



COPPE/UFRJ

CONDICIONADOR UNIVERSAL DE ENERGIA (UPQC) COM ESTRATÉGIA
DE CONTROLE INVERTIDA

Rodrigo Martins Fernandes

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Mauricio Aredes

Rio de Janeiro
Dezembro de 2008

CONDICIONADOR UNIVERSAL DE ENERGIA (UPQC) COM ESTRATÉGIA
DE CONTROLE INVERTIDA

Rodrigo Martins Fernandes

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO LUIZ
COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA (COPPE)
DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

Aprovada por:

Prof. Maurício Aredes, Dr.-Ing.

Prof. Walter Issamu Suemitsu, Dr. Ing.

Prof. Luís Guilherme Barbosa Rolim, Dr.-Ing.

Prof. Pedro Gomes Barbosa, D.Sc.

Prof. Marcelo Cabral Cavalcanti, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

DEZEMBRO DE 2008

Fernandes, Rodrigo Martins

Condicionador Universal de Energia (UPQC) com estratégia de controle invertida/Rodrigo Martins Fernandes. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2008.

XXI, 201 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Mauricio Aredes

Tese (doutorado) – UFRJ/COPPE/Programa de Engenharia Elétrica, 2008.

Referências Bibliográficas: p. 163 – 168.

1. Condicionadores de energia. 2. Filtros ativos. 3. UPQC. I. Aredes, Mauricio. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Elétrica. III. Título.

Dedico esse trabalho aos meus pais Renato e Walderes e a minha esposa Andresa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo seu amor infinito e gratuito! A ele devemos tudo o que somos e o que temos... devemos a vida.

Aos meus pais, Renato e Walderes, pelo amor, carinho e dedicação que sempre tiveram por mim.

A minha amada esposa Andresa, por sempre estar ao meu lado me apoiando e incentivando a completar mais esta etapa da minha vida. Agradeço a sua paciência e compreensão pelas vezes que eu lhe faltei a devida atenção e pelas renúncias que juntos fizemos em prol da realização deste trabalho.

Ao meu professor e orientador Maurício Aredes pela confiança em mim depositada na realização deste trabalho e pela sua valiosa orientação, principalmente durante a implementação do protótipo experimental.

Aos meus sócios e amigos Fábio Domingues e Gilson Santos por suportarem a minha ausência na fase final de elaboração desta tese e me darem a tranqüilidade necessária para bem realizá-la.

Ao amigo João Moor pelos longos dias de trabalho árduo no protótipo laboratorial que dividimos para a realização de nossas teses.

Aos técnicos e bolsistas do Laboratório de Eletrônica de Potência que foram imprescindíveis na construção do protótipo experimental.

A todos os professores do grupo de Eletrônica de Potência da COPPE/UFRJ pelas contribuições à minha formação.

À CAPES pelo apoio financeiro.

E, aos verdadeiros amigos, que sempre nos apóiam tanto nos momentos bons quanto nos momentos difíceis da vida.

A todos vocês, meu

Muito Obrigado!!!

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Doutor em Ciências (D.Sc.)

CONDICIONADOR UNIVERSAL DE ENERGIA (UPQC) COM ESTRATÉGIA DE CONTROLE INVERTIDA

Rodrigo Martins Fernandes

Dezembro/2008

Orientador: Maurício Aredes

Programa: Engenharia Elétrica

O UPQC é um filtro ativo série e paralelo com capacidade de compensar problemas de qualidade na tensão da fonte e na corrente da carga. Na abordagem convencional o filtro série é tratado como uma fonte de tensão controlada e o filtro paralelo como uma fonte de corrente controlada. Neste trabalho esta modelagem é invertida e o nome UPQC-i é utilizado para denominá-la. O modelo digital ideal do UPQC-i para sistemas a três fios é implementado no programa de simulação computacional de transitórios eletromagnéticos PSCAD. Em seguida, o modelo real digital do UPQC-i também é implementado no PSCAD em conjunto com uma biblioteca de funções desenvolvida para facilitar o desenvolvimento do código de controle a ser embarcado no microprocessador DSP utilizado no protótipo experimental, cujos resultados validam o seu modelo.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Science (D.Sc.)

