersão do transformador de acoplamento série</i>	$R_{dt} = 0,1439\Omega$
<i>Indutância de dispersão do transformador de acoplamento série</i>	$L_{dt} = 381,796\mu H$
<i>Potência do transformador de acoplamento série</i>	0,5kVA
<i>Indutância do conversor série</i>	$L_{fs} = 3,14mH$
<i>Resistência do indutor série</i>	$R_{fs} = 0,38\Omega$
<i>Indutância do conversor paralelo</i>	$L_{fp} = 354\mu H$
<i>Resistência do indutor paralelo</i>	$R_{fp} = 0,12\Omega$
<i>Capacitância do conversor paralelo</i>	$C_{fp} = 200\mu H$
<i>Capacitância do barramento CC</i>	$C_{cc} = 940\mu H$
<i>Resistência da carga</i>	$R = 16\Omega$
<i>Indutância da carga</i>	$L = 200mH$

- **Módulos de potência e drivers de acionamento dos IGBTs:** Dois Inversores Monofásicos Full Bridge - Módulo inversor SKS 30F B2CI 10 V12 (SEMIKRON), composto pelos IGBTs SK 30GB 123 (30A/1200V). Os drivers (SKHI 20opA) para o acionamento das chaves são integrados ao módulo.
- **Barramento CC:** O barramento CC é composto por 25 baterias seladas de 12V/7Ah;
- **Controle dos conversores série, paralelo e barramento CC e geração dos sinais PWM:** (DSP) TMS320F28335 Experimenter Kit (TMDSXPRES28335), (TEXAS INSTRUMENTS), algoritmo desenvolvido em linguagem C, área sombreada da figura 9;
- **Placas de condicionamento de sinais:** Medições da tensão da rede de alimentação (circuito *PLL*), tensão do banco de baterias (controle do barramento CC), tensão de saída (controle da tensão na carga do conversor paralelo), corrente da carga (extração da componente fundamental de corrente da carga), corrente do indutor do filtro série (controle de corrente do conversor série) e corrente do indutor do filtro paralelo (malha interna de controle de corrente do conversor paralelo);
- **Chave Estática:** Modelo SKKD46/08 - Semikron;
- **Fontes auxiliares :** Três fontes de +15V/-15V/1A.

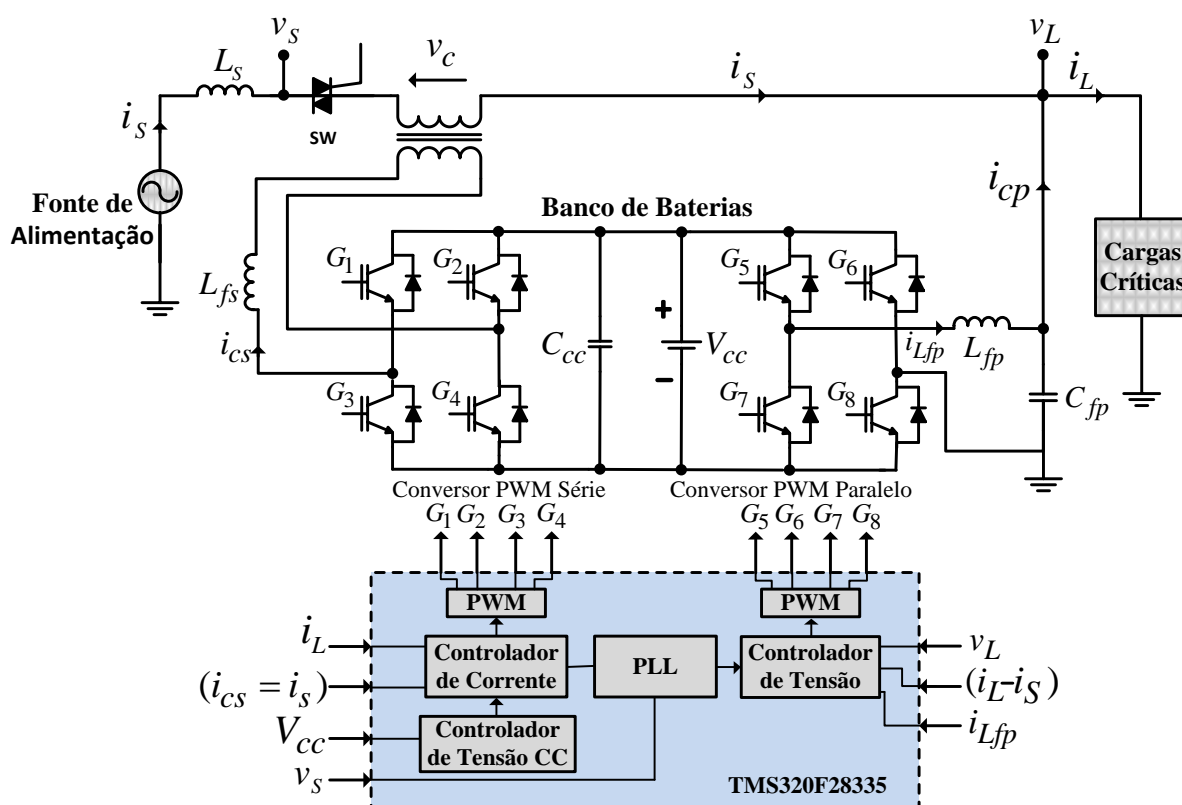
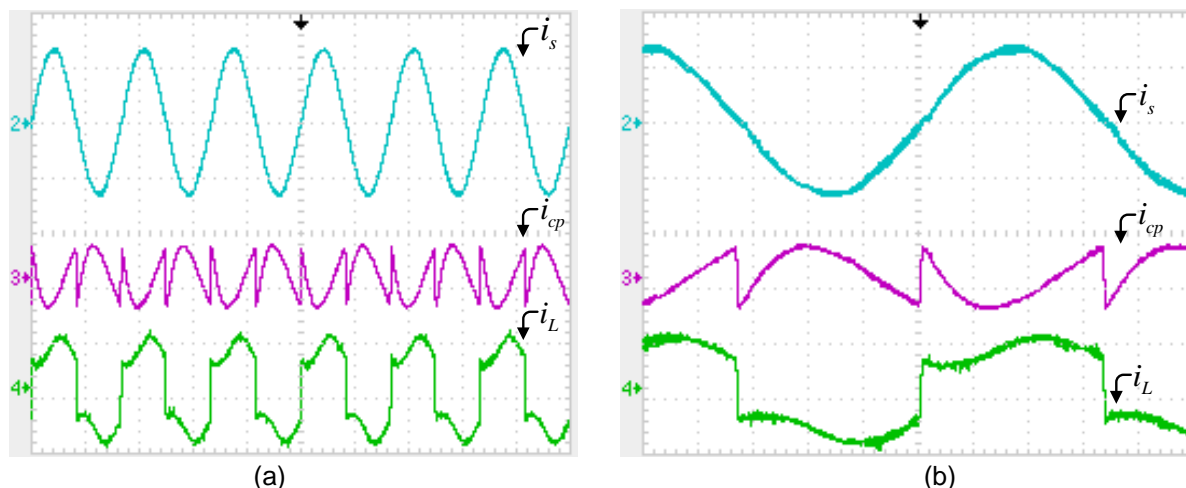


Figura 59 – Diagrama em blocos do protótipo da UPS

### 6.3 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

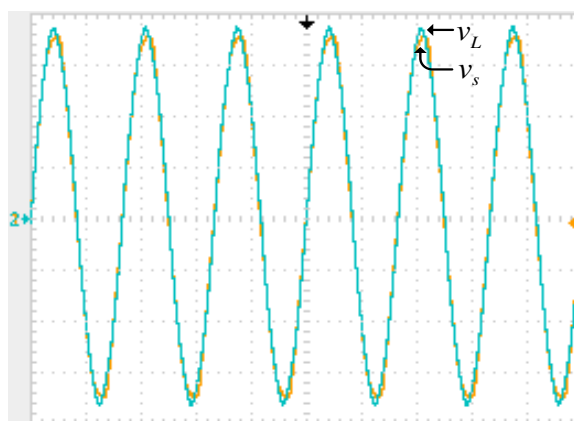
Os resultados estáticos da UPS são apresentados pelas figuras 60, 61, 62 e 63, enquanto os resultados dinâmicos são mostrados pelas figuras 64, 65, 66, 67 e 68. As transições entre os modos de operação *standby-backup-standby* estão apresentadas nas figuras 69, 70 e 71. As figuras 73, 74 e 75 mostram as distorções harmônicas totais (DTH).

As figuras 60 (a) e (b) mostram as correntes da UPS, ou seja, a corrente de entrada já compensada ( $i_s$ ), a corrente de compensação fornecida pelo conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) e a corrente de carga não compensada ( $i_L$ ). Percebe-se que a corrente de entrada é senoidal e possui uma taxa de distorção harmônica muito baixa.



**Figura 60 – Correntes: (a) corrente da rede ( $i_s$ ), corrente de compensação paralela ( $i_{cp}$ ) e corrente da carga ( $i_L$ ) (10A/div); Detalhe das correntes: (b) corrente da rede ( $i_s$ ), corrente de compensação paralela ( $i_{cp}$ ) e corrente da carga ( $i_L$ ) (10A/div – 10ms/div e 2.5ms/div)**

A figura 61 mostra as tensões de entrada e saída da UPS, ou seja, ( $v_s$ ) e ( $v_L$ ), respectivamente. Nesta condição a UPS está operando similarmente a um UPQC dual (iUPQC). Percebe-se que a tensão de saída é senoidal e com taxa de distorção harmônica muito baixa, bem como está em fase com a tensão de entrada.



**Figura 61 – Tensões: Entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (50V/div – 10ms/div)**

A figura 62 (a) mostra a tensão ( $v_s$ ) e a corrente ( $i_s$ ) da entrada da UPS. Observa-se que a corrente de entrada é senoidal, com uma taxa de distorção harmônica muito baixa, bem como está em fase com a tensão de entrada. A figura 62 (b) mostra a tensão de saída ( $v_L$ ) e a corrente ( $i_s$ ) de entrada da UPS. Tanto a tensão de saída como a corrente de entrada são senoidais e possuem baixa taxa de distorção harmônica, bem como estão em fase.

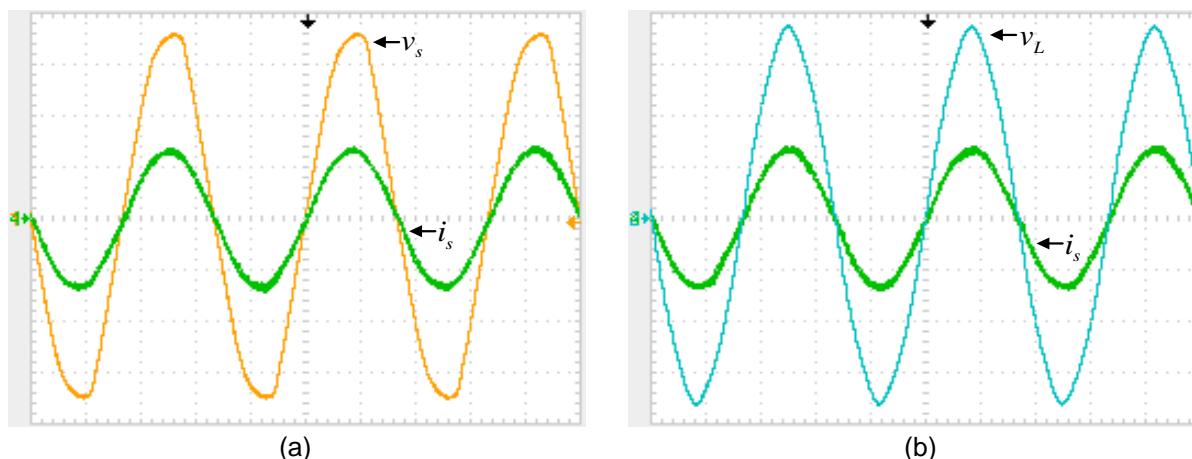


Figura 62 – Tensão e corrente: (a) tensão de entrada ( $v_s$ ) (50V/div – 5ms/div) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (10A/div); (b) tensão de saída ( $v_L$ ) (50V/div) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (10A/div);

A figura 63 mostra as tensões de entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) da UPS juntamente com a tensão sobre o transformador de acoplamento série ( $v_C$ ), a qual representa a diferença entre ( $v_s$ ) e ( $v_L$ ).

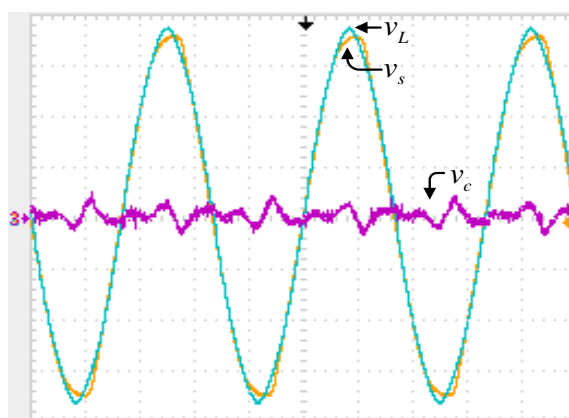
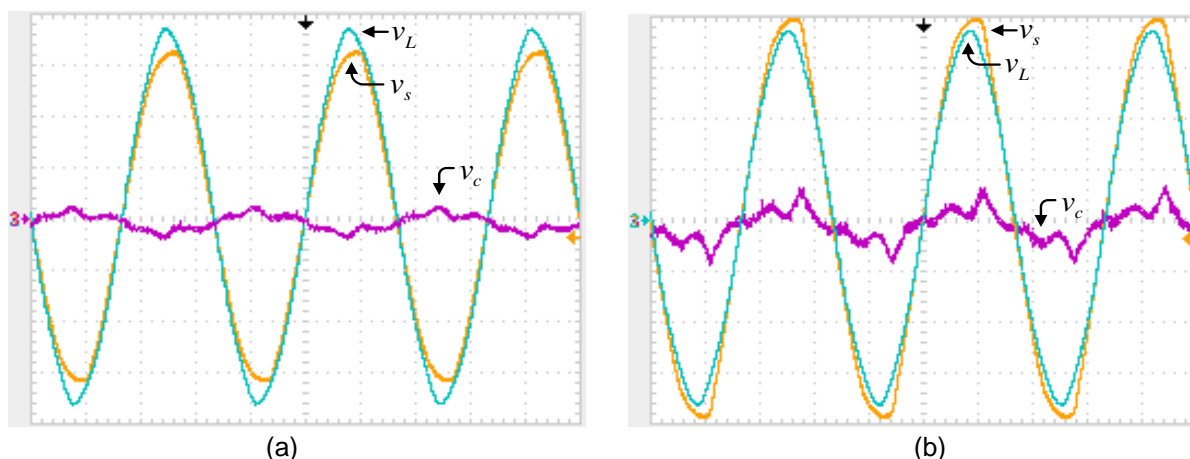


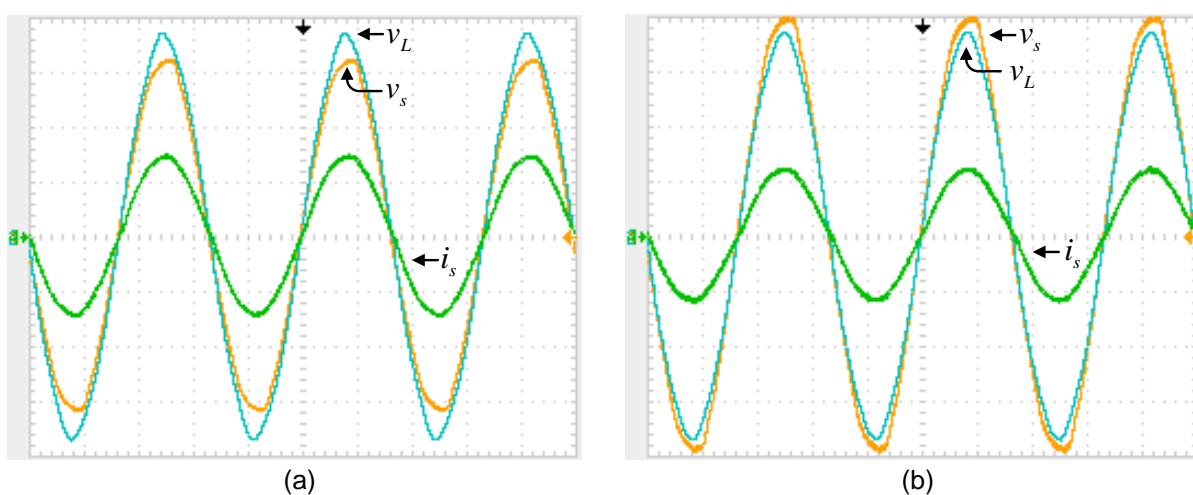
Figura 63 – Tensões: Entrada ( $v_s$ ), saída ( $v_L$ ) e compensação série ( $v_c$ ) (50V/div – 5ms/div)

Pela figura 64 é possível verificar a regulação da tensão de saída da UPS mediante variações da tensão de entrada. A figura 64 (a) mostra as tensões da UPS, ou seja, ( $v_s$ ), ( $v_L$ ) e ( $v_C$ ) para a condição onde o valor eficaz da tensão de entrada ( $V_s = 114 \text{ V}$ ) é menor que da saída ( $V_L = 127 \text{ V}$ ), ou seja,  $V_s < V_L$ . A figura 64 (b) mostra as tensões da UPS para a condição onde o valor eficaz da tensão de entrada (140 V) é maior que da saída (127 V), ou seja,  $V_s > V_L$ . Nota-se que a tensão de saída é sempre regulada para um valor eficaz igual a 127 V, independente do valor da tensão de entrada.



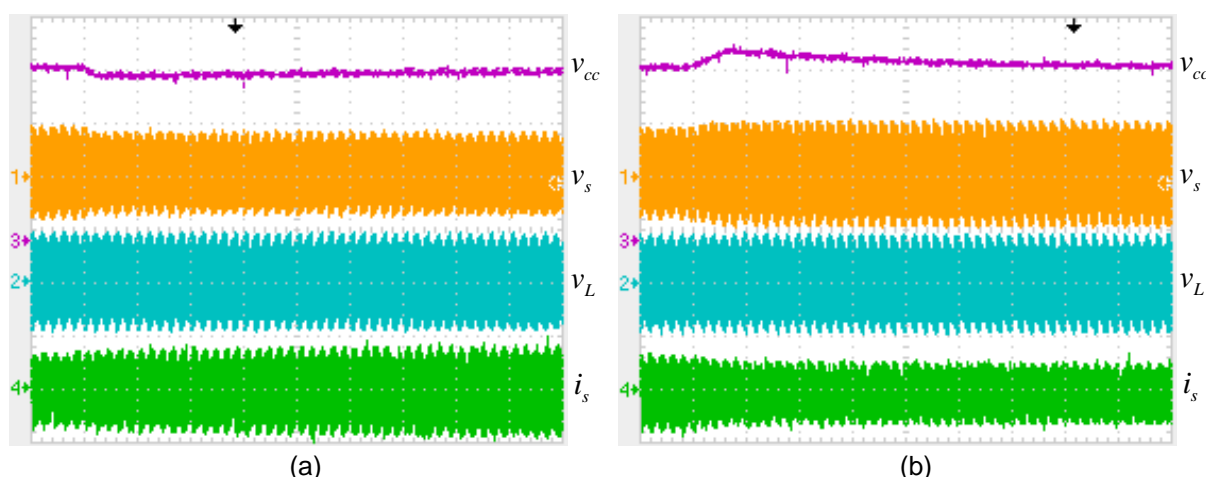
**Figura 64 – Tensões: Afundamento - (a)  $(v_s) < (v_L)$  e compensação série  $(v_c)$  (100V/div – 5ms/div); Elevação - (b)  $(v_s) > (v_L)$  e compensação série  $(v_c)$  (50V/div – 5ms/div)**

As figuras 65 (a) e (b) mostram as tensões de entrada e saída e a corrente de entrada da UPS, considerando as situações em que a tensão de entrada é maior (figura 65a) e menor (figura 65b) que a tensão de saída. Percebe-se claramente que, tanto a corrente de entrada como a tensão de saída da UPS são controladas para estarem em fase com a tensão de entrada. Nota-se também que a amplitude da corrente de entrada é diferente nas duas situações de forma a manter o fluxo de potência na UPS.



**Figura 65 – Tensões e correntes: Afundamento - (a) tensão de entrada  $(v_s)$  < que a tensão de saída  $(v_L)$  (50V/div – 5ms/div) e corrente de compensação série  $(i_s)$  (10A/div – 5ms/div); Elevação - (b) tensão de entrada  $(v_s)$  > que a tensão de saída  $(v_L)$  e corrente de compensação série  $(i_s)$  (10A/div – 5ms/div)**

As figuras 66 (a) e (b) apresentam a ação do controle do barramento CC no momento em que há um afundamento e uma elevação na tensão de entrada, respectivamente. O afundamento é representado na figura 66 (a), onde se percebe que a amplitude da corrente de entrada se eleva de forma a manter o fluxo de potência na UPS. A elevação da tensão de entrada é mostrada na figura 66 (b), onde nota-se que a amplitude da corrente diminui sempre com a intenção de manter o fluxo de potência na UPS. O controle da amplitude de corrente de referência do conversor série é realizado pelo controlador PI do barramento CC. Também é possível notar que a amplitude da tensão de saída permanece constante independente dos distúrbios de afundamento (sag) e elevação de tensão (swell) da rede.



**Figura 66 – Tensões e correntes: Afundamento e Elevação - (a) e (b) tensões do barramento CC ( $v_{cc}$ ) (100V/div – 500ms/div), entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (200V/div – 500ms/div) e corrente de entrada ( $i_s$ ) (20A/div – 5ms/div)**

As figuras 67 (a) e (b) e figura 68 mostram o comportamento dinâmico da UPS frente às variações de carga. Primeiramente na figura 67 (a) a carga é variada de 50% a 100% do seu valor nominal. Percebe-se uma redução na tensão do barramento CC ( $v_{cc}$ ) e um aumento na amplitude da corrente de entrada ( $i_s$ ), do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) e de carga ( $i_L$ ). Em seguida na figura 67 (b), a carga varia de 100% a 50% do seu valor nominal. Nota-se uma elevação da tensão do barramento CC e uma redução das amplitudes das demais correntes da UPS. O controle de tensão do barramento CC é feito como mostrado no diagrama de blocos da figura 23.

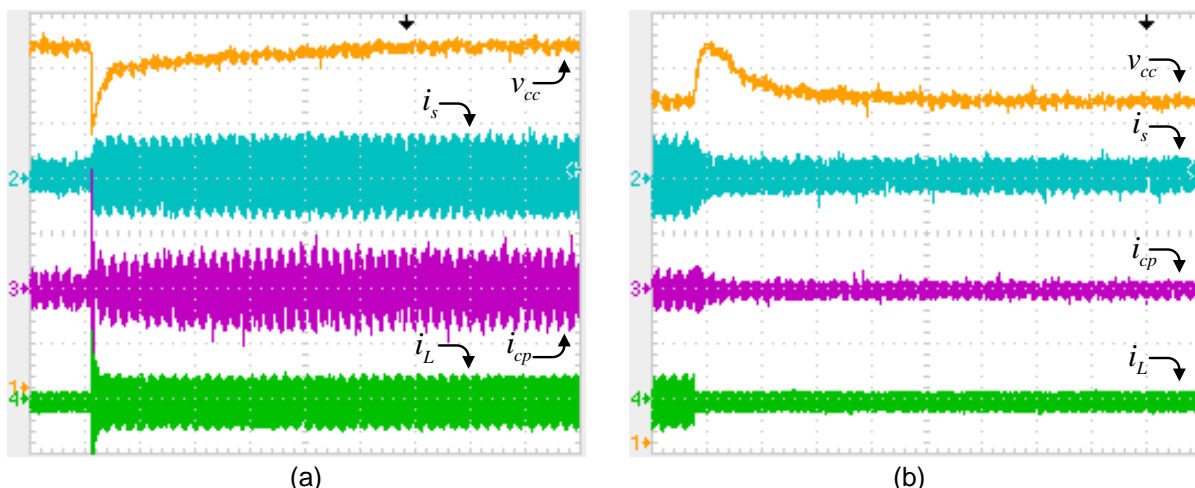


Figura 67 – Tensões e correntes: Variações de Carga - (a) e (b) tensão do barramento CC ( $v_{cc}$ ) (50V/div – 500ms/div), corrente de entrada ( $i_s$ ) (20A/div – 500ms/div), corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) (10A/div / 20A/div – 500ms/div) e corrente da carga ( $i_L$ ) (20A/div – 500ms/div)

A figura 68 mostra, respectivamente, a tensão do barramento CC, a corrente da rede, a corrente de compensação do conversor paralelo e a corrente de carga, quando um transitório de carga ocorre.

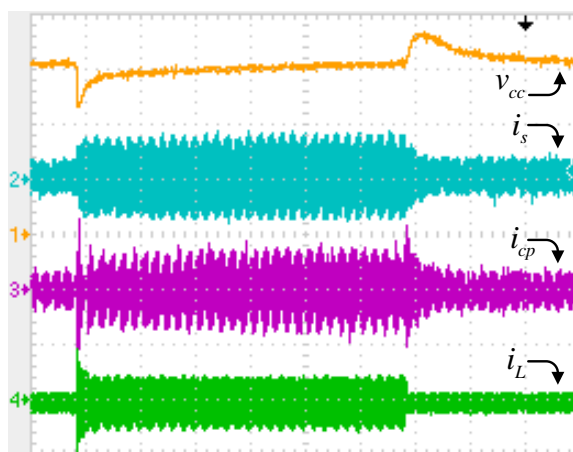


Figura 68 – Tensão e correntes: Variações de Carga - (a) tensão do barramento CC ( $v_{cc}$ ) (100V/div – 500ms/div), corrente de entrada ( $i_s$ ) (20A/div – 500ms/div), corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) (10A/div – 500ms/div) e corrente da carga ( $i_L$ ) (20A/div – 500ms/div)

As correntes e tensões da UPS, operando nos modos de operação standby e backup, são mostrados na figura 69. A corrente da rede, a corrente do conversor paralelo e a corrente de carga são mostradas na figura 69 (a), quando a transição standby-backup ocorre, enquanto que a transição backup-standby é mostrada na figura 69 (b).



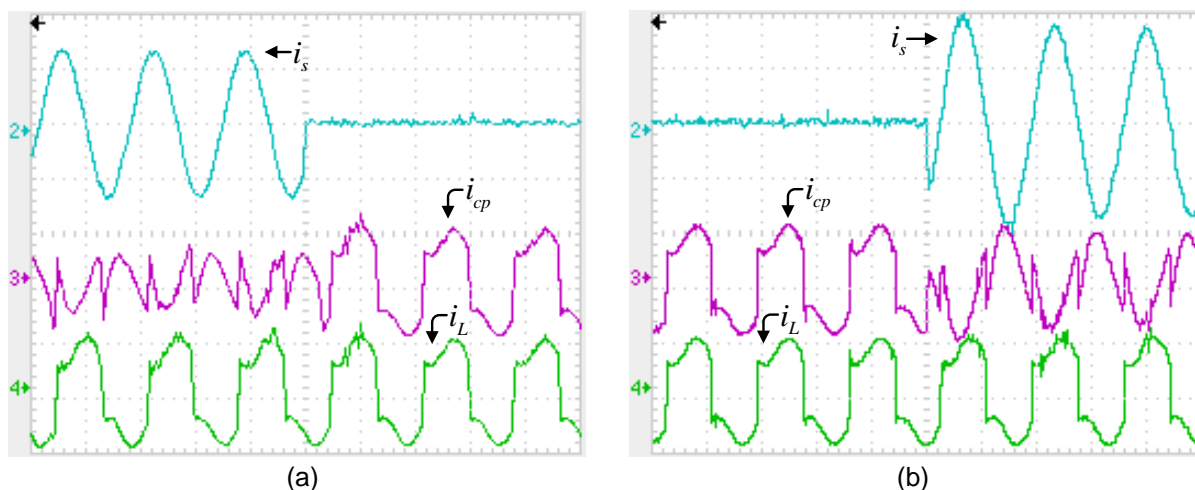


Figura 69 – Correntes: Transitórias - (a) e (b) corrente de entrada ( $i_s$ ), corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) e corrente da carga ( $i_L$ ) (10A/div – 10ms/div)

As correntes e tensões do sistema UPS para ambas as transições, são apresentadas na figura 70. A figura 71 (a) mostra as tensões da rede e de saída para as transições standby-backup-standby, bem como a figura 71 (b) apresenta a tensão do barramento CC, as tensões da rede e de saída para as transições standby-backup-standby. Como pode ser observado, não existe tempo de transferência durante as respectivas transições.

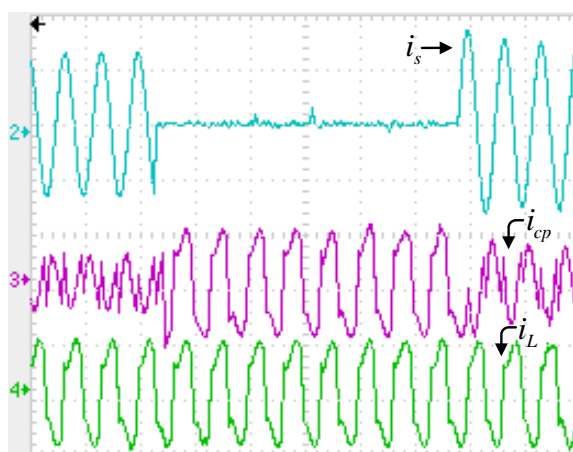


Figura 70 – Correntes: Transitórias - (a) corrente de entrada ( $i_s$ ), corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ ) e corrente da carga ( $i_L$ ) (10A/div – 10ms/div)

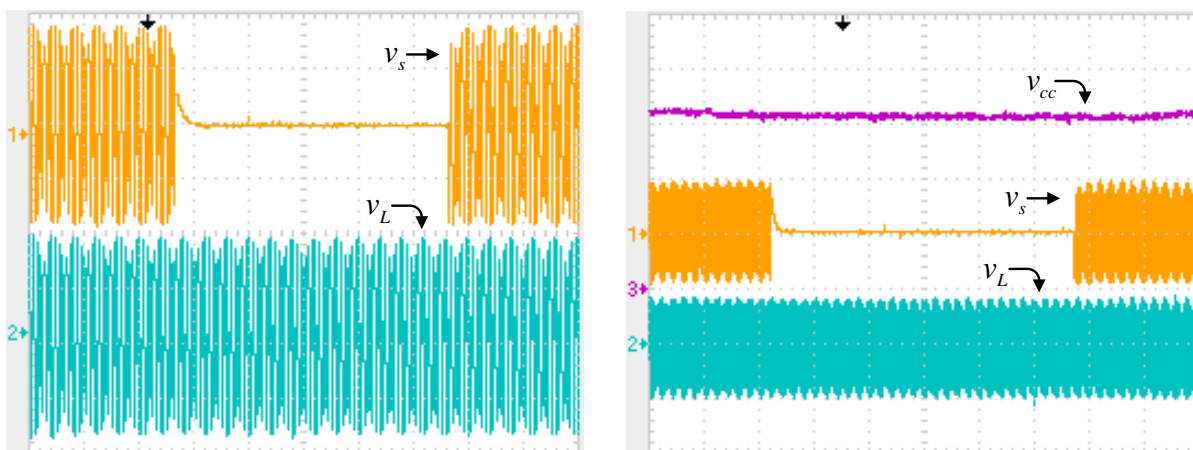
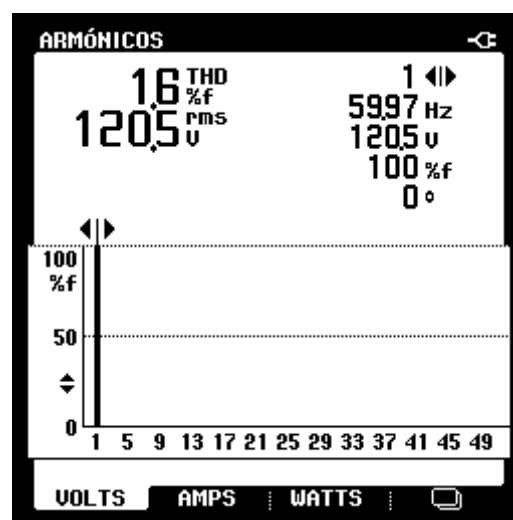


Figura 71 – Tensões: Transitórios - (a) tensões de entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (100V/div – 250ms/div); (b) tensões do barramento CC ( $v_{cc}$ ) (100V/div – 500ms/div), entrada ( $v_s$ ) e saída ( $v_L$ ) (200V/div – 500ms/div)

As figuras 72 (a) e (b) apresentam as taxas de distorção harmônicas das tensões da rede (2,2%) e da carga (1,6 %). As distorções harmônicas totais das correntes da rede (2,0%) e da carga (31,6%) estão mostradas nas figuras 72 (c) e (d), respectivamente, demonstrando uma redução de aproximadamente 29,6%.



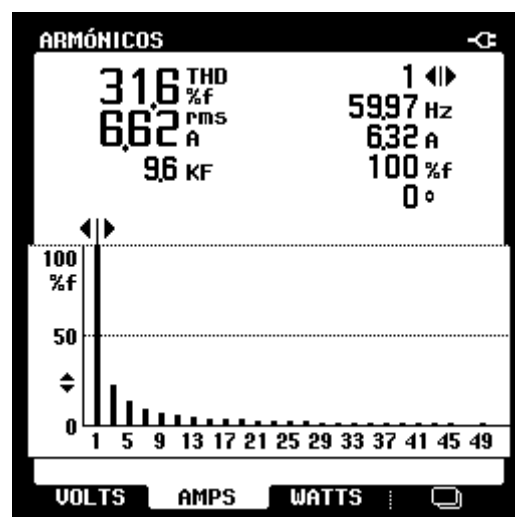
(a)



(b)



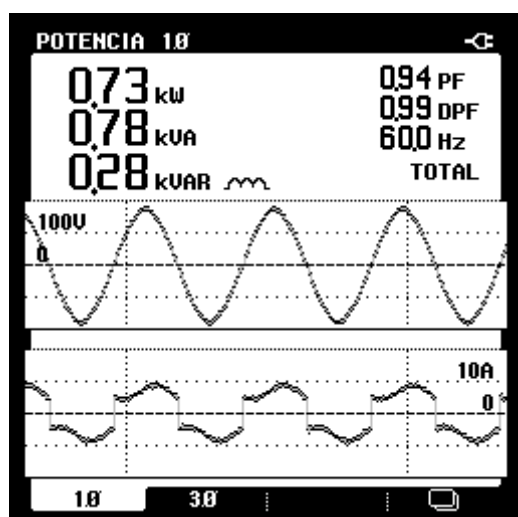
(c)



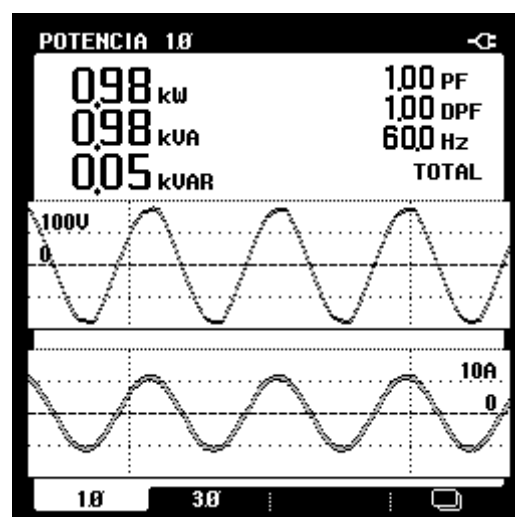
(d)

Figura 72 – Amplitude dos harmônicos em porcentagem em relação à fundamental e DHT: (a) Tensão de entrada ( $v_s$ ); (b) Tensão de saída ( $v_L$ ); (c) Corrente de entrada ( $i_s$ ); (d) Corrente da carga ( $i_L$ )

O fator de potência medido pelo Analisador de Qualidade de Energia monofásico (Fluke 43B) foi elevado de 0,94 para 1.0 conforme pode ser visto pelas figuras 73 (a) e (b). Também são mostrados o fator de deslocamento (DPF) medido na rede, bem como as potências ativa (W), reativa (VAR) e aparente (VA) envolvidas.



(a)



(b)

Figura 73 – Tensões e correntes: Entrada: (a) Fator de potência (PF), fator de deslocamento (DPF), potências em W, VAR e VA; Carga: (b) Fator de potência (PF), fator de deslocamento (DPF), potências em W, VAR e VA

A figura 74 mostra o espectro harmônico e a DHT da corrente compensada ( $i_s$ ) juntamente com os níveis harmônicos recomendados pela IEEE 519-1992 no item 2.2.3.1. Observa-se um conteúdo harmônico da corrente da rede abaixo do limite recomendado.

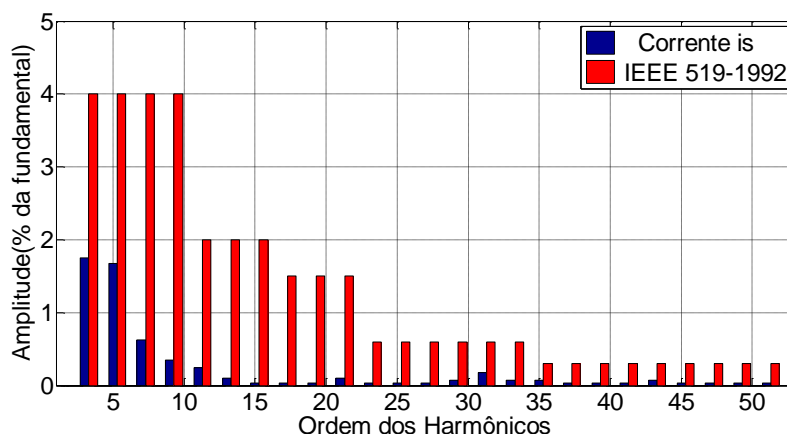


Figura 74 – Amplitude dos harmônicos em porcentagem em relação à fundamental comparada com a recomendação IEEE 519-1992: Corrente de entrada ( $i_s$ )

Conforme definido pela norma IEC 61000-3-2 no item 2.2.3.2, a UPS monofásica em questão é classificada como um equipamento da Classe A, porque possui correntes menores que 16A. A figura 75 mostra as amplitudes das correntes harmônicas que compõem a corrente de entrada, comparadas com os limites das correntes harmônicas determinados pela norma, onde percebe-se que nenhum harmônico ultrapassou os limites impostos pela mesma, representando um grande atrativo para o sistema UPS.

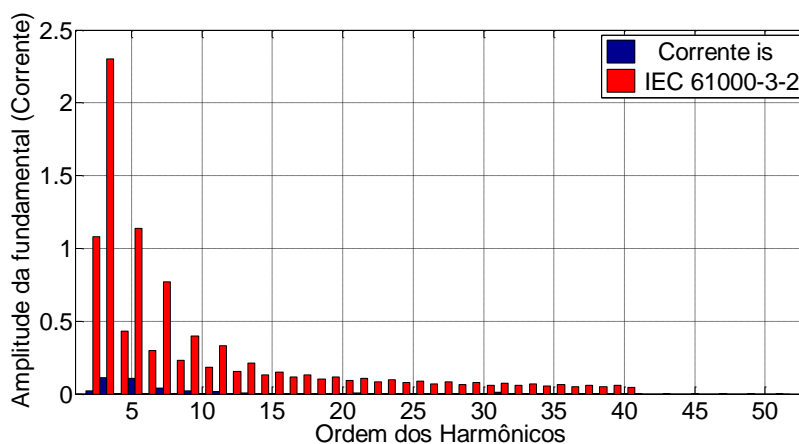


Figura 75 – Amplitude dos harmônicos em porcentagem em relação à fundamental comparada com a norma IEC 61000-3-2: Corrente de entrada ( $i_s$ )

## 6.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados experimentais obtidos a partir do protótipo da UPS *Line-interactive* monofásica com compensação ativa de potência série e paralela, a fim de comprovar os resultados de simulação e também demonstrar que os algoritmos de compensação utilizados são eficientes para esta aplicação.

Os ensaios da UPS operando nos modos *standby* e *backup*, foram realizados, levando-se em consideração a utilização de uma carga não linear, a qual é constituída por um retificador em ponte completa a diodos alimentando uma carga RL.

No modo *standby*, foram apresentados os comportamentos estáticos e dinâmicos da UPS onde demonstraram um desempenho muito satisfatório mediante a presença de distúrbios da rede elétrica, tais como harmônicos, elevações e afundamentos de tensão, bem como frente aos degraus de carga. Ainda no modo *standby*, o condicionamento de corrente foi verificado levando-se em consideração a eliminação de harmônicos e compensação de reativos da carga. Adicionalmente, os fluxos de potência através dos conversores série e paralelo foram verificados observando a variação de amplitude da corrente de entrada da UPS, a qual é controlada pelo controlador do barramento CC, tornando este sistema UPS muito atrativo, operando similar a um UPQC dual.

O comportamento da UPS mediante as transições do modo *standby* para *backup*, e vice-versa, são também foram apresentados, onde pôde-se perceber que não houve nenhum distúrbio sentido pela carga.

Finalmente, as distorções harmônicas totais da tensão de saída e corrente de entrada compensada foram comparadas com aquelas apresentadas na recomendação IEEE 519-1992, na qual todos os níveis de DTH ficaram dentro dos limites recomendados. Além disso, por meio da norma IEC-61000-3-2 pode-se observar que todos os níveis de harmônicos de corrente se enquadraram dentro dos limites estabelecidos pela mesma, considerando os equipamentos pertencentes à classe A.

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

### 7.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo, projeto e implementação prática de uma estrutura *UPS line-interactive* monofásica com compensação ativa de potência série e paralela, utilizando um processador digital de sinal (DSP) com ponto flutuante no controle, a qual, no modo *Standby*, opera de maneira similar ao iUPQC ou UPQC dual. A característica principal no controle da UPS é a vantagem da mesma em operar com os controles independentes de tensão e corrente, além operar com as referências de controle senoidais. Dois conversores PWM foram utilizados para realizar as funções de filtros ativos de potência série e paralelo. O primeiro deles, chamado de conversor PWM série, atuou como um filtro ativo série de potência, operando como uma fonte de corrente senoidal em fase com a tensão da rede elétrica. O segundo conversor, chamado de conversor PWM paralelo, atuou como um filtro ativo paralelo de potência, operando como uma fonte de tensão senoidal, também em fase com a tensão da rede elétrica. Este último tem a finalidade de fornecer à carga tensões estabilizadas e com baixa DHT, tanto com a rede elétrica presente como ausente.

No capítulo 2 foram apresentados os termos e definições relacionados à qualidade de energia elétrica. Além disso, os requisitos principais referentes aos limites de distorções harmônicas foram discutidos por meio da norma IEC 1000-2-3, da recomendação do IEEE 519-1992 e do PRODIST. Também foi apresentada, segundo as normas do IEEE Std 446-1995 (IEEE Std. 446-1995, 1995), duas classes de UPS definidas como sistemas de simples e dupla conversão de energia, apresentando suas principais características. Foram apresentadas as características mais significativas da UPS implementada neste trabalho, evidenciando seu princípio de funcionamento, suas vantagens e desvantagens e um estudo comparativo com a UPS *On-line*.

No capítulo 3 foram apresentados os algoritmos de compensação para gerar as referências de corrente e tensão da UPS. A referência de corrente do conversor

série foi obtida usando um algoritmo baseado no sistema de eixos de referência síncrona. Já a referência de tensão do conversor paralelo foi obtida usando um sistema PLL monofásico baseado na teoria de potência ativa instantânea. Também foi apresentada a descrição das malhas de controle de compensação de corrente e tensão, bem como da malha de controle do barramento CC. Os modelos físicos das plantas dos conversores série e paralelo, foram discutidos no sentido de auxiliar os projetos dos controladores. Por fim, foram apresentadas curvas normalizadas que descrevem o fluxo de energia através dos conversores série e paralelo da UPS, permitindo estimar a potência processada pelos conversores PWM e consequentemente auxiliar no dimensionamento dos mesmos.

A metodologia utilizada para projetar os ganhos dos controladores Proporcional-Integral foram apresentadas no capítulo 4. Ao final deste capítulo, a metodologia utilizada para a discretização dos controladores para implementação no processador digital de sinal (DSP - Digital Signal Processing) foi apresentada.

Com o intuito de validar os modelos obtidos e os controladores projetados no capítulo 4, no capítulo 5 realizou-se as simulações computacionais da UPS utilizando o software PSIM<sup>®</sup>, sendo etapa de vital importância antes da implementação prática da UPS estudada. Verificou-se, no modo de operação *standby*, o comportamento estático e dinâmico da UPS. Esta foi capaz de compensar os distúrbios da rede elétrica, tais como harmônicos, elevações e afundamentos de tensão, bem como frente a degraus de carga. A tensão de saída se manteve regulada em seu valor nominal de amplitude durante os distúrbios de afundamento e elevação da tensão da rede, bem como para os degraus de carga. Uma vez que a tensão de saída imposta pelo conversor paralelo da UPS é sempre senoidal e regulada, as perturbações da rede foram naturalmente absorvidas pelo transformador do conversor série, ou seja, a compensação de tensão da rede ocorre de forma indireta, não havendo a necessidade de cálculo da referência da tensão de compensação, geralmente não senoidais e sintetizadas pelo conversor série. Também pôde ser observado que a estratégia de compensação proposta, a qual baseou-se no sistema de eixo de referência síncrona obteve um desempenho satisfatório na geração da corrente senoidal de compensação do conversor série.

No capítulo 6 foram apresentados os resultados dos testes experimentais realizados na UPS, os quais foram devidamente comparados com à norma IEC 1000-2-3 e a recomendação do IEEE 519-1992, nos aspectos que se referem às

distorções harmônicas de corrente e tensão. Constatou-se que as distorções harmônicas da corrente drenada da rede, bem como a tensão da carga ficaram abaixo daquelas estabelecidos pela norma IEC 1000-2-3 e pela recomendação do IEEE 519-1992. Os resultados experimentais confirmaram a capacidade de condicionamento da UPS, observados pelo comportamento estático e dinâmico perante degraus de carga e distúrbios de tensão da rede elétrica.

Resumidamente, o sistema UPS *Line Interactive* monofásico implementado foi capaz de realizar com eficácia as compensações tanto da corrente da rede como da tensão da carga, possibilitando a diminuição dos níveis harmônicos de tensão e corrente, elevação do fator de potência e compensação de afundamentos e elevações de tensão da rede. Em outras palavras a UPS foi capaz de drenar da rede elétrica uma corrente senoidal e com baixa DHT, assim como fornecer à carga tensão senoidal, regulada e também com baixa DHT.

## 7.2 PROPOSTA DE CONTINUIDADE

- Estudar a influência da presença do conteúdo harmônico de tensão e corrente nas baterias e a sua relação sobre o tempo de vida útil das mesmas;
- Implementar outros algoritmos para a geração da referência de corrente de compensação do conversor série bem como da referência de tensão do conversor paralelo;
- Estudar e implementar outros tipos de controladores para ambos os conversores série e paralelo;
- Estudar os efeitos relacionados com a eficiência da UPS, considerando, principalmente, as perdas de potência dos conversores série e paralelo, em condições onde a tensão de entrada é maior ou menor que a tensão de saída, bem como em condições de carga do banco de baterias.



### 7.3 PUBLICAÇÕES

Durante o desenvolvimento dos trabalhos foram publicados artigos nos principais congressos da área de eletrônica de potência nacionais e internacionais e resumos expandidos entre outros para publicação como citados a seguir:

- Silva, S. A. O. ; Barriviera, R. ; Modesto, R. A. ; Kaster, M. S.; Goedtel, A. . **Single-Phase Power Quality Conditioners with Series-Parallel Filtering Capabilities**. In: 20th IEEE International Symposium on Industrial Electronics, 2011, Gdanski-Polônia. ISIE 2011, 2011. p. 1124-1130.

- Barriviera, R. ; Silva, S. A. O. ; Modesto, R. A. ; Goedtel, A. ; Kaster, M. S. **Power Quality Conditioner with Series-Parallel Compensation Applied to Single-Phase Systems**. In: 14th European Conference on Power Electronics and Applications, 2011, Birmingham-UK. 14th EPE, 2011. p. 1-10.

- Barriviera, R. ; Silva, S. A. O. ; Kaster, M. S.; Modesto, R. A. ; Goedtel, A. . **Single-Phase UPS System with Series-Parallel Filtering Capabilities**. In: Brazilian Power Electronics Conference, 2011, Natal. 11th COBEP, 2011.

- Modesto, R. A. ; Silva, S. A. O.; Barriviera, R. ; Kaster, M. S. **Analysis of a Single-Phase Line-Interactive UPS System**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12), 2012;

- Silva, S. A. O.; Modesto, R. A.; Barriviera, R. Kaster, M. S. **A Line-Interactive UPS System Operating with Sinusoidal Voltage and Current References Obtained from a Self-Tuning Filter**. In: 28th International Conference on Industrial Electronics, 2012, Montreal-Canadá. IECON 2012, novembro 2012.

- Silva, S. A. O.; Modesto, R. A.; Barriviera, R. Kaster, M. S. **Sistema UPS Line-Interactive Monofásico com Referências de Corrente e Tensão de Compensação Senoidais Geradas por um Filtro Auto-Sintonizado**. Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande, Paraíba. CBA 2012, 2012.

Publicações em Periódicos:

- Modesto, R. A. ; Silva, S. A. O.; Barriviera, R. ; Kaster, M. S. **Analysis of a Single-Phase Line-Interactive UPS System**. Renewable Energy & Power Quality Journal, v. 10, p.411, 2012.

## REFERÊNCIAS

AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. **Instantaneous power theory and applications to power conditioning**. New Jersey: J. Wiley, 2007.

AREDES, M.; HÄFNER, J.; HEUMANN, K. A Combined Series and Shunt Active Power Filter. In: IEEE/KTH STOCKHOLM POWER TECH CONFERENCE, 1995, Stockholm. **Proceedings...** Stockholm: IEEE, 1995. p. 237-242.

AREDES, M.; FERNANDES, R. M. A Unified Power Quality Conditioner with Voltage Sag/Swell Compensation Capability. In: BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 10., 2009, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: IEEE, 2009. p. 218-224.

\_\_\_\_\_. A dual topology of unified power quality conditioner: the iUPQC. In: INTERNATIONAL EUROPEAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 13., Rio de Janeiro, 2009. **Proceedings...** Rio de Janeiro: IEEE, 2009. p. 1-10.

BACON, V. D.; SILVA, S. A. O.; BARRIVIERA, R. Análise e Dimensionamento de um Sistema UPS Monofásico com Compensação Ativa de Potência Série e Paralela. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 16., 2011, Ponta Grossa. **Anais...** Ponta Grossa: UTFPR, 2011.

BARBI, I. **Projetos de fontes chaveadas**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2001.

BARRIVIERA, R. et al. Single-Phase UPS System with Series-Parallel Filtering Capabilities. In: BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE, 11., 2011, Natal. **Proceedings...** Natal: COBEP, 2011. p. 844-849.

BHATTACHARYA, S. et al. Parallel Active Filter System Implementation and Design Issues for Utility Interface of Adjustable Speed Drive Systems. In: Industry Applications Society Annual Meeting, 31., 1996, San Diego. **Proceedings...** San Diego: IEEE, 1996. p. 1032-1039.

BHATTACHARYA, S.; DIVAN, D. M.; BANERJEE, B. Synchronous Frame Harmonic Isolator Using Active Series Filter. In: EPE'91 CONFERENCE RECORD, 1991, Firenze. **Proceedings...** Firenze: [s.n.], 1996. v. 3, p. 30-35.

CHEUNG, R. et al. New Line-Interactive UPS System with DSP-Based Active Power-Line Conditioning. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 27., 1996, Baveno. **Proceedings...** Baveno: IEEE, 1996. v. 2, p. 981-985.

DIAS, J. Controle Digital Simplificado para um Condicionador Unificado de Qualidade de Energia. **Revista Eletrônica de Potência**, v. 16, n. 3, p. 212-221, 2011.

DIRK, L. **Projeto de um filtro ativo paralelo de 1kVA usando técnicas de controle analógico e digital**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. **Electrical power systems quality**. New York: McGraw-Hill, 1996.

FILHO, R. M. S. **Estudo e implementação de um inversor senoidal com elo ca de alta frequência aplicado a sistemas de energia ininterrupta**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

FILHO, R. M. S. et al. Comparison of three single-phase PLL algorithms for UPS applications. **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, Piscataway, v. 55, n. 8, p. 2923-2932, aug. 2008.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, Charles; UMANS, Stephen D. **Máquinas elétricas: com introdução a eletrônica de potência**. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

FUJITA, H; AKAGI, H. The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series Active Filters and Shunt Active Filters. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 27., 1996, Baveno. **Proceedings...** Baveno: IEEE, 1996. v. 1, p. 494-501.

\_\_\_\_\_. The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt active filters. **IEEE Trans. on Power Electronics**, Piscataway, v. 13, no. 2, p. 315-322, mar. 1998.

GRIÑÓ, R. et al. Digital repetitive control of a three-phase four-wire shunt active filter. **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, Piscataway, v. 54, n. 3, p. 1495-1503, jun. 2007.

HOLTZ, J. Pulse width modulation: a survey. **IEEE Trans. on Power Electronics**, Piscataway, v. 39, n. 5, p. 410 – 420, oct. 1992.

IEC 1000-3-2 International Std, "**International Eletrotechnical Comission**", Geneve Switzerland, 1998.

IEEE Std. 519-1992, "**IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**," June, 1992.

IEEE Std. 446-1995. "**IEEE Recommended Practices for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications**", December, 1995.

IEEE Std. P519A/D5-1996. "**IEEE Guide for Applying Harmonic Limits on Power Systems**", 1996.

JEON, S. J.; CHO, G. H. A Series-Parallel Compensated Uninterruptible Power Supply with Sinusoidal Input Current and Sinusoidal Output Voltage. In: IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 28., 1997, St. Louis. **Proceedings...** St. Louis: IEEE, 1997, p. 297-303.

JOU, H.-L.; WU, J.-C. A New Parallel Processing UPS with the Performance of Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation. In: POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 25., 1994, Taipei. **Proceedings...** Taipei: IEEE, 1994, p. 1443-1450.

JOU, H. -L. et al. Novel line-interactive uninterruptible power supply. **IEE Proc.-Electr. Power Appl.** Stevenage, v. 151, n. 3, may 2004.

KAMRAN, F.; HABETLER, T. A Novel On-Line UPS with Universal Filtering Capabilities. IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 26., 1995. **Proceedings...** Atlanta: IEEE, 1995, p. 500-506.

\_\_\_\_\_. A novel on-line UPS with universal filtering capabilities. **IEEE Trans. on Power Electronics**, Piscataway, v. 13, n. 3, p. 410-418, may 1998.

KEMMERLY, J. E.; HAYT, W. H.; DURBIN, S. M. **Análise de circuitos em Engenharia**. 7. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2008.

KWON, B.H.; CHOI, J.H.; KIM, T.W. Improved single-phase line interactive UPS. **IEEE Trans. on Industrial Electronics**, Pohang, v. 48, n. 4, p. 804-811, 2001.

LIN, Y.; JOOS, G.; LINDSAY, J. F. Performance Analysis of Parallel - Processing UPS Systems. In: APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION, 8., 1993, San Diego. **Proceedings...** San Diego: APEC, 1993. p. 533-539.

LINARD, F. M. A. et al. Double conversion uninterrupted energy system with rectifier and the inverter integration. **Revista Eletrônica de Potência**, Florianópolis, v. 15, n. 2, p. 59-66, 2010.

MARAFÃO, F. B. **Análise e controle da energia elétrica através de técnicas de processamento digital de sinais**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, 2004.

MODESTO, R. A. **Método de compensação ativa de potência aplicado a um filtro ativo paralelo monofásico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

MOHAN, N.; UNDELAND, T. M.; ROBBINS, W. P. **Power electronics: converters, applications and design**. 2. ed. New York: J. Wiley, 1995.

MONTEIRO, M. I. M.; CADAVAL, E. R.; GONZÁLEZ, F. B. Comparison of Control Strategies for Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire System. **IEEE Trans. on Power Electronics**, Piscataway, v. 22, n. 1, p. 229-236, jan. 2007.

NASIRI, A.; AMAC, A. E.; EMADI, A. Series-parallel active filter/uninterruptible power supply system. **Electric Power Components and Systems Journal**, Chicago, v. 32, n.11, p. 1151-1163, 2004.

FERACIN NETO, A. **Filtros ativos paralelos aplicados a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) -

Programa de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, Brasil, 2009.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. Rio de Janeiro: Pearson, 2003.

PERIN, Arnaldo J. **Curso: modulação PWM**. Florianópolis: [s.n.], 2000.

PIGAZO, A. et al. Harmonic Compensation in Shunt Active Power Filters by Applying Kalman Filtering for Estimation of the Averaged Load Conductance. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2010, Bari. **Proceedings...** Bari: IEEE, IEEE, 2010. p. 1874-1880.

PLATTS, J. St.; AUBYN, J. **Uninterruptible power supplies**. [S. l.]: IET, 1992. (IEE Power Series, 14).

PÖTTKER, F. S. **Correção do Fator de Potência para Instalações de Baixa Potência Empregando Filtro Ativo**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

PRODIST. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema Elétrico nacional: módulo 8: revisão 4**. [Brasília]: ANEEL, 2012.

REINERT, M. R. UPS de dupla conversão não isolada usando Snubber regenerativo. **Revista Eletrônica de Potência**, Florianópolis, v. 16, n. 2, p. 158-167, 2011.

RASHID, H. Muhammad. **Power electronics handbook**. 2. ed. [S. l.]: Elsevier, 2007.

SANTOS, R. J. M. dos. **Condicionador unificado de qualidade de energia dual com controle simplificado**. Dissertação (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville, 2012.

SILVA, S. A. O. da. **Sistemas de energia ininterrupta *line interactive* trifásicos com compensação ativa de potência série e paralela**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.

SILVA, S. A. O. da et al. Single-Phase Power Quality Conditioners with Series-Parallel Filtering Capabilities. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 20., 2011, Gdanski. **Proceedings...** Gdanski: ISIE, 2011. p. 1124-1130.

SILVA, S. A. O. da et al. A Comparative Analysis of p-PLL Algorithms for Single-Phase Utility Connected Systems. In: EUROPEAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND APPLICATIONS - EPE, 13., 2009, Barcelona. **Proceedings...** Barcelona: EPE, 2009. p. 1-10.

SILVA, S. A. O. da et al. A Line-Interactive Ups System Implementation With Series-Parallel Active Power-Line Conditioning For Three-Phase, Four-Wire Systems. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 14., 2002, Natal. **Proceedings...** Natal: SBA, 2002.

\_\_\_\_\_. A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities. **IEEE Trans. on Industry Applications**, Pleasant Ridge, v. 38, n. 6, p. 1581-1590, 2002.

\_\_\_\_\_. Performance Analysis of Three-Phase Line-Interactive UPS System with Active Power-Line Conditioning. In: ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE - INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY - IECON, 29., 2003, Roanoke. **Proceedings...** Roanoke: IECON, 2003. p. 353-360. v. 1.

SILVA, S. A. O. da et al. Synchronous Reference Frame Based Controllers Applied to Shunt Active Power Filters in Three-Phase Four-Wire Systems. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON INDUSTRIAL TECHNOLOGY - ICIT, 2010, Viña del Mar. **Proceedings...** Viña del Mar: ICIT, 2012. p. 832-837.

SILVA, S. A. O. da; MODESTO, R. A. A Comparative Analysis of SRF-based Controllers Applied to Active Power Line Conditioners. In: INDUSTRIAL ELECTRONICS – IECON, 34., 2008, Orlando. **Proceedings...** Orlando: IEEE, 2008. p. 405-410.

SILVA, S. A. O. da; MODESTO, R. A.; BARBOSA, L. dos R. Dynamic Response Improvement of a Three-Phase Line Interactive UPS System with Active Power Line Conditioning. In: IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE, 38., 2007, Orlando. **Proceedings...** Orlando: PESC, 2007. p. 1055-1059.



SILVA, S. A. O. da et al. Compensation Algorithms Applied to Power Quality Conditioners in Three-Phase Four-Wire Systems. In: IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2010, Bari. **Proceedings...** Bari: IEEE, 2010. p. 730-735.

SILVA, S. A. O. da; NOVOCHADLO, R.; MODESTO, R. A. Single-Phase PLL structure using modified p-q theory for utility connected systems. In: IEEE ANNUAL POWER ELECTRONICS SPECIALIST CONFERENCE, 39., 2008, Rhodes. **Proceedings...** Rhodes: IEEE, 2008. p. 4706-4711.

SILVA, S. M. et al. Performance Evaluation of PLL Algorithms for Single-Phase Grid-connected systems. In: INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 39., 2004. IAS Annual Meeting, 39., 2004. **Proceedings...** [S.l.]: IEEE. 2004. p. 2259-2263.

## APÊNDICE A – Fotografias do Protótipo da UPS



Fig. A.1 – Protótipo da *UPS Line-interactive*



Fig. A.2 – Módulos inversores dos conversores série e paralelo e barramento DC da UPS.

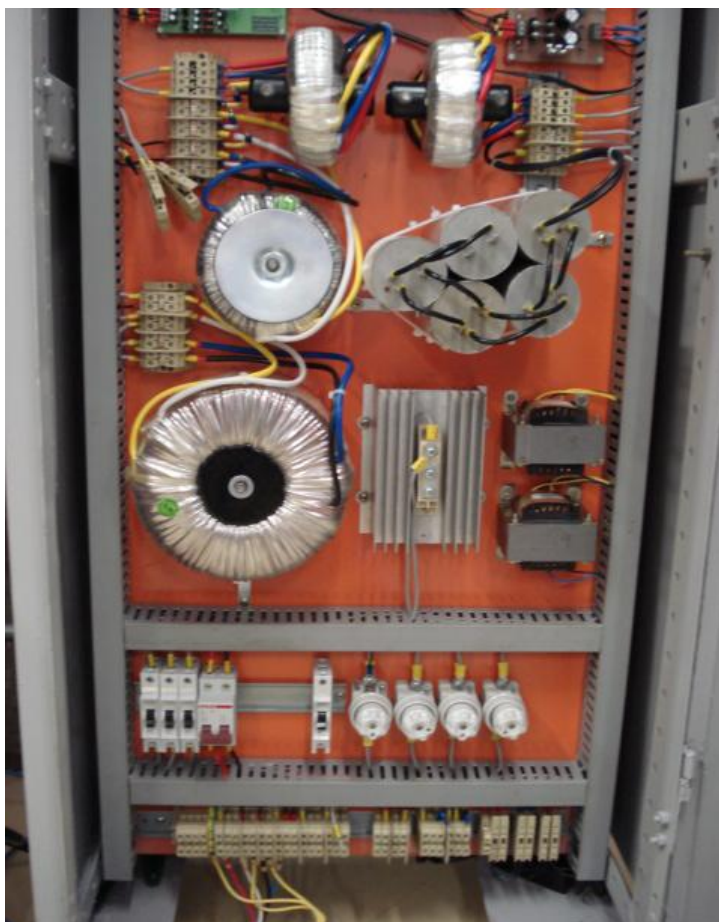


Fig. A.3 – Transformadores de isolamento e filtros indutivos e capacitivos da *UPS*.

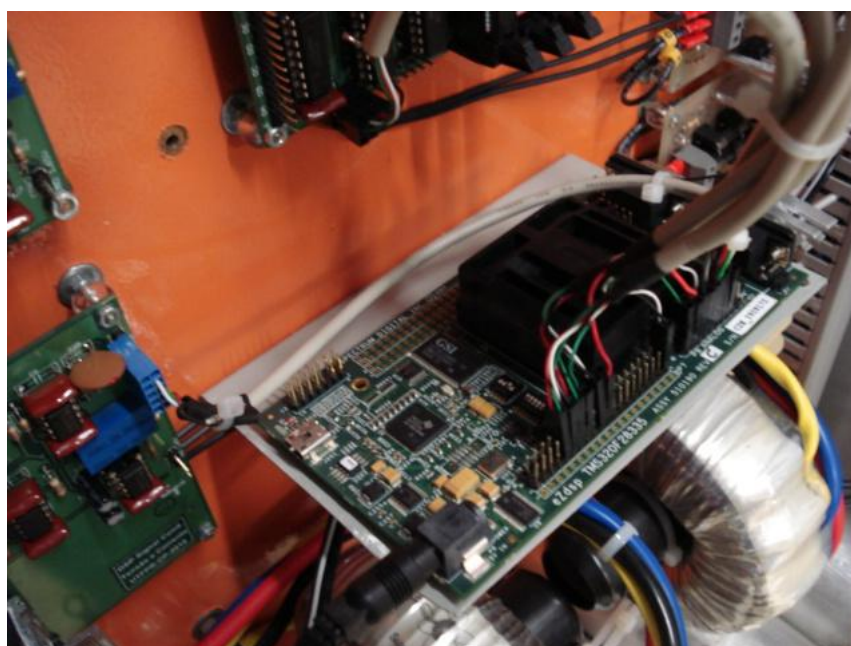
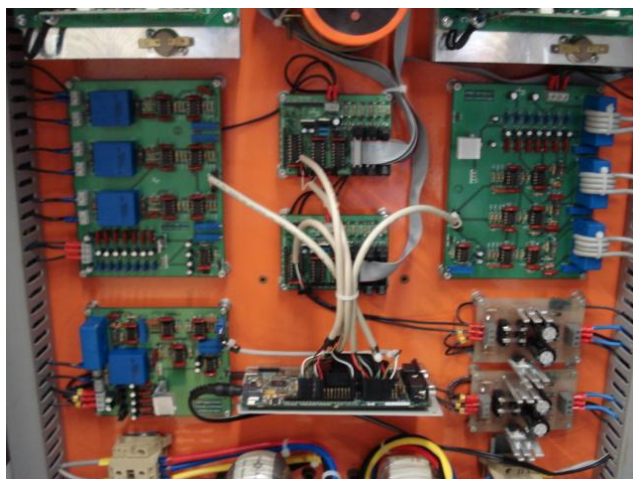
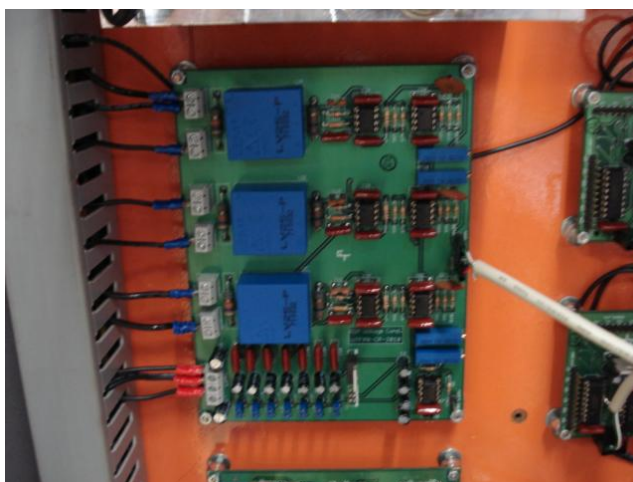


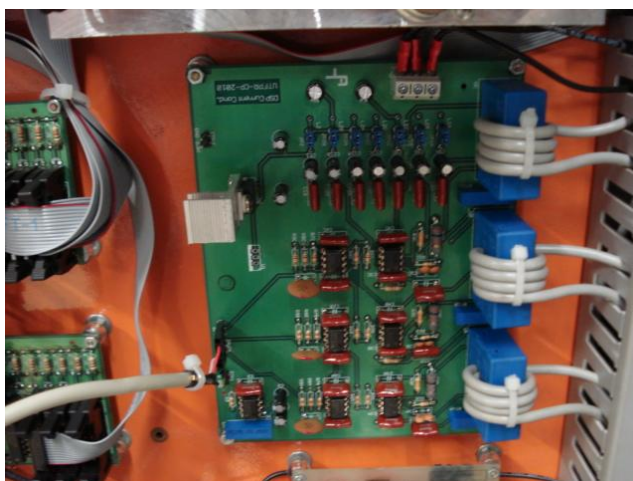
Fig. A.4 – DSP: TMS320F28335 eZdsp DSP Starter Kit (DSK), (TEXAS INSTRUMENTS).



(a)



(b)



(c)

Fig. A.5 – (a) Placas de condicionamento de sinais; (b) detalhe da placa de condicionamento de tensão; (c) detalhe da placa de condicionamento de corrente.

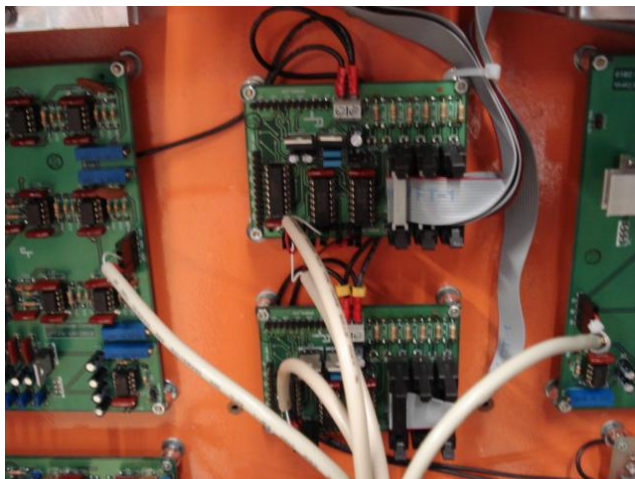


Fig. A.6 – Placas de comunicação DSP - drivers.



Fig. A.7 – Detalhe do módulo do banco de baterias da UPS.