

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**CÂMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO**  
**DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**VINICIUS DE SOUZA**

**COMPARTILHAMENTO DE ENERGIA OTIMIZADO APLICADO A UM SISTEMA  
DELTA-UPS TRIFÁSICO ATUANDO NO MODO DE OPERAÇÃO *BACKUP***

**DISSERTAÇÃO**

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2020**

**VINICIUS DE SOUZA**

**COMPARTILHAMENTO DE ENERGIA OTIMIZADO APLICADO A UM SISTEMA  
DELTA-UPS TRIFÁSICO ATUANDO NO MODO DE OPERAÇÃO *BACKUP***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para a obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica”.

Orientador: Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva

**CORNÉLIO PROCÓPIO**

**2020**

---

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

---

S729 Souza, Vinicius de

Compartilhamento de energia otimizado aplicado a um sistema Delta-UPS trifásico atuando no modo de operação backup / Vinicius de Souza. – 2020.  
113 f. : il. color. ; 31 cm.

Orientador: Sérgio Augusto Oliveira da Silva.  
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Cornélio Procópio, 2020.  
Bibliografia: p. 103-107.

1. Fonte de energia ininterrupta. 2. Conversores de corrente elétrica. 3. Amplificadores de potência. 4. Engenharia Elétrica – Dissertações. I. Silva, Sérgio Augusto Oliveira da, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD (22. ed.) 621.3

---

### Biblioteca da UTFPR - Câmpus Cornélio Procópio

Bibliotecário/Documentalista responsável:  
Romeu Righetti de Araujo – CRB-9/1676

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título da Dissertação Nº 061:

# “Compartilhamento de Energia Otimizado Aplicado a um Sistema Delta-UPS Trifásico Atuando no Modo de Operação Backup”.

por

**Vinícius de Souza**

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva

Co-orientador:

Esta dissertação foi apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA – Área de Concentração: Sistemas Eletrônicos Industriais, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Câmpus Cornélio Procópio, às 14h30 do dia 02 de junho de 2020. O trabalho foi \_\_\_\_\_ pela Banca Examinadora, composta pelos professores:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Sérgio Augusto Oliveira da Silva  
Presidente

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Moacyr Aureliano Gomes de Brito  
UFMS

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Leonardo Poltronieri Sampaio  
UTFPR-CP

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Leonardo Bruno Garcia Campanhol  
UTFPR-AP

Visto da coordenação:

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Cristiano Marcos Agulhari  
Coordenador Substituto do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica  
UTFPR Câmpus Cornélio Procópio

A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa.

## RESUMO

DE SOUZA, Vinicius. Compartilhamento de Energia Otimizado Aplicado a um Sistema Delta-UPS Trifásico Atuando no Modo de Operação *Backup*. 2020. 113f. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Este trabalho propõe a implementação de estratégias de compartilhamento da energia processada pelos conversores de potência série e paralelo que compõem uma fonte de energia ininterrupta (do Inglês UPS – *Uninterruptible Power Supply*) denominada neste trabalho de sistema Delta-UPS trifásico. Assim, por se tratar de um sistema trifásico, com a utilização de chaves estáticas adicionais, operando associadas às estratégias propostas de compartilhamento de energia, as potências ativa e não ativa processadas pelos conversores podem ser otimizadas quando o sistema Delta-UPS atua no modo de operação backup (rede ausente). Normalmente, no modo de operação standby (rede presente) da Delta-UPS convencional, a potência processada pelos conversores série e paralelo são menores que as potências exigidas pela carga, de modo que ambos os conversores operam subutilizados. Por outro lado, no modo de operação backup, o conversor série é sempre inibido, enquanto o conversor paralelo continua alimentando a carga, o que indica que o conversor paralelo deve ser dimensionado para fornecer toda a energia exigida pela carga. Com o emprego de estratégias de compartilhamento da energia propostas neste trabalho, o conversor série não é mais inibido no modo de operação backup e passa a operar em conjunto com o conversor paralelo. Portanto, por meio de algoritmos de compensação de potência, um compartilhamento efetivo da energia processada pelos conversores é realizado, tendo como base a quantidade de energia demandada pela carga. Como resultado, o dimensionamento do conversor paralelo da estrutura pode ser otimizado, uma vez que sua potência aparente nominal não necessita mais ser igual a demandada pela carga. A eficácia das estratégias de compartilhamento de potência propostas é avaliada por meio de resultados em simulações computacionais e experimentações práticas.

**Palavras-chave:** Sistema Delta-UPS. Modo de Operação *Backup*. Métodos de Compensação Ativa de Energia. Otimização da Potência Processada.

## ABSTRACT

DE SOUZA, Vinicius. Optimized Power Sharing Applied to a Three-Phase Delta-UPS System Operating in Backup Operation Mode. 2020. 113 f. Master Thesis – Electrical Engineering Graduate Program, Federal University of Technology – Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

This work proposes the implementation of strategies for sharing the energy handled by the series and parallel power converters, which compose a three-phase Delta uninterruptible power supply (UPS) system. Thus, since a three-phase system is considered, by using additional static switches, operating in association with the proposed strategies for power sharing, the overall amount of active and non-active power processed by the PWM converters can be optimized when the UPS operates in backup-mode. Usually, for a conventional operation of the Delta-UPS in standby operation mode, the power processed by the series and parallel converters are always lower than that demanded by the load, such that both converters operate underload. On the other hand, in the backup mode, the series converter is inhibited, while the parallel converter remains feeding the load, such that the parallel converter must be sized to provide all the power demanded by the load. It can be highlighted that by employing the strategies proposed in this paper, the series converter is not inhibited in backup mode and operates in conjunction with the parallel converter. Therefore, the power compensation algorithms predict an effective power sharing between the converters, based on the amount of energy demanded by the load. As a result, the sizing of the parallel converter can be optimized, since its nominal VA power rate does not need to be equal to that demanded by the load. Simulation and experimental results are performed in order to present the effectiveness of the proposed optimized power sharing strategies.

**Keywords:** Delta UPS System. Backup Operation Mode. Power Active Compensation Methods. Optimized Power Processing.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Diagrama em blocos da UPS <i>On-line</i> .....	24
Figura 2.2 – Diagrama em blocos da UPS <i>Line-interactive</i> .....	25
Figura 2.3 – Diagrama em blocos da Delta-UPS.....	26
Figura 2.4 – Diagrama do Filtro Ativo de Potência Série.....	27
Figura 2.5 – Diagrama do Filtro Ativo de Potência Paralelo.....	28
Figura 2.6 – Diagrama do Condicionador Unificado de Qualidade de Energia.....	29
Figura 2.7 – Diagrama da UPQC Convencional.....	29
Figura 2.8 – Diagrama do algoritmo de geração de referências de compensação com estratégia convencional do filtro série.....	30
Figura 2.9 – Diagrama do algoritmo de geração de referências de compensação com estratégia convencional do filtro paralelo.....	31
Figura 2.10 – Diagrama da UPQC Dual.....	33
Figura 2.11 – Diagrama do algoritmo de geração de referências de compensação com estratégia dual do filtro série.....	33
Figura 3.1 – Circuito de potência da Delta-UPS trifásica.....	35
Figura 3.2 – Circuito de potência da Delta-UPS trifásica no modo <i>standby</i> .....	37
Figura 3.3 – Circuito de potência da Delta-UPS trifásica no modo <i>backup</i> .....	38
Figura 3.4 – Diagrama do circuito equivalente da Delta-UPS no modo <i>backup</i> .....	39
Figura 3.5 – Algoritmo para geração de referências de corrente do conversor série no modo <i>standby</i> .....	41
Figura 3.6 – Algoritmo para geração de referências de corrente do conversor série no modo <i>backup</i> .....	42
Figura 3.7 – Algoritmo de compartilhamento de energia otimizado.....	45
Figura 3.8 – Algoritmo para geração de referências de tensão do conversor paralelo.....	46
Figura 4.1 – Circuito equivalente do conversor trifásico NPC conectado em série com a rede.....	48
Figura 4.2 – Circuito monofásico do conversor NPC conectado em série com a rede.....	48
Figura 4.3 – Circuito equivalente monofásico do conversor NPC conectado em série com a rede.....	49

Figura 4.4 – Circuito equivalente monofásico do conversor série.....	50
Figura 4.5 – Malha de controle do conversor série.....	52
Figura 4.6 – Circuito equivalente do conversor trifásico NPC paralelo.....	53
Figura 4.7 – Circuito equivalente de cada fase do conversor paralelo.....	54
Figura 4.8 – Diagrama em blocos da malha de controle do conversor série: em tempo (a) contínuo e (b) discreto.....	57
Figura 4.9 – Diagrama em blocos da malha de controle do conversor paralelo: em tempo (a) contínuo e (b) discreto.....	59
Figura 5.1 – Delta-UPS alimentando a carga 1 no modo <i>standby</i> (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	64
Figura 5.2 – Delta-UPS alimentando a carga 1 na transição entre os modos <i>standby-backup</i> (Resultados de simulação): tensões (100V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (10A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	66
Figura 5.3 – Delta-UPS alimentando a carga 1 no modo <i>backup</i> (Resultados de simulação): tensões (100V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	
Figura 5.4 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor série (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).....	67
Figura 5.5 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor paralelo (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).....	69
Figura 5.6 – Potências aparentes trifásicas processadas pelos conversores série e paralelo (Resultados de simulação – 200VA/div e 200ms/div).....	70
Figura 5.7 – Ganhos do algoritmo ACEO (Resultados de simulação – 0,1/div e 200ms/div)	71
Figura 5.8 – Delta-UPS alimentando a carga 2 no modo <i>standby</i> (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do	

transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	72
Figura 5.9 – Delta-UPS alimentando a carga 2 na transição entre os modos <i>standby-backup</i> (Resultados de simulação): tensões (100V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (10A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	73
Figura 5.10 – Delta-UPS alimentando a carga 2 no modo <i>backup</i> (Resultados de simulação): tensões (100V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	74
Figura 5.11 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor série (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).....	76
Figura 5.12 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor paralelo (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).....	76
Figura 5.13 – Potências aparentes trifásicas processadas pelos conversores série e paralelo (Resultados de simulação – 200VA/div e 200ms/div).....	77
Figura 5.14 – Ganhos do algoritmo ACEO (Resultados de simulação – 0,1/div e 200ms/div).....	77
Figura 5.15 – Delta-UPS alimentando a carga 3 no modo <i>standby</i> (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	78
Figura 5.16 – Delta-UPS alimentando a carga 3 na transição entre os modos <i>standby-backup</i> (Resultados de simulação): tensões (100V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (10A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	80

Figura 5.17 – Delta-UPS alimentando a carga 3 no modo <i>backup</i> (Resultados de simulação): tensões (100V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e corrente (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.....	81
Figura 5.18 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor série (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).....	82
Figura 5.19 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor paralelo (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).....	82
Figura 5.20 – Potências aparentes trifásicas processadas pelos conversores série e paralelo (Resultados de simulação – 200VA/div e 200ms/div).....	83
Figura 5.21 – Ganhos do algoritmo ACEO (Resultados de simulação – 0,1/div e 200ms/div).....	83
Figura 5.22 – Algoritmo ACEO com intervalo de não atuação de $\Delta i_{m\acute{a}x}$ .....	85
Figura 5.23 – Circuito equivalente de potência da Delta-UPS no modo <i>backup</i> .....	86
Figura 5.24 – Delta-UPS no modo <i>backup</i> alimentando a carga 1 (Resultados de simulação - 50V/div, 5A/div e 5ms/div): (a) tensões e correntes da carga, (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.....	87
Figura 5.25 – Delta-UPS no modo <i>backup</i> alimentando a carga 2 (Resultados de simulação - 50V/div, 5A/div e 5ms/div): (a) tensões e correntes da carga, (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.....	88
Figura 5.26 – Delta-UPS no modo <i>backup</i> alimentando a carga 3 (Resultados de simulação - 50V/div, 5A/div e 5ms/div): (a) tensões e correntes da carga, (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador,	

correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.....	89
Figura 5.27 – Delta-UPS no modo <i>backup</i> alimentando a carga 1 (Resultados experimentais - 50V/div, 5A/div e 5ms/div): (a) tensões e correntes da carga, (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.....	92
Figura 5.28 – Delta-UPS no modo <i>backup</i> alimentando a carga 2 (Resultados experimentais - 50V/div, 5A/div e 5ms/div): (a) tensões e correntes da carga, (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.....	93
Figura 5.29 – Delta-UPS no modo <i>backup</i> alimentando a carga 3 (Resultados experimentais - 50V/div, 5A/div e 5ms/div): (a) tensões e correntes da carga, (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor, correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador.....	94
Figura 5.30 – Circuito equivalente da Delta-UPS no modo <i>backup</i> .....	96
Figura 5.31 – Testes experimentais para confirmação da circulação da corrente $i_{npc}$ no lado secundário do transformador e conversor paralelo (5ms/div): formas de onda de (a) correntes do secundário do transformador ( $i_{2csabcn}$ - 5A/div), conversor série ( $i_{csabc}$ - 5A/div), conversor paralelo ( $i_{cpabc}$ - 2A/div) e carga ( $i_{Labcn}$ - 5A/div); e (b) correntes do secundário do transformador ( $i_{2csabc}$ )(5A/div), conversor série ( $i_{csabc}$ )(5A/div), conversor paralelo ( $i_{cpabc}$ - 2A/div), tensão da carga ( $v_{Labc}$ - 100/div) e subtração das correntes do conversor série pelas correntes do secundário do transformador ( $(i_{csabc} - i_{2csabc})$ - 2A/div).....	97
Figura A.1 – Diagrama em blocos do Sistema AF-PSD-3pPLL.....	107
Figura A.2 – Potências aparentes aritmética ( $S_A$ ) e vetorial ( $S_V$ ).....	113

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros adotados para controle do conversor série.....	56
Tabela 4.2 – Parâmetros adotados para controle do conversor paralelo.....	59
Tabela 4.3 – Parâmetros adotados para controle da tensão do barramento CC.....	60
Tabela 4.4 – Parâmetros adotados para controle de desequilíbrio de tensão do barramento CC.....	60
Tabela 5.1 – Cargas utilizadas para simulação.....	62
Tabela 5.2 – Parâmetros do sistema adotados em simulação.....	62
Tabela 5.3 – THD das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS alimentando a carga 1 durante o modo <i>standby</i> .....	65
Tabela 5.4 – THD das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS alimentando a carga 2 durante o modo <i>standby</i> .....	73
Tabela 5.5 – THD das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS alimentando a carga 3 durante o modo <i>standby</i> .....	79
Tabela 5.6 – Parâmetros do sistema.....	84
Tabela 5.7 – Cargas utilizadas.....	85
Tabela 5.8 – Valores medidos de potência aparente para as cargas 1,2 e 3 (Resultados de simulação).....	90
Tabela 5.9 – Ganhos em que o ACEO convergiu para as cargas 1,2 e 3 (Resultados de simulação).....	90
Tabela 5.10 – Valores medidos de potência aparente para as cargas 1,2 e 3 (Resultados experimentais).....	95
Tabela 5.11 – Ganhos em que o ACEO convergiu para as cargas 1,2 e 3 (Resultados experimentais).....	95
Tabela 5.12 – Percentual de potência aparente da carga processada pelos conversores (Resultados experimentais).....	98
Tabela 5.13 – Percentual de potência aparente da carga processada pelos conversores (Resultados experimentais).....	98

## LISTA DE ABREVIATURAS

ACEO	Algoritmo de Compartilhamento de Energia Otimizado
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
FAPP	Filtro Ativo de Potência Série
FAPS	Filtro Ativo de Potência Paralelo
FD	Fator de Deslocamento
FP	Fator de Potência
NPC	<i>Neutral-Point Clamped</i>
PLL	<i>Phased-Locked Loop</i>
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
SRF	Synchronous Rotacionary Frame
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i>
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_{cp}$	Capacitor de filtragem do conversor paralelo
$f_{ACEO}$	Frequência de amostragem do algoritmo ACEO
$f_{ad}$	Frequência de amostragem do conversor A/D do DSC
$f_{ch}$	Frequência de chaveamento dos conversores
$K_{PWM}$	Ganho PWM
$L_{cp}$	Indutor de acoplamento do conversor paralelo
$L_{cs}$	Indutor de acoplamento do conversor série
$\Delta$	Passo de incremento do algoritmo ACEO
$\Delta i_{máx}$	Variável de definição de intervalo de não atuação do ACEO
$R_{cp}$	Resistência do indutor de acoplamento do conversor paralelo
$R_{cs}$	Resistência do indutor de acoplamento do conversor série
$V_{dc}$	Tensão nominal do barramento CC
$V_L$	Tensão nominal da carga
$V_s$	Tensão nominal da rede
$\Delta$	Passo de incremento do algoritmo ACEO
$\Delta i_{máx}$	Variável de definição de intervalo de não atuação do ACEO

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA.....	20
1.1.1 OBJETIVO GERAL.....	20
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	21
1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	21
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	22
<b>2. CONDICIONADORES ATIVOS DE POTÊNCIA.....</b>	<b>23</b>
2.1 FONTES DE ENERGIA ININTERRUPTA.....	23
2.1.1 UPS <i>ON-LINE</i> .....	24
2.1.2 UPS <i>LINE-INTERACTIVE</i> .....	25
2.1.3 DELTA-UPS.....	26
2.2 CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA.....	27
2.2.1 ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO CONVENCIONAL.....	29
2.2.2 ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO DUAL.....	32
<b>3. CIRCUITO DE POTÊNCIA E REFERÊNCIAS DE COMPENSAÇÃO.....</b>	<b>36</b>
3.1 CIRCUITO DE POTÊNCIA DA DELTA-UPS TRIFÁSICA.....	36
3.2 REFERÊNCIAS DE COMPENSAÇÃO DO CONVERSOR SÉRIE.....	40
3.2.1 MODO DE OPERAÇÃO <i>STANDBY</i> .....	40
3.2.2 MODO DE OPERAÇÃO <i>BACKUP</i> .....	42
3.3 ALGORITMO DE COMPARTILHAMENTO DE ENERGIA OTIMIZADO.....	44
3.4 REFERÊNCIAS DE COMPENSAÇÃO DO CONVERSOR PARALELO.....	46
<b>4. MODELAGEM E CONTROLE DOS CONVERSORES DE POTÊNCIA.....</b>	<b>47</b>
4.1 MODELO MATEMÁTICO DO CONVERSOR SÉRIE.....	47
4.2 MODELO MATEMÁTICO DO CONVERSOR PARALELO.....	52
4.3 MALHA DE CONTROLE DO CONVERSOR SÉRIE.....	56
4.4 MALHA DE CONTROLE DO CONVERSOR PARALELO.....	57
4.5 MODELO MATEMÁTICO E CONTROLE DO BARRAMENTO CC.....	60
<b>5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES E EXPERIMENTAIS.....</b>	<b>61</b>

5.1 SISTEMA DELTA-UPS.....	62
5.1.1 CARGA 1.....	63
5.1.2 CARGA 2.....	71
5.1.3 CARGA 3.....	78
5.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DA DELTA-UPS NO MODO <i>BACKUP</i> .....	84
5.2.1 RESULTADOS DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.....	87
5.2.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS.....	91
<b>6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....</b>	<b>99</b>
6.1 CONCLUSÕES.....	99
6.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE.....	100
6.3 TRABALHOS DESENVOLVIDOS AO LONGO DESTA PESQUISA.....	101
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>102</b>
APÊNDICE A – SISTEMA PLL TRIFÁSICO AF-PSD-3PPLL.....	107
APÊNDICE B – POTÊNCIAS APARENTES TRIFÁSICAS.....	111

## 1. INTRODUÇÃO

O nível de consumo de energia elétrica é um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e social de uma população, uma vez que reflete o ritmo das atividades realizadas em áreas como comunicação, segurança, comércio, indústria. É notório o quão dependente a sociedade é da eletricidade, com isso evidencia-se a necessidade do desenvolvimento de estratégias que garantam o fornecimento de energia dentro de padrões de qualidade, de modo que os equipamentos dos consumidores operem sem perdas de desempenho e vida útil (ANEEL, 2016; IEEE, 2010).

Neste sentido, o Sistema Elétrico de Potência (SEP) é suscetível à diversos problemas relacionados à Qualidade de Energia Elétrica (QEE), os quais podem ser divididos entre distúrbios estacionários e não estacionários.

Dentre os distúrbios estacionários, harmônicos de tensão e corrente apresentam maior destaque, devido ao elevado uso de cargas não-lineares, como fontes chaveadas, tais cargas drenam da rede, correntes com elevado conteúdo harmônico. Harmônicos, por sua vez, são componentes de tensão e/ou corrente com frequências múltiplas da frequência fundamental da rede. Tais distúrbios prejudicam a qualidade da energia fornecida, uma vez que podem causar redução do fator de potência, aumento de ruídos na frequência audível, oscilações eletromagnéticas de torque em motores elétricos e aquecimento excessivo de transformadores (IEEE, 2010).

Por outro lado, entre os distúrbios dinâmicos, destacam-se os afundamentos, elevações e interrupções de tensão. Tais distúrbios são caracterizados pela alteração do valor eficaz da tensão da rede, e podem ocasionar baixo desempenho, interrupção do funcionamento, ou até a queima de equipamentos elétricos. As causas, na maioria das vezes, estão relacionadas à entrada ou saída de grandes cargas ou bancos de capacitores, além de faltas nas linhas de transmissão (ANEEL, 2016).

Fontes de energia ininterrupta (do Inglês UPS – *Uninterruptible Power Supply*) têm sido amplamente utilizadas contra falhas da rede elétrica no intuito de proteger e fornecer energia sem interrupção às cargas críticas, tais como equipamentos de telecomunicações e hospitalares, computadores, centros de dados. Além disso, as UPSs também podem solucionar problemas relacionados à qualidade de energia, tais como afundamentos de tensão, elevações de tensão, harmônicos de tensão, desequilíbrios de tensão, dentre outros, de forma que as tensões fornecidas

à carga sejam senoidais, reguladas e equilibradas (ABUSARA; SHARKH, 2011; AREDES; HEUMANN. WATANABE, 1998; CAMPANHOL et. al, 2017; DA SILVA et. al, 2002; MODESTO; DA SILVA; JÚNIOR, 2015; MODESTO et. al, 2015).

As UPSs podem ser divididas em três grandes categorias, sendo elas o de dupla conversão de energia (UPS *on-line*), de única conversão de energia (UPS *line-interactive*) e a Delta Conversion UPS (Delta-UPS), sendo esta última também considerada como um sistema com dupla conversão de energia (RATHMANN, WARNER, 1996; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007; ABUSARA E SHARKH, 2011; RIBEIRO et. al, 2018; MODESTO, DA SILVA e JÚNIOR, 2015; FATEMI, MOHMADIAN e YAZDIAN, 2012; APC, 2011; UCEDA, 2007; IEEE, 1996)..

A UPS *on-line* sofre com o baixo fator de potência (FP) e com elevadas perdas, que acarreta em uma baixa eficiência, em torno de 90%. Por sua vez, a UPS *line-interactive*, com simples conversão de energia, não sofre com problemas associados à distorção das correntes drenadas da rede. No entanto, com a variação das amplitudes das tensões da rede acima da nominal, as perdas aumentam e o FP também varia, além disso, o FP é dependente da carga. Por outro lado, destaca-se a sua eficiência em torno de 95%. Já a Delta-UPS, apesar de ter em sua estrutura e concepção a dupla conversão de energia, possui baixíssimas distorções nas correntes drenadas da rede, fator de potência unitário, e ainda eficiência em torno de 97% (RATHMANN, WARNER, 1996; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007; ABUSARA E SHARKH, 2011; RIBEIRO et. al, 2018; MODESTO, DA SILVA e JÚNIOR, 2015; FATEMI, MOHMADIAN e YAZDIAN, 2012; APC, 2011; UCEDA, 2007; IEEE, 1996).

Operando em seu modo de operação típico ou mesmo convencional, o sistema Delta-UPS possui dois conversores conectados na configuração *back-to-back*, os quais são empregados a fim de realizar o condicionamento ativo de energia série-paralelo. Esta topologia de UPS, apesar de utilizar duas estruturas de conversão de energia operando simultaneamente, apresenta a característica de possuir menores perdas de energia em sua operação no modo *standby* (rede presente) e, conseqüentemente, obter maior eficiência quando comparada com a UPS *on-line*. Assim, no modo de operação *standby*, a Delta-UPS é controlada para operar de maneira similar a um condicionador de qualidade de energia unificado (do Inglês UPQC – *Unified Power Quality Conditioner*) (AREDES; HEUMANN. WATANABE, 1998; DA SILVA; CAMPANHOL; DE SOUZA; 2018; FUJITA; AKAGI, 1998; KHADIKAR, 2011; MODESTO; DA SILVA; JÚNIOR,

2015; MODESTO et. al, 2015), realizando o condicionamento de energia enquanto as baterias são mantidas no estado de carga ou no estado de flutuação. Em outras palavras, no modo *standby* de operação, o conversor série atua como um filtro ativo de potência série (NIELSON et. al, 2004; KHADKIKAR; CHANDRA, 2011), enquanto o conversor paralelo opera como um filtro ativo de potência paralelo (BACON; DA SILVA, 2015; BRIZ et. al, 2013; RIBEIRO, 2011; RIBEIRO, 2018; HE et. al, 2013).

No modo de operação de *backup* (rede-ausente), o conversor paralelo da Delta-UPS fornece energia para a carga a partir da energia armazenada pelo banco de baterias. Nesse caso, o conversor série é inibido e não processa qualquer tipo de energia. Por outro lado, o conversor paralelo deve processar toda potência aparente nominal exigida pela carga e, conseqüentemente, deve ser dimensionado para atender a esta exigência. Destaca-se, no entanto, que os conversores série e paralelo da Delta-UPS ao operar no modo *standby*, processam níveis de potências inferiores àquelas exigidas pela carga, ou ainda, ambos os conversores operam com suas potências abaixo da nominal, isto é, operam subdimensionados. Isto acontece pois, no modo *standby*, os conversores da Delta-UPS atuam apenas no condicionamento ativo de potência e não necessitam processar toda a energia ativa consumida pela carga, diminuindo as perdas e, conseqüentemente, aumentando sua eficiência (RATHMANN, WARNER, 1996; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007; ABUSARA E SHARKH, 2011; RIBEIRO et. al, 2018; MODESTO, DA SILVA e JÚNIOR, 2015; FATEMI, MOHMADIAN e YAZDIAN, 2012; APC, 2011; UCEDA, 2007; IEEE, 1996).

Dentro desta característica de operação, percebe-se que o conversor paralelo da Delta-UPS, apesar de ser subutilizado no modo *standby*, deve ser dimensionado para fornecer toda a potência aparente demandada pela carga no modo *backup*. Já o conversor série normalmente é dimensionado para uma taxa de potência variando entre 30% e 50% da potência nominal da carga, uma vez que tal dimensionamento depende dos níveis de afundamentos e elevações de tensão admissíveis a serem compensados (RATHMANN, WARNER, 1996; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007; ABUSARA E SHARKH, 2011; RIBEIRO et. al, 2018; MODESTO, DA SILVA e JÚNIOR, 2015; FATEMI, MOHMADIAN e YAZDIAN, 2012; APC, 2011).

Este trabalho apresenta a utilização de estratégias de controle e operação aplicáveis à Delta-UPS, as quais permitem o compartilhamento de energia entre os conversores de potência no

modo de operação *backup*. Assim, diferentemente do modo de operação típico da Delta-UPS, o conversor série passa a não ser inibido no modo *backup*, uma vez que, por meio de chaves estáticas adicionais, o conversor série permanece em operação e conectado em paralelo com a carga, da mesma forma como ocorre naturalmente com o conversor paralelo.

Para permitir esta nova funcionalidade da Delta-UPS, os novos algoritmos de compensação de potência propostos devem prever um compartilhamento efetivo de energia entre os conversores, tendo como parâmetro de compartilhamento as potências ativa e não ativa demandadas pela carga.

Como resultado desta nova forma de controle e operação da Delta-UPS, o conversor paralelo, que permanece em operação tanto no modo *standby* quanto no *backup*, pode ser dimensionado, dependendo da estratégia de projeto adotada, para uma potência em torno de 50% da potência nominal da carga, uma vez que o conversor série, que antes permanecia inibido no modo *backup*, passa a compartilhar o restante da energia demandada pela carga.

Esta nova forma de controlar o sistema Delta-UPS é inédito na literatura e representa avanço tecnológico no sentido de otimizar a potência processada pelos conversores e, conseqüentemente, reduzir custos, além de aumentar o desempenho do sistema.

Resultados experimentais e de simulação são apresentados, a fim de avaliar o desempenho das estratégias de operação e controle propostas para o compartilhamento otimizado de energia entre os conversores de potência no modo de operação *backup* da Delta-UPS.

## 1.1 OBJETIVOS DA PESQUISA

Os objetivos deste trabalho são divididos em objetivo geral e específicos.

### 1.1.1 OBJETIVO GERAL

Desenvolver e implementar estratégias de controle e operação capazes de compartilhar a energia entre os conversores de potência série e paralelo de um sistema Delta-UPS trifásico no modo de operação *backup*.

### 1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma estratégia de operação da Delta-UPS de modo que o conversor série não seja inibido no modo *backup*.
- Desenvolver e implementar um algoritmo que permita o controle do compartilhamento de energia entre os conversores de potência no modo de operação *backup* da Delta-UPS;
- Avaliar por meio dos resultados de simulação e experimentais o desempenho das estratégias de controle e operação para compartilhamento de energia entre os conversores de potência da UPS no modo de operação *backup*.

### 1.2 CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

Considerando o modo de operação *backup* da Delta-UPS duas principais contribuições podem ser ressaltadas neste trabalho:

- Compartilhamento de energia entre os conversores de potência, o qual é possível por meio da inclusão de três chaves estáticas ao circuito de potência da Delta-UPS trifásica, que permitam estabelecer a conexão do conversor série em paralelo com a carga no modo de operação *backup*. Assim, a potência solicitada pela carga, a qual é toda suprida pelo banco de baterias no modo *backup*, pode ser compartilhada entre os dois conversores de potência;
- Desenvolvimento de algoritmos de cálculo das potências a serem entregues à carga pelos conversores de potência. Tais algoritmos são capazes de dividir entre os conversores as quantidades de potência ativa e não ativa demandadas pela carga. Tal contribuição, permite uma redução de até 50% do dimensionamento do conversor paralelo, e, conseqüentemente, redução nos custos de implementação, quando comparado com o dimensionamento típico da Delta-UPS.

### 1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 são apresentados os principais condicionadores ativos de potência utilizados comercialmente e industrialmente. O circuito de potência e os algoritmos utilizados para o compartilhamento de energia otimizado da Delta-UPS no modo de operação *backup* são discutidos no Capítulo 3. No Capítulo 4 são apresentados os modelos matemáticos, bem como as malhas e estratégias de controle dos conversores de potência da Delta-UPS. O Capítulo 5 apresenta os resultados de simulação e experimentais do sistema Delta-UPS trifásico. Por fim, o Capítulo 6 apresenta as conclusões e propostas de continuidade.

## 2. CONDICIONADORES ATIVOS DE POTÊNCIA

Este capítulo apresenta as topologias de UPS mais utilizadas comercialmente e industrialmente. Além disso, são apresentados conceitos relacionados aos sistemas UPQC, destacando as estratégias de compensação ativa de energia mais utilizadas, uma vez que o sistema Delta-UPS apresentado neste trabalho possui características de funcionamento similares ao UPQC quando em operação no modo *standby*.

### 2.1 FONTES DE ENERGIA ININTERRUPTA

Sistemas de Fornecimento de Energia Ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply* - UPS) são empregados para proteger cargas críticas contra distúrbios de tensão da rede elétrica, além de manter o fornecimento contínuo de energia para as mesmas (RATHMANN, WARNER, 1996; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007; ABUSARA E SHARKH, 2011; RIBEIRO et. al, 2018; MODESTO, DA SILVA e JÚNIOR, 2015; FATEMI, MOHMADIAN e YAZDIAN, 2012; APC, 2011).

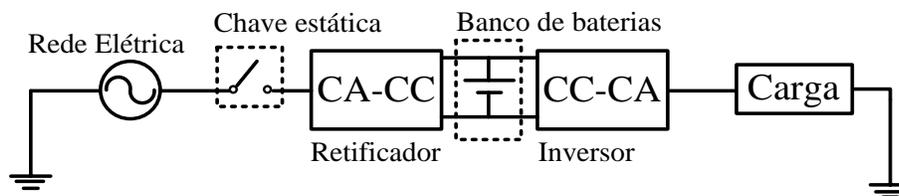
Além de serem consideradas cargas críticas, equipamentos como radares para aeroportos, equipamentos hospitalares, centros de armazenamento de dados, também têm características de cargas não-lineares, ou seja, tais cargas drenam do sistema de energia elétrica altos níveis de correntes harmônicas, as quais, dependendo do nível de conteúdo harmônico envolvido e da impedância da rede, podem interferir distorcendo a forma de onda de tensão da rede e, por sua vez, degradando os indicadores de qualidade de energia elétrica (QEE) (IEEE, 2010). Assim, o objetivo é que os sistemas UPS possam melhorar também os indicadores de QEE, como fator de potência, enquanto protegem cargas críticas contra eventos de QEE, como afundamentos e elevações de tensão, harmônicos de tensão, interrupções de tensão, dentre outros. Em outras palavras, os sistemas UPS devem fornecer tensões reguladas, balanceadas (sistemas trifásicos) e senoidais para qualquer tipo de carga, independentemente das características da mesma, bem como das condições da rede elétrica (ABUSARA; SHARKH, 2011; AREDES; CAMPANHOL et. al, 2017; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO; DE VICUNA; UCEDA, 2007; HEUMANN. WATANABE, 1998;

IEEE, 1996; MODESTO et. al, 2015; MODESTO; DA SILVA e JÚNIOR, 2015). Nesta seção serão apresentados alguns tipos de sistemas UPS mais empregados comercialmente.

### 2.1.1 UPS *ON-LINE*

A UPS *on-line* mostrada na Figura 2.1 é composta por dois estágios de conversão de energia. No primeiro estágio, por meio de um retificador, a energia da rede é convertida de corrente alternada (CA) para corrente contínua (CC), onde parte da energia drenada da rede elétrica é utilizada para carregar o banco de baterias. Já no segundo estágio, é realizado o processo inverso, ou seja, a energia do barramento CC, o qual é formado por um banco de baterias, é convertida de CC para CA, alimentando assim a carga. Desse modo, a UPS *on-line* é capaz de fornecer tensões senoidais e equilibradas à carga, independente da amplitude e frequência das tensões de entrada, tornando o sistema mais robusto, quando comparado a outras topologias de UPS, como *off-line*, *line-interactive* e Delta-UPS. Por outro lado, a eficiência do sistema é comprometida, entre 88 e 92%, visto que são necessários dois estágios de conversão de energia. Já no modo *backup*, uma vez que a rede está ausente, apenas o estágio inversor permanece em operação (RATHMANN, WARNER, 1996; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007; APC, 2011).

**Figura 2.1 – Diagrama em blocos da UPS *on-line*.**

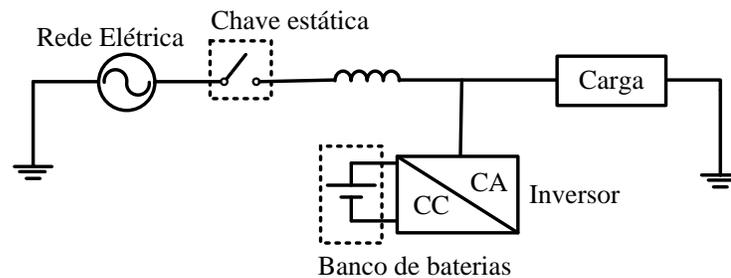


**Fonte: Autor.**

### 2.1.2 UPS *LINE-INTERACTIVE*

A Figura 2.2 apresenta o diagrama em blocos da UPS *Line-interactive*, a qual é caracterizada por UPS de simples conversão de energia, pois apresenta apenas um conversor bidirecional em energia. No modo *standby* a rede fornece energia tanto à carga quanto para as baterias por meio do inversor.

Figura 2.2 – Diagrama em blocos da UPS *Line-interactive*.



Fonte: Autor.

No modo *backup*, quando a rede está ausente, a chave estática desacopla a rede do sistema e o inversor processa toda a energia enviada à carga oriunda do banco de baterias. A UPS *Line-interactive* não sofre com problemas associados à distorção das correntes drenadas da rede, no entanto com a variação das amplitudes das tensões da rede acima da nominal, as perdas aumentam e o FP também varia, além disso, o FP também é dependente da carga. Por outro lado, como vantagem, a UPS *Line-interactive* destaca-se devido a sua alta eficiência em torno de 95% (RATHMANN, WARNER, 1996; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007; APC, 2011).

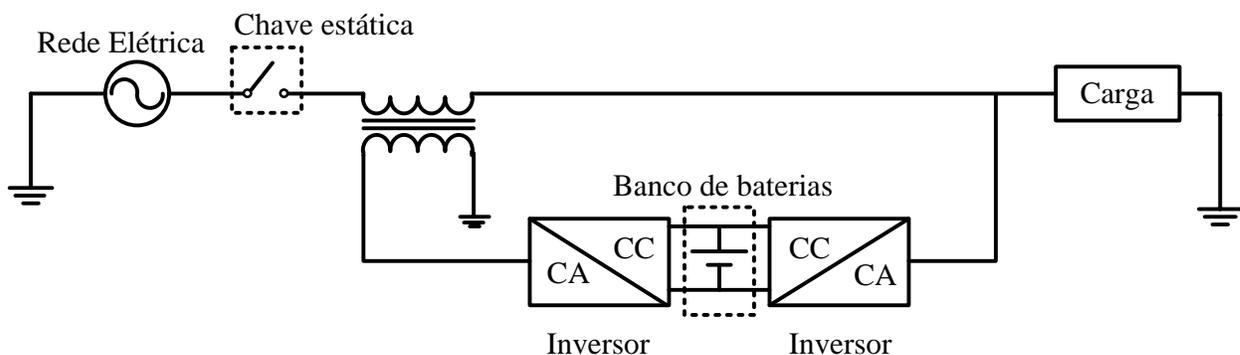
### 2.1.3 DELTA-UPS

A Delta-UPS mostrada na Figura 2.3, também caracterizada como UPS de dupla conversão de energia, é formada por dois conversores conectados na configuração *back-to-back*. Neste caso, no modo *standby*, o sistema UPS possui a característica de ser controlado para operar como uma UPQC. Assim, o conversor série atua como um filtro de potência ativo série, enquanto o conversor paralelo opera como um filtro de potência ativo paralelo, garantindo correntes da rede senoidais e equilibradas, bem como tensões senoidais e equilibradas fornecidas à carga. No modo *backup*, o conversor paralelo fornece energia para a carga a partir da energia armazenada no banco de baterias. Nesse caso, o conversor série é inibido e não processa energia, logo, o conversor paralelo processa a potência aparente total exigida pela carga (RATHMANN, WARNER, 1996; DA SILVA et. al, 2002; GUERRERO, DE VICUNA e UCEDA, 2007; APC, 2011).

A Delta-UPS, apesar de ter em sua estrutura e concepção a dupla conversão de energia, possui baixíssimas distorções nas correntes drenadas da rede, fator de potência unitário e alta eficiência em torno de 97% (APC, 2011).

Por outro lado, a Delta-UPS pode sofrer interferências associadas aos problemas de QEE (harmônicos e desbalanços de tensão, afundamentos e elevações de tensão, variações de frequência, transitórios de tensão, dentre outros), os quais atuam como distúrbios no controle das tensões de saída. Por outro lado, um controle adequado atuando nas tensões de saída são capazes de rejeitar tais distúrbios sem maiores dificuldades.

Figura 2.3 – Diagrama em blocos da Delta-UPS.



Fonte: Autor.

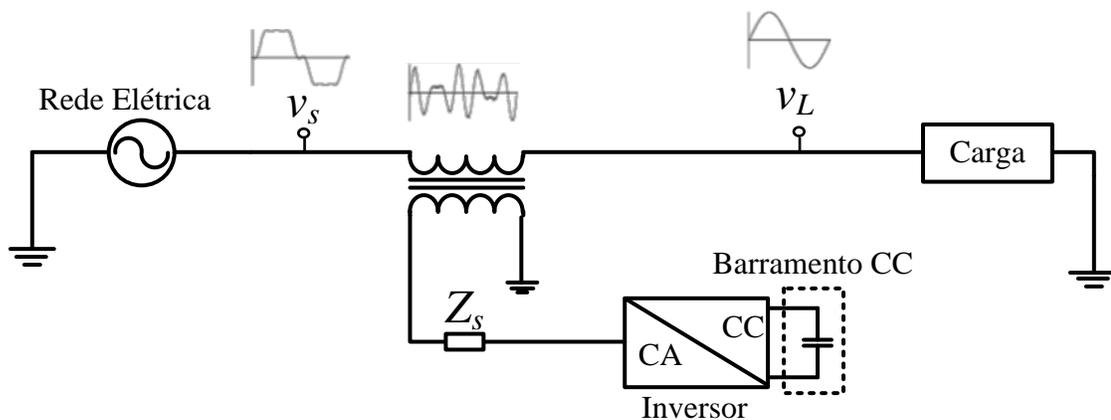
## 2.2 CONDICIONADOR UNIFICADO DE QUALIDADE DE ENERGIA

Nesta seção faz-se necessário tratar das características de operação de um sistema UPQC, uma vez que o sistema Delta-UPS apresentado neste trabalho possui características de funcionamento similares ao UPQC quando em operação no modo *standby*. Além disso, as estratégias de compensação de potência utilizados na Delta-UPS, empregadas para compensar reativos e suprimir harmônicos de corrente da carga também são similares, considerando que a Delta-UPS, no modo *standby*, realiza as funções dos filtros ativos de potência (FAP) série e paralelo. Ressalta-se, porém, que o sistema Delta-UPS deve prever o processo de carga do banco de baterias no modo de operação *standby*.

Uma estratégia para a solução de distúrbios de QEE é a aplicação de Filtros Ativos de Potência (FAP). Nestes filtros são utilizados algoritmos para os cálculos das referências de compensação de tensão ou corrente, que por meio de conversores estáticos impõem as referências de compensação a fim de minimizar ou eliminar o efeito dos distúrbios.

Uma vez que o FAP é conectado em série com a rede elétrica, é então denominado Filtro Ativo de Potência Série (FAPS), como é apresentado na Figura 2.4. O FAPS opera compensando harmônicos, afundamentos/elevações e desbalanços de tensão da rede, atuando como Restaurador Dinâmico de Tensão (*Dynamic Voltage Restorer - DVR*), de forma a garantir tensão senoidal e equilibrada à carga (NIELSON et. al, 2004; KHADKIKAR; CHANDRA, 2011).

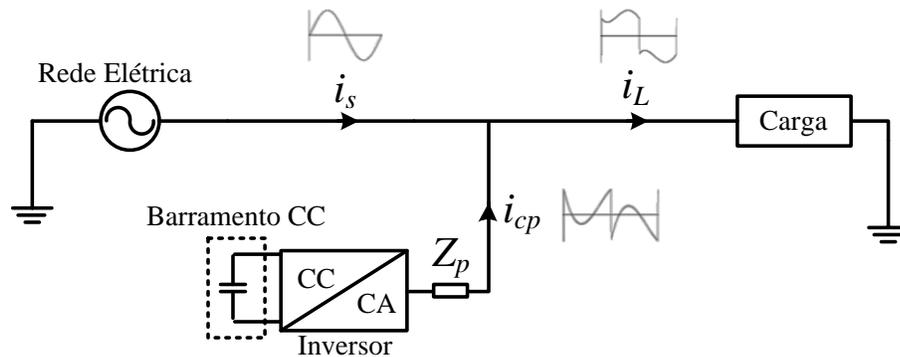
**Figura 2.4 - Diagrama do Filtro Ativo de Potência Série (FAPS).**



Fonte: Autor.

Por outro lado, conforme apresentado na Figura 2.5, quando o FAP é conectado em paralelo com a carga, este passa a ser denominado Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP). O FAPP opera compensando as componentes harmônicas de corrente da rede, além de realizar, caso necessário, a supressão de potência reativa da carga (BACON; DA SILVA, 2015; BRIZ et. al, 2013; RIBEIRO, 2011; RIBEIRO, 2018; HE et. al, 2013).

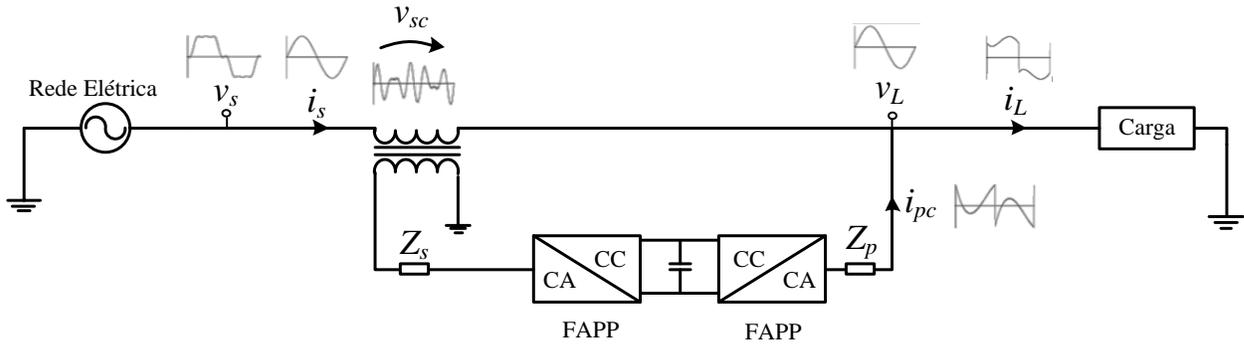
### 2.5 - Diagrama do Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP).



Fonte: Autor.

Como mostrado a Figura 2.6, os filtros ativos de potência citados (FAPS e FAPP) podem ser utilizados simultaneamente numa configuração denominada de Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (*Unified Power Quality Conditioner* – UPQC), que consiste em unir as duas características de filtragem associadas aos filtros série e paralelo. O UPQC tem por objetivo garantir que as correntes da rede sejam senoidais e equilibradas, bem como que as cargas sejam alimentadas por tensões senoidais e equilibradas (AREDES; HEUMANN. WATANABE, 1998; DA SILVA; CAMPANHOL; DE SOUZA; 2018; FUJITA; AKAGI, 1998; KESLER; OZDEMIR, 2010; KHADIKAR, 2011; MODESTO; DA SILVA; JÚNIOR, 2015; MODESTO et. al, 2015), como mostra a Figura 2.6.

## 2.6 - Diagrama do Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (UPQC).

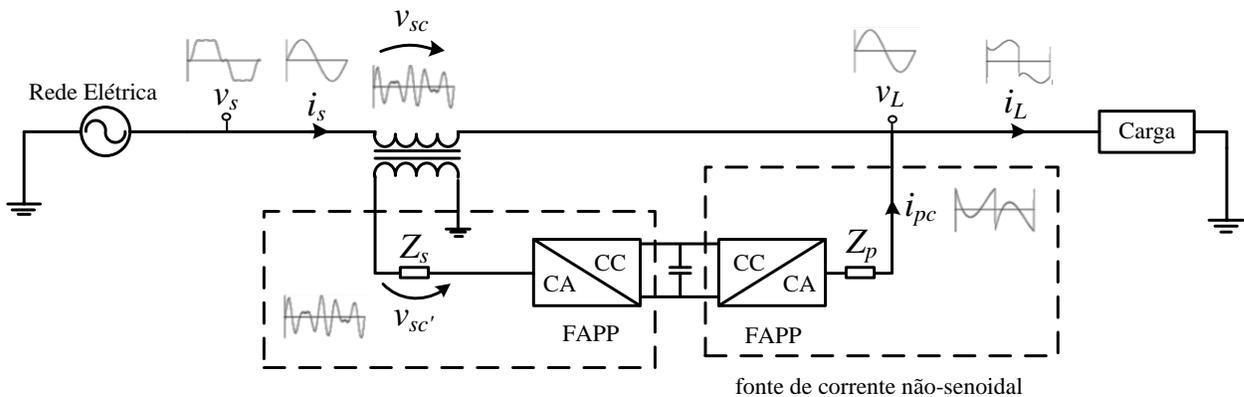


Fonte: Autor.

### 2.2.1 ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO CONVENCIONAL

A Figura 2.7 apresenta o diagrama do UPQC com estratégia de compensação convencional, a qual caracteriza-se pelo fato do filtro ativo série, controlado em tensão, impor tensão não senoidal ao transformador série, em contra fase à tensão da rede, a fim de compensar distúrbios das tensões da rede. Já o filtro paralelo, controlado em corrente, impõe correntes não senoidais, com o intuito de fornecer à carga as parcelas harmônicas e reativas demandadas pela mesma.

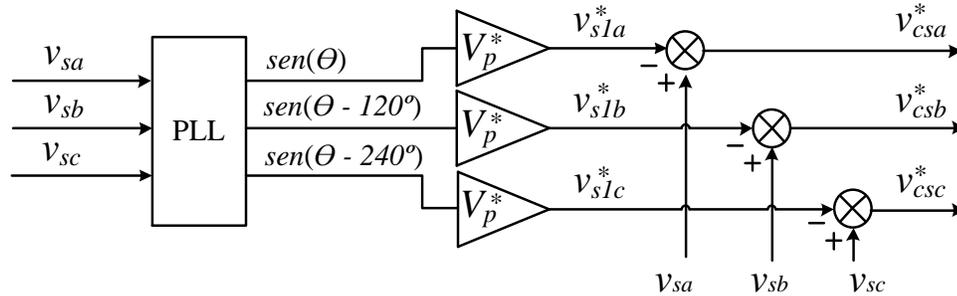
Figura 2.7 – Diagrama da UPQC convencional.



Fonte: Autor.

A Figura 2.8 apresenta o diagrama de geração das referências de compensação para o conversor série. Um sistema de detecção de ângulo de fase, conhecido como PLL (*phased-locked loop*) é utilizado para estimar o ângulo de fase ( $\theta$ ) das tensões da rede.

**Figura 2.8 – Diagrama do algoritmo de geração de referências de compensação convencional do filtro série.**



**Fonte: Autor.**

Assim, obtido o ângulo de fase das tensões da rede, é possível estimar as componentes fundamentais de sequência positiva das tensões da rede, por meio da Equação (2.1), onde,  $V_p^*$  é equivalente ao valor de pico nominal da tensão da rede elétrica:

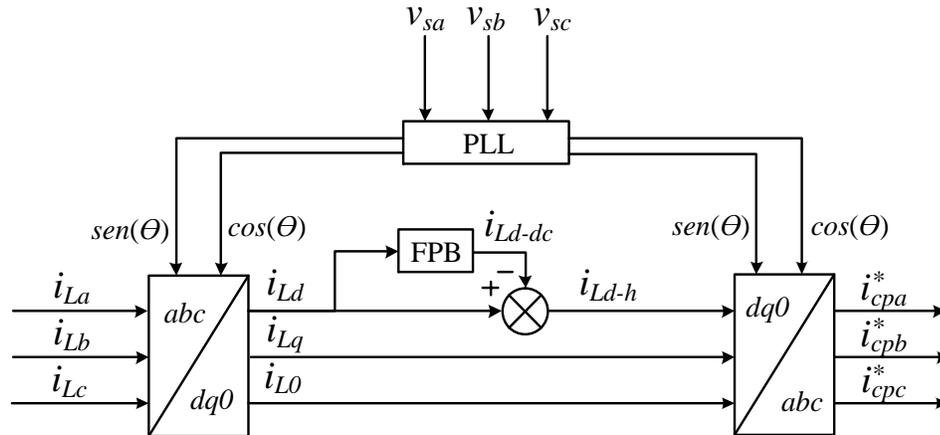
$$\begin{bmatrix} v_{s1a}^* \\ v_{s1b}^* \\ v_{s1c}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p^* \text{sen}\theta \\ V_p^* \text{sen}(\theta - 120^\circ) \\ V_p^* \text{sen}(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Em seguida, é possível obter as referências de compensação subtraindo as componentes fundamentais de sequência positiva estimadas das tensões da rede pelas tensões medidas da rede, como apresentado na Equação (2.2):

$$\begin{bmatrix} v_{csa}^* \\ v_{csb}^* \\ v_{csc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{s1a}^* \\ v_{sb} - v_{s1b}^* \\ v_{sc} - v_{s1c}^* \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

A Figura 2.9 apresenta o diagrama de geração das referências de compensação do conversor paralelo. O filtro paralelo tem como objetivo impor as parcelas harmônica e reativa de corrente da carga, de modo que a rede forneça apenas a parcela ativa de corrente da carga.

Figura 2.9 – Diagrama do algoritmo de geração de referências de compensação convencional do filtro paralelo.



Fonte: Autor.

As referências de compensação podem ser calculadas, primeiramente, por meio da medição das correntes da carga e transformação do referencial estacionário  $abc$  para o referencial síncrono  $dq0$  como apresentado na equação (2.3):

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Deste modo, a parcela ativa média de corrente da carga ( $i_{Ld-dc}$ ) pode ser obtida aplicando-se um filtro passa-baixa em  $i_{Ld}$ , e em seguida, a parcela alternada de  $i_{Ld}$  ( $i_{Ld-h}$ ) pode ser obtida da seguinte forma:

$$i_{Ld-h} = i_{Ld} - i_{Ld-dc} \quad (2.4)$$

As parcelas de corrente  $i_{Ld-h}$  e  $i_{Lq}$  correspondem ao conteúdo harmônico e reativo total de corrente da carga, enquanto a corrente  $i_{L0}$  corresponde a parcela de desequilíbrio de corrente da carga. Sendo que o objetivo do conversor paralelo com estratégia de compensação

convencional é impor o conteúdo não senoidal de corrente da carga, adota-se as seguintes referências de compensação para o conversor paralelo no referencial síncrono  $dq0$ :

$$\begin{bmatrix} i_{cpd}^* \\ i_{cpq}^* \\ i_{cp0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Ld-h} \\ i_{Lq} \\ i_{L0} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

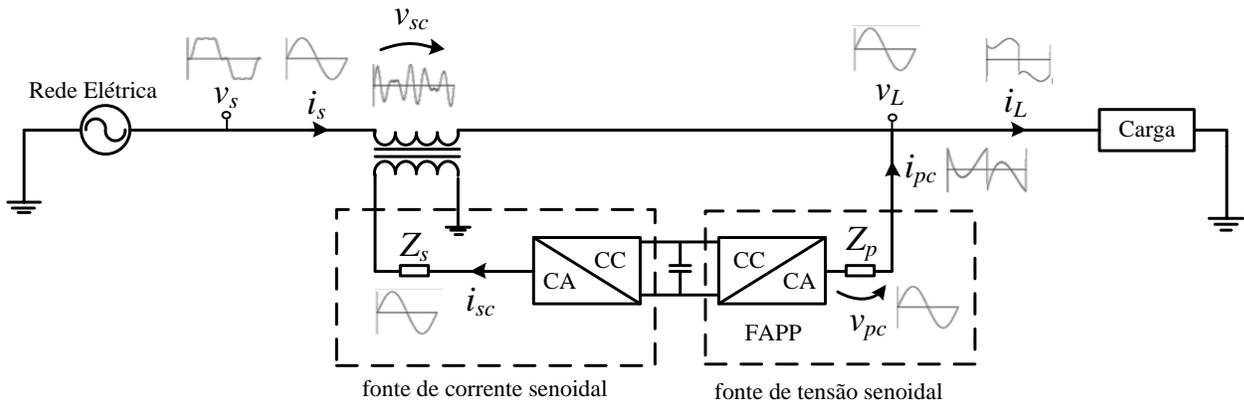
Por fim, as referências de compensação de corrente do conversor paralelo no referencial  $abc$  podem ser obtidas por:

$$\begin{bmatrix} i_{cpa}^* \\ i_{cpb}^* \\ i_{cpc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\text{sen}\theta & 0 \\ \text{sen}\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{cpd}^* \\ i_{cpq}^* \\ i_{cp0}^* \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

### 2.2.2 ESTRATÉGIA DE COMPENSAÇÃO DUAL

A Figura 2.10 apresenta o diagrama do UQPC com estratégia de compensação dual. Neste caso, o conversor série é controlado em corrente e impõe correntes senoidais e equilibradas à rede por meio do transformador de acoplamento, enquanto o conversor paralelo, controlado em tensão, fornece tensões senoidais e equilibradas à carga (KESLER; OZDEMIR, 2010; MODESTO; DA SILVA; JÚNIOR, 2015; MODESTO; DA SILVA; MODESTO et. al, 2015).

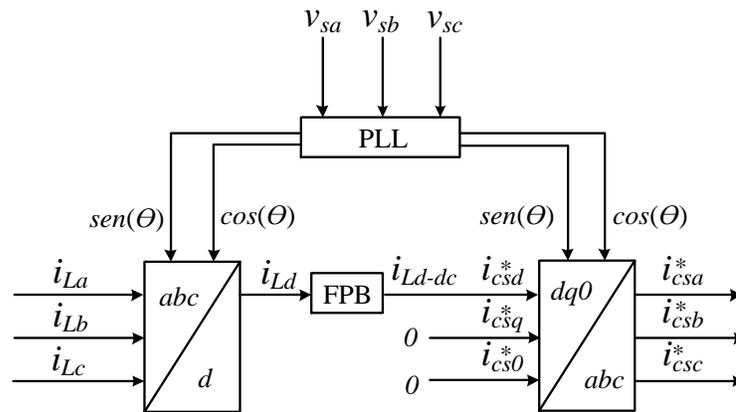
Figura 2.10 – Diagrama da UPQC Dual.



Fonte: Autor.

A Figura 2.11 apresenta o diagrama de geração das referências de compensação do conversor série, as quais são calculadas a fim de garantir que as correntes do filtro série sejam senoidais, equilibradas e em fase com a componente fundamental de sequência positiva das tensões da rede.

Figura 2.11 – Diagrama do algoritmo de geração de referências de compensação dual do filtro série.



Fonte: Autor.

As referências de compensação podem ser obtidas medindo as correntes da carga e passando do referencial estacionário  $abc$  para o referencial síncrono  $dq0$ . Por meio da Equação (2.7) é possível obter  $i_{Ld}$ , a qual é composta por parcelas ativa e harmônica de corrente da carga.

$$i_{Ld} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\frac{1}{2}\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta & -\frac{1}{2}\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

O valor médio de  $i_{Ld}$ , a saber ( $i_{Ld-dc}$ ), pode ser obtido por meio de um filtro passa-baixa, obtendo-se assim,  $i_{Ld-dc}$ , a qual representa, no referencial síncrono, toda parcela ativa da corrente da carga. Considerando que o conversor série, da UPQC com estratégia de compensação dual, tem como objetivo impor a somente a parcela ativa de corrente da carga, as referências de compensação no referencial síncrono  $dq0$  podem ser definidas da seguinte maneira:

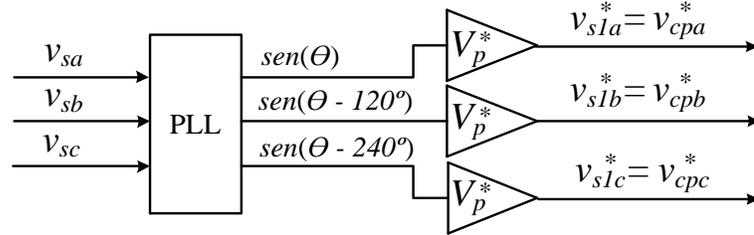
$$\begin{bmatrix} i_{csd}^* \\ i_{csq}^* \\ i_{cs0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Ld-dc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

Por fim, as referências de compensação de corrente do conversor série no referencial  $abc$  podem ser obtidas por:

$$\begin{bmatrix} i_{csa}^* \\ i_{csb}^* \\ i_{csc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{csd}^* \\ i_{csq}^* \\ i_{cs0}^* \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

A Figura 2.12 apresenta o diagrama de geração das referências de compensação do conversor paralelo. Neste caso, deseja-se que as tensões fornecidas pelo conversor paralelo sejam senoidais, equilibradas e em fase com a componente fundamental das tensões da rede.

Figura 2.12 – Diagrama do algoritmo de geração de referências de compensação dual do filtro paralelo.



Fonte: Autor.

As componentes fundamentais de sequência positiva das tensões da rede elétrica podem ser obtidas por meio da Equação (2.10):

$$\begin{bmatrix} v_{s1a}^* \\ v_{s1b}^* \\ v_{s1c}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p^* \text{sen}\theta \\ V_p^* \text{sen}(\theta - 120^\circ) \\ V_p^* \text{sen}(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

Como o conversor paralelo da UPQC com estratégia de compensação dual opera como fonte de tensão senoidal, as componentes fundamentais de sequência positiva das tensões da rede serão as referências de compensação no referencial estacionário  $abc$  e podem ser obtidas por:

$$\begin{bmatrix} v_{cpa}^* \\ v_{cpb}^* \\ v_{cpc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{s1a}^* \\ v_{s1b}^* \\ v_{s1c}^* \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

### 3. CIRCUITO DE POTÊNCIA E REFERÊNCIAS DE COMPENSAÇÃO

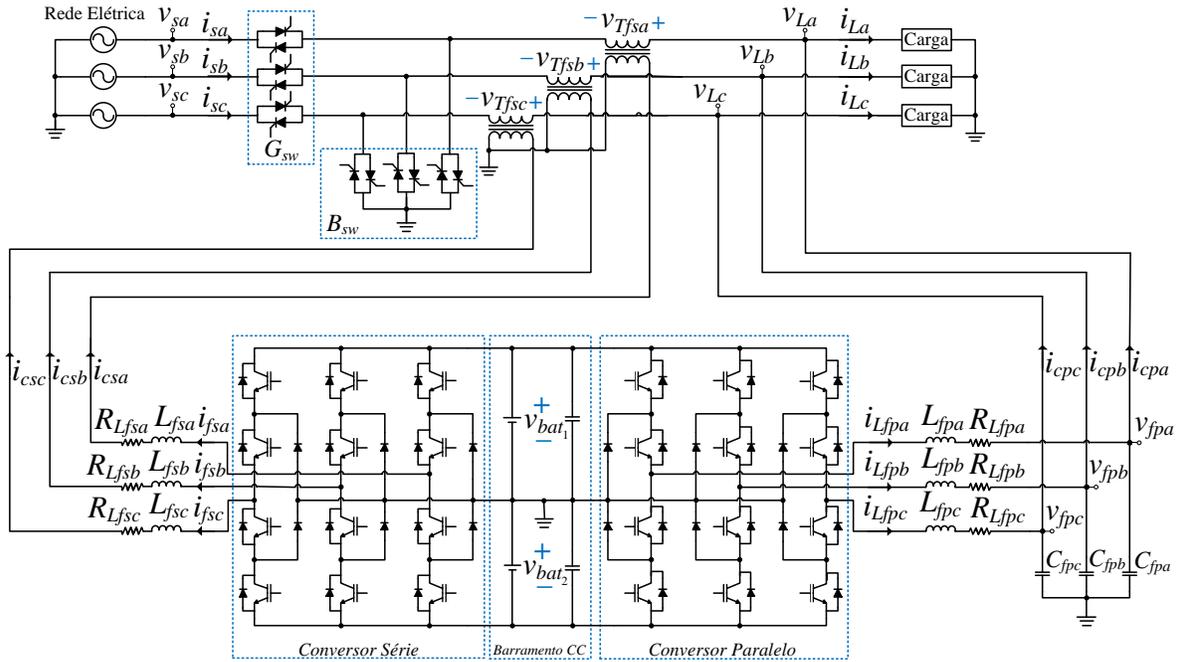
Este capítulo apresenta o circuito de potência da Delta-UPS trifásica a quatro-fios adotada neste trabalho, além disso, são descritos os circuitos de potência equivalentes da UPS nos modos de operação *standby* e *backup*.

Adicionalmente este capítulo descreve como são calculadas as referências de compensação dos conversores série e paralelo da Delta-UPS. No conversor série as referências de compensação de corrente são calculadas de maneira diferente entre os modos *standby* e *backup*, por outro lado, as referências de compensação de tensão do conversor paralelo são calculadas da mesma maneira.

#### 3.1 CIRCUITO DE POTÊNCIA DA DELTA-UPS TRIFÁSICA

O circuito de potência da Delta-UPS trifásica, discutida neste trabalho, está representado na Figura 3.1. Ambos os conversores, série e paralelo, são conversores NPC (*Neutral-Point Clamped*) e compartilham o mesmo barramento CC formado por um banco de baterias. Ainda, o conversor série é controlado como fonte de corrente e cada fase deste conversor é conectada a um transformador de acoplamento por meio de um filtro L ( $L_{csabc}$ ). Por sua vez o conversor paralelo é controlado como fonte de tensão e cada fase deste conversor é conectada em paralelo com a carga por meio de um filtro LC ( $L_{cpabc}$  e  $C_{cpabc}$ ).

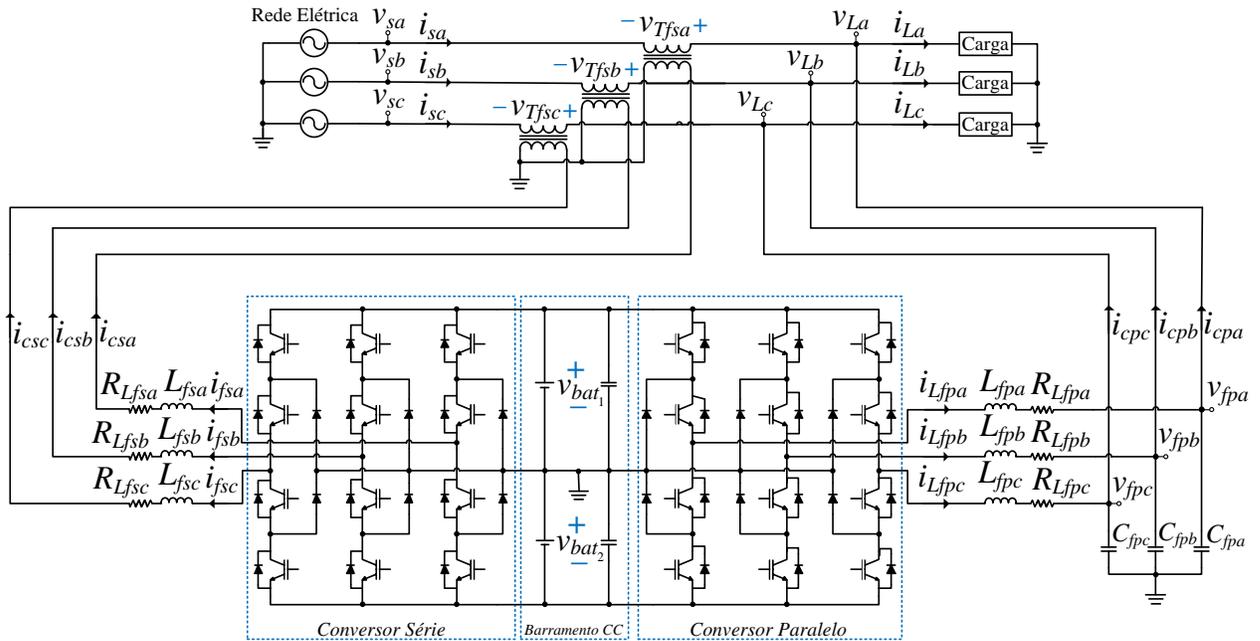
Figura 3.1 - Circuito de potência da Delta-UPS trifásica.



Fonte: Autor.

A partir da Figura 3.1, nota-se a presença de dois conjuntos de chaves estáticas no circuito de potência da Delta-UPS, os quais são nomeados  $G_{sw}$  e  $B_{sw}$ . Assim, no modo *standby* as chaves estáticas de conexão da rede elétrica ( $G_{sw}$ ) permanecem fechadas, enquanto as chaves estáticas de *backup* ( $B_{sw}$ ) operam abertas, como mostra a Figura 3.2. Neste caso, a Delta-UPS opera semelhante a uma UPQC, assim, o conversor série controlado em corrente atua para manter as correntes da rede elétrica ( $i_{sabc}$ ) senoidais, equilibradas e em fase com as tensões da rede ( $v_{sabc}$ ). Por outro lado, o conversor paralelo, controlado em tensão, opera para manter as tensões da carga ( $v_{Labc}$ ) senoidais, reguladas e em fase com as tensões da rede. Desse modo, qualquer distúrbio nas tensões da rede elétrica aparecerá nas tensões sobre o transformador série ( $v_{Tfsabc}$ ), enquanto, as parcelas harmônicas e reativas das correntes da carga aparecerão nas correntes do conversor paralelo ( $i_{cpabc}$ ).

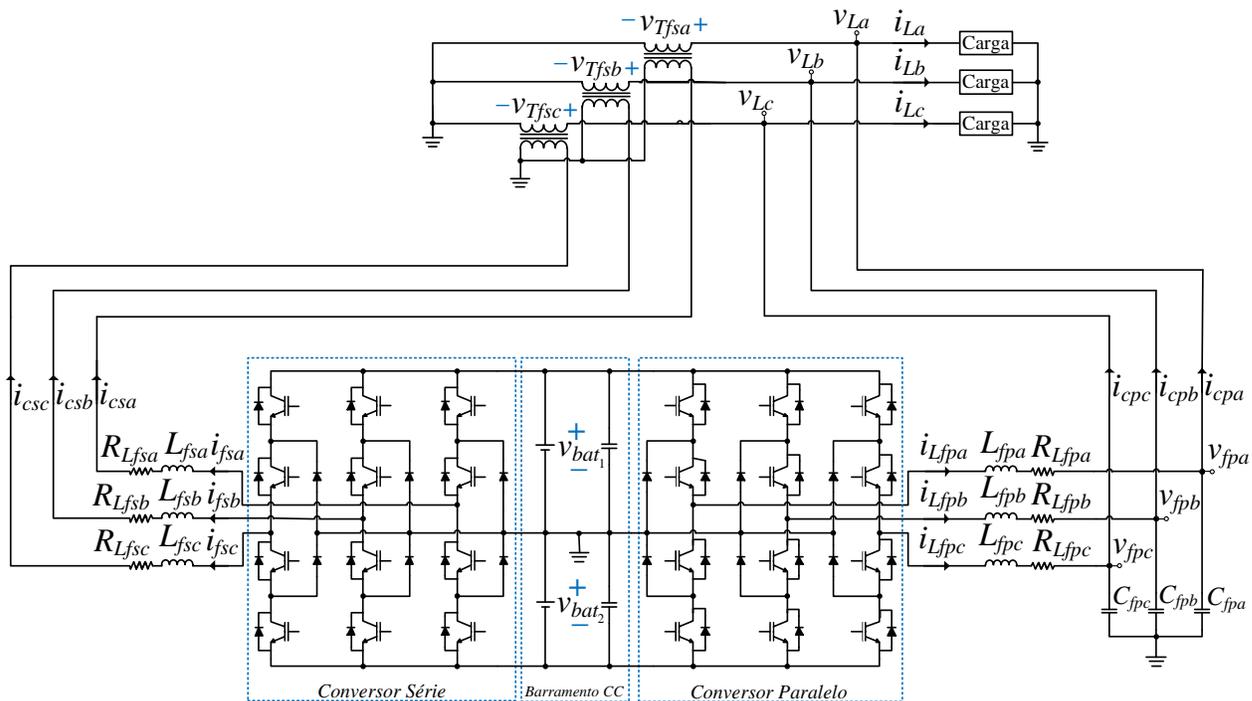
Figura 3.2 - Circuito de potência da Delta-UPS trifásica no modo *standby*.



Fonte: Autor.

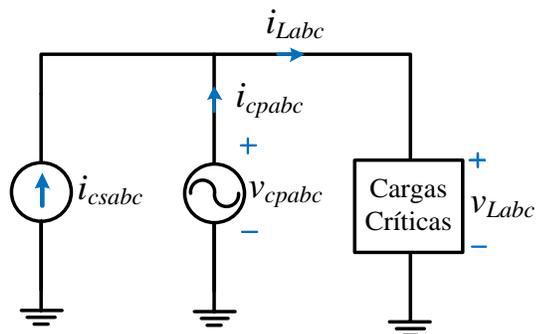
No modo *backup* as chaves estáticas do conjunto *Gsw* operam abertas, enquanto as chaves estáticas do conjunto *Bsw* operam fechadas, como apresentado na Figura 3.3. Na Figura 3.4, o conversor série é reposicionado em paralelo com o conversor paralelo e a carga. Cabe ressaltar, que o conversor série permanece operando como fonte de corrente e o conversor paralelo como fonte de tensão.

Figura 3.3 - Circuito de potência da Delta-UPS trifásica no modo *backup*.



Fonte: Autor.

Figura 3.4 - Diagrama do circuito equivalente da Delta-UPS no modo *backup*.



Fonte: Autor.

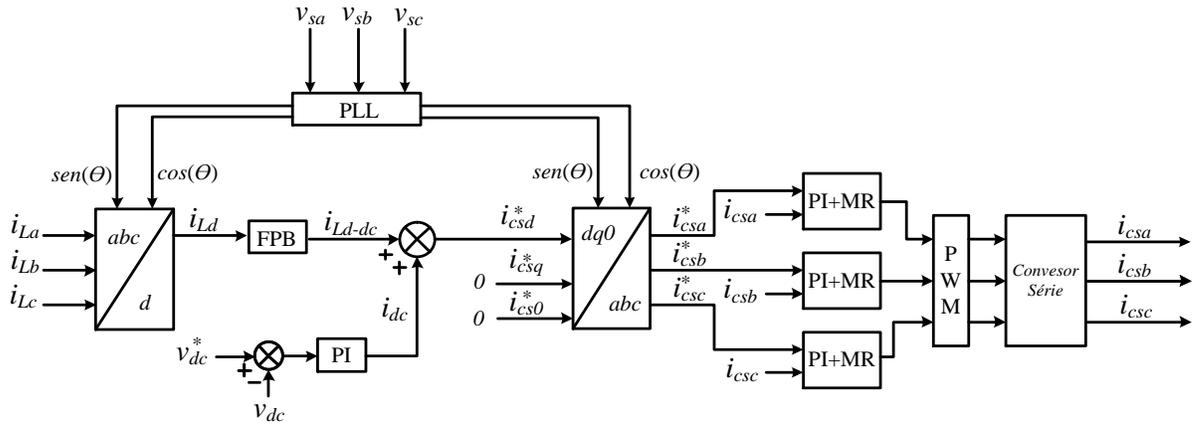
### 3.2 REFERÊNCIAS DE COMPENSAÇÃO DO CONVERSOR SÉRIE

Esta seção apresenta como são calculadas as referências de compensação do conversor série da Delta-UPS em ambos os modos de operação. No modo de operação *backup*, um algoritmo de compartilhamento de energia otimizado (ACEO) é responsável por ajustar a potência aparente que será processada por cada conversor de potência. No modo *standby* o ACEO permanece desabilitado.

#### 3.2.1 MODO DE OPERAÇÃO *STANDBY*

O conversor série é controlado para atuar como uma fonte de corrente senoidal de modo que as correntes resultantes devem ser equilibradas e em fase com as tensões da rede, a fim de obter fator de potência unitário. É importante notar que as amplitudes destas correntes devem ser ajustadas para garantir que a tensão total do barramento CC mantenha-se no valor de referência ( $v_{dc}^*$ ). As perdas nos conversores e variações de amplitude das tensões entre entrada (rede) e saída (carga) da Delta-UPS fazem com o que a tensão total do barramento CC varie. Assim, como mostrado na Figura 3.5, um controlador PI é utilizado a fim de manter a tensão total do barramento CC em um valor de referência, adotado neste trabalho como  $460V$ , e gera uma referência de corrente para controle da tensão total do barramento CC ( $i_{dc}$ ). O algoritmo apresentado na Figura 3.5 é baseado na extração da componente fundamental das correntes medidas da carga ( $i_{Labc}$ ).

Figura 3.5 - Algoritmo para geração de referências de corrente do conversor série no modo *standby*.



Fonte: Autor.

As referências de compensação podem ser obtidas, de maneira simplificada, medindo as correntes da carga e passando do referencial estacionário *abc* para o referencial síncrono *dq0*. Por meio da Equação (3.1) é possível obter  $i_{Ld}$ , a qual é composta por uma parcela fundamental ativa de corrente da carga, além de parte do conteúdo harmônico da corrente da carga.

$$i_{Ld} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\frac{1}{2}\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta & -\frac{1}{2}\cos\theta + \frac{\sqrt{3}}{2}\sin\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

O valor médio de  $i_{Ld}$  ( $i_{Ld-dc}$ ) pode ser obtido por meio de um filtro passa-baixa. Assim,  $i_{Ld-dc}$  representa a componente ativa de corrente da carga. Logo, a referência de compensação para o eixo *d* ( $i_{csd}^*$ ) é dada por:

$$i_{csd}^* = i_{Ld-dc} + i_{dc} \quad (3.2)$$

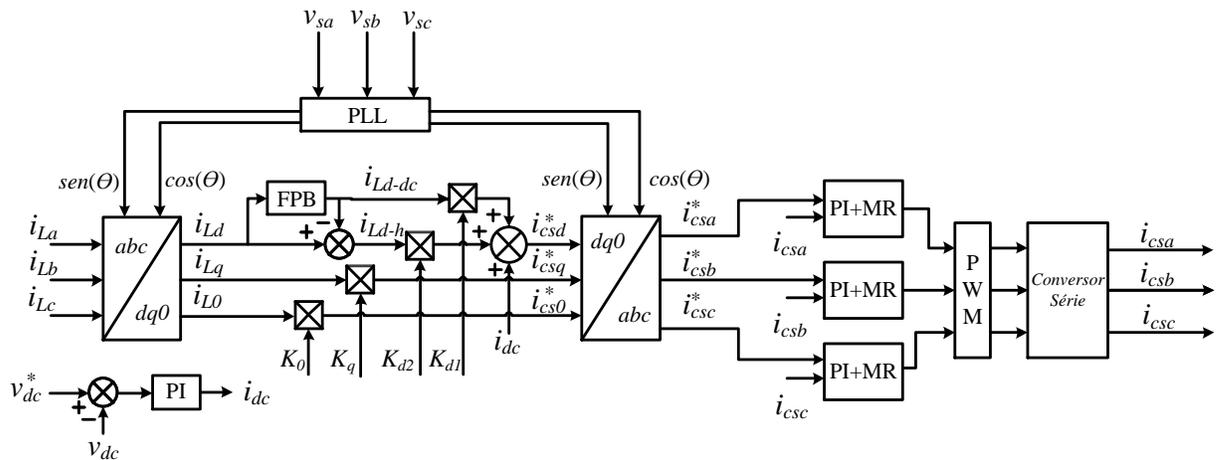
Por outro lado, para os eixos *q* e *0* as referências são nulas, uma vez que, deseja-se que somente a parcela ativa de corrente circule pelo filtro série e, conseqüentemente, pela rede. Deste modo, as referências de compensação do conversor série no referencial estacionário *abc* podem ser obtidas por meio de:

$$\begin{bmatrix} i_{csa}^* \\ i_{csb}^* \\ i_{csc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{csd}^* \cos\theta \\ i_{csd}^* \sin\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{s1a}^* \\ i_{s1b}^* \\ i_{s1c}^* \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

### 3.2.2 MODO DE OPERAÇÃO *BACKUP*

O algoritmo utilizado para calcular as referências de controle do conversor série da Delta-UPS no modo backup é apresentado na Figura 3.6. Note que o algoritmo de compartilhamento de energia é habilitado.

**Figura 3.6 - Algoritmo para geração de referências de corrente do conversor série no modo *backup*.**



**Fonte: Autor.**

O algoritmo leva em consideração a componente média do eixo  $d$ , ( $\mathbf{i}_{Ld-dc}$ ), a componente alternada do eixo  $d$ , ( $\mathbf{i}_{Ld-h}$ ), a componente total do eixo  $q$ , ( $\mathbf{i}_{Lq}$ ) e a componente total do eixo  $0$ , ( $\mathbf{i}_{L0}$ ). Tem-se que,  $\mathbf{i}_{Ld-cc}$  refere-se à parcela fundamental ativa de corrente da carga;  $\mathbf{i}_{Ld-h}$  refere-se à uma parte do conteúdo harmônico da corrente da carga;  $\mathbf{i}_{Lq}$  refere-se a parcela total reativa da carga mais uma parcela do conteúdo harmônico da corrente da carga; e  $\mathbf{i}_{L0}$  corresponde ao restante do conteúdo harmônico da corrente da carga. Assim, as correntes medidas da carga no referencial síncrono  $dq0$  podem ser obtidas por:

$$\begin{bmatrix} i_{Ld} \\ i_{Lq} \\ i_{L0} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

O valor médio ( $i_{Ld-dc}$ ) da corrente medida na carga no eixo  $d$ , ( $i_{Ld}$ ), pode ser obtido por meio de um filtro passa-baixa. Em seguida, a parcela alternada, ( $i_{Ld-h}$ ), de  $i_{Ld}$  é obtido da seguinte forma:

$$i_{Ld-h} = i_{Ld} - i_{Ld-dc} \quad (3.5)$$

Assim, a amplitude das componentes de corrente que irão compor as referências de compensação dependerá dos ganhos  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$ . Desse modo, as referências de compensação no referencial síncrono  $dq0$  podem ser calculadas da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} i_{csd}^* \\ i_{csq}^* \\ i_{cs0}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{Ld-dc} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} K_{d1} + \begin{bmatrix} i_{Ld-h} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} K_{d2} + \begin{bmatrix} 0 \\ i_{Lq} \\ 0 \end{bmatrix} K_q + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ i_{L0} \end{bmatrix} K_0 \quad (3.6)$$

Por fim, a referência de compensação de corrente do conversor série da Delta-UPS no referencial  $abc$  pode ser obtida por:

$$\begin{bmatrix} i_{csa}^* \\ i_{csb}^* \\ i_{csc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta & 0 \\ \sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{csd}^* \\ i_{csq}^* \\ i_{cs0}^* \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

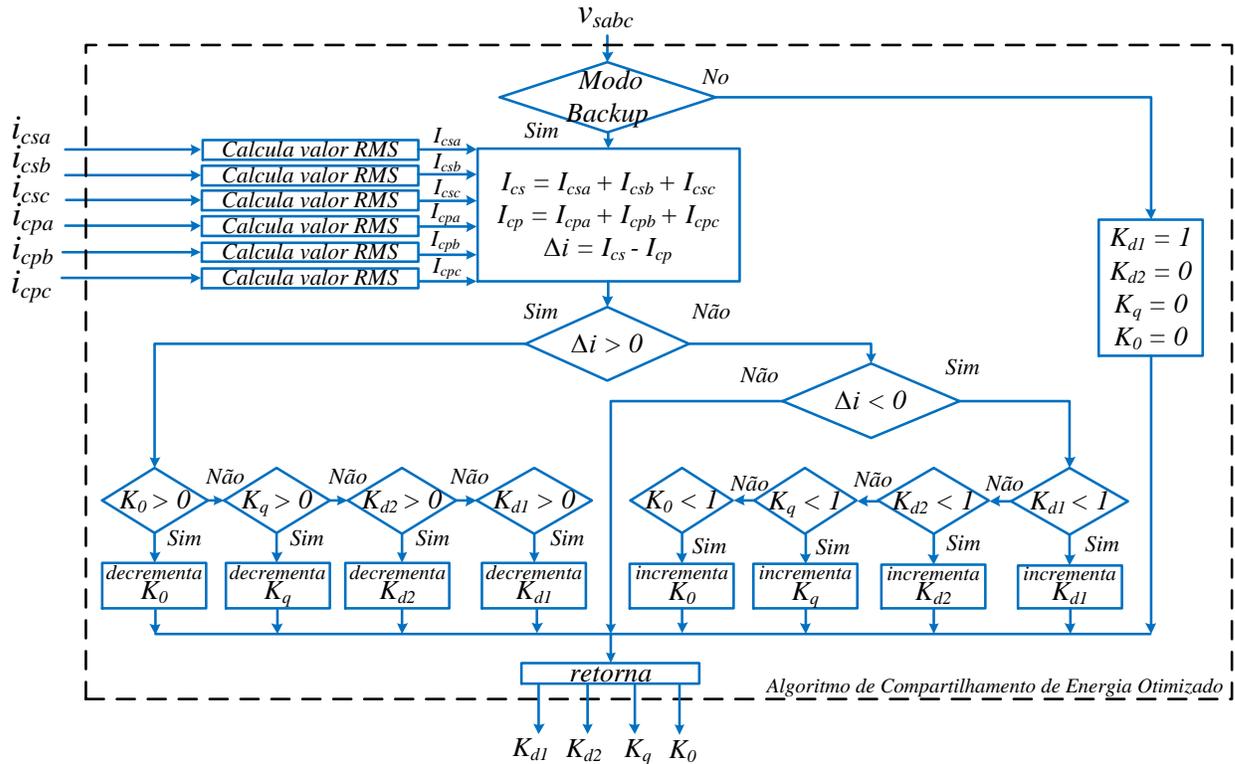
### 3.3 ALGORITMO DE COMPARTILHAMENTO DE ENERGIA OTIMIZADO

Como mencionado, os ganhos  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$  são utilizados para ajustar, diretamente, a quantidade de energia que o conversor série processa e, indiretamente, a energia processada pelo conversor paralelo no modo *backup*. Foi definido que cada conversor processará aproximadamente 50% da potência aparente aritmética nominal da carga. O ganho  $K_{d1}$  controla a potência ativa,  $K_{d2}$  a parcela de potência harmônica do eixo  $d$ ,  $K_q$  a potência reativa mais a parcela de potência harmônica do eixo  $q$ , enquanto  $K_0$  controla a potência relacionada aos desequilíbrios de corrente da carga do eixo  $0$ .

A Figura 3.7 apresenta o ACEO, o qual é responsável por obter os valores dos ganhos  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$ , sendo que tais ganhos variam dentro do intervalo de 0 a 1. O algoritmo prioriza que o conversor série processe potência ativa (W), porém, ao considerar determinadas proporções de potência ativa e não-ativa que compõem a potência aparente da carga, o conversor série pode processar potência não-ativa. Tal processamento é possível ajustando os ganhos  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$ . Caso a potência não-ativa da carga for maior que a potência ativa, o conversor série assumirá parte da potência não-ativa, de modo que ocorra a divisão equivalente de potência aparente entre os conversores. Cabe ressaltar, que o algoritmo de compartilhamento atua com base na potência aparente aritmética trifásica dos conversores, a qual é maior detalhada no Apêndice B.

Como pode ser observado na Figura 3.7, as entradas do ACEO são as correntes do conversor série  $i_{csabc}$  e do conversor paralelo  $i_{cpabc}$ . As tensões da rede  $v_{sabc}$  são usadas para detectar o modo de operação da UPS, *standby* (rede-presente) ou *backup* (rede-ausente). Uma vez que os conversores têm a mesma tensão de saída, é necessário calcular somente o valor eficaz das correntes ( $I_{csabc}$  e  $I_{cpabc}$ ).

Figura 3.7 - Algoritmo de compartilhamento de energia otimizado (ACEO).



Fonte: Autor.

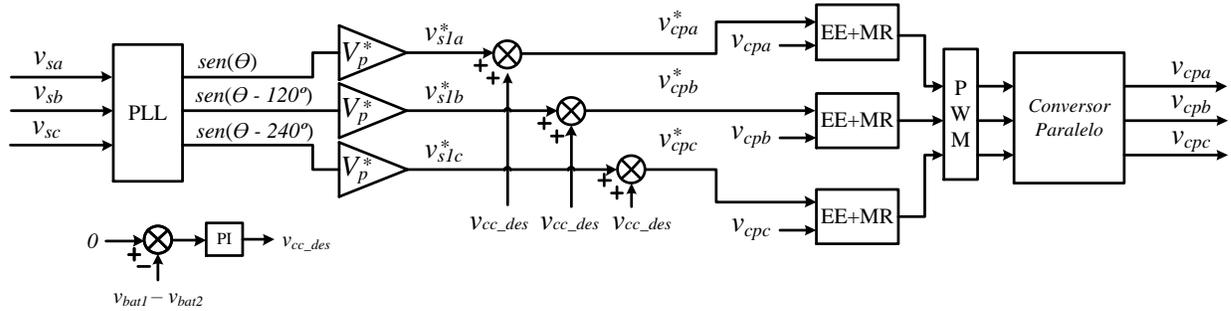
Dependendo dos valores de  $I_{cs}$  e  $I_{cp}$ , a diferença  $\Delta i = I_{cs} - I_{cp}$  pode ser positiva ou negativa. Ainda, se  $\Delta i > 0$ , a energia processada pelo conversor série é maior do que a energia processada pelo conversor paralelo. Sendo que, o conversor série é controlado em corrente, para diminuir a corrente fornecida por este conversor, basta diminuir as referências de compensação. Neste caso, os ganhos  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$  são decrementados seguindo uma sequência específica ( $K_0 - K_q - K_{d2} - K_{d1}$ ). Por outro lado, se  $\Delta i < 0$ , os ganhos precisam ser incrementados, também seguindo uma sequência específica ( $K_{d1} - K_{d2} - K_q - K_0$ ).

Tanto o incremento quanto o decremento dos ganhos é feito por meio de um passo fixo ( $\Delta$ ), atribuído empiricamente igual a 0,0002, a frequência de atuação do algoritmo foi ajustada em 5kHz. O passo fixo e a frequência de atuação devem ser ajustados, a fim de que, o algoritmo convirja para o ponto ótimo de compartilhamento, pois se  $\Delta$  for muito pequeno ou a frequência for muito baixa o tempo de convergência do algoritmo será muito alto. Por outro lado, a escolha de um  $\Delta$  muito grande ou uma frequência muito alta causará oscilações nos ganhos ( $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$ ) e, portanto, prejudicará o cálculo das referências de corrente.

### 3.4 REFERÊNCIAS DE COMPENSAÇÃO DO CONVERSOR PARALELO

A Figura 3.8 apresenta o diagrama de geração das referências de compensação do conversor paralelo, as quais deseja-se que sejam senoidais, equilibradas e em fase com a componente fundamental das tensões da rede.

**Figura 3.8 - Algoritmo para geração de referências de tensão do conversor paralelo.**



**Fonte: Autor.**

Assim, é possível obter as componentes fundamentais de sequência positiva das tensões da rede elétrica por meio da equação (3.8):

$$\begin{bmatrix} v_{s1a}^* \\ v_{s1b}^* \\ v_{s1c}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p^* \text{sen} \theta \\ V_p^* \text{sen}(\theta - 120^\circ) \\ V_p^* \text{sen}(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \quad (4.8)$$

As referências de compensação no referencial estacionário  $abc$  para o filtro paralelo podem ser obtidas somando as componentes fundamentais de sequência positiva das tensões da rede,  $(v_{s1abc}^*)$ , a referência de controle de desequilíbrio do barramento CC,  $(v_{cc\_des})$ , ou seja:

$$\begin{bmatrix} v_{cpa}^* \\ v_{cpb}^* \\ v_{cpc}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_p^* \text{sen} \theta + v_{cc\_des} \\ V_p^* \text{sen}(\theta - 120^\circ) + v_{cc\_des} \\ V_p^* \text{sen}(\theta - 240^\circ) + v_{cc\_des} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

## 4. MODELAGEM E CONTROLE DOS CONVERSORES DE POTÊNCIA

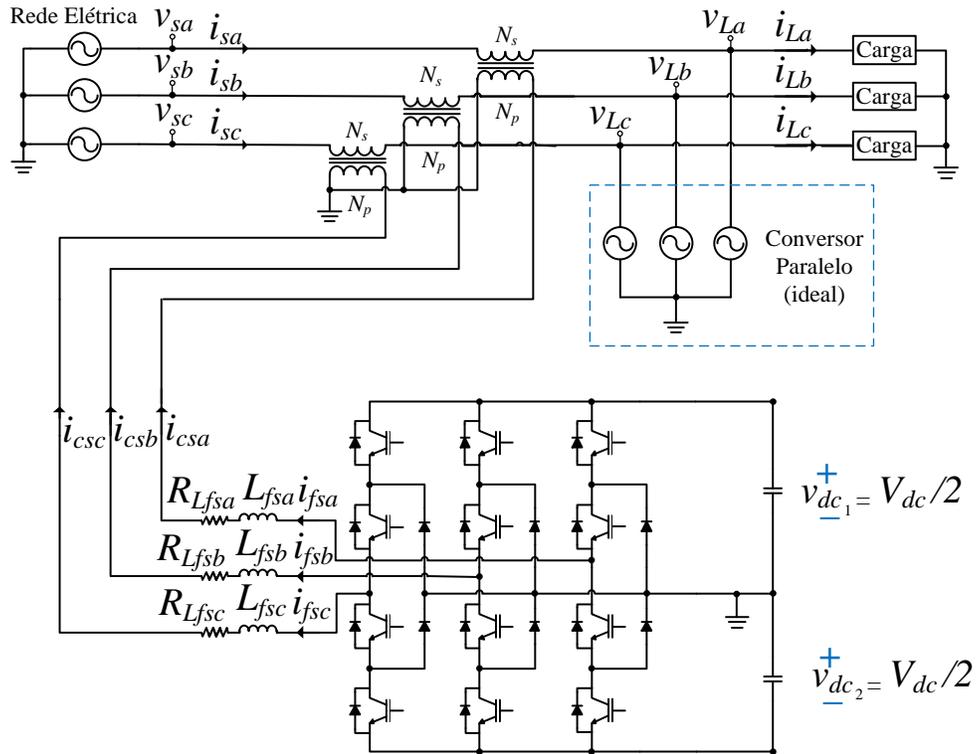
Nesta seção são apresentados os modelos matemáticos dos conversores série e paralelo, bem como as malhas e estratégias de controle utilizadas neste trabalho.

### 4.1 MODELO MATEMÁTICO DO CONVERSOR SÉRIE

O conversor série adotado neste trabalho é um inversor do tipo NPC, acoplado por meio de um filtro L e opera como fonte de corrente. Cada fase do conversor série é conectada em série com a respectiva fase da rede por meio de um transformador monofásico de acoplamento. O modelo matemático do conversor série no referencial estacionário  $abc$  é obtido a partir do circuito equivalente apresentado na Figura 4.1. São adotadas as seguintes considerações: correntes trifásicas equilibradas circulando pelo conversor série; o conversor paralelo operando como fonte de tensão senoidal; e tensões constantes do barramento CC.

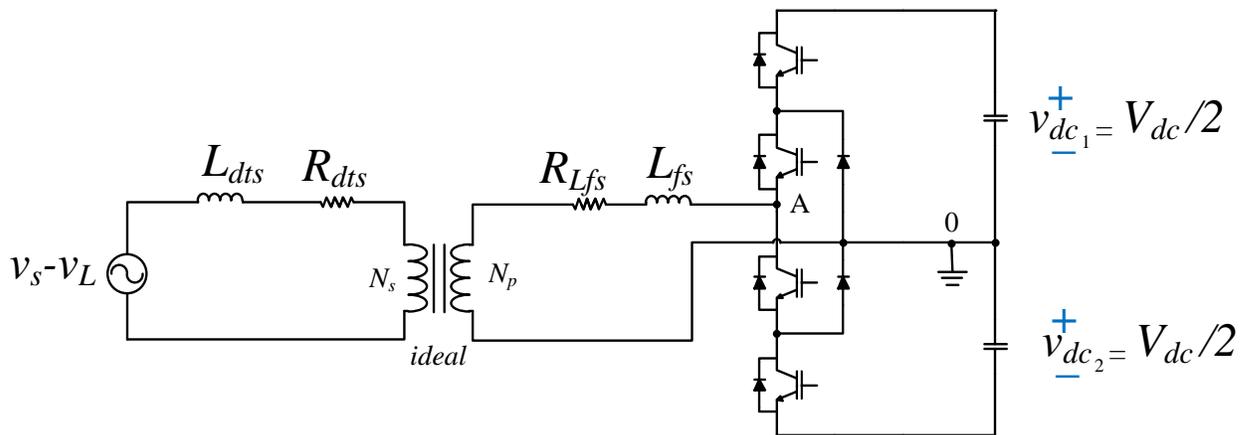
O circuito equivalente monofásico do sistema é apresentado na Figura 4.2 e neste caso são adotadas duas considerações: indutâncias de acoplamento iguais para cada uma das fases ( $L_{f_{sa}} = L_{f_{sb}} = L_{f_{sc}} = L_{f_s}$ ), bem como as respectivas resistências série ( $R_{L_{f_{sa}}} = R_{L_{f_{sb}}} = R_{L_{f_{sc}}} = R_{L_{f_s}}$ ); transformadores de acoplamento que apresentam indutância total de dispersão ( $L_{dts}$ ), bem como resistência série ( $R_{dts}$ ).

Figura 4.1 – Circuito equivalente do conversor trifásico NPC conectado em série com a rede.



Fonte: Autor.

Figura 4.2 – Circuito monofásico do conversor NPC conectado em série com a rede.



Fonte: Autor.

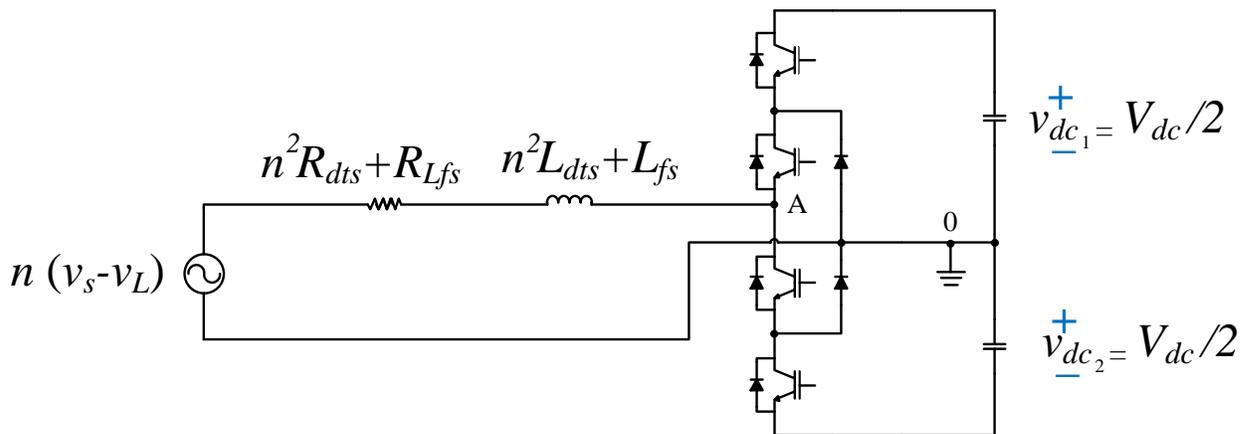
Considerando as Equações (4.1), (4.2) e (4.3), é possível obter o circuito equivalente com as impedâncias de dispersão e a queda de tensão do lado primário refletidas para o lado secundário, apresentado na Figura 4.3.

$$n = \frac{N_p}{N_s} \quad (4.1)$$

$$V_p = n \cdot V_s \quad (4.2)$$

$$Z_p = n^2 \cdot Z_s \quad (4.3)$$

Figura 4.3 – Circuito equivalente monofásico do conversor NPC conectado em série com a rede.



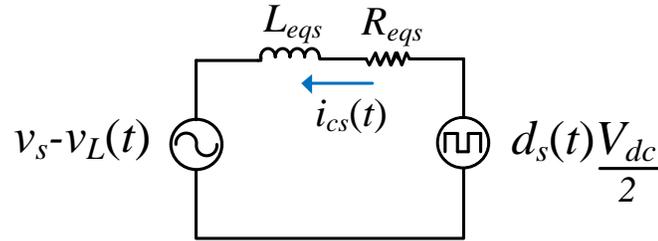
Fonte: Autor.

Considerando a operação em três níveis, a tensão entre os pontos A e 0 assume os valores  $0$  e  $+\frac{V_{cc}}{2}$ , no semi-ciclo positivo, e  $0$  e  $-\frac{V_{cc}}{2}$ , durante o semi-ciclo negativo. Assim, o valor médio de  $v_{A0s}$  durante o semi-ciclo positivo, pode ser calculado por meio da Equação (4.4).

$$\langle v_{A0s}(t) \rangle = d_s(t) \cdot \frac{V_{dc}}{2} \quad (4.4)$$

onde,  $d_s(t)$  é a razão cíclica do conversor série. A relação de transformação do transformador de acoplamento é unitária, portanto considera-se  $n = 1$ , e então  $L_{eqs} = L_{dts} + L_{fs}$  e  $R_{eqs} = R_{dts} + R_{Lfs}$ . Deste modo, obtém-se o circuito equivalente apresentado na Figura A.5.

**Figura 4.4 – Circuito equivalente monofásico do conversor série.**



**Fonte: Autor.**

Por meio da análise do valor médio das grandezas do circuito equivalente tem-se:

$$\langle d_s(t) \rangle \frac{V_{dc}}{2} = L_{eqs} \frac{d\langle i_{cs}(t) \rangle}{dt} + R_{eqs} \langle i_{cs}(t) \rangle + (\langle v_s(t) \rangle + \langle v_L(t) \rangle) \quad (4.5)$$

O valor médio das grandezas é composto por componentes CC e componentes oscilatórias, como é apresentado nas Equações 4.6 a 4.9. Substituindo as Equações 4.6 a 4.9 na Equação 4.5, obtém-se a Equação 4.10. As componentes CC da Equação 4.10 referem-se à resposta em regime permanente do sistema, logo, desprezando tais grandezas, é possível obter o modelo CA de pequenos sinais, o qual é apresentado na Equação 4.11.

$$\langle d_s(t) \rangle = D_s + \hat{d}_s(t) \quad (4.6)$$

$$\langle i_{cs}(t) \rangle = I_{cs} + \hat{i}_{cs}(t) \quad (4.7)$$

$$\langle v_s(t) \rangle = V_s + \hat{v}_s(t) \quad (4.8)$$

$$\langle v_L(t) \rangle = V_L + \hat{v}_L(t) \quad (4.9)$$

$$D_s \frac{V_{dc}}{2} + \hat{d}_s(t) = L_{eqs} \frac{dI_{cs}}{dt} + L_{eqs} \frac{d\hat{i}_{cs}(t)}{dt} + R_{eqs} I_{cs} + R_{eqs} \hat{i}_{cs}(t) + [(V_s + \hat{v}_s(t)) - (V_L + \hat{v}_L(t))] \quad (4.10)$$

$$\hat{d}_s(t) \frac{V_{dc}}{2} = L_{eqs} \frac{d\hat{i}_{cs}(t)}{dt} + R_{eqs} \hat{i}_{cs}(t) + (\hat{v}_s(t) - \hat{v}_L(t)) \quad (4.11)$$

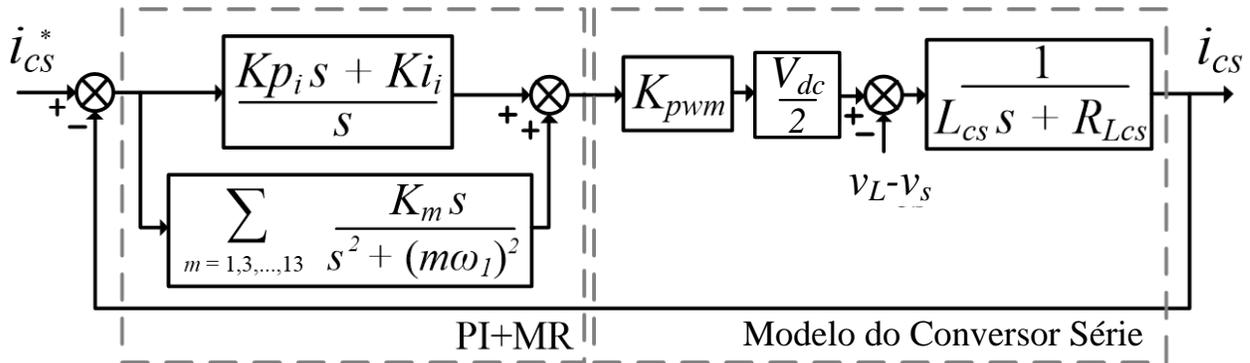
Aplicando a transformada de Laplace na Equação (4.11) e isolando  $\hat{i}_{cs}(s)$ , tem-se a Equação (4.12). Considerando a diferença de tensão  $\hat{v}_s(s) - \hat{v}_L(s)$  um distúrbio para o sistema, tal termo pode ser desprezado. Logo, é possível obter a função de transferência para cada uma das fases do conversor série no referencial estacionário  $abc$ , a qual é definida pela Equação (4.13).

$$\hat{i}_{cs}(s) = \frac{\hat{d}_s(s) \frac{V_{dc}}{2} - (\hat{v}_s(s) - \hat{v}_L(s))}{(L_{eqs}s + R_{eqs})} \quad (4.12)$$

$$G_{cs\_abc}(s) = \frac{\hat{i}_{cs}(s)}{\hat{d}_s(s)} = \frac{\frac{V_{dc}}{2}}{(L_{eqs}s + R_{eqs})} \quad (4.13)$$

O diagrama em blocos da malha de controle da corrente do conversor série no referencial estacionário  $abc$  é apresentado na Figura 4.5, onde,  $K_{PWM}$  representa o ganho do modulador PWM, calculado por meio da Equação 4.14. Ainda,  $KP_i$  e  $KI_i$  são os ganhos proporcional e integral, respectivamente, do controlador PI de corrente do conversor série.

Figura 4.5 – Malha de controle do conversor série.



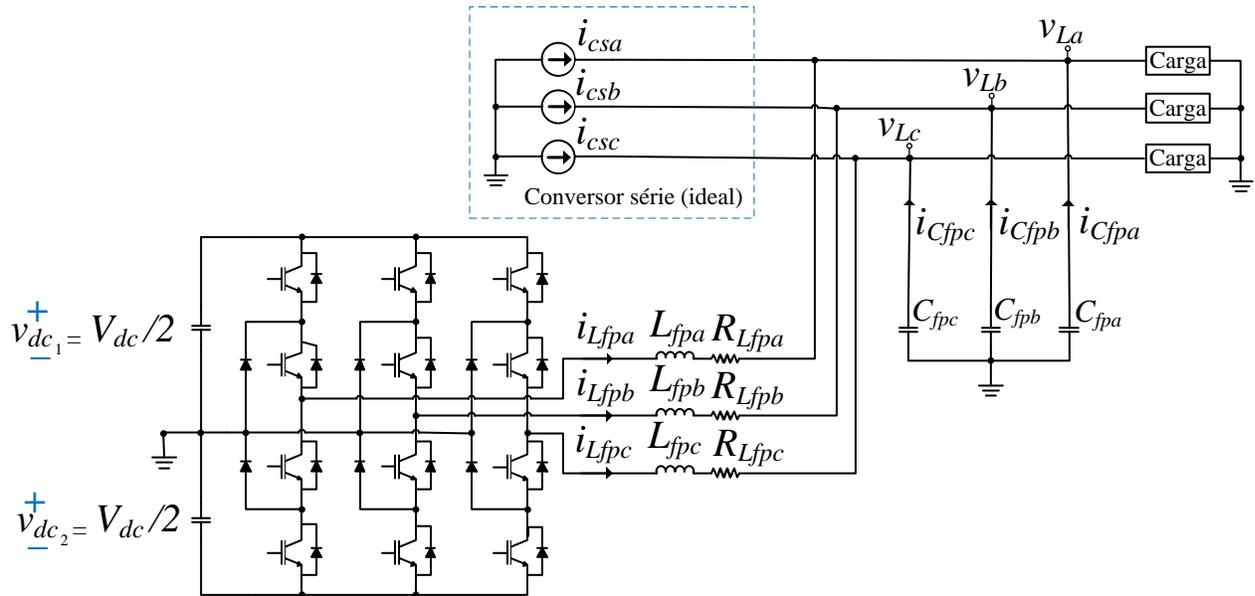
Fonte: Autor.

$$K_{PWM} = \frac{1}{P_{PWM}} \quad (4.14)$$

## 4.2 MODELO MATEMÁTICO DO CONVERSOR PARALELO

O conversor paralelo adotado neste trabalho é um inversor do tipo NPC acoplado por meio de um filtro LC. Este conversor é alocado em paralelo com a carga e opera como fonte de tensão. O modelo matemático do conversor paralelo no referencial estacionário  $abc$  é obtido a partir do circuito equivalente apresentado na Figura 4.6. São adotadas as seguintes considerações: tensões trifásicas equilibradas do conversor paralelo; o conversor série opera como fonte de corrente senoidal; e tensões constantes do barramento CC.

Figura 4.6 – Circuito equivalente trifásico do conversor NPC paralelo.

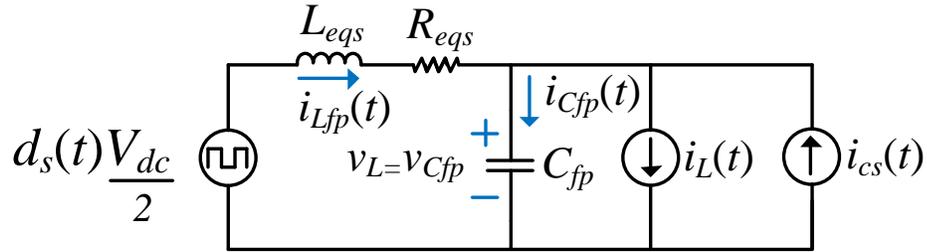


Fonte: Autor.

O circuito equivalente monofásico do sistema é apresentado na Figura 4.6, onde duas considerações são adotadas: indutâncias de acoplamento iguais para cada uma das fases ( $L_{fpa} = L_{fpb} = L_{fpc} = L_{fp}$ ), bem como as respectivas resistências série ( $R_{Lfpa} = R_{Lfpb} = R_{Lfpc} = R_{Lfp}$ ); e capacitores de filtragem iguais para cada uma das fases ( $C_{fpa} = C_{fpb} = C_{fpc} = C_{fp}$ ).

De maneira equivalente ao conversor série, com operação em três níveis, a tensão entre os pontos A e 0 assume os valores 0 e  $+\frac{V_{cc}}{2}$ , no semi-ciclo positivo, e 0 e  $-\frac{V_{cc}}{2}$ , durante o semi-ciclo negativo. Portanto, o valor médio de  $v_{A0s}$  durante o semi-ciclo positivo, pode ser calculado por meio da Equação (4.15). Deste modo, obtém-se o circuito equivalente para cada uma das fases do conversor paralelo, apresentado na Figura 4.7.

Figura 4.7 – Modelo equivalente de cada fase de conversor paralelo



Fonte: Autor.

Por meio da análise do circuito da Figura 4.7, é possível obter as equações (4.15) e (4.16).

$$\langle d_p(t) \rangle \frac{V_{cc}}{2} = L_{fp} \frac{d\langle i_{Lfp}(t) \rangle}{dt} + R_{Lfp} \langle i_{Lfp}(t) \rangle + \langle v_L(t) \rangle \quad (4.15)$$

$$\langle i_{Lfp}(t) \rangle = \langle i_{Cfp}(t) \rangle + \langle i_L(t) \rangle - \langle i_{cs}(t) \rangle \quad (4.16)$$

onde,  $\langle d_p(t) \rangle$  é a razão cíclica média;  $\langle i_{Lfp}(t) \rangle$  é a corrente média do indutor;  $\langle v_L(t) \rangle$  é a tensão média da carga;  $\langle i_{Cfp}(t) \rangle$  é a corrente média do capacitor;  $\langle i_L(t) \rangle$  é a corrente média da carga; e  $\langle i_{cs}(t) \rangle$  é a corrente média de compensação do conversor série.

As Equações (4.17), (4.18), (4.19), (4.20), (4.21) e (4.22) representam o valor médio das grandezas das equações (4.15) e (4.16), as quais são compostas por componentes CC e oscilantes. Substituindo as Equações (4.17), (4.18) e (4.19) na Equação (4.15), obtém-se a Equação (4.23), enquanto a Equação (4.24) pode ser obtida substituindo as equações (4.20), (4.21) e (4.22) na Equação (4.23).

$$\langle d_p(t) \rangle = D_p + \hat{d}_p(t) \quad (4.17)$$

$$\langle i_{Lfp}(t) \rangle = I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t) \quad (4.18)$$

$$\langle v_L(t) \rangle = V_L + \hat{v}_L(t) \quad (4.19)$$

$$\langle i_{cfp}(t) \rangle = I_{cfp} + \hat{i}_{cfp}(t) \quad (4.20)$$

$$\langle i_L(t) \rangle = I_L + \hat{i}_L(t) \quad (4.21)$$

$$\langle i_{cs}(t) \rangle = I_{cs} + \hat{i}_{cs}(t) \quad (4.22)$$

$$[D_p + \hat{d}_p(t)] \frac{V_{cc}}{2} = L_{fp} \frac{d[I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t)]}{dt} + R_{Lfp}[I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t)] + V_L + \hat{v}_L(t) \quad (4.23)$$

$$(I_{Lfp} + \hat{i}_{Lfp}(t)) = (I_{cfp} + \hat{i}_{cfp}(t)) + (I_L + \hat{i}_L(t)) - (I_{cs} + \hat{i}_{cs}(t)) \quad (4.24)$$

As componentes CC das equações (4.23) e (4.24) referem-se à resposta em regime permanente do sistema, logo, desprezando tais grandezas, é possível obter o modelo CA de pequenos sinais, apresentado nas equações (4.25) e (4.26).

$$\hat{d}_p(t) \frac{V_{cc}}{2} = L_{fp} \frac{d\hat{i}_{Lfp}(t)}{dt} + R_{Lfp}\hat{i}_{Lfp}(t) + \hat{v}_L(t) \quad (4.25)$$

$$\hat{i}_{Lfp}(t) = \hat{i}_{cfp}(t) + \hat{i}_L(t) - \hat{i}_{cs}(t) = C_{fp} \frac{d\hat{v}_L(t)}{dt} + \hat{i}_L(t) - \hat{i}_{cs}(t) \quad (4.26)$$

Isolando os termos  $\frac{d\hat{i}_{Lfp}(t)}{dt}$  e  $\frac{d\hat{v}_L(t)}{dt}$ , das Equações 4.25 e 4.26, respectivamente, é possível escrever o sistema em malha aberta utilizando a notação de espaço de estados, descrito por:

$$\begin{aligned} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{i}_{Lcp} \\ \hat{v}_{cp} \end{bmatrix}}_{\hat{x}_{cp}} &= \underbrace{\begin{bmatrix} -\frac{R_{Lcp}}{L_{cp}} & -\frac{1}{L_{cp}} \\ \frac{1}{C_{cp}} & 0 \end{bmatrix}}_{A_{cp}} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{i}_{Lcp} \\ \hat{v}_{cp} \end{bmatrix}}_{x_{cp}} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{V_{dc}}{2L_{cp}} \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{cp}} [d_{pc}] + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{C_{pc}} \end{bmatrix}}_{B_{wpc}} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{i}_{wpc} \end{bmatrix}}_{w_{pc}} \\ y_{cp} &= \underbrace{[0 \quad 1]}_{O_{cp}} \underbrace{\begin{bmatrix} \hat{i}_{Lcp} \\ \hat{v}_{cp} \end{bmatrix}}_{x_{cp}} \end{aligned} \quad (4.27)$$

onde, o distúrbio  $i_{w_{pc}}$  é a corrente do conversor paralelo ( $i_{cp}$ );  $L_{pc}$  é o indutor do filtro LC de acoplamento com a respectiva resistência interna  $R_{L_{pc}}$ ;  $C_{pc}$  é o capacitor do filtro LC de acoplamento; e  $d_{pc}$  é a razão cíclica do conversor paralelo.

### 4.3 MALHA DE CONTROLE DO CONVERSOR SÉRIE

As referências de compensação do conversor série podem ser não-senoidais durante o modo *backup*, sendo assim, o PI convencional não é capaz de garantir erro nulo em regime estacionário. Deste modo, foi utilizado o controlador PI multi-ressonante (PI+MR) para controle do conversor série (PELZ, 2017). Termos ressonantes são utilizados, a fim de garantir que as referências de compensação sejam seguidas, bem como os distúrbios de tensão rejeitados, nas frequências dos termos ressonantes. A função de transferência dos termos ressonantes é apresentada por:

$$G_{PI+MR}(s) = \frac{kp_i s + ki_i}{s} + \sum_{m=1}^n \frac{k_m s}{[s^2 + (m\omega_1)^2]} \quad (4.28)$$

onde,  $kp_i$  é o ganho proporcional do controlador PI+MR;  $ki_i$  é o ganho integral do controlador PI+MR;  $\omega_1$  é a frequência fundamental da rede; e  $k_m$  são os ganhos dos termos ressonantes, com  $m = 1, 3, 5, 7, 9, 11$  e  $13$ .

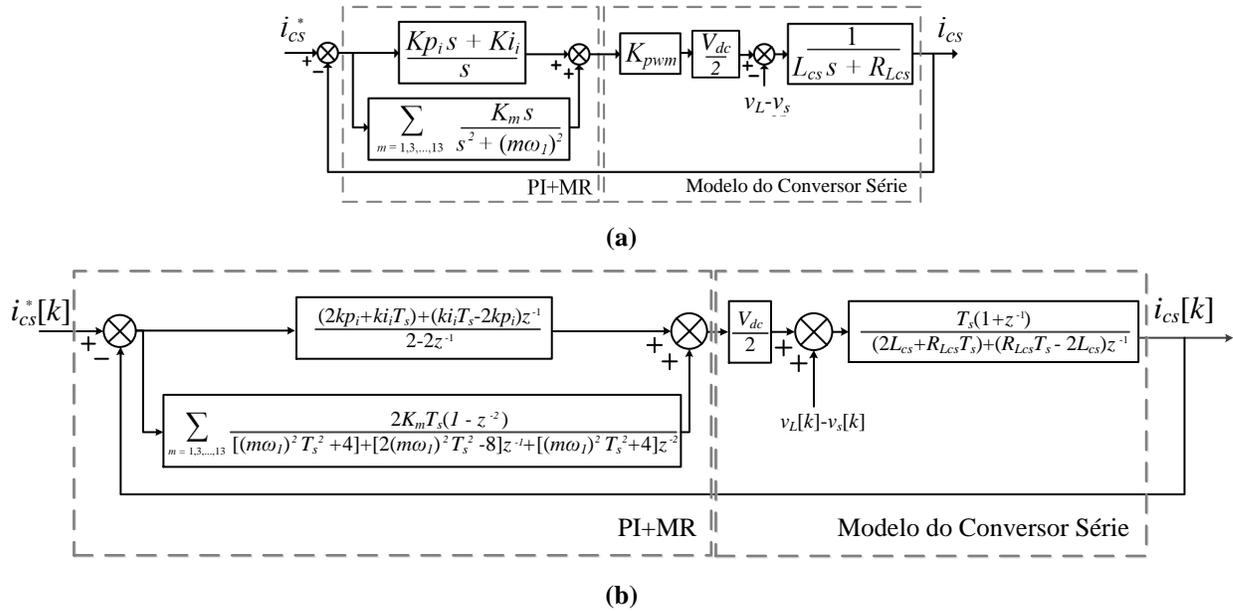
As malhas de controle do conversor série em tempo contínuo e discreto são apresentadas na Figura 4.8. Por fim, os parâmetros adotados para o projeto e os ganhos calculados são apresentados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1 – Parâmetros adotados para controle do conversor série.**

Ganhos dos controladores PI-MR do conversor fonte de corrente	
Frequência de cruzamento do PI	$\omega_{ci} = 12,566 \text{ rad/s}$
Margem de fase do PI	$PM_i = 80^\circ$
Ganhos do controlador PI-MR	$k_{pi} = 235,21 \quad k_{ii} = 535,054$
	$K_1 = 14,68 \quad K_3 = 7,46 \quad K_5 = 1,70 \quad K_7 = 2,72 \quad K_9 = 4,84 \quad K_{11} = 4,55 \quad K_{13} = 3,72$

Fonte: Autor.

Figura 4.8 – Diagrama em blocos da malha de controle do conversor série: em tempo (a) contínuo e (b) discreto.



Fonte: Autor.

#### 4.4 MALHA DE CONTROLE DO CONVERSOR PARALELO

Para o controle do conversor paralelo foi utilizado o controle por realimentação de estados (SF – *State-Feedback*) com termos multi-ressonante (SF+MR) (PELZ; DA SILVA e SAMPAIO, 2017; PELZ, 2018). Deste modo, tanto as referências senoidais quanto os distúrbios, nas frequências dos termos ressonantes, serão seguidas e rejeitadas, respectivamente. Neste tipo de controle, alguns estados são adicionados ao sistema em malha aberta, e então, o novo sistema em malha aberta é representado por:

$$\begin{aligned}
\begin{bmatrix} \dot{x}_{cp} \\ \dot{q}_{cp} \\ \dot{x}_{resj} \\ \vdots \\ \dot{x}_{resi} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A_{cp} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -O_{cp} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_{resj} & A_{resj} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & B_{resi} & 0 & \dots & A_{resi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{cp} \\ q_{cp} \\ x_{resj} \\ \vdots \\ x_{resi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{cp} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} d_{cp} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} v_{cp}^* + \begin{bmatrix} B_{wcp} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} i_{wcp} \\
\hat{x}_{cp} &= \underbrace{\begin{bmatrix} A_{cp} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ -O_{cp} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & B_{resj} & A_{resj} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & B_{resi} & 0 & \dots & A_{resi} \end{bmatrix}}_{\hat{A}_{cp}} \hat{x}_{cp} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_{cp} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}}_{\hat{B}_{cp}} d_{cp} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}}_{\hat{B}^*} v_{cp}^* + \underbrace{\begin{bmatrix} B_{wcp} \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}}_{\hat{B}_w} i_{wcp} \\
\hat{y}_{cp} &= \underbrace{[O_{cp} \quad 0 \quad 0 \quad \dots \quad 0]}_{\hat{O}_{cp}} [\hat{x}_{cp}]
\end{aligned} \tag{4.29}$$

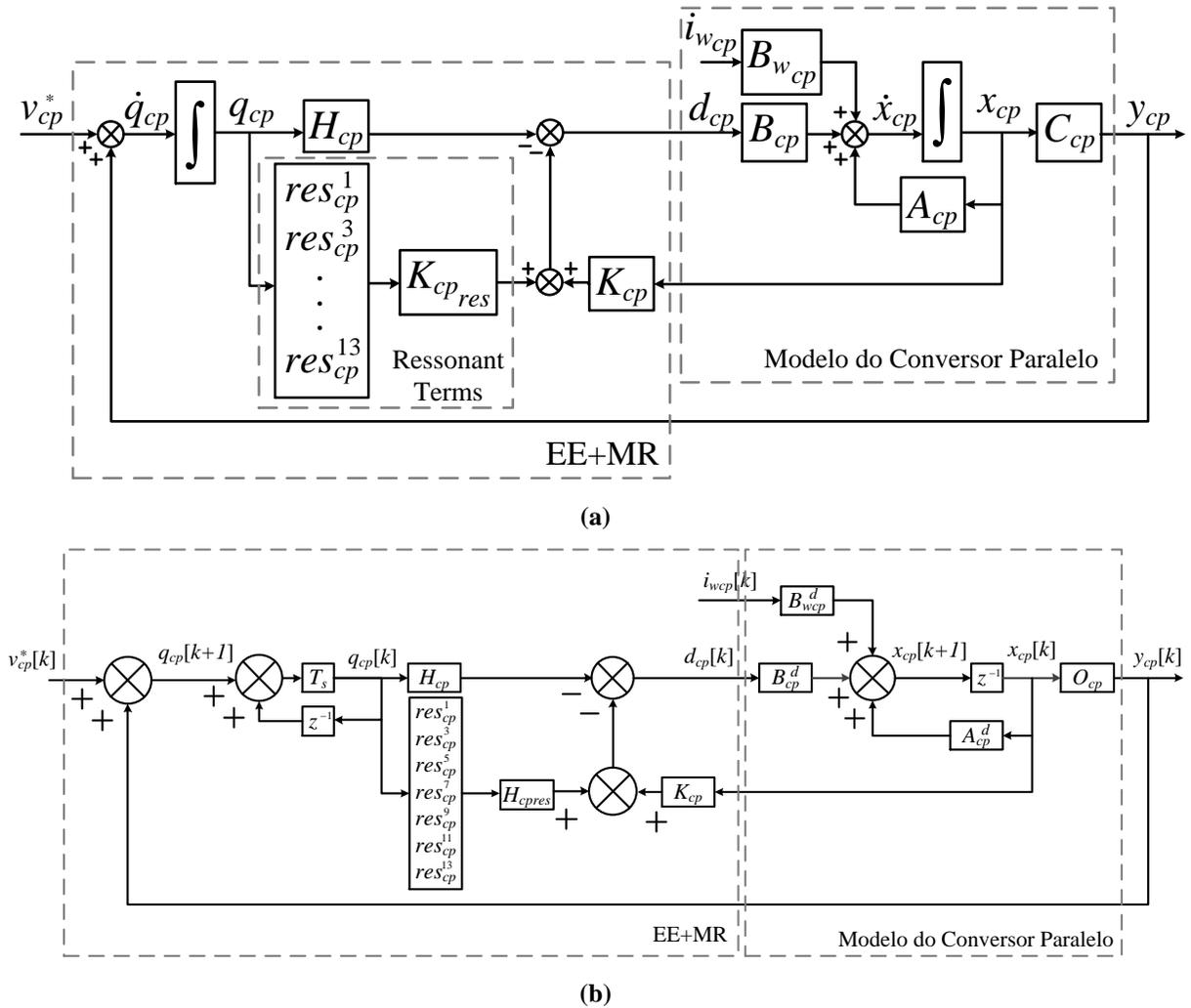
O estado  $q_{cp}$  é obtido por meio da integral do erro na malha de controle, calculado por  $v_{cp}^* - y_{cp}$ . O modelo em espaço de estados de cada termo ressonante, é representado de maneira genérica por:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_{res1n} \\ \dot{x}_{res2n} \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & -(n\omega_1)^2 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}}_{A_{resn}} \underbrace{\begin{bmatrix} x_{res1n} \\ x_{res2n} \end{bmatrix}}_{x_{resn}} + \underbrace{\begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix}}_{B_{resn}} q_{cp} \tag{4.30}$$

Foram considerados termos ressonantes de ordem 1, 3, 5, 7, 9, 11 e 13. Os valores que compõem a matriz  $Q_{cp}$ , foram definidos empiricamente por meio de simulações computacionais, e adotados como  $Q_{cp_{1,2}} = 0$ ,  $Q_{cp_3} = 3.59$ ,  $Q_{cp_{4,5}} = 1 \times 10^5$ ,  $Q_{cp_{6,7,8,9}} = 5 \times 10^5$  e  $Q_{cp_{10,11,\dots,17}} = 1 \times 10^5$ . Os valores  $Q_{cp_1}$ ,  $Q_{cp_2}$  e  $Q_{cp_3}$  estão relacionados aos ganhos de realimentação de estados que multiplicam os estados  $i_{L_{cp}}$ ,  $v_{cp}$  e  $q_{cp}$ , respectivamente, enquanto os valores restantes de  $Q_{cp}$  estão relacionados aos ganhos que multiplicam os termos ressonantes. O valor adotado para  $R_{cp}$  é igual a 0.01.

A Figura 4.9 apresenta as malhas de controle do conversor paralelo em tempo contínuo e discreto.  $A_{cp}^d$ ,  $B_{cp}^d$  e  $B_{wcp}^d$  são as matrizes do sistema em malha aberta em tempo discreto.  $K_{cp}$ ,  $H_{cp}$  e  $K_{cp_{res}}$  são, respectivamente, os ganhos de realimentação de estados que multiplicam os estados do sistema físico, a integral do erro, e os estados dos termos ressonantes. Os ganhos dos controladores de realimentação de estados usados no conversor paralelo são apresentados na Tabela 4.2.

Figura 4.9 – Diagrama em blocos da malha de controle do conversor paralelo.



Fonte: Autor.

Tabela 4.2 – Parâmetros adotados para controle do conversor paralelo.

Ganhos dos controladores EE+MR do conversor paralelo					
$K_{cp} = [0,0433 \quad 0,0075] \quad H_{cp} = [-29,19]$					
$K_{cpres} = \begin{bmatrix} -2,79 \times 10^3 & 3,93 \times 10^5 & -5,45 \times 10^3 & 4,36 \times 10^6 & -5,13 \times 10^3 & \dots \\ 8,05 \times 10^6 & -1,75 \times 10^3 & 6,37 \times 10^6 & -498,17 & 9,99 \times 10^6 & \dots \\ 1 \times 10^3 & 1,16 \times 10^7 & 2,29 \times 10^3 & 9,36 \times 10^6 & & \end{bmatrix}$					

Fonte: Autor.

#### 4.5 MODELO MATEMÁTICO E MALHA DE CONTROLE DO BARRAMENTO CC

Este tópico apresenta o modelo matemático, bem como a malha de controle de tensão do barramento CC adotados para este sistema. A função transferência da planta do barramento CC é dada por:

$$G_{Bdc} = \frac{v_d}{C_{dc}V_{dc}s} \quad (4.31)$$

onde,  $v_d$  é a tensão da rede no eixo síncrono  $d$ ;  $C_{dc}$  é a capacitância do barramento CC; e  $V_{dc}$  é a tensão total do barramento CC.

Para o controle da tensão total do barramento CC foi utilizado um PI convencional (CAMPANHOL et. al, 2017). Os parâmetros adotados para o projeto dos controladores PI da tensão total do barramento CC são apresentados na Tabela 4.3.

**Tabela 4.3 – Parâmetros adotados para controle da tensão total do barramento CC.**

Controlador PI de Tensão do barramento CC	
Frequência de cruzamento do $PI_{vdc}$	$\omega_{vdc} = 22,619$ rad/s
Margem de fase do $PI_{vdc}$	$MF_{vdc} = 83^\circ$
Ganhos do controlador $PI_{vdc}$	$KP_{vdc} = 0,1103$ $KI_{vdc} = 0,3064$

Fonte: Autor.

Para o controle de desequilíbrio da tensão do barramento CC, foi utilizado um PI convencional. Os parâmetros adotados para o projeto dos controladores PI de desequilíbrio são apresentados na Tabela 4.4.

**Tabela 4.4 – Parâmetros adotados para controle de desequilíbrio de tensão do barramento CC.**

Controlador PI de Tensão do barramento CC	
Frequência de cruzamento do $PI_{des}$	$\omega_{v_{des}} = 2,261$ rad/s
Margem de fase do $PI_{des}$	$MF_{v_{des}} = 75^\circ$
Ganhos do controlador $PI_{des}$	$KP_{v_{des}} = 0,0108$ $KI_{v_{des}} = 0,0065$

Fonte: Autor.

## 5. RESULTADOS DE SIMULAÇÕES E EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos os resultados do sistema Delta-UPS conectado em um sistema elétrico trifásico a quatro fios, operado com um algoritmo de compartilhamento de energia otimizado entre os conversores de potência durante o modo de operação *backup*. Primeiramente, são apresentados resultados de simulação do sistema Delta-UPS submetido a uma interrupção no fornecimento de energia elétrica. São apresentadas as formas de onda de tensão e corrente do sistema no modo *standby* (rede presente), na transição entre os modos de operação *standby-backup*, e *backup* (rede-ausente). Tais resultados tem como objetivo apresentar o comportamento de operação completo da Delta-UPS.

Além disso, são relatados resultados de simulação e experimentais de um circuito equivalente ao modo *backup* da Delta-UPS com cargas variadas. Neste caso, os resultados tem como objetivo avaliar o comportamento da nova conexão proposta neste trabalho do conversor série no modo *backup*, bem como o algoritmo de compartilhamento.

Por fim, é realizada uma análise dos resultados obtidos, comparando o sistema proposto à topologia original, destacando as vantagens e desvantagens de sua utilização com ênfase no processamento de energia dos conversores.

## 5.1 SISTEMA DELTA-UPS

As simulações computacionais foram realizadas por meio do software MATLAB/*Simulink*. Foi implementada toda estrutura de potência, bem como os controladores dos conversores série e paralelo. Além disso, os atrasos nas aquisições, tempo morto das chaves, e tempo de atuação dos conversores PWM foram considerados, a fim de obter resultados de simulação mais próximos aos reais. O sistema PLL trifásico adotado é apresentado no Apêndice A. As cargas e parâmetros utilizados nas simulações são apresentados nas Tabelas 5.1 e 5.2, respectivamente.

**Tabela 5.1 – Cargas utilizadas em simulação.**

Carga	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
1	Carga resistiva ( $R = 30\Omega$ )	Carga resistiva ( $R = 30\Omega$ )	Carga resistiva ( $R = 30\Omega$ )
2	Retificador trifásico de onda completa com carga R ( $R = 50\Omega$ )		
3	Retificador monofásico de onda completa com carga RL ( $R = 12\Omega$ e $L = 22\text{mH}$ )	Retificador monofásico de onda completa com carga RL ( $R = 27\Omega$ e $L = 35\text{mH}$ )	Retificador monofásico de onda completa com carga RC ( $R = 100\Omega$ e $C = 940\ \mu\text{F}$ )

Fonte: Autor.

**Tabela 5.2 – Parâmetros do sistema adotados em simulação.**

Tensão nominal da rede e carga	$V_s = V_L = 127\text{ V}$
Tensão nominal do barramento CC	$V_{cc} = 460\text{ V}$
Frequência de chaveamento dos conversores	$f_{ch} = 20\text{ kHz}$
Frequência de amostragem do conversor A/D do DSC	$f_{ad} = 60\text{ kHz}$
Ganho PWM	$K_{PWM} = 0,002$
Indutor de acoplamento do conversor série	$L_{FC} = 3,5\text{ mH}$
Resistência do indutor de acoplamento do conversor série	$R_{FC} = 0,2\ \Omega$
Indutor de acoplamento do conversor paralelo	$L_{FT} = 1,75\text{ mH}$
Resistência do indutor de acoplamento do conversor paralelo	$R_{FT} = 0,2\ \Omega$
Capacitor de filtragem do conversor paralelo	$C_{FT} = 60\ \mu\text{F}$
Passo de incremento do algoritmo ACEO	$\Delta = 0,0002$
Frequência de amostragem do algoritmo ACEO	$f_{ACEO} = 5\text{ kHz}$
Quantidade equivalente de baterias conectadas no barramento CC	42

Fonte: Autor.

Nos resultados de simulação são apresentados três cenários, sendo que no primeiro a rede está presente e, neste caso, a UPS opera no modo *standby*; no segundo é apresentada a transição do modo de operação *standby-backup* e no terceiro intervalo a UPS opera no modo *backup*.

Em tais resultados são apresentadas as seguintes variáveis: tensões da rede elétrica ( $v_{sabc}$ ); correntes da rede elétrica ( $i_{sabc}$ ); tensões sobre os transformadores de acoplamento ( $v_{Tfsabc}$ ); correntes do conversor série ( $i_{csabc}$ ); tensões do conversor paralelo ( $v_{fcpabc}$ ); correntes do conversor paralelo ( $i_{cpabc}$ ); tensões da carga ( $v_{Labc}$ ); correntes da carga ( $i_{Labc}$ ); potências aparentes monofásicas e trifásicas do conversor série ( $S_{csabc}$  e  $S_{3\theta cs}$ ); potências aparentes monofásicas e trifásicas do conversor paralelo ( $S_{cpabc}$  e  $S_{3\theta cp}$ ); Ganhos do algoritmo ACEO ( $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$ ,  $K_0$ ).

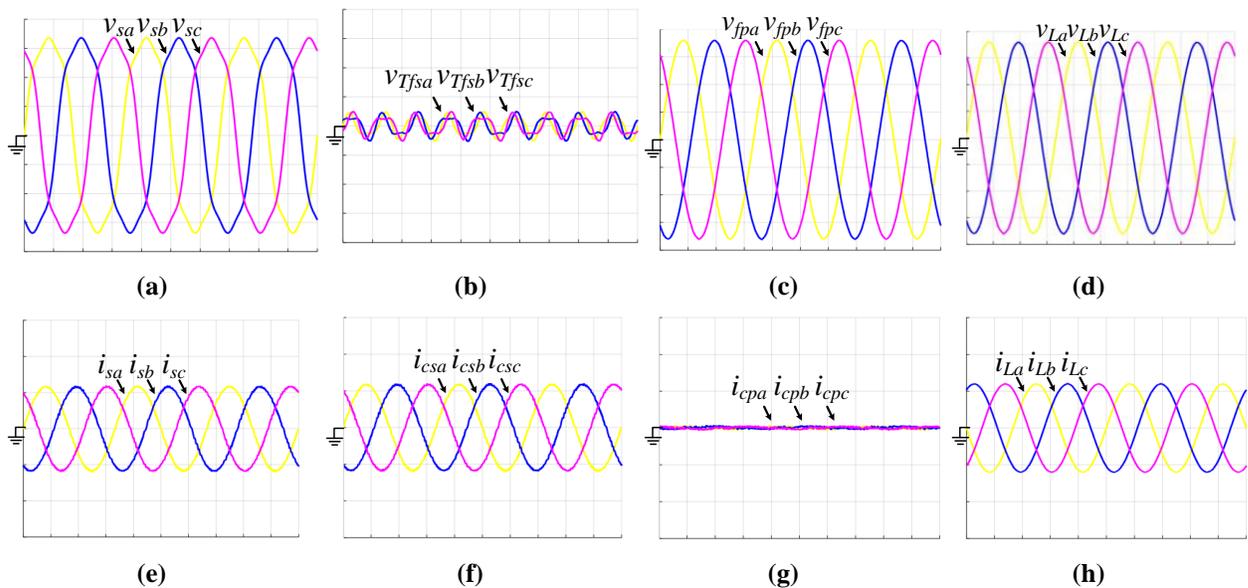
### 5.1.1 CARGA 1

Os resultados de simulação da Delta-UPS alimentando a Carga 1 são descritos na Figura 5.1, a qual apresentam as formas de onda de tensão e corrente da rede, conversor série, conversor paralelo e carga no modo de operação *standby*.

A Figura 5.1(a) apresenta as tensões da rede elétrica, as quais nota-se que são não-senoidais com ditorção harmônica total (THD - *Total Harmonic Distortion*) de 11,36%, 11,36% e 11,36% nas fases “a”, “b” e “c”, respectivamente. Tais tensões foram adotadas com conteúdo harmônico a fim de avaliar o desempenho da Delta-UPS como filtro ativo de tensão. A Figura 5.1(e) apresenta as correntes da rede elétrica, que são senoidais e equilibradas e em fase com a componente fundamental das tensões da rede, de modo que o fator de deslocamento (FD) seja unitário. A Figura 5.1(b) apresenta as tensões sobre os transformadores monofásicos de acoplamento do conversor série. No modo *standby*, as tensões da rede elétrica são aplicadas na entrada da Delta-UPS, enquanto a saída da Delta-UPS fornece tensão senoidal e equilibrada à carga por meio do filtro paralelo (fonte de tensão). Como os transformadores monofásicos são os únicos elementos conectados entre saída e entrada da Delta-UPS, os distúrbios de tensão da rede elétrica são aplicados, indiretamente, sobre estes transformadores. A Figura 5.1(f) apresenta as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor série. No modo *standby*, o conversor série fornece a parcela ativa de corrente da carga, ou seja, a componente fundamental. Uma vez que as cargas adotadas são puramente resistivas, e portanto consomem correntes senoidais, o conversor série fornece toda

a corrente demandada pela carga. O objetivo do conversor paralelo da Delta-UPS é atuar, independentemente do modo de operação, como fonte de tensão senoidal, equilibrada e com valor eficaz de 127V. A Figura 5.1(c) apresenta as tensões do conversor paralelo. É possível notar que as tensões fornecidas pelo conversor paralelo atendem aos critérios citados anteriormente. O conversor paralelo fornece a parcela não-senoidal de corrente demandada pela carga e a Figura 5.1(g) apresenta suas correntes. Sendo que a carga adotada é puramente resistiva, a corrente fornecida pelo conversor paralelo é aproximadamente nula. As tensões da carga, ou tensões de saída da Delta-UPS, são fornecidas pelo conversor paralelo. Sendo assim, as tensões da carga são as próprias tensões do conversor paralelo. No modo *standby*, tem-se como objetivo que as tensões de saída da Delta-UPS sejam equivalentes à componente fundamental de tensão da rede elétrica, como pode-se notar na Figura 5.1(d). A Carga 1 é puramente resistiva e equilibrada. As tensões fornecidas à carga são senoidais e equilibradas. Logo, as correntes da carga, também são senoidais, equilibradas e em fase com as tensões da carga, como mostra a Figura 5.1(h).

**Figura 5.1 – Delta-UPS alimentando a Carga 1 no modo *standby* (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



Fonte: Autor.

A Tabela 5.3 apresenta as THDs das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS durante o modo de operação *standby*. Observa-se que os harmônicos de tensão da rede elétrica são mitigados pela Delta-UPS.

**Tabela 5.3 – THD das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS alimentando a carga 1 durante o modo *standby*.**

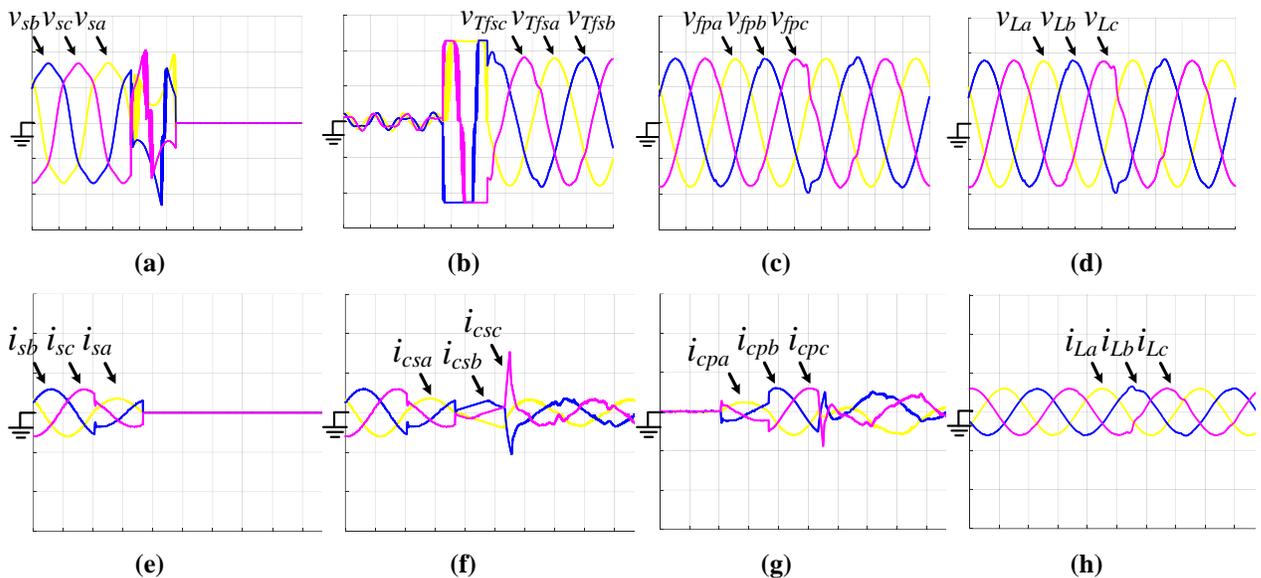
	THD (%)		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
$v_s$	11,36	11,36	11,36
$i_s$	1,87	1,82	1,82
$v_L$	0,41	0,39	0,40
$i_L$	0,41	0,39	0,40

**Fonte: Autor.**

A Figura 5.2 apresenta as formas de onda de tensão e corrente da rede, conversor série, conversor paralelo e carga na transição entre os modos de operação *standby-backup*. As Figuras 5.2(a) e 5.2(e) mostram as tensões e correntes da rede elétrica, ou seja, as grandezas de entrada da Delta-UPS e pode-se notar que houve a interrupção do fornecimento de energia da rede elétrica. A Figura 5.2(b) apresenta as tensões sobre os transformadores monofásicos de acoplamento do conversor série. Considerando a interrupção das tensões de entrada, as tensões resultantes aplicadas sobre os transformadores de acoplamento serão as próprias tensões da carga. A Figura 5.2(f) apresenta as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor série. Nota-se que na transição entre os modos *standby-backup* houve a redução das amplitudes das correntes do conversor série. Isto ocorre devido a estratégia adotada no ACEO, que consiste em ajustar a solução inicial do algoritmo, no momento da transição, em  $K_{d1} = 0,6$ ,  $K_{d2} = 0$ ,  $K_q = 0$  e  $K_0 = 0$ . Tal ajuste reduz o tempo de sobrecarga do conversor série na transição entre os modos de operação. As tensões do conversor paralelo são descritas na Figura 5.2(c). Observa-se que houve um pequeno *spike* na fase “c” do conversor paralelo em virtude da interrupção das tensões da rede elétrica. Com base nisso, nota-se a eficácia da estratégia de compensação adotada (Dual) na rejeição de distúrbios de tensão com alta taxa de variação de tensão em um curto intervalo de tempo (DA SILVA *et al*, 2020). A Figura 5.2(g) apresenta as correntes do conversor paralelo. O conversor paralelo fornece, indiretamente, a parcela complementar de corrente da carga ao conversor série. Deste modo, com

a estratégia adotado no algoritmo ACEO, de ajustar a solução inicial em  $K_{d1} = 0,6$ ,  $K_{d2} = 0$ ,  $K_q = 0$  e  $K_0 = 0$ , o conversor paralelo assume parte da parcela ativa de corrente da carga na entrada do modo *backup*. Além disso, observa-se um *offset* nas correntes, consequência do desbalanço de tensão do barramento CC no instante da transição abrupta entre os modos de operação. As tensões e correntes da carga são apresentadas nas Figuras 5.2(d) e 5.2(h). Percebe-se que as tensões de saída da Delta-UPS apresentaram um pequeno *spike*, o qual é refletido na carga. Porém, em termos gerais, nota-se que o desempenho e funcionamento da carga não foram comprometidos com a interrupção de fornecimento de energia da rede elétrica.

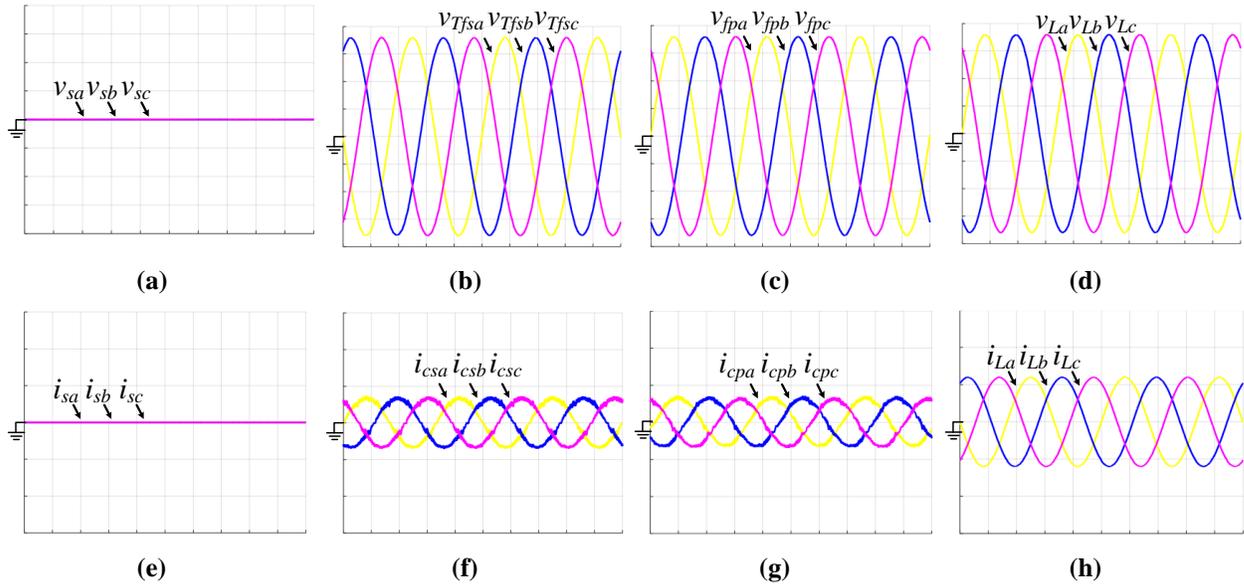
**Figura 5.2 – Delta-UPS alimentando a Carga 1 na transição entre os modos *standby-backup* (Resultados de simulação): tensões (100V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (10A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



**Fonte: Autor.**

A Figura 5.3 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do sistema Delta-UPS alimentando a Carga 1 no modo de operação *backup*. As Figuras 5.3(a) e 5.3(e) mostram as tensões e correntes da rede elétrica, respectivamente. Como mencionado anteriormente, é simulada uma interrupção do fornecimento de energia da rede elétrica.

**Figura 5.3 – Delta-UPS alimentando a Carga 1 no modo *backup* (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



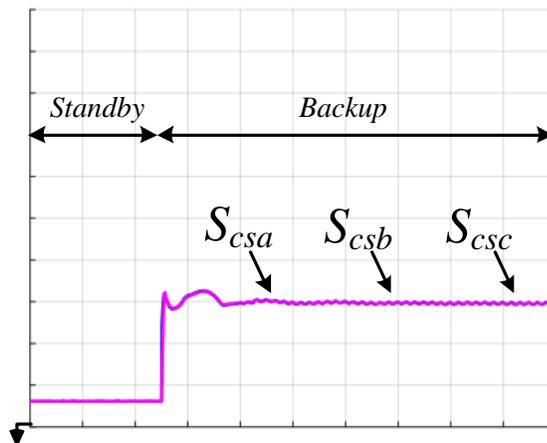
Fonte: Autor.

A Figura 5.3(b) apresenta as tensões sobre os transformadores monofásicos de acoplamento do conversor série. No modo *backup*, o conversor série é conectado em paralelo com a carga, e então, as tensões aplicadas sobre os transformadores de acoplamento são as tensões da carga. A Figura 5.3(f) descreve as correntes processadas pelo conversor série no modo *backup*. Nota-se que, em relação ao modo *standby*, houve um decréscimo das amplitudes das correntes do conversor série, isto justifica-se pela atuação do algoritmo de compartilhamento de potência. Neste cenário, com a Delta-UPS alimentando a Carga 1, durante o modo *standby* o conversor série fornece toda a corrente demandada pela carga. Sendo que, no modo *backup* os conversores série e paralelo compartilham as mesmas tensões da carga, para que haja compartilhamento igualitário de potência, as amplitudes de corrente do conversor série devem diminuir. Por outro lado, como o conversor paralelo assume a parcela restante de corrente da carga ( $i_{cpabc} = i_{Labc} - i_{csabc}$ ), as amplitudes de corrente do conversor paralelo devem aumentar. As tensões do conversor paralelo são senoidais, equilibradas com valor eficaz de 127V e são apresentadas na Figura 5.3(c). A Figura 5.3(g) apresenta as correntes que circulam pelo conversor paralelo. Neste caso, para haver o compartilhamento de potência entre os conversores de potência, espera-se que as amplitudes das

correntes do conversor paralelo aumentem no modo *backup* em relação ao modo *standby*, o que de fato ocorre nas simulações computacionais. As tensões e correntes de saída da Delta-UPS não sofrem alterações após o ajuste de compartilhamento de potência do algoritmo ACEO, como apresentadas nas Figuras 5.3(d) e 5.3(h).

Na Figura 5.4 são apresentadas as potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor série. Percebe-se que no modo *standby* o conversor série processa em cada fase uma potência aparente aritmética inferior a 100VA. Isto ocorre devido as tensões aplicadas sobre os transformadores de acoplamento serem compostas apenas pelo conteúdo harmônico das tensões da rede elétrica. Deste modo, as tensões sobre o transformador apresentam valor eficaz da ordem de 14V, assim, mesmo o conversor série processando toda a corrente da carga, o produto entre as tensões e correntes eficazes das fases a, b e c permanecem abaixo de 100VA. Por outro lado, observa-se que no modo *backup* há um aumento das potências aparentes processadas pelo conversor série. Tal aumento é justificado pela tensão aplicada sobre o transformador, a qual deixa de conter somente o conteúdo harmônico das tensões da rede e passa a ter o valor total de tensão da carga (tensão eficaz de 127V). Dessa forma, apesar da diminuição das correntes do conversor série, as quais foram igualmente compartilhadas com o conversor paralelo, as potências aparentes aritméticas monofásicas apresentam aumento em relação ao modo *standby*.

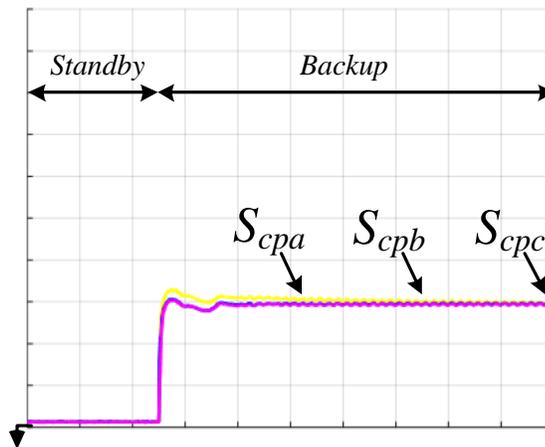
**Figura 5.4 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor série (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).**



**Fonte: Autor.**

A Figura 5.5 apresenta as potências aparentes aritméticas monofásicas processadas pelo conversor paralelo, que durante o modo *standby* são quase nulas. Isto ocorre pois, apesar do conversor paralelo fornecer tensão eficaz de 127V, as correntes que circulam pelo conversor apresentam valor eficaz de aproximadamente 0A. Por outro lado, no modo *backup*, há um aumento significativo das potências processadas por este conversor, uma vez que, metade da corrente da carga passa a ser fornecida pelo conversor paralelo.

**Figura 5.5 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor paralelo (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).**

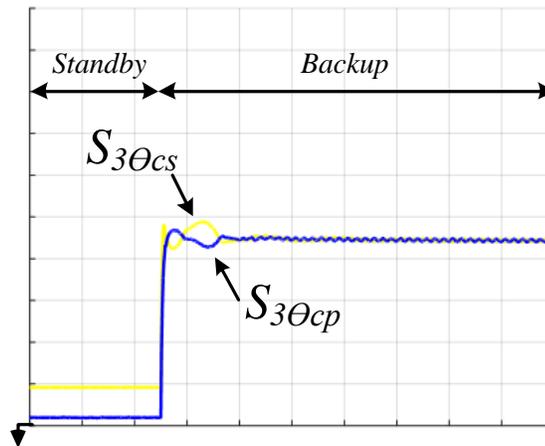


**Fonte: Autor.**

A Figura 5.6 apresenta as potências aparentes aritméticas trifásicas dos conversores série e paralelo. Nota-se que a convergência do algoritmo ACEO foi de aproximadamente 300ms. Além disso, percebe-se um comportamento oscilatório das potências após a convergência do algoritmo, comportamento justificado pelo fato do algoritmo ACEO comparar constantemente a diferença entre as potências trifásicas dos conversores série e paralelo. Caso houver qualquer diferença entre as mesmas, o algoritmo atua incrementando ou decrementando os ganhos  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$ , com um passo fixo e tal comportamento oscilatório pode ser solucionado de duas formas. A primeira solução é definir um intervalo de diferença de potência processada entre os conversores em que o algoritmo não atua, como exemplo, um intervalo de 100VA. Assim, enquanto o conversor série processa potência com diferença inferior a 100VA em relação ao conversor paralelo, ou vice-versa, o algoritmo não modifica os ganhos  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$ . Esta estratégia é adotada posteriormente

nos resultados de simulação e experimentais do circuito equivalente ao modo *backup* da Delta-UPS. Outra possível solução, é diminuir o passo fixo de incremento e decremento dos ganhos.

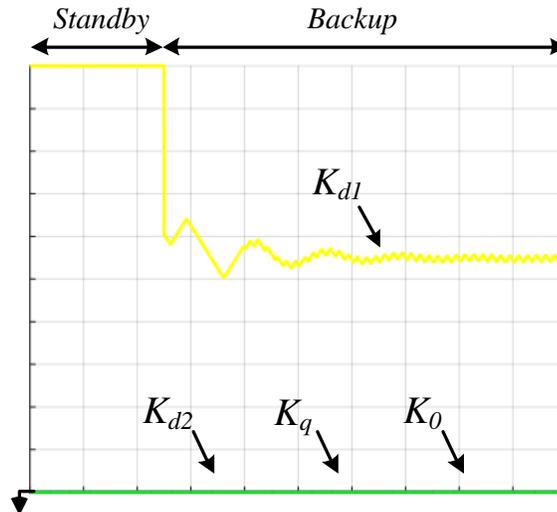
**Figura 5.6 – Potências aparentes trifásicas processadas pelos conversores série e paralelo (Resultados de simulação – 200VA/div e 200ms/div).**



**Fonte: Autor.**

A Figura 5.7 apresenta as formas de onda dos ganhos  $K_{d1}$ ,  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$ . Nota-se que, na entrada do modo *backup* a solução inicial do algoritmo ACEO é ajustada em  $K_{d1} = 0,6$ ,  $K_{d2} = 0$ ,  $K_q = 0$  e  $K_0 = 0$ , sendo que, tal solução inicial foi definida empiricamente. Foram simulados diversos cenários com a Delta-UPS alimentando cargas com diferentes características (senoidais, não-senoidais, equilibradas, desequilibradas e suas combinações) e na maior parte dos casos o algoritmo converge para um ponto em torno de  $K_{d1} = 0,6$ ,  $K_{d2} = 0$ ,  $K_q = 0$  e  $K_0 = 0$ . Assim, o tempo de convergência do algoritmo é reduzido, além dos transitórios e sobrecarga do conversor série na transição para o modo de operação *backup*.

Figura 5.7 – Ganhos do algoritmo ACEO (Resultados de simulação – 0,1/div e 200ms/div).



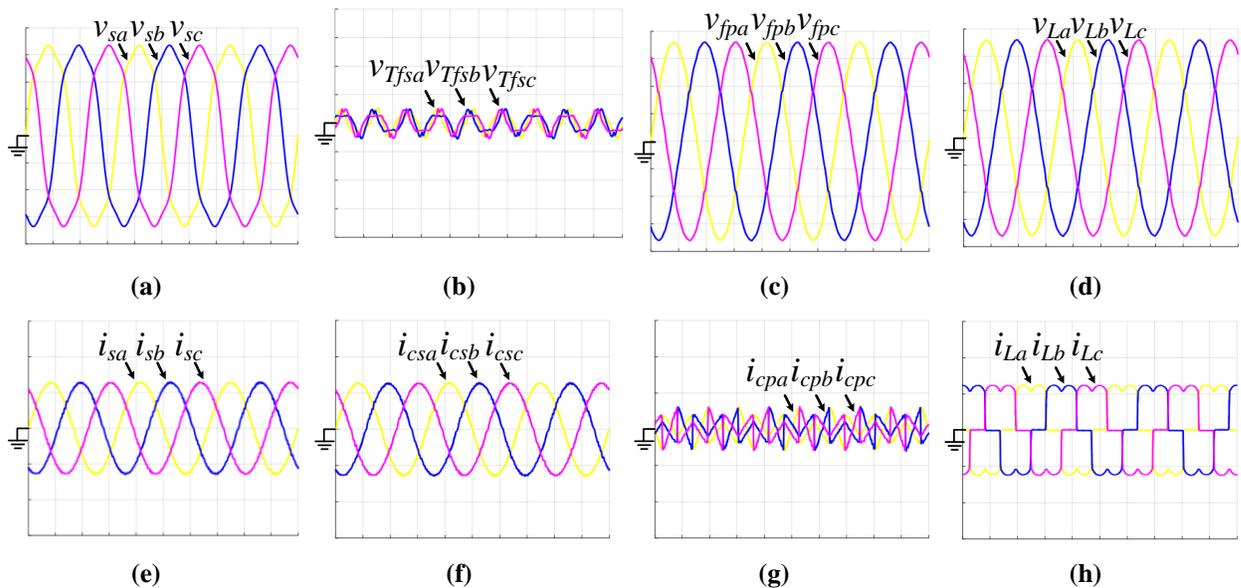
Fonte: Autor.

### 5.1.2 CARGA 2

Os resultados de simulação da Delta-UPS alimentando a Carga 2 são apresentados na Figura 5.8, a qual descreve as formas de onda de tensão e corrente da rede, conversor série, conversor paralelo e carga no modo de operação *standby*. A Figura 5.8(a) apresenta as tensões da rede elétrica e pode-se notar que tais tensões apresentam conteúdo harmônico. A THD é de 11,38% para as fases “a”, “b” e “c”. Por outro lado, as correntes da rede elétrica são senoidais e equilibradas como apresentado na Figura 5.8(e). A Figura 5.8(b) apresenta as tensões sobre os transformadores monofásicos de acoplamento do conversor série. Nota-se que os distúrbios de tensão da rede elétrica são aplicados sobre tais transformadores. A Figura 5.8(f) apresenta as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor série que, por sua vez, fornece a parcela ativa de corrente da carga. A Figura 5.8(c) apresenta as tensões do conversor paralelo e são senoidais, equilibradas e com amplitude de 180V. Além disso, percebe-se um distúrbio nos cruzamentos das tensões, consequência da variação abrupta das correntes da carga. A Figura 5.8(g) apresenta as correntes do conversor paralelo, o qual fornece a parcela não-senoidal de corrente demandada pela carga. A Figura 5.8(d) apresenta as tensões da carga, ou tensões de saída da Delta-UPS, que são equivalentes as tensões do conversor paralelo, como pode ser notado ao comparar as Figuras 5.8(c) e 5.8(d). A Figura 5.8(h) mostra as formas de onda de corrente da carga. Nota-se que tais correntes apresentam

periodicamente uma variação instantânea superior a 5A. Ao compararmos as Figuras 5.8(d) e 5.8(h), é possível observar que os distúrbios da tensão da carga ocorrem exatamente nos pontos de variação abrupta das correntes da carga.

**Figura 5.8 – Delta-UPS alimentando a Carga 2 no modo *standby* (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



Fonte: Autor.

A Tabela 5.4 descreve as THDs das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS durante o modo de operação *standby*. Nota-se que os distúrbios de tensão na entrada da Delta-UPS não são refletidos na saída, bem como os distúrbios de correntes na saída da Delta-UPS não são refletidos na corrente de entrada da Delta-UPS.

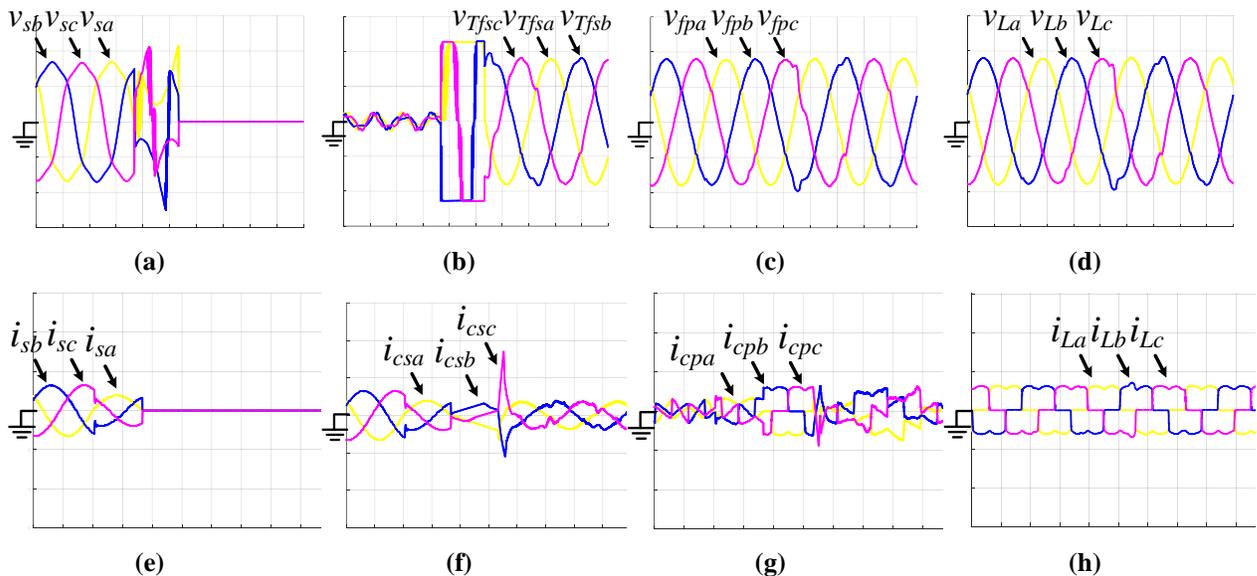
**Tabela 5.4 – THD das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS alimentando a carga 2 durante o modo *standby*.**

	THD (%)		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
$v_s$	11,38	11,38	11,38
$i_s$	1,97	1,89	1,91
$v_L$	1,23	1,19	1,26
$i_L$	29,36	29,35	29,36

Fonte: Autor.

A Figura 5.9 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do sistema Delta-UPS alimentando a Carga 2 na transição entre os modos de operação *standby-backup*. As Figuras 5.9(a) e 5.9(e) apresentam as tensões e correntes da rede elétrica. Nota-se a interrupção do fornecimento de energia na entrada da Delta-UPS.

**Figura 5.9 – Delta-UPS alimentando a Carga 2 na transição entre os modos *standby-backup* (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



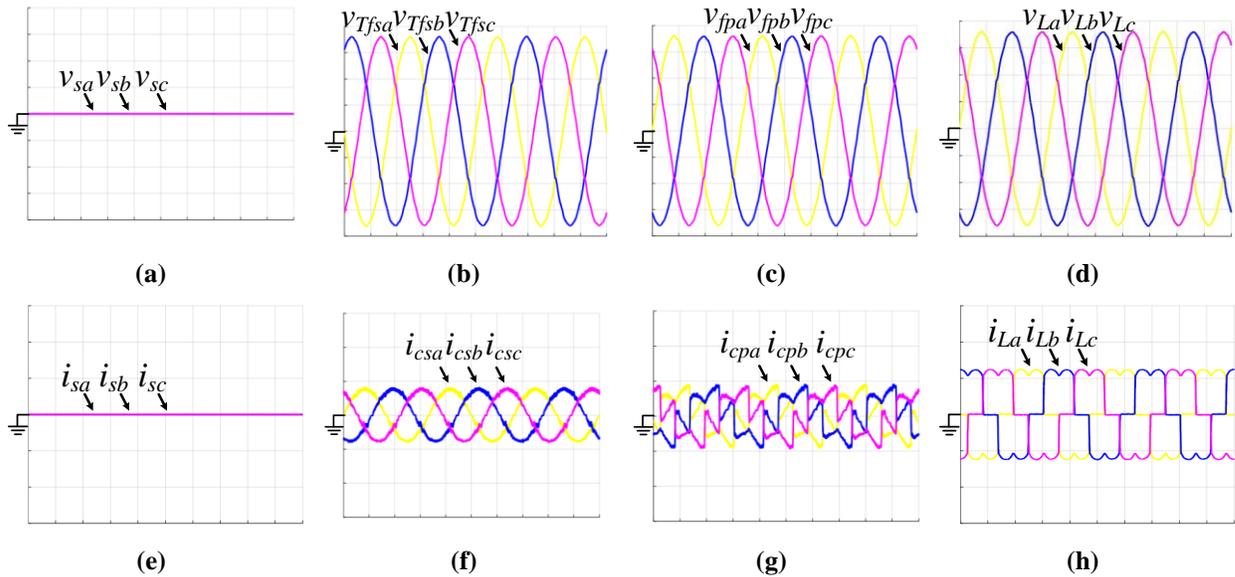
Fonte: Autor.

A Figura 5.9(b) apresenta as tensões sobre os transformadores monofásicos de acoplamento do conversor série. Nota-se que, com a interrupção das tensões de entrada, as tensões resultantes

aplicadas sobre os transformadores de acoplamento são equivalentes as tensões da carga. A Figura 5.9(f) apresenta as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor série. Pode-se observar a diminuição das amplitudes das correntes do conversor série, justificada pela solução inicial do algoritmo ACEO na entrada do modo *backup*. As tensões do conversor paralelo são apresentadas na Figura 5.9(c). Nota-se que houve um pequeno *spike* nas fases “b” e “c” do conversor paralelo em decorrência da interrupção das tensões da rede elétrica. A Figura 5.9(g) apresenta as correntes do conversor paralelo na transição entre os modos *standby-backup*. O conversor paralelo fornece, indiretamente, a parcela complementar de corrente da carga ao conversor série. Deste modo, com a estratégia adotada no algoritmo ACEO de ajustar a solução inicial dos ganhos em  $K_{d1} = 0,6$ ,  $K_{d2} = 0$ ,  $K_q = 0$  e  $K_0 = 0$ , o conversor paralelo assume, além da parcela não-ativa de corrente da carga, parte da parcela ativa de corrente da carga na entrada. Além disso, observa-se um *offset* de corrente na fase “a” do conversor paralelo, consequência da saída abrupta das tensões e correntes de entrada da Delta-UPS. As tensões e correntes da carga são descritas nas Figuras 5.9(d) e 5.9(h), respectivamente. Observa-se que as tensões e correntes de saída da Delta-UPS apresentam um pequeno *spike* na transição entre os modos de operação.

A Figura 5.10 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do sistema Delta-UPS alimentando a Carga 2 no modo de operação *backup*. As Figuras 5.10(a) e 5.10(e) apresentam as tensões e correntes de entrada da Delta-UPS, respectivamente. A Figura 5.10(b) apresenta as tensões sobre os transformadores monofásicos de acoplamento do conversor série durante o modo de operação *backup*. A Figura 5.10(f) apresenta as correntes processadas pelo conversor série. Em relação ao modo *standby*, houve um decréscimo das amplitudes das correntes do conversor série. As tensões do conversor paralelo são apresentadas na Figura 5.10(c). Com base nas Figuras 5.8(d) e 5.10(d), nota-se que a qualidade das tensões fornecidas pelo conversor paralelo não são alteradas com a interrupção do fornecimento de energia. A Figura 5.10(g) apresenta as correntes que circulam pelo conversor paralelo e observa-se que no modo *backup* tais correntes contêm uma parcela de corrente ativa da carga. As tensões e correntes de saída da Delta-UPS não sofrem alterações com a divisão de potência otimizada do entre os conversores, como pode-se observar nas Figuras 5.10(d) e 5.10(h).

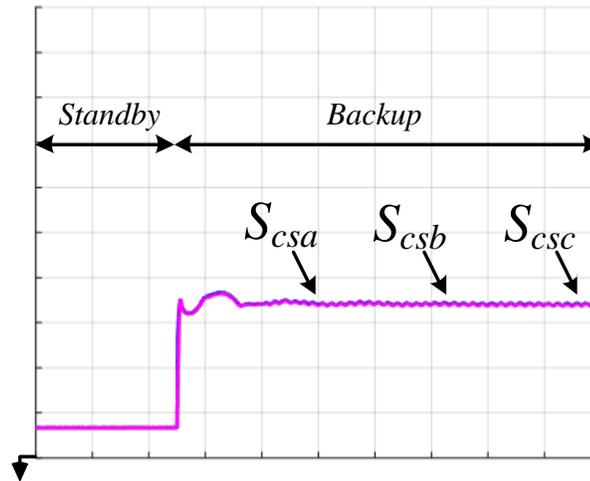
**Figura 5.10 – Delta-UPS alimentando a Carga 2 no modo *backup* (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (5A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



Fonte: Autor.

A Figura 5.11 apresenta as potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor série. Nota-se que, no modo *standby* o conversor série processa em cada fase uma potência aparente aritmética inferior a 100VA. Tais potências são consequência das tensões não-senoidais aplicadas sobre os transformadores de acoplamento, bem como as correntes senoidais injetadas pelo conversor série. No modo *backup*, apesar da diminuição das correntes, há um aumento das potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor série, visto que a tensão aplicada sobre os transformadores de acoplamento passa a ser equivalente às tensões da carga.

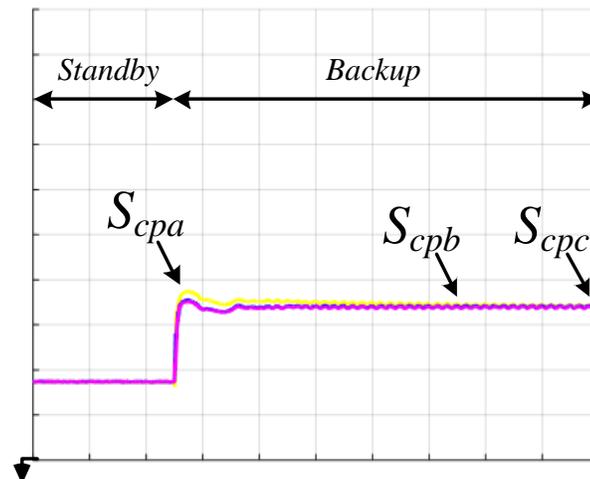
**Figura 5.11 – Potências aparentes monofásicos processadas pelo conversor série (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).**



Fonte: Autor.

A Figura 5.12 apresenta as potências aparentes aritméticas monofásicas processadas pelo conversor paralelo. Durante o modo *standby*, as potências processadas pelo conversor paralelo são inferiores a 200VA e compostas pela parcela não-ativa de potência da carga. Por outro lado, no modo *backup*, há um aumento das potências processadas por este conversor, uma vez que, além da parcela não-ativa, o conversor paralelo processa parte da potência ativa da carga.

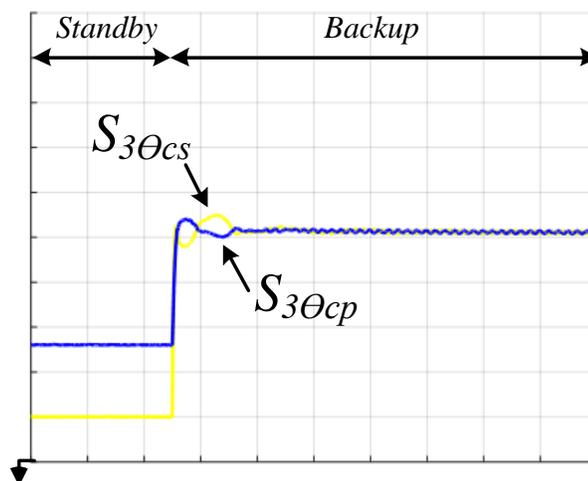
**Figura 5.12 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor paralelo (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div)**



Fonte: Autor.

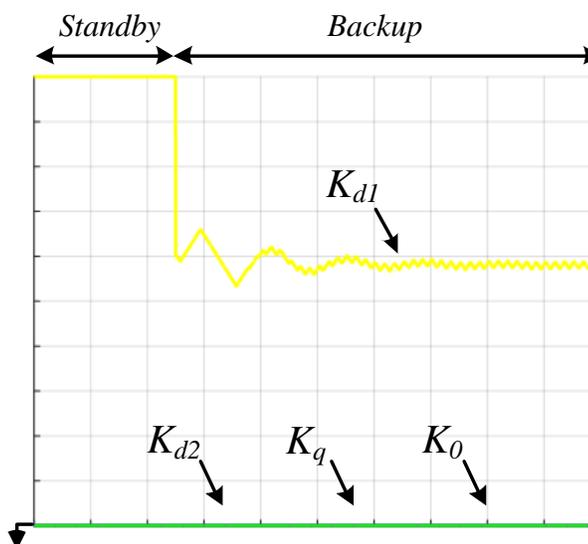
A Figura 5.13 descreve as potências aparentes aritméticas trifásicas dos conversores série e paralelo. O tempo de convergência do algoritmo ACEO foi de aproximadamente 150ms. A Figura 5.14 apresenta as formas de onda dos ganhos do algoritmo de compartilhamento.

**Figura 5.13 – Potências aparentes trifásicas processadas pelos conversores série e paralelo (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).**



Fonte: Autor.

**Figura 5.14 – Ganhos do algoritmo ACEO (Resultados de simulação – 0,1/div e 200ms/div).**

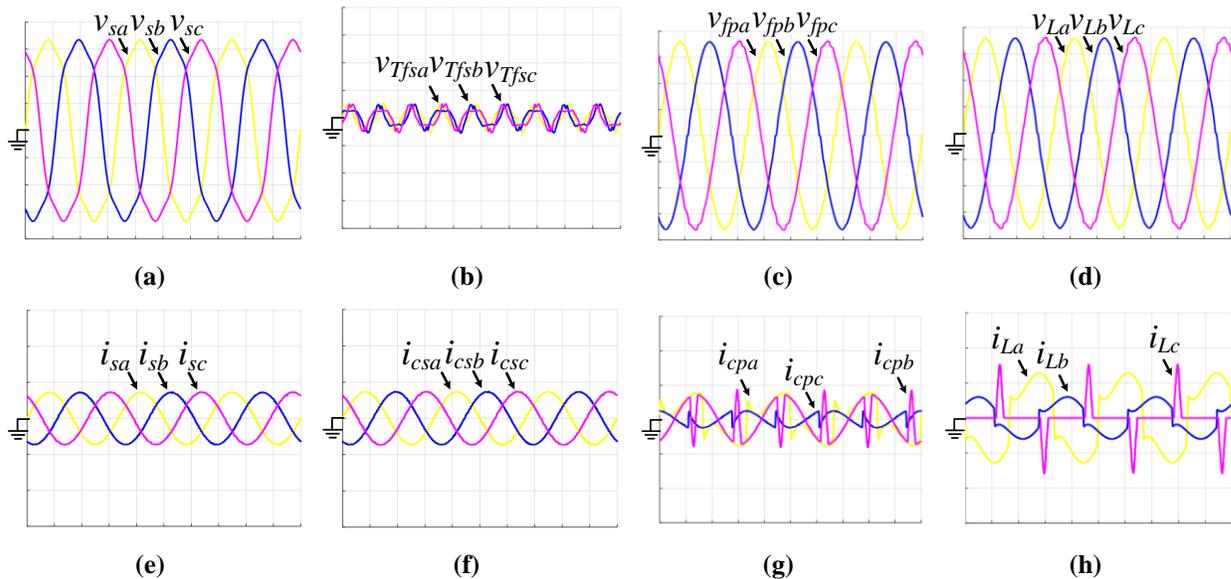


Fonte: Autor.

### 5.1.3 CARGA 3

A Figura 5.15 mostra as formas de onda de tensão e corrente relacionadas ao sistema Delta-UPS alimentando a Carga 3. As tensões e correntes da rede elétrica, durante o modo de operação *standby*, são descritas nas Figuras 5.15(a) e 5.15(e), respectivamente. Estas tensões apresentam conteúdo harmônico, enquanto, as correntes são senoidais e equilibradas.

**Figura 5.15 – Delta-UPS alimentando a Carga 3 no modo *standby* (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (10A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



Fonte: Autor.

A Figura 5.15(b) apresenta as tensões sobre os transformadores monofásicos de acoplamento do conversor série. A Figura 5.15(f) descreve as formas de onda das correntes injetadas pelo conversor série, o qual processa a parcela ativa de corrente da carga durante o modo *standby*. A Figura 5.15(c) apresenta as tensões do conversor paralelo. Percebe-se um distúrbio nos picos da tensão da fase “c”, bem como nos cruzamentos por zero das tensões “a” e “b”. Tais perturbações são consequência das altas taxas de variação das correntes da carga. A Figura 5.15(g) apresenta as correntes do conversor paralelo durante o modo de operação *standby*, tais correntes são compostas pela parcela não-ativa de corrente demandada pela carga. As Figuras 5.15(d) e

5.15(h) descrevem as tensões e correntes de saída da Delta-UPS, respectivamente. As correntes da carga são não-senoidais e desequilibradas, além de apresentarem pontos com taxas de variação de corrente da ordem de 10A em intervalos de aproximadamente 1 ms.

A Tabela 5.5 apresenta as THDs das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS durante o modo de operação *standby*. Os distúrbios de tensão na entrada da Delta-UPS não são refletidos na saída. Além disso, os harmônicos de corrente na saída da Delta-UPS não são refletidos nas correntes de entrada da Delta-UPS.

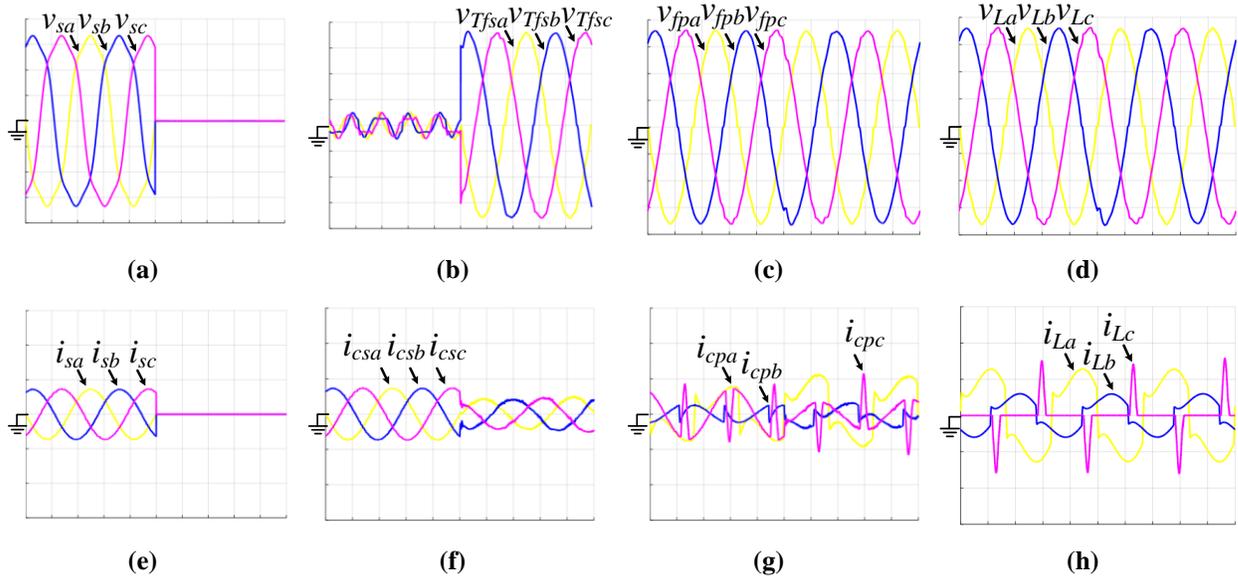
**Tabela 5.5 – THD das tensões e correntes de entrada e saída da Delta-UPS alimentando a carga 3 durante o modo *standby*.**

	THD (%)		
	Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>
$v_s$	11,38	11,38	11,38
$i_s$	1,97	1,89	1,91
$v_L$	1,23	1,19	1,26
$i_L$	28,45	23,36	162,45

**Fonte: Autor.**

A transição entre os modos de operação *standby-backup* é detalhada na Figura 5.16. As Figuras 5.16(a) e 5.16(e) apresentam as tensões e correntes de entrada da Delta-UPS. A Figura 5.16(b) apresenta as tensões sobre os transformadores de acoplamento do conversor série. Com a interrupção das tensões de entrada, as tensões resultantes sobre os transformadores de acoplamento são equivalentes às tensões da carga. A Figura 5.16(f) descreve as correntes do conversor série. Pode-se observar a diminuição da amplitude das correntes na transição dos modos de operação. As tensões do conversor paralelo são apresentadas na Figura 5.16(c). Nota-se um pequeno *spike* nas fases “*b*” e “*c*” do conversor no instante da transição. A Figura 5.16(g) apresenta as correntes do conversor paralelo na transição entre os modos *standby-backup*. O conversor paralelo processa, além da parcela não-ativa de corrente da carga, parte da parcela ativa de corrente da carga na entrada. As tensões e correntes da carga são apresentadas nas Figuras 5.16(d) e 5.16(h), respectivamente, ambas apresentam um *spike* na transição dos modos de operação.

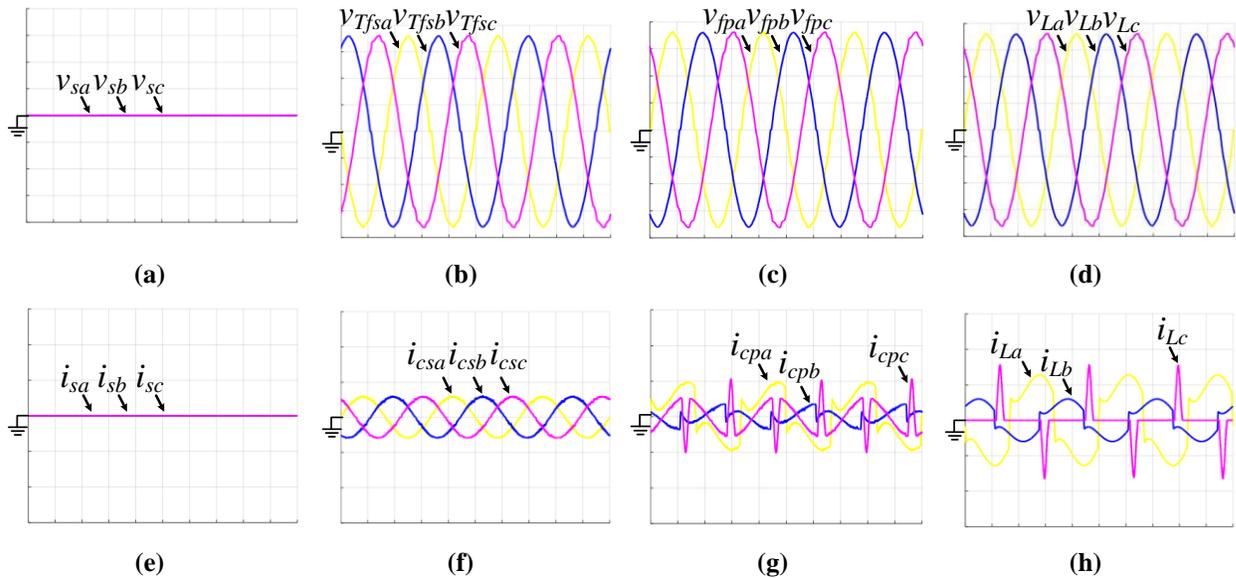
**Figura 5.16 – Delta-UPS alimentando a Carga 3 na transição entre os modos *standby-backup* (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (10A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



Fonte: Autor.

A Figura 5.17 apresenta as formas de onda de tensão e corrente do sistema Delta-UPS alimentando a Carga 3 no modo de operação *backup*. As Figuras 5.17(a) e 5.17(e) apresentam as tensões e correntes de entrada da Delta-UPS, respectivamente. A Figura 5.17(b) apresenta as tensões sobre os transformadores monofásicos de acoplamento do conversor série durante o modo de operação *backup*. A Figura 5.17(f) descreve as correntes processadas pelo conversor série. Nota-se um decréscimo das amplitudes das correntes do conversor série em relação ao modo *standby*. As tensões do conversor paralelo são apresentadas na Figura 5.17(c). A qualidade das tensões fornecidas pelo conversor paralelo não são alteradas com a interrupção do fornecimento de energia. A Figura 5.17(g) apresenta as correntes que circulam pelo conversor paralelo. Observa-se que no modo *backup* tais correntes contêm uma parcela de corrente correspondente à potência ativa demandada pela carga. As tensões e correntes de saída da Delta-UPS permanecem inalteradas após a convergência do algoritmo ACEO e são apresentadas nas Figuras 5.17(d) e 5.17(h).

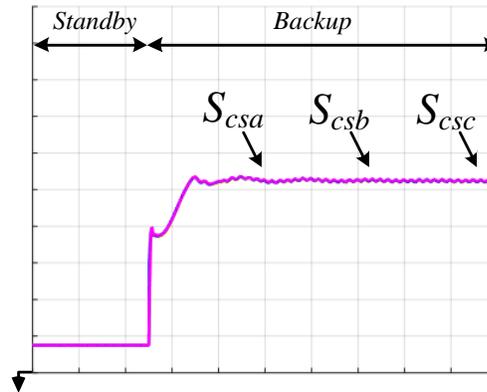
**Figura 5.17 – Delta-UPS alimentando a Carga 3 no modo *backup* (Resultados de simulação): tensões (50V/div e 5ms/div) da (a) rede elétrica, (b) secundário do transformador de acoplamento do conversor série, (c) conversor paralelo e (d) carga; e correntes (10A/div e 5ms/div) (e) da rede, (f) conversor série, (g) conversor paralelo e (h) carga.**



**Fonte: Autor.**

A Figura 5.18 apresenta as potências aparentes monofásicas aritméticas processadas pelo conversor série. Nota-se que no modo *standby*, as potências em cada fase do conversor são inferiores a 100VA. Tais potências são consequência das tensões não-senoidais aplicadas sobre os transformadores de acoplamento, bem como as correntes que correspondem à potência ativa consumida pela carga. Por outro lado, no modo *backup*, mesmo com a diminuição das correntes, as potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor série superam o valor de 500 VA.

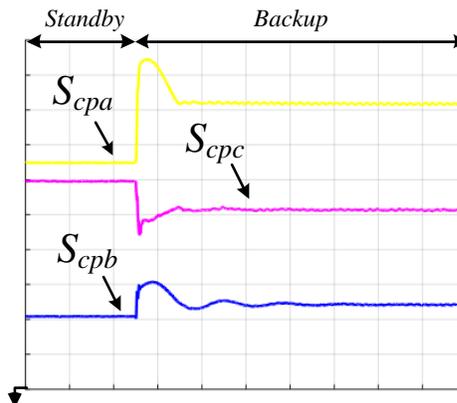
**Figura 5.18 – Potências aparentes monofásicos processadas pelo conversor série (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).**



Fonte: Autor.

A Figura 5.19 apresenta as potências processadas pelo conversor paralelo. Sendo que, as cargas alimentadas pela Delta-UPS são desequilibradas, as potências processadas em cada fase do conversor paralelo são diferentes.

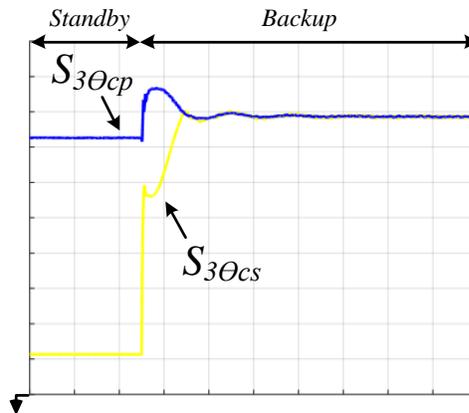
**Figura 5.19 – Potências aparentes monofásicas processadas pelo conversor paralelo (Resultados de simulação – 100VA/div e 200ms/div).**



Fonte: Autor.

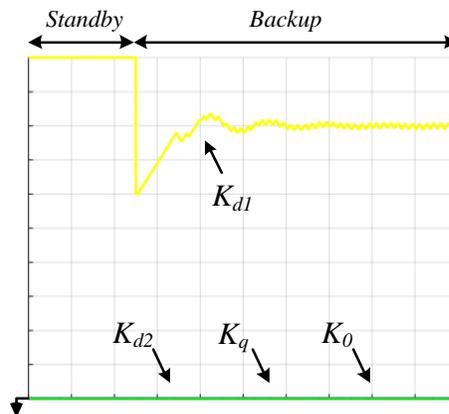
As Figuras 5.20 e 5.21 apresentam as potências aparentes aritméticas trifásicas dos conversores série e paralelo, e os ganhos do algoritmo ACEO, respectivamente. Observa-se que o tempo de convergência do algoritmo ACEO foi próximo de 200ms.

**Figura 5.20 – Potências aparentes trifásicas processadas pelos conversores série e paralelo (Resultados de simulação – 200VA/div e 200ms/div).**



Fonte: Autor.

**Figura 5.21 – Ganhos do Algoritmo ACEO (Resultados de simulação – 0,1/div e 200ms/div).**



Fonte: Autor.

De acordo com os resultados apresentados via simulações computacionais nota-se que o conjunto adicional de chaves estáticas permite a conexão do conversor série em paralelo com a carga no modo *backup*. Deste modo, a potência fornecida à carga pode ser compartilhada por ambos os conversores, série e paralelo. Além disso, percebe-se a relevância do algoritmo ACEO, o qual opera em conjunto com o algoritmo de geração de referências de compensação de corrente e manipula a quantidade de potência aparente processada por cada conversor. O objetivo do algoritmo é que cada conversor processe metade da potência aparente da carga e com base nos resultados, nota-se a eficácia do algoritmo. Portanto, por meio das simulações, observa-se que a adição do conjunto de chaves estáticas, bem como o algoritmo ACEO permitem uma redução do

dimensionamento do conversor paralelo de até 50% em relação à topologia original da Delta-UPS, o que implica em redução de custos significativa para implementação do sistema.

## 5.2 CIRCUITO EQUIVALENTE DA DELTA-UPS NO MODO *BACKUP*

Os resultados computacionais e experimentais da Delta-UPS foram coletados durante o modo *backup* antes do acionamento do algoritmo e após a convergência do ACEO. Anteriormente ao acionamento do algoritmo, as referências de compensação foram mantidas iguais às adotadas no modo de operação *standby*, portanto, o conversor série fornece a parcela ativa de potência, enquanto o conversor paralelo fornece a parcela não-ativa. Por outro lado, após a convergência do algoritmo ACEO, espera-se que cada conversor processe aproximadamente 50% da potência aparente trifásica aritmética da carga. Os parâmetros e cargas utilizados são apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7, respectivamente.

No tópico anterior, foi discutida a definição de um intervalo de potência em que o algoritmo ACEO não atue, a fim de minimizar a oscilação dos ganhos do algoritmo após a convergência. Desse modo, foi definido um  $\Delta i_{m\acute{a}x}$  ao algoritmo como é mostrado na Figura 5.22.

**Tabela 5.6 – Parâmetros do sistema.**

Tensão nominal da rede e carga	$V_s = V_L = 127\text{ V}$
Tensão nominal do barramento CC	$V_{dc} = 460\text{ V}$
Frequência de chaveamento dos conversores	$f_{ch} = 20\text{ kHz}$
Frequência de amostragem do conversor A/D do DSC	$f_{ad} = 60\text{ kHz}$
Ganho PWM	$K_{PWM} = 0,002$
Indutor de acoplamento do conversor série	$L_{cs} = 3,5\text{ mH}$
Resistência do indutor de acoplamento do conversor série	$R_{cs} = 0,2\ \Omega$
Indutor de acoplamento do conversor paralelo	$L_{cp} = 1,75\text{ mH}$
Resistência do indutor de acoplamento do conversor paralelo	$R_{cp} = 0,2\ \Omega$
Capacitor de filtragem do conversor paralelo	$C_{cp} = 60\ \mu\text{F}$
Passo de incremento do algoritmo ACEO	$\Delta = 0,0002$
Variável de definição de intervalo de não atuação do ACEO	$\Delta i_{m\acute{a}x} = 0,8\text{ A}$
Frequência de amostragem do algoritmo ACEO	$F_{ACEO} = 5\text{ kHz}$
Quantidade equivalente de baterias conectadas no barramento CC	42

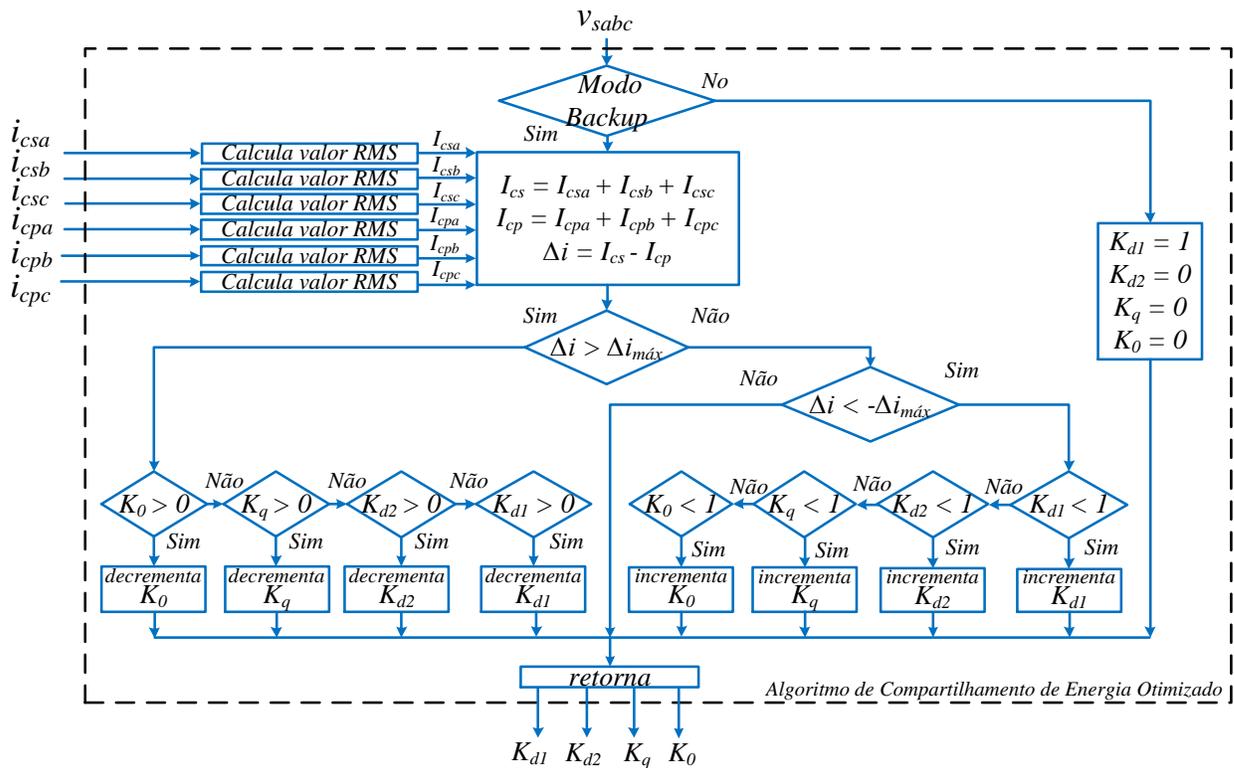
**Fonte: Autor.**

Tabela 5.7 – Cargas utilizadas.

Carga	Fase a	Fase b	Fase c
1	Carga resistiva (R = 30Ω)	Carga resistiva (R = 30Ω)	Carga resistiva (R = 30Ω)
2	Retificador trifásico de onda completa com carga R (R = 50Ω)		
3	Retificador monofásico de onda completa com carga RL (R = 12Ω e L = 22mH)	Retificador monofásico de onda completa com carga RL (R = 27Ω e L = 35mH)	Retificador monofásico de onda completa com carga RC (R = 100Ω e C = 940 μF)

Fonte: Autor.

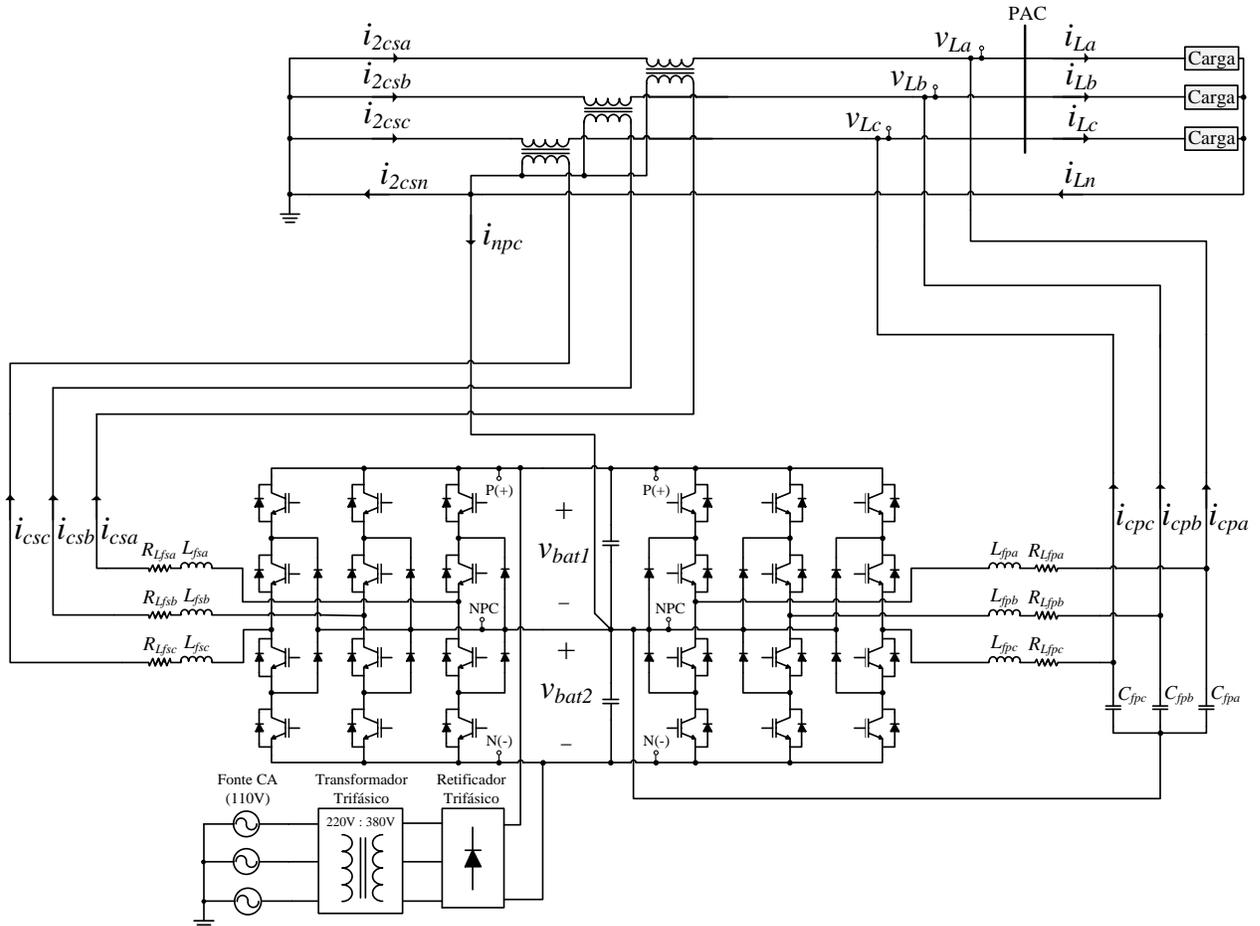
Figura 5.22 – Algoritmo ACEO com intervalo de não atuação em função de  $\Delta i_{m\acute{a}x}$ .



Fonte: Autor.

A Figura 5.23 apresenta o circuito de potência utilizado nos resultados experimentais. Nota-se que o banco de baterias é substituído por uma fonte trifásica CA, um transformador trifásico e um retificador trifásico, que são utilizados a fim de obter, experimentalmente, um circuito equivalente a Delta-UPS-ACEO no modo *backup*.

Figura 5.23 – Circuito equivalente de potência da Delta-UPS-ACEO no modo *backup*.

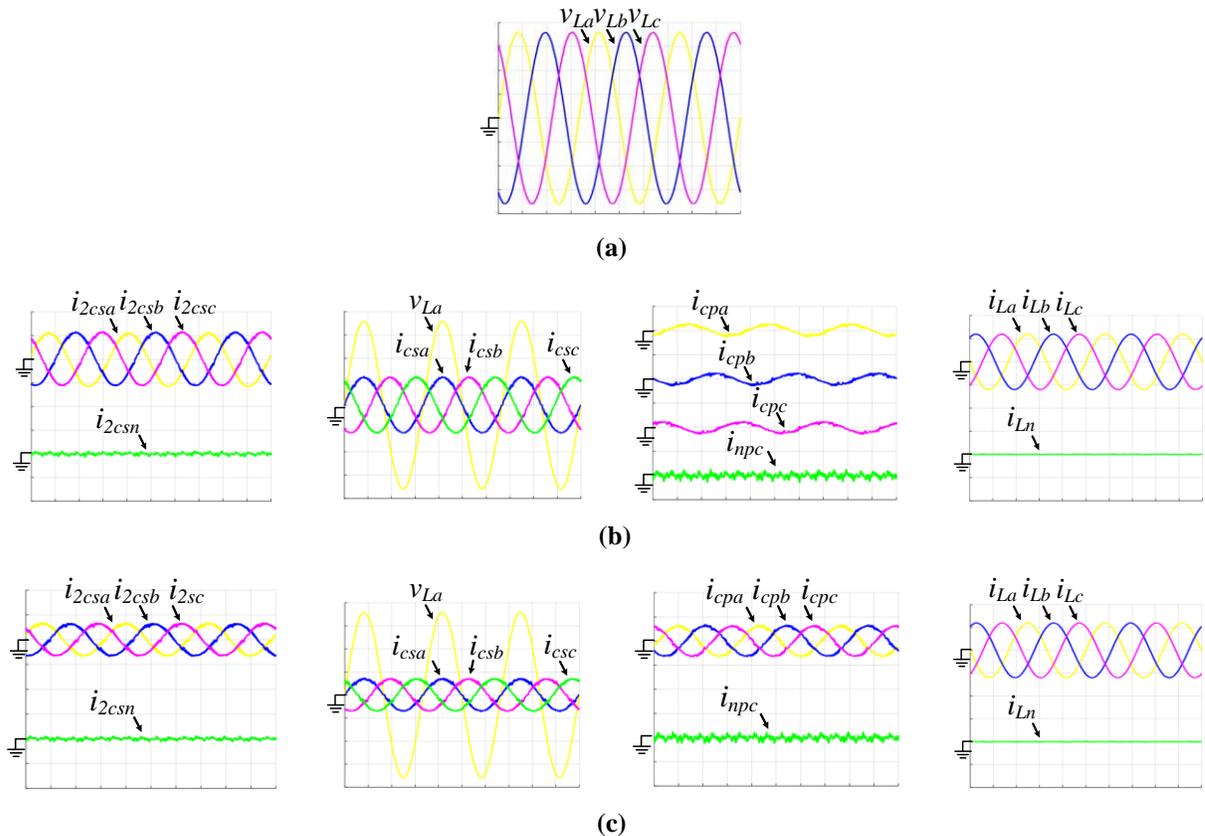


Fonte: Autor.

### 5.2.1 Resultados de Simulações Computacionais

As Figuras 5.24, 5.25 e 5.26 apresentam os resultados de simulação da Delta-UPS-ACEO no modo *backup* alimentando as Cargas 1, 2 e 3, respectivamente. Em tais figuras são apresentadas as seguintes variáveis: tensões da carga ( $v_{Labc}$ ); correntes do lado secundário do transformador ( $i_{2csabcn}$ ); correntes do conversor série ( $i_{scabc}$ ); correntes do conversor paralelo ( $i_{pcabc}$ ); correntes da carga ( $i_{Labcn}$ ); corrente que circula entre o ponto central do Barramento CC e a referência da Delta-UPS ( $i_{npc}$ ).

**5.24 - Delta-UPS-ACEO no modo *backup* alimentado a Carga 1 (Resultados de simulação - 50V/div, 5A/div e 5ms/div): (a) tensões e correntes da carga; (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.**



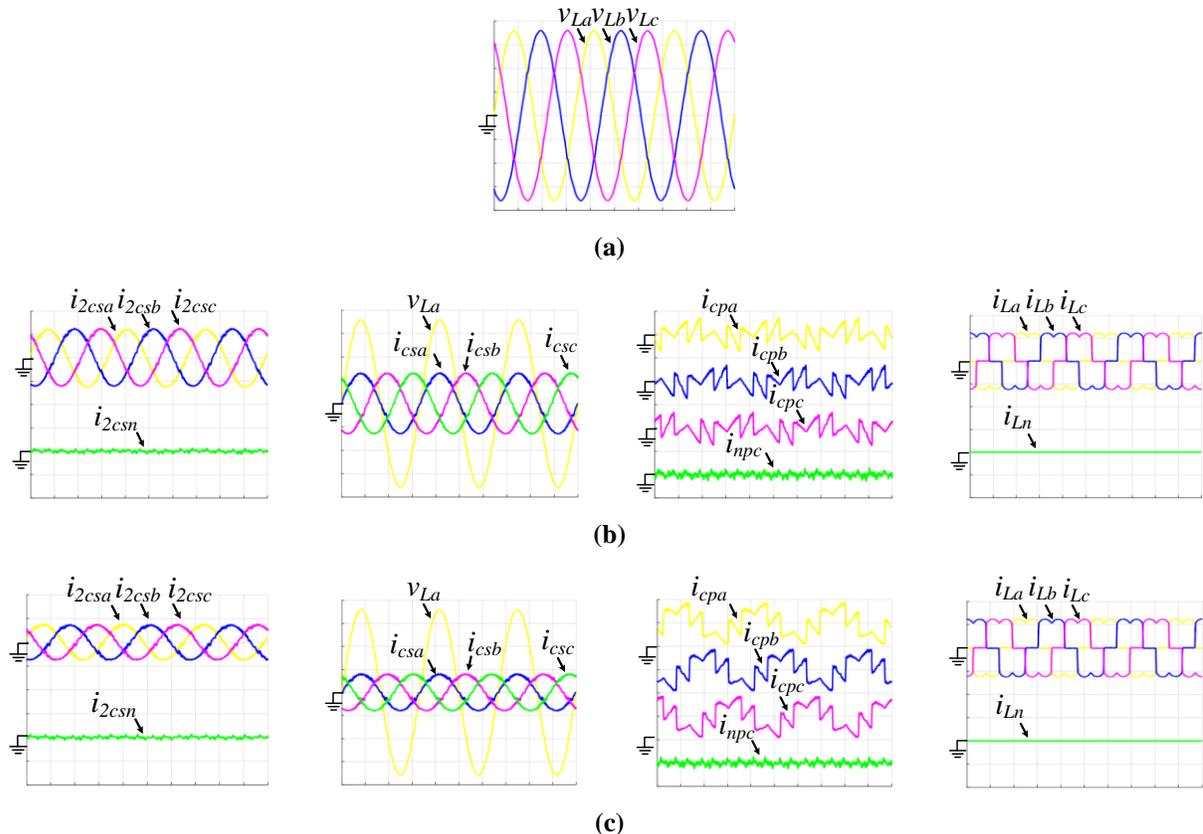
Fonte: Autor.

Comparando os pares de Figuras: 5.24(b) e 5.24(c), observa-se que houve variação na amplitude das correntes anteriormente ao acionamento do algoritmo e após a convergência do ACEO. Além disso, nota-se que após a convergência do algoritmo ACEO as correntes do secundário do transformador e do conversor série diminuíram de amplitude. Por outro lado, as correntes do conversor paralelo tiveram suas amplitudes aumentadas. Baseado nisso, percebe-se que houve um equilíbrio no processamento de energia dos conversores série e paralelo.

Nestes dois casos, comparando os pares de Figuras: 5.25(b) e 5.25(c); e 5.26(b) e 5.26(c), é possível notar que, com o acionamento do algoritmo ACEO, as correntes do secundário do transformador e do conversor série também diminuíram de amplitude. Além disso, o conversor paralelo passa a processar tanto potência não-ativa quanto potência ativa.

**5.25 - Delta-UPS no modo *backup* alimentado a Carga 2 (Resultados de simulação - 50V/div, 5A/div e 5ms/div):**

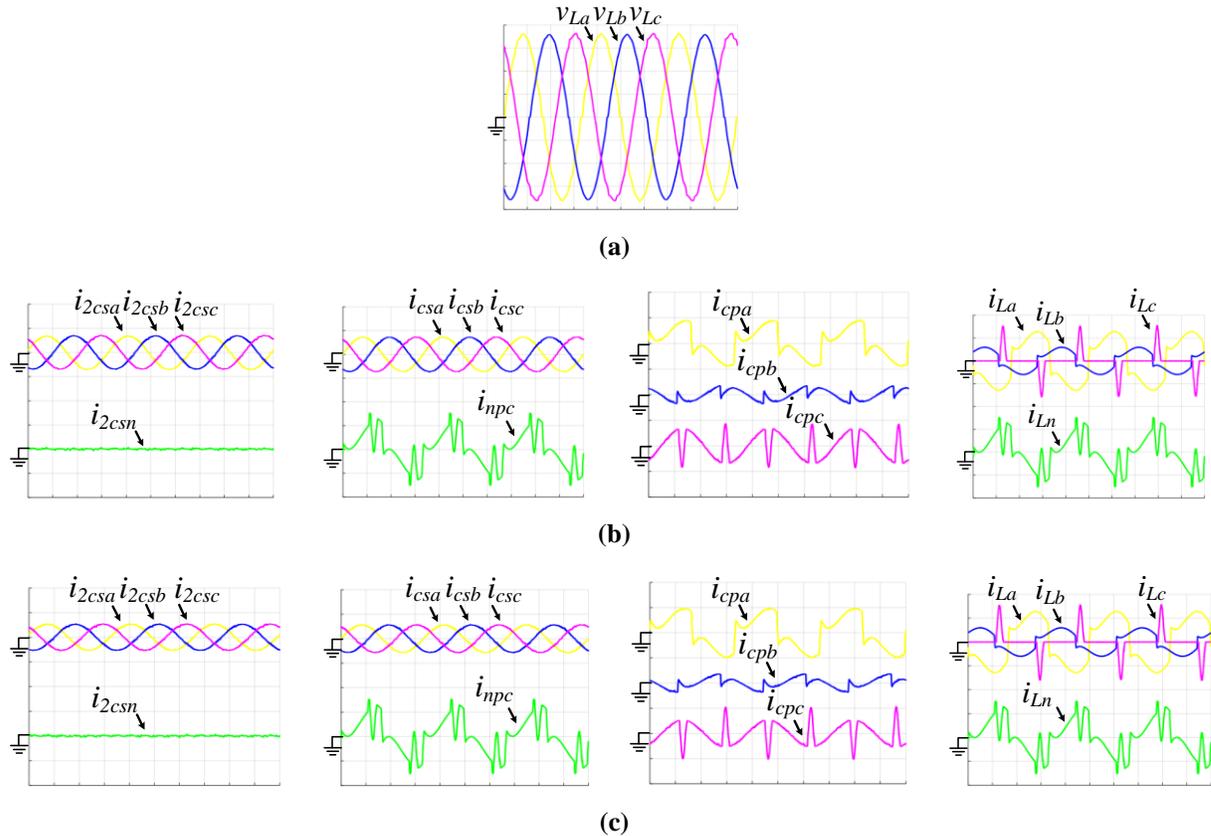
(a) tensões e correntes da carga; (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.



Fonte: Autor.

**5.26 - Delta-UPS no modo *backup* alimentado a Carga 3 (Resultados de simulação - 50V/div, 10A/div e 5ms/div):**

(a) tensões da carga; (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.



Fonte: Autor.

A Tabela 5.8 descreve os valores de potência aparente coletadas para cada tipo de carga. Foram medidas a potência aparente demandada pela carga, bem como as potências aparentes processadas pelos conversores série e paralelo. Para as cargas 1 e 2, a potência aparente trifásica aparente do conversor paralelo é 90VA maior do que a potência trifásica aparente do conversor série. Isto ocorre devido ao intervalo de potência adotado para que o algoritmo não perturbe o sistema após ter convergido. Tal intervalo foi definido em 100VA e é ajustado por meio da variável  $\Delta i_{m\acute{a}x}$ .

**Tabela 5.8 - Valores medidos de potência aparente para as Cargas 1, 2 e 3 (Resultados de simulação).**

		Potência Aparente (kVA)			
Carga		Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Trifásica
1	Conversor Série	0,31	0,31	0,31	0,93
	Conversor Paralelo	0,28	0,28	0,28	0,84
2	Conversor Série	0,35	0,35	0,35	1,05
	Conversor Paralelo	0,33	0,33	0,33	0,99
3	Conversor Série	0,51	0,51	0,51	1,53
	Conversor Paralelo	0,84	0,24	0,51	1,59

Fonte: Autor.

Por fim, a Tabela 5.9 apresenta o valor dos ganhos em que o algoritmo convergiu para os três tipos de carga adotados. De acordo com esta tabela, o ganho  $K_{d1}$  foi menor que 1 (um) em todos os casos avaliados. Assim, é possível concluir que o conversor série processou somente potência ativa. Por outro lado, o conversor paralelo processou potência ativa e não-ativa durante o modo *backup*.

**Tabela 5.9 - Ganhos em que o ACEO convergiu para as Cargas 1, 2 e 3 (Resultados de simulação).**

Carga	$K_{d1}$	$K_{d2}$	$K_q$	$K_0$
1	0,57	0	0	0
2	0,61	0	0	0
3	0,77	0	0	0

Fonte: Autor.

### 5.2.2 Resultados Experimentais

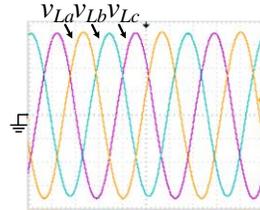
As Figuras 5.27, 5.28 e 5.29 apresentam os resultados experimentais considerando a UPS no modo *backup* alimentando as Cargas 1, 2 e 3, respectivamente. Em tais figuras são apresentadas as seguintes variáveis: tensões da carga ( $v_{Labc}$ ); correntes do lado secundário do transformador ( $i_{zcsabcn}$ ); correntes do conversor série ( $i_{csabc}$ ); correntes do conversor paralelo ( $i_{cpabc}$ ); correntes da carga ( $i_{Labcn}$ ); corrente que circula entre o ponto central do barramento CC e a referência da Delta-UPS ( $i_{npc}$ ).

Com base nas Figuras: 5.27(b) e 5.27(c), nota-se que houve variação na amplitude das correntes antes do acionamento do algoritmo e após a convergência do ACEO. Além disso, após a convergência do algoritmo ACEO, as correntes do secundário do transformador e do conversor série diminuíram de amplitude. Por outro lado, as correntes do conversor paralelo tiveram suas amplitudes aumentadas. Com base nisto, percebe-se que houve um equilíbrio no processamento de energia dos conversores série e paralelo.

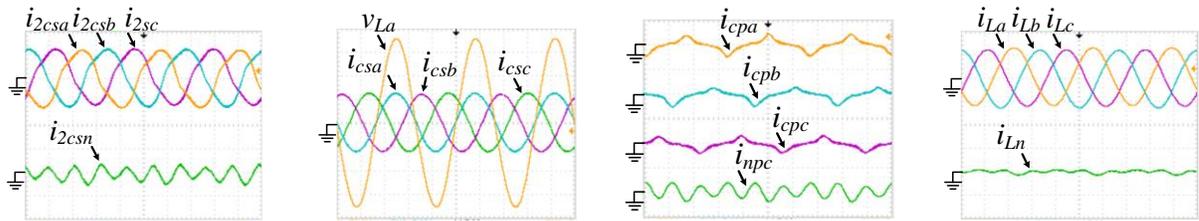
Os pares de Figuras: 5.28(b) e 5.28(c); e 5.29(b) e 5.29(c) evidenciam que ao acionar o algoritmo ACEO, as correntes do secundário do transformador e do conversor série também diminuíram de amplitude. Além disso, o conversor paralelo passa a processar tanto potência não-ativa quanto potência ativa.

5.27 - Delta-UPS no modo *backup* alimentado a Carga 1 (Resultados experimentais - 50V/div, 5A/div e 5ms/div):

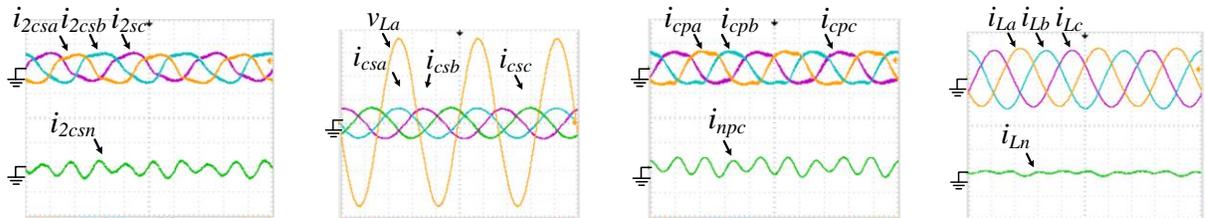
(a) tensões e correntes da carga; (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.



(a)



(b)

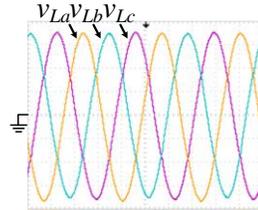


(c)

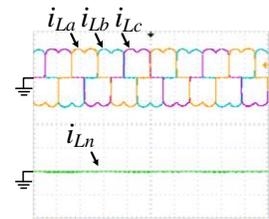
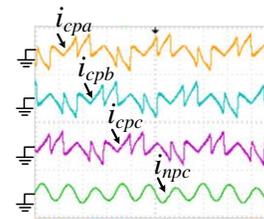
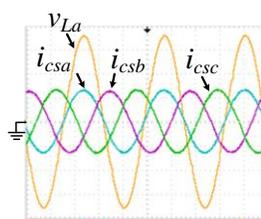
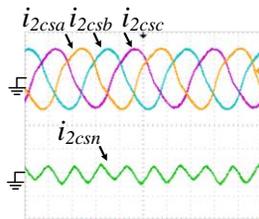
Fonte: Autor.

**5.28 - Delta-UPS no modo *backup* alimentado a Carga 2 (Resultados experimentais - 50V/div, 5A/div e 5ms/div):**

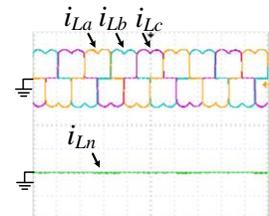
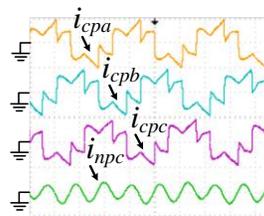
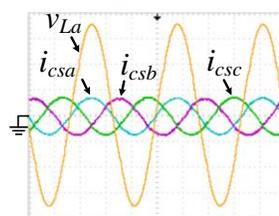
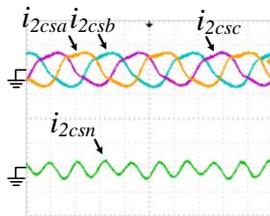
**(a) tensões e correntes da carga; (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.**



(a)



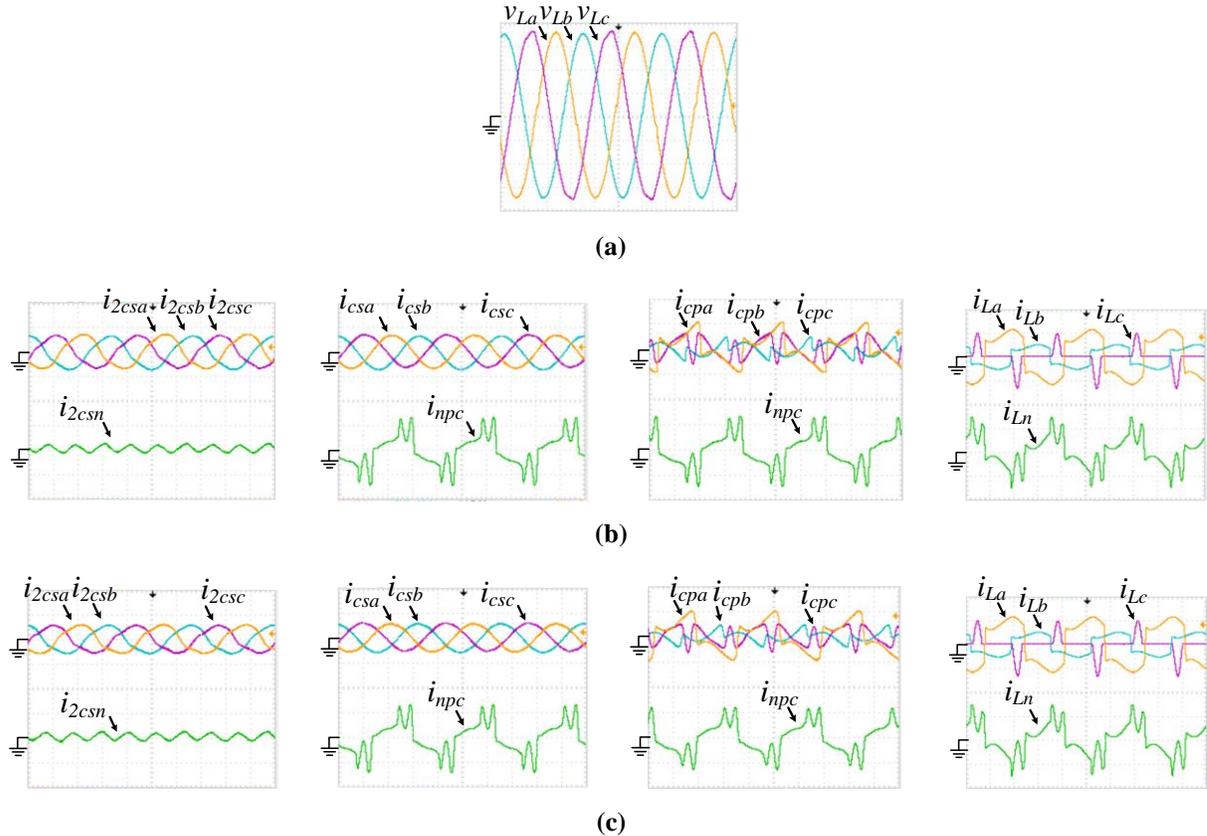
(b)



(c)

**Fonte: Autor.**

5.29 - Delta-UPS no modo *backup* alimentado a Carga 3 (Resultados experimentais - 50V/div, 10A/div e 5ms/div): (a) tensões da carga; (b) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série correntes do conversor paralelo e correntes da carga antes do acionamento do ACEO; e (c) correntes do secundário do transformador, correntes do conversor série, correntes do conversor paralelo e correntes da carga após a convergência do ACEO.



Fonte: Autor.

A Tabela 5.10 descreve os valores de potência aparente coletadas para cada tipo de carga. Foram medidas as potências aparentes processadas pelos conversores série e paralelo. Nota-se que, para as cargas 1 e 2, a potência aparente trifásica do conversor paralelo é 90VA maior do que a potência trifásica aparente do conversor série. Tal fato é garantido devido ao intervalo de potência adotado para que o algoritmo não perturbe o sistema após sua convergência, tal intervalo foi definido de 100VA e é ajustado por meio da variável  $\Delta i_{m\acute{a}x}$ .

**Tabela 5.10 - Valores medidos de potência aparente para as Cargas 1, 2 e 3 (Resultados experimentais).**

Carga		Potência Aparente (kVA)			
		Fase <i>a</i>	Fase <i>b</i>	Fase <i>c</i>	Trifásica
1	Conversor Série	0,23	0,24	0,24	0,71
	Conversor Paralelo	0,28	0,26	0,26	0,80
2	Conversor Série	0,26	0,27	0,26	0,79
	Conversor Paralelo	0,30	0,28	0,30	0,88
3	Conversor Série	0,50	0,50	0,49	1,49
	Conversor Paralelo	0,73	0,24	0,44	1,41

Fonte: Autor.

A Tabela 5.11 apresenta o valor dos ganhos para o qual o algoritmo convergiu para os três tipos de carga adotados. Segundo esta tabela, o ganho  $K_{d1}$  foi menor que 1 (um) em todos os casos avaliados. Assim, é possível concluir que o conversor série processou somente potência ativa. Por outro lado, o conversor paralelo processou potência ativa e não-ativa durante o modo *backup*.

**Tabela 5.11 - Ganhos em que o ACEO convergiu para as Cargas 1, 2 e 3 (Resultados experimentais).**

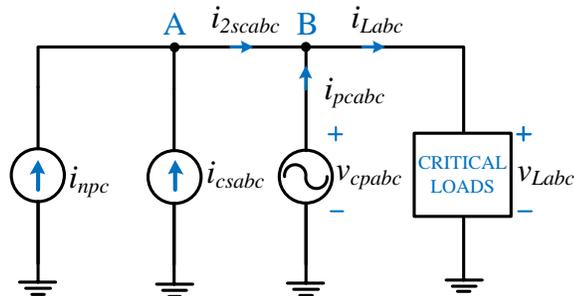
Carga	$K_{d1}$	$K_{d2}$	$K_q$	$K_0$
1	0,5151	0	0	0
2	0,5578	0	0	0
3	0,8444	0	0	0

Fonte: Autor.

Como o ganho  $K_{d1}$  foi menor que 1 (um) em todos os casos estudados, desconsiderando os distúrbios da malha de controle, seria possível dispensar os termos ressonantes do conversor série e o cálculo dos ganhos  $K_{d2}$ ,  $K_q$  e  $K_0$ . Tal alteração permitiria uma economia significativa em esforço computacional, além de um DSC com menor capacidade de processamento e, conseqüentemente, custo reduzido. De acordo com as Figuras 5.27(c), 5.28(c) e 5.29(c), as correntes do lado secundário do transformador de acoplamento do conversor série  $i_{2csabc}$  são não-senoidais. Tal fato pode ser justificado devido a conexão realizada no modo *backup* pelo conjunto de chaves estáticas  $B_{sw}$ , o qual liga o secundário do transformador ao terra do circuito, como mostrado na Figura 5.23. Assim, o circuito da Delta-UPS passa a ser equivalente ao circuito apresentado na Figura 5.30. O barramento CC da Delta-UPS utilizado é dividido, portanto qualquer oscilação ou desbalanço das tensões  $v_{bat1}$  e  $v_{bat2}$  resulta em  $i_{npc}$  não nula. A fim de que, a

somatória das correntes do nó “A” do circuito equivalente apresentado na Figura 5.30 seja igual a zero,  $i_{2csabc} = i_{csabc} + i_{npc}$ . Além disso, deduz-se que no nó “B” a parcela  $i_{npc}$  contida em  $i_{2csabc}$  circulará pelo conversor paralelo, enquanto a parcela restante de  $i_{2csabc}$ , que é igual a  $i_{csabc}$ , será assumida pela carga.

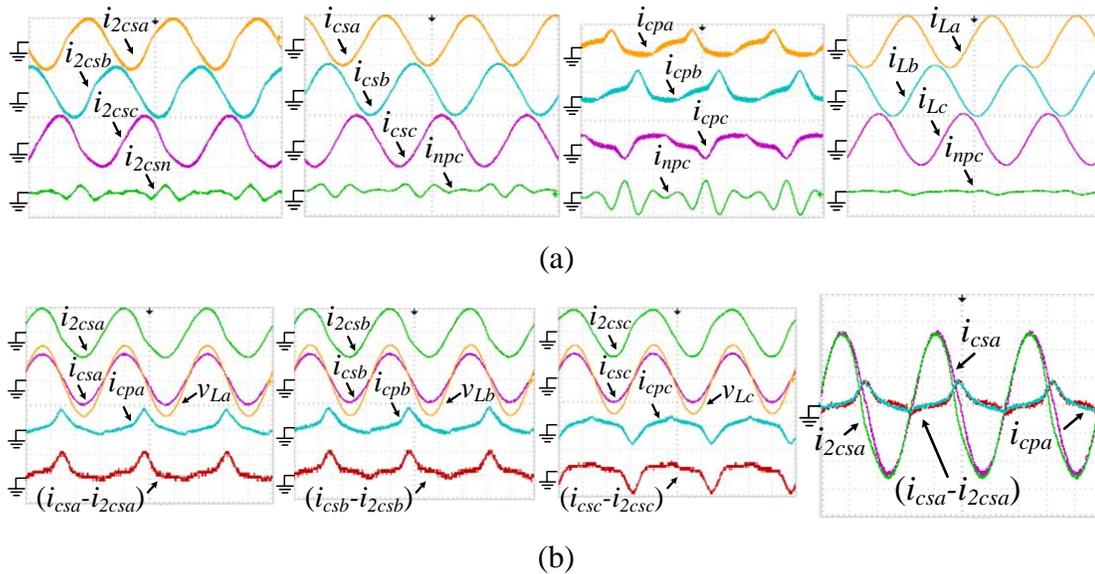
**Figura 5.30 - Circuito equivalente da Delta-UPS no modo *backup*.**



**Fonte: Autor.**

A Figura 5.31 descreve testes realizados, confirmando que, de fato a corrente  $i_{npc}$  circula pelo secundário do transformador e pelo conversor paralelo. O cenário testado inclui as tensões de saída da Delta-UPS com valor eficaz de 100V, as quais alimentam a Carga 1. A Figura 5.31(a) apresenta as correntes do secundário do transformador ( $i_{2csabc}$ ), conversor série ( $i_{csabc}$ ), conversor paralelo ( $i_{cpabc}$ ) e carga ( $i_{Labc}$ ). Ao comparar os picos das correntes do conversor paralelo ( $i_{cpabc}$ ) com os picos da corrente  $i_{npc}$ , nota-se que a somatória das correntes “abc” do conversor paralelo é equivalente a corrente  $i_{npc}$ . Além disso, com base na Figura 5.31(b), tem-se que  $(i_{csabc} - i_{2csabc}) = i_{cpabc}$ .

**Figura 5.31 – Testes experimentais para confirmação da circulação da corrente  $i_{npc}$  no lado secundário do transformador e conversor paralelo (5ms/div): formas de onda de (a) correntes do secundário do transformador ( $i_{2csabcn}$  - 5A/div), conversor série ( $i_{csabc}$  - 5A/div), conversor paralelo ( $i_{cpabc}$  - 2A/div) e carga ( $i_{Labcn}$  - 5A/div); e (b) correntes do secundário do transformador ( $i_{2csabc}$ )(5A/div), conversor série ( $i_{csabc}$ )(5A/div), conversor paralelo ( $i_{cpabc}$  - 2A/div), tensão da carga ( $v_{Labc}$  - 100/div) e subtração das correntes do conversor série pelas correntes do secundário do transformador ( $(i_{csabc} - i_{2csabc})$  - 2A/div).**



**Fonte: Autor.**

As Tabelas 5.12 e 5.13 apresentam o percentual de potência aparente aritmética processada por cada conversor em relação a carga nos ensaios de simulação e experimentais, respectivamente. É possível notar que a potência aparente trifásica processada por cada conversor, série e paralelo, corresponde a aproximadamente 50% da potência aparente da carga em todos os casos avaliados.

Por outro lado, observa-se que, ao considerar a Carga 3, as potências aparentes monofásicas processadas pelos conversores série e paralelo não são compartilhadas na mesma proporção, isto ocorre devido ao algoritmo avaliar a potência aparente trifásica processada pelo conversor. Porém, o algoritmo poderia ser adaptado para dividir a potência aparente de cada fase dos conversores em 50% da potência aparente das respectivas fases da carga, no entanto, seria necessário adaptar o algoritmo de geração de referências a um sistema monofásico, a fim de calcular as referências de cada fase dos conversores de maneira desacoplada.

**Tabela 5.12 – Percentual de potência aparente da carga processada pelos conversores (Resultados de simulação).**

		<b>Razão entre Potência Aparente dos Conversores e carga (%)</b>			
<b>Carga</b>		<i>Fase a</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase c</i>	Trifásica
<b>1</b>	Conversor Série	53	53	53	53
	Conversor Paralelo	47	47	47	47
<b>2</b>	Conversor Série	51	51	51	51
	Conversor Paralelo	49	49	49	49
<b>3</b>	Conversor Série	38	68	50	49
	Conversor Paralelo	62	32	50	51

**Fonte: Autor.**

**Tabela 5.13 – Percentual de potência aparente da carga processada pelos conversores (Resultados experimentais).**

		<b>Razão entre Potência Aparente dos Conversores e carga (%)</b>			
<b>Carga</b>		<i>Fase a</i>	<i>Fase b</i>	<i>Fase c</i>	Trifásica
<b>1</b>	Conversor Série	45	48	48	47
	Conversor Paralelo	55	52	52	53
<b>2</b>	Conversor Série	46	49	46	47
	Conversor Paralelo	54	51	54	53
<b>3</b>	Conversor Série	41	68	53	51
	Conversor Paralelo	49	32	47	49

**Fonte: Autor.**

## 6. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

Este capítulo apresenta as conclusões deste trabalho, bem como trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos com base neste estudo. Ainda, são descritos os trabalhos realizados durante seu desenvolvimento.

### 6.1 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou o estudo e implementação de estratégias de compartilhamento de energia otimizado entre os conversores de potência aplicáveis a Delta-UPS durante o modo de operação *backup*. Tais estratégias incluem a adição de um conjunto de chaves estáticas e um algoritmo que opera em conjunto ao algoritmo para geração das referências de compensação. A utilização do algoritmo desenvolvido neste trabalho garantiu o compartilhamento de energia otimizado entre os conversores de potência durante o modo *backup*.

O circuito equivalente da Delta-UPS proposta neste trabalho foi implementado experimentalmente por meio de dois inversores NPC trifásicos à quatro fios conectados ao mesmo barramento de tensão CC. Para testar o algoritmo proposto no modo *backup* e com o intuito de emular a operação de um banco de baterias composto por 42 baterias estacionárias, foi conectado ao barramento CC um retificador trifásico alimentado por uma fonte CA de 110 V eficaz.. Além disso, foram realizadas as conexões equivalentes aos estados de operação dos dois conjuntos de chaves estáticas no modo *backup*, sendo que um conjunto tem como função desacoplar o sistema da rede, enquanto o outro realiza a conexão do conversor série.

As estratégias propostas foram avaliadas por meio de simulações computacionais e resultados experimentais. Com base nos resultados obtidos, conclui-se que as modificações propostas ao sistema Delta-UPS convencional se apresentaram eficazes e viáveis, uma vez que proporcionam uma redução de até 50% do dimensionamento do conversor paralelo. Tal redução implica na diminuição dos custos para a implementação do sistema, além de melhoria no desempenho, visto que o sistema passa a não operar subutilizado.

## 6.2 PROPOSTAS DE CONTINUIDADE

As propostas de continuidade deste trabalho são descritas abaixo:

- Implementar experimentalmente o sistema Delta-UPS-ACEO operando nos modos *standby* e *backup* considerando a implementação das chaves estáticas;
- Avaliar o desempenho e redução de esforço computacional do sistema Delta-UPS proposto neste trabalho com o algoritmo de compartilhamento alterando somente o ganho  $K_{d1}$  e sem a utilização dos controladores multi-ressonantes na estratégia de controle do conversor série;
- Utilizar o algoritmo ACEO em conjunto com um algoritmo SRF monofásico em cada fase da Delta-UPS, a fim de realizar o compartilhamento ótimo de potência em cada fase dos conversores;
- Empregar o sistema Delta-UPS com compartilhamento de energia otimizado em microrredes CA.

### 6.3 TRABALHOS DESENVOLVIDOS AO LONGO DESTA PESQUISA

Durante o desenvolvimento deste trabalho foram publicados os seguintes trabalhos em congressos e periódico:

- DA SILVA, S. A. O.; CAMPANHOL, LEONARDO B.G.; DE SOUZA, V. **Dynamic Performance Evaluation of a Dual UPQC Operating under Power Quality Disturbances**. In: International Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, 2018, Nuremberg-Alemanha. PCIM Europe 2018, 2018. p. 1846-1853.
- DE SOUZA, V.; DA SILVA, S. A. O.; CAMPANHOL, L. B. G. **A Line-Interactive UPS System Operating with Optimized Power Processing in Backup Mode**. In: 2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'19 ECCE Europe). IEEE, 2019.
- BACON, V. D.; DA SILVA, S. A. O.; DE SOUZA, V.; CAMPANHOL, L. B. G. **Impact of the Phase-Angle Detection Inaccuracies on the Performance of a Three-Phase Grid-Tied System**. In: 21st European Conference on Power Electronics and Applications, 2019, Gênova. EPE'19 ECCE Europe, 2019. p. 1-8.
- DA SILVA, S. A. O.; CAMPANHOL, L. B. G.; PELZ, G. M. ; DE SOUZA, V. **Comparative Performance Analysis Involving a Three-Phase UPQC Operating with Conventional and Dual/Inverted Power-Line Conditioning Strategies**. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2020, Vol. 45, No. 11, p. 1-14, early access.

## REFERÊNCIAS

ABUSARA, M. A.; SHARKH, S. M. Control of line interactive UPS systems in a Microgrid. **2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**. IEEE, 2011. p. 1433-1440, 2011.

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional-PRODIST/Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica - Rev. 7. 2016.

APC – American Power Conversion Corporate and APC Europe / Silicon Power Electronics A/S. White Paper: The Ideal Green UPS. 2011. Disponível em: <<http://www.nationwidepower.com/wp-content/uploads/2011/09/SilconWhitePaper.pdf>> Acesso em: 19/06/2020.

AREDES, M.; HEUMANN, K.; WATANABE, Edson H. An universal active power line conditioner. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 13, n. 2, p. 545-551, 1998.

BACON, V. D.; DA SILVA, S. A. O.; CAMPANHOL, L. B. G. Single-phase frequency detector algorithm applied to grid-connected power conditioning systems. **2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE)**. IEEE, p. 1-10, 2013.

BACON, Vinícius Dario et al. Stability analysis and performance evaluation of a single-phase phase-locked loop algorithm using a non-autonomous adaptive filter. **IET Power Electronics**, v. 7, n. 8, p. 2081-2092, 2014.

BACON, V. D.; DA SILVA, S. A. O. Performance improvement of a three-phase phase-locked-loop algorithm under utility voltage disturbances using non-autonomous adaptive filters. **IET Power Electronics**, v. 8, n. 11, p. 2237-2250, 2015.

BACON, V. D.; DA SILVA, S. A. O. Selective harmonic currents suppressing applied to a three-phase shunt active power filter based on adaptive filters. In: **2015 IEEE 13th Brazilian Power**

**Electronics Conference and 1st Southern Power Electronics Conference (COBEP/SPEC).** IEEE. p. 1-6, 2015.

BRIZ, F. et al. Dynamic behavior of current controllers for selective harmonic compensation in three-phase active power filters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 3, p. 1411-1420, 2013.

CAMPANHOL, L. B. G. et al. Single-stage three-phase grid-tied PV system with universal filtering capability applied to DG systems and AC microgrids. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 12, p. 9131-9142, 2017.

DA SILVA, S. A. O. et al. A three-phase line-interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities. **Transactions Industry Applications**, v. 38 n. 6, p. 1581-1590, 2002.

DA SILVA, S. A. O. et al. PLL structures for utility connected systems under distorted utility conditions. In: **IECON 2006-32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics**. IEEE, 2006. p. 2636-2641.

DA SILVA, S. A. O.; NOVOCHADLO, R.; MODESTO, R. A. Single-phase PLL structure using modified pq theory for utility connected systems. In: **2008 IEEE Power Electronics Specialists Conference**. IEEE, 2008. p. 4706-4711.

DA SILVA, S. A. O.; BACON, V. D. A three-phase adaptive phase-locked loop scheme for utility grid-connected systems. In: **2015 17th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'15 ECCE-Europe)**. IEEE, 2015. p. 1-10.

DA SILVA, S. A. O.; CAMPANHOL, L. B. G.; DE SOUZA, V. Dynamic Performance Evaluation of a dual UPQC Operating Under Power Quality Disturbances. In: **PCIM Europe 2018: International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management**. VDE. p. 1-8, 2018.

DA SILVA, S. A. O.; CAMPANHOL, L. B. G.; PELZ, G. M. ; DE SOUZA, V. Comparative Performance Analysis Involving a Three-Phase UPQC Operating with Conventional and Dual/Inverted Power-Line Conditioning Strategies. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2020.

FUJITA, H.; AKAGI, H. The unified power quality conditioner: the integration of series-and shunt-active filters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 13, n. 2, p. 315-322, 1998.

GUERRERO, J. M.; DE VICUNA, L. G.; UCEDA, J. Uninterruptible power supply systems provide protection. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 1, n. 1, p. 28-38, 2007.

HE, J. et al. Active harmonic filtering using current-controlled, grid-connected DG units with closed-loop power control. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 29, n. 2, p. 642-653, 2013.

IEEE. Recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications, IEEE Std 446-1995, p.1-320, 1996.

IEEE. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions. IEEE Std1459-2000, p. 1-50, 2000.

KAURA, V.; BLASKO, V. Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions. **IEEE Transactions on Industry applications**, v. 33, n. 1, p. 58-63, 1997.

KESLER, M.; OZDEMIR, E. Synchronous-reference-frame-based control method for UPQC under unbalanced and distorted load conditions. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 58, n. 9, p. 3967-3975, 2010.

KHADKIKAR, V. Enhancing electric power quality using UPQC: A comprehensive overview. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 5, p. 2284-2297, 2011.

KHADKIKAR, V; CHANDRA, A. UPQC-S: A novel concept of simultaneous voltage sag/swell and load reactive power compensations utilizing series inverter of UPQC. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 9, p. 2414-2425, 2011.

NIELSEN, J. G. et al. Control and testing of a dynamic voltage restorer (DVR) at medium voltage level. **IEEE Transactions on power electronics**, v. 19, n. 3, p. 806-813, 2004.

MODESTO, R. A.; DA SILVA, S. A. O.; JÚNIOR, A. A. O. Power quality improvement using a dual unified power quality conditioner/uninterruptible power supply in three-phase four-wire systems. **IET Power Electronics**, v. 8, n. 9, p. 1595-1605, 2015.

MODESTO, R. A. et al. A versatile unified power quality conditioner applied to three-phase four-wire distribution systems using a dual control strategy. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 31, n. 8, p. 5503-5514, 2015.

OGATA, Katsuhiko et al. **Discrete-time control systems**. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1995.

PELZ, G. M.; DA SILVA, S. A. O.; SAMPAIO, L. P. Comparative analysis involving PI and state-feedback multi-resonant controllers applied to the grid voltage disturbances rejection of a unified power quality conditioner. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 115, p. 105481, 2017.

PELZ, G. M. **Sistema De Geração Distribuída Fotovoltaico Integrado a um Condicionador de Qualidade de Energia Unificado Monofásico-Trifásico Aplicado à Áreas Rurais ou Remotas**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2018.

RATHMANN, S. e WARNER, H. A. **New generation ups technology, the delta conversion principle**. IAS '96. Conference Record of the 1996 IEEE Industry Applications Conference Thirty-First IAS Annual Meeting, p. 2389-2395, 1996.

RIBEIRO, R. L. A.; DE AZEVEDO, C.C.; DE SOUSA, R. M. A robust adaptive control strategy of active power filters for power-factor correction, harmonic compensation, and balancing of nonlinear loads. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 27, n. 2, p. 718-730, 2011.

RIBEIRO, L. A. S. et al. Full Discrete Modeling, Controller Design, and Sensitivity Analysis for High-Performance Grid-Forming Converters in Islanded Microgrids. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 54, n. 6, p. 6267-6278, 2018.

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

## APÊNDICE A – SISTEMA PLL TRIFÁSICO AF-PSD-3pPLL

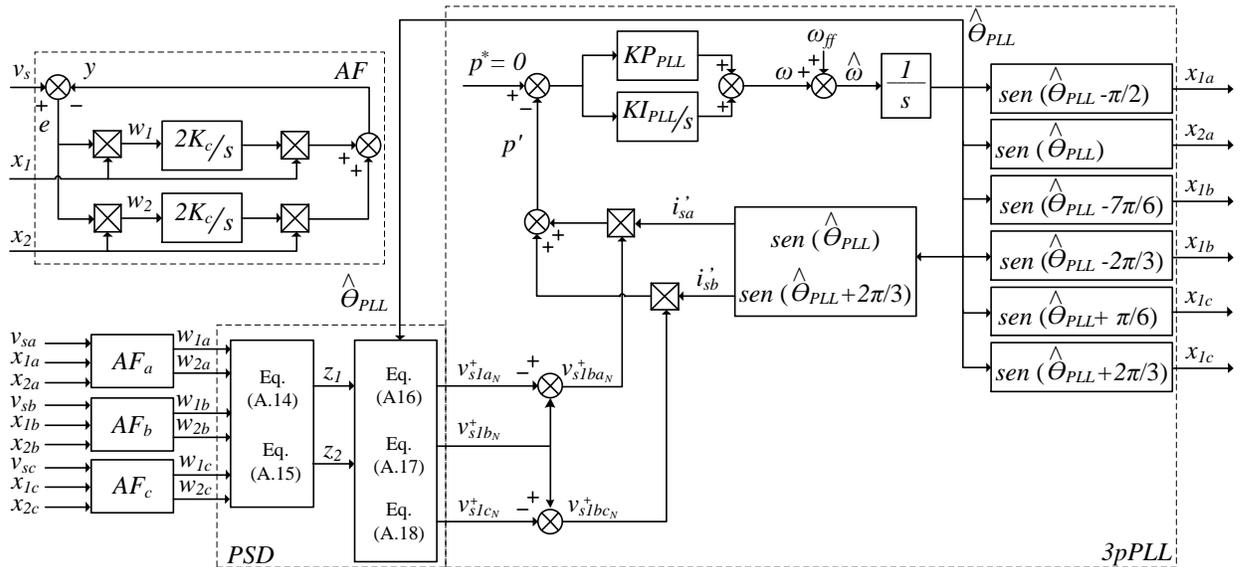
Ao considerar-se uma rede elétrica, informações como ângulo de fase e frequência das tensões são necessárias em determinadas aplicações de conversores estáticos de potência, por exemplo, o sincronismo entre os conversores e a rede. Estes dados são obtidos por meio de um sistema PLL (*Phase-Locked Loop*) (SANTOS FILHO et al., 2008; DA SILVA et al.; BACON et al., 2014; DA SILVA et al., 2006; KAURA e BLASKO, 1997; DA SILVA e BACON, 2015).

Em situações nas quais as tensões da rede elétrica apresentam distúrbios, o desempenho do PLL pode ser prejudicado, dessa forma, é necessário garantir que os sistemas PLL sejam capazes de fornecer as informações da componente fundamental de tensão da rede elétrica com confiabilidade, independentemente da situação das tensões da rede elétrica.

O sistema PLL adotado neste trabalho (AF-PSD-3pPLL) (BACON e DA SILVA, 2015), opera interligado com filtros adaptativos (AF – *Adaptive Filter*) e um detector de sequência positiva (PSD – *Positive Sequence Detector*). Deste modo, tal topologia apresenta alta imunidade à harmônicos de tensão, bem como para desequilíbrios de tensão. Ainda, este sistema PLL é baseado na teoria da potência ativa convencional (3pPLL).

A Figura A.1 apresenta o diagrama em blocos do sistema AF-PSD-3pPLL. Este algoritmo opera com o intuito de zerar a componente CC da potência ativa instantânea fictícia ( $\bar{p}'$ ). Deste modo,  $\bar{p}'$  ser igual a zero garante que a saída do PLL está atracada com a componente fundamental de sequência positiva da rede. Logo, para que  $\bar{p}'$  siga a referência de controle ( $p^*$ ), a dinâmica do PLL deverá ajustar a saída do controlador PI na frequência angular de referência  $\hat{\omega} = 2\pi f_s$ , onde  $f_s$  é a frequência nominal da rede elétrica. A integração de  $\hat{\omega}$ , a qual deverá ser igual à frequência angular da rede ( $\omega$ ), resulta no ângulo de fase  $\hat{\theta}_{pll}$ . Assim, as correntes  $i'_{sa}$  e  $i'_{sc}$  podem ser obtidas em função de  $\hat{\theta}_{pll}$  e para que  $\bar{p}'$  seja anulada  $v_{s1baN}^+$  e  $v_{s1bcN}^+$  precisam ortogonais, respectivamente, a  $i'_{sa}$  e  $i'_{sc}$ .

Figura A.1 – Diagrama em blocos do Sistema AF-PSD-3pPLL.



Fonte: Autor.

De acordo com a Figura A.1, as tensões da rede elétrica ( $v_{sabc}$ ) são as entradas do filtro adaptativo (AF). Deste modo, é possível obter as componentes fundamentais das tensões da rede elétrica por:

$$v_{s1a} = w_{1a} \operatorname{sen}\left(\hat{\theta}_{pll} - \frac{\pi}{2}\right) - w_{2a} \operatorname{sen}(\hat{\theta}_{pll}) \quad (\text{A.1})$$

$$v_{s1b} = w_{1b} \operatorname{sen}\left(\hat{\theta}_{pll} - \frac{7\pi}{6}\right) - w_{2b} \operatorname{sen}\left(\hat{\theta}_{pll} - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{A.2})$$

$$v_{s1c} = w_{1c} \operatorname{sen}\left(\hat{\theta}_{pll} + \frac{\pi}{6}\right) - w_{2c} \operatorname{sen}\left(\hat{\theta}_{pll} + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{A.3})$$

As Equações (A.1), (A.2) e (A.3) podem reescritas, respectivamente, por:

$$v_{s1a} = V_{pa} (\operatorname{sen}(\theta) \cos(\varphi) + \cos(\theta) \operatorname{sen}(\varphi)) \quad (\text{A.4})$$

$$v_{s1b} = V_{pb} (\operatorname{sen}(\theta - 2\pi/3) \cos(\varphi) + \cos(\theta - 2\pi/3) \operatorname{sen}(\varphi)) \quad (\text{A.5})$$

$$v_{s1c} = V_{pc} (\text{sen}(\theta + 2\pi/3) \cos(\varphi) + \cos(\theta + 2\pi/3) \text{sen}(\varphi)) \quad (\text{A.6})$$

onde,  $\theta$  é o ângulo de fase da rede;  $\varphi$  é a diferença entre o ângulo de fase estimado da rede ( $\hat{\theta}_{pll}$ ) e o ângulo de fase do sinal de saída do AF ( $\theta_y$ ), ou seja,  $\varphi = \hat{\theta}_{pll} - \theta_y$ ;  $V_{pabc}$  são as amplitudes das tensões fundamentais  $v_{s1abc}$ . Deste modo, é possível obter os pesos  $w_{1abc}$  e  $w_{2abc}$  dos filtros adaptativos (AF) por meio de:

$$w_{1abc} = V_{pabc} \cos(\varphi) = V_{pabc} \cos(\hat{\theta} - \theta_y) \quad (\text{A.7})$$

$$w_{2abc} = V_{pabc} \text{sen}(\varphi) = V_{pabc} \text{sen}(\hat{\theta} - \theta_y) \quad (\text{A.8})$$

No instante em que o PLL atraca com a rede elétrica significa que  $\theta_y = \hat{\theta}_{pll} = \theta$ . Portanto, em regime estacionário tem-se que  $w_{1abc} = V_{pabc}$  e  $w_{2abc} = 0$ .

Em seguida obtêm-se as componentes fundamentais de sequência positiva ( $v_{s1abc}^+$ ) das tensões da rede elétrica por meio do PSD, baseado no Teorema de Fortescue. Deste modo, as componentes de sequência positiva ( $v_{s1}^+$ ), negativa ( $v_{s1}^-$ ) e zero ( $v_{s1}^0$ ) podem ser representadas por:

$$\begin{bmatrix} v_{s1}^0 \\ v_{s1}^+ \\ v_{s1}^- \end{bmatrix} = \left(\frac{1}{3}\right) \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{s1a} \\ v_{s1b} \\ v_{s1c} \end{bmatrix} \quad (\text{A.9})$$

$$\text{sendo } a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120}$$

Substituindo (A.1), (A.2) e (A.3) em (A.9) e realizando as multiplicações, é possível obter  $v_{s1}^+$  em função de  $w_{1abc}$ ,  $w_{2abc}$  e  $\hat{\theta}_{pll}$ .

$$v_{s1}^+ = \left(\frac{w_{1a} + w_{1b} + w_{1c}}{3}\right) \text{sen}\left(\hat{\theta}_{pll} - \frac{\pi}{2}\right) - \left(\frac{w_{2a} + w_{2b} + w_{2c}}{3}\right) \text{sen}(\hat{\theta}_{pll}) \quad (\text{A.10})$$

A partir da Equação (A.10), em regime estacionário e considerando  $\hat{\theta}_{pll} = \theta_y$ , obtém-se a amplitude média ( $A$ ) dos sinais de entrada por meio de:

$$A = \sqrt{z_1^2 + z_2^2} \cong z_1 \quad (\text{A.11})$$

onde:

$$z_1 = \left( \frac{w_{1a} + w_{1b} + w_{1c}}{3} \right) \quad (\text{A.12})$$

$$z_2 = \left( \frac{w_{2a} + w_{2b} + w_{2c}}{3} \right) \quad (\text{A.13})$$

Dividindo as componentes de sequência positiva  $v_{s1abc}^+$  pela amplitude média dos sinais de entrada ( $A$ ) é possível obter as tensões de entrada do sistema PLL normalizadas  $v_{s1abcN}^+$ , como mostram as Equações (A.14), (A.15) e (A.16).

$$v_{s1aN}^+ = \frac{v_{s1a}^+}{A} = \frac{[z_1 \text{sen}(\hat{\theta}_{pll} - \frac{\pi}{2}) - z_2 \text{sen}(\hat{\theta}_{pll})]}{A} \quad (\text{A.14})$$

$$v_{s1bN}^+ = \frac{v_{s1b}^+}{A} = \frac{[z_1 \text{sen}(\hat{\theta}_{pll} - \frac{7\pi}{6}) - z_2 \text{sen}(\hat{\theta}_{pll} - \frac{2\pi}{3})]}{A} \quad (\text{A.15})$$

$$v_{s1cN}^+ = \frac{v_{s1c}^+}{A} = \frac{[z_1 \text{sen}(\hat{\theta}_{pll} + \frac{\pi}{6}) - z_2 \text{sen}(\hat{\theta}_{pll} + \frac{2\pi}{3})]}{A} \quad (\text{A.16})$$

Em seguida, a potência ativa instantânea fictícia é calculada por:

$$p' = (v_{s1aN}^+ - v_{s1bN}^+)i'_{sa} + (v_{s1cN}^+ - v_{s1bN}^+)i'_{sc} = \bar{p}' + \tilde{p}' \quad (\text{A.17})$$

Assim, assumindo que  $\hat{\theta}_{pll}$  é aproximadamente igual a  $\theta$  tem-se que  $\bar{p}'$  é igual a zero.

## APÊNDICE B – POTÊNCIAS APARENTES TRIFÁSICAS

As potências trifásicas aritmética ( $S_A$ ) e vetorial ( $S_V$ ) podem ser calculadas, respectivamente, por meio das seguintes equações, (IEEE, 2000):

$$S_A = S_a + S_b + S_c \quad (\text{A.18})$$

$$S_V = \sqrt{P^2 + Q^2 + H^2} \quad (\text{A.19})$$

sendo:

$$S_a = \sqrt{P_a^2 + Q_a^2 + H_a^2} = V_{arms} I_{arms} \quad (\text{A.20})$$

$$S_b = \sqrt{P_b^2 + Q_b^2 + H_b^2} = V_{brms} I_{brms} \quad (\text{A.21})$$

$$S_c = \sqrt{P_c^2 + Q_c^2 + H_c^2} = V_{crms} I_{crms} \quad (\text{A.22})$$

$$P = P_a + P_b + P_c \quad (\text{A.23})$$

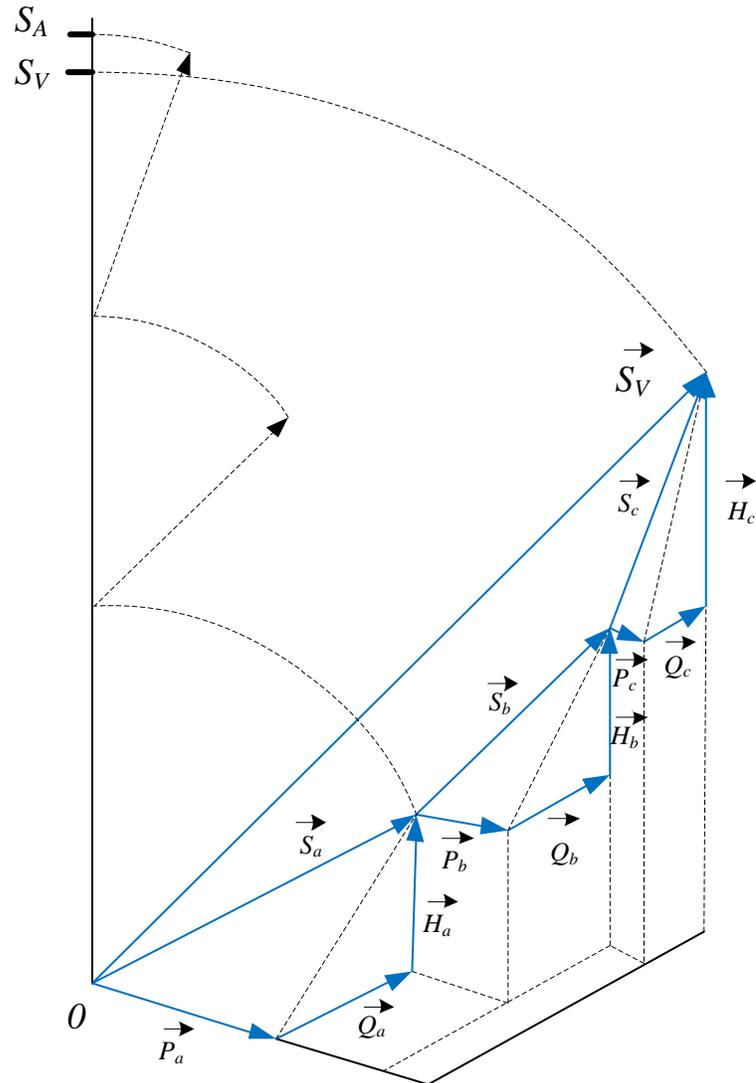
$$Q = Q_a + Q_b + Q_c \quad (\text{A.24})$$

$$H = H_a + H_b + H_c \quad (\text{A.25})$$

onde,  $S_{abc}$  é o módulo da potência aparente aritmética para cada fase do sistema elétrico;  $P_{abc}$  é a potência ativa para cada fase do sistema elétrico;  $Q_{abc}$  é a potência reativa para cada fase do sistema elétrico;  $H_{abc}$  é a potência harmônica para cada fase do sistema elétrico;  $V_{abcrms}$  é o valor da tensão de fase do sistema elétrico; e  $I_{abcrms}$  é a corrente eficaz para cada fase do sistema elétrico.

A Figura A.2 apresenta o tetraedro das potências aparente aritmética ( $S_A$ ) e vetorial ( $S_V$ ). Nota-se que os módulos destas duas grandezas podem ser diferentes. Cabe ressaltar que, neste trabalho o algoritmo ACEO atua compartilhando a potência aparente aritmética ( $S_A$ ) da carga entre os conversores série e paralelo.

Figura A.2 – Potências aparentes aritmética ( $S_A$ ) e vetorial ( $S_V$ ).



Fonte: Autor.