INVERSE CONTROL STRATEGY OF A UNIFIED POWER QUALITY
CONDITIONER (UPQC)

Rodrigo Martins Fernandes

December/2008

Advisor: Maurício Aredes

Department: Electrical Engineering

The UPQC is a series-parallel active filter for compensating power-quality problems from source voltages and load currents. In a conventional approach of a UPQC, the series active filter is treated as a controlled voltage source and the parallel active filter as a controlled current source. The inverted model is presented in this work and the name UPQC-i is used to entitle it. The three-wire UPQC-i ideal digital model is implemented in the PSCAD electromagnetic transient simulator. The UPQC-i real digital model is also implemented in the PSCAD together with a function library developed to make easier the development of the control code to be embedded into the DSP controller used in the experimental prototype.

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Objetivo e Motivação	2
1.2	Descrição dos demais Capítulos	4
2	Estado da arte dos equipamentos condicionadores de energia	6
2.1	Considerações Iniciais	7
2.2	Filtros Ativos de Potência	9
2.2.1	Princípio Básico de Operação dos Filtros Ativos	12
	Filtro ativo paralelo	13
	Filtro ativo série	17
2.3	Condicionadores de energia baseados em filtros ativos	18
2.3.1	Compensador Estático Série	18
2.3.2	Compensador Estático Paralelo (D-STATCOM)	21
2.3.3	Compensador Estático Série-Paralelo	22
2.4	Sumário	25
3	Contribuições as estratégias de controle do UPQC-i	26
3.1	Modelagem do UPQC-i	27
3.2	Estratégia de Controle do UPQC-i	31
3.2.1	Teoria p-q	31
3.2.2	PLL trifásico	33
3.2.3	Descrição da estratégia de controle	34
3.3	Modelo digital ideal do UPQC-i	41
3.4	Simulação do modelo digital ideal do UPQC-i	44
3.4.1	Resultado da simulação computacional ideal1	47
3.4.2	Resultado da simulação computacional ideal2	63

3.5	Análise da resposta dinâmica e proposição de estratégia de controle modificada	79
3.6	Sumário	87
4	Modelagem Digital do UPQC-i	88
4.1	Simulações Computacionais	89
4.2	O programa de simulação	89
4.3	Ambiente de Trabalho PSCAD/DSPSIM	90
4.3.1	Descrição do PSCAD/DSPSIM	93
4.3.2	Limitações e características do PSCAD/DSPSIM	95
4.4	Modelagem do UPQC-i no PSCAD/DSPSIM	98
4.5	Simulações Computacionais do UPQC-i usando o PSCAD/DSPSIM	103
4.5.1	Resultados da simulação computacional real1	105
4.5.2	Resultados da simulação computacional real2	122
4.6	Sumário do Capítulo	138
5	Protótipo do UPQC-i e Resultados Experimentais	139
5.1	Introdução	140
5.2	O circuito de potência	140
5.3	O circuito de controle	145
5.4	Resultados Experimentais	147
5.4.1	Operação com tensão da fonte com desbalanço	148
5.4.2	Operação com tensão da fonte com afundamento	154
5.5	Sumário do Capítulo	159
6	Conclusão	160
	Referências Bibliográficas	163
	Apêndice A Qualidade da Energia Elétrica	169
	Apêndice B Resposta em frequência dos filtros	191
	Anexo I Folha de Dados do módulo IGBT modelo SKM 200 GB	195

Lista de Figuras

2.1	Filtro ativo trifásico com um inversor de fonte de tensão.	11
2.2	Filtro ativo trifásico com um inversor de fonte de corrente.	12
2.3	Filtro ativo paralelo.	13
2.4	Filtro ativo série.	17
2.5	Configuração Básica do Compensador Estático Série.	19
2.6	SSC com sistema de armazenamento de energia.	20
2.7	SSC com suprimento de energia pela rede.	21
2.8	Configuração Básica do STATCOM.	22
2.9	Configuração Básica do UPQC.	23
3.1	Modelagem do UPQC-i com fontes ideais.	27
3.2	Circuito simplificado por fases do modelo do UPQC-i.	28
3.3	Circuitos de sincronismo p-PLL e q-PLL.	34
3.4	Diagrama de blocos do algoritmo de controle reduzido do UPQC-i.	35
3.5	Diagrama de blocos do algoritmo de controle adaptativo do UPQC-i.	37
3.6	Diagrama de blocos do modelo ideal do UPQC-i no PSCAD.	42
3.7	Diagrama de blocos do cálculo da tensão no capacitor do elo CC fictício.	43
3.8	Diagrama de circuitos da simulação do modelo digital ideal do UPQC-i.	44
3.9	Valor coletivo das Tensões de Entrada e da Carga	47
3.10	Perfil das correntes trifásicas produzidas pelas conexões e desconexões das cargas 1, 2, 3 e 4	48
3.11	Perfil das correntes trifásicas, drenadas da fonte, durante as conexões e desconexões das cargas 1, 2, 3 e 4	49
3.12	Valor coletivo das correntes da fonte e da carga (filtrada)	50
3.13	Tensão no capacitor do elo CC	50
3.14	Tensões de linha na fonte durante a conexão e desconexão da carga1	51
3.15	Tensões de linha na fonte durante a conexão e desconexão da carga2	52

3.16	Tensões de linha na fonte durante a conexão e desconexão da carga3	52
3.17	Tensões de linha na fonte durante a conexão e desconexão da carga4	52
3.18	Tensões de linha na carga 1 durante a sua conexão e desconexão . . .	53
3.19	Tensões de linha na carga 2 durante a sua conexão e desconexão . . .	53
3.20	Tensões de linha na carga 3 durante a sua conexão e desconexão . . .	53
3.21	Tensões de linha na carga 4 durante a sua conexão e desconexão . . .	54
3.22	Correntes trifásicas da carga 1 durante a sua conexão e desconexão	54
3.23	Correntes trifásicas da carga 2 durante a sua conexão e desconexão	55
3.24	Correntes trifásicas da carga 3 durante a sua conexão e desconexão	55
3.25	Correntes trifásicas da carga 4 durante a sua conexão e desconexão	55
3.26	Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga1	56
3.27	Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga2	56
3.28	Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga3	57
3.29	Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga4	57
3.30	Componentes harmônicos mais relevantes das correntes trifásicas da carga 4 em regime permanente	58
3.31	Componente fundamental das correntes trifásicas da carga 4 em regime permanente	58
3.32	Componentes harmônicos mais relevantes das correntes trifásicas A, B e C da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente	59
3.33	Componente fundamental das correntes trifásicas A, B e C da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente	59
3.34	Componentes harmônicos mais relevantes das tensões de linha trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente. .	61
3.35	Componente fundamental das tensões de linha trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.	61
3.36	Componentes harmônicos mais relevantes das tensões de linha trifásicas da carga durante a operação da carga 4 em regime permanente.	62
3.37	Componente fundamental das tensões de linha trifásicas da carga durante a operação da carga 4 em regime permanente.	62
3.38	Valor coletivo das tensões da fonte e da carga	64
3.39	Perfil das correntes da carga.	65
3.40	Perfil das correntes da fonte.	65
3.41	Valor coletivo das correntes da fonte e da carga (filtrada)	66

3.42	Tensão no capacitor do elo CC	67
3.43	Tensões de linha da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio1	67
3.44	Tensões de linha da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio2	68
3.45	Tensões de linha da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio3	68
3.46	Tensões de linha da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio4	68
3.47	Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio1	69
3.48	Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio2	69
3.49	Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio3	70
3.50	Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio4	70
3.51	Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 1 . .	71
3.52	Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 2 . .	71
3.53	Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3 . .	71
3.54	Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4 . .	72
3.55	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 1 . .	72
3.56	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 2 . .	73
3.57	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3 . .	73
3.58	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4 . .	73
3.59	Espectro harmônico das correntes da carga 4 durante a presença do distúrbio 4	75
3.60	Componentes fundamentais das correntes da carga 4 durante a pre- sença do distúrbio 4	75
3.61	Espectro harmônico das correntes da fonte compensadas, na presença do distúrbio 4	76
3.62	Componentes fundamentais das correntes da fonte compensadas, na presença do distúrbio 4	76
3.63	Espectro harmônico das tensões de linha da fonte com o distúrbio 4. .	77
3.64	Componentes fundamentais das tensões de linha da fonte com o dis- túrbio 4.	77
3.65	Espectro harmônico das tensões de linha na carga 4 em regime per- manente na presença do distúrbio 4.	78
3.66	Componentes fundamentais das tensões de linha na carga 4 em regime permanente na presença do distúrbio 4.	78
3.67	Variável de controle p_{loss} durante a simulação ideal2.	81
3.68	Diagrama de blocos do algoritmo de controle adaptativo modificado. .	82

3.69	Variável p_{loss} do controle modificado durante a simulação ideal3. . . .	83
3.70	Correntes trifásicas da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3, utilizando o controle modificado.	84
3.71	Correntes trifásicas da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4, utilizando o controle modificado.	84
3.72	Comparação entre as estratégias de controle - dinâmica do valor coletivo das correntes da carga.	84
3.73	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3, utilizando o controle modificado.	85
3.74	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4, utilizando o controle modificado.	85
3.75	Comparação entre as estratégias de controle - dinâmica do valor coletivo das correntes da fonte.	86
3.76	Comparação entre as estratégias de controle - dinâmica do valor coletivo das tensões da carga.	86
4.1	Ilustração gráfica das definições: IntrHandler, ADNEW400 e Interrupt Clock.	94
4.2	Ilustração gráfica dos módulos de geração dos sinais seno-PWM. . . .	95
4.3	Ilustração gráfica da primeira página da Simulação.	98
4.4	Modelo digital do UPQC-i utilizando a biblioteca PSCAD/DSPSIM. . . .	99
4.5	Diagrama de blocos do controle de chaveamento do inversor paralelo do UPQC-i.	100
4.6	Diagrama de blocos do controle de chaveamento do inversor série do UPQC-i.	102
4.7	Circuito de saída do inversor de fonte de tensão.	102
4.8	Valor coletivo das Tensões de Entrada, Referência e da Carga. . . .	105
4.9	Perfil das correntes trifásicas produzidas pelas conexões e desconexões das cargas 1, 2, 3 e 4.	106
4.10	Perfil das correntes trifásicas, drenadas da fonte, durante as conexões e desconexões das cargas 1, 2, 3 e 4.	106
4.11	Valor coletivo das correntes da fonte, de referência e da carga (filtrada)107	
4.12	Tensão no capacitor do elo CC.	108
4.13	Tensões de linha da entrada durante a conexão e desconexão da carga1.108	

4.14	Tensões de linha da entrada durante a conexão e desconexão da carga	2.109
4.15	Tensões de linha da entrada durante a conexão e desconexão da carga	3.109
4.16	Tensões de linha da entrada durante a conexão e desconexão da carga	4.109
4.17	Tensões de linha da carga 1 durante a sua conexão e desconexão.	110
4.18	Tensões de linha da carga 2 durante a sua conexão e desconexão.	110
4.19	Tensões de linha da carga 3 durante a sua conexão e desconexão.	110
4.20	Tensões de linha da carga 4 durante a sua conexão e desconexão.	111
4.21	Correntes trifásicas da carga 1 durante a sua conexão e desconexão.	112
4.22	Correntes trifásicas da carga 2 durante a sua conexão e desconexão.	112
4.23	Correntes trifásicas da carga 3 durante a sua conexão e desconexão.	112
4.24	Correntes trifásicas da carga 4 durante a sua conexão e desconexão.	113
4.25	Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga	1.113
4.26	Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga	2.113
4.27	Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga	3.114
4.28	Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga	4.114
4.29	Tensões de linha de referência e medida da carga 4 em regime permanente.	115
4.30	Correntes trifásicas da fonte, de referência e medidas, durante a operação da carga 4 em regime permanente.	116
4.31	Componentes harmônicos mais relevantes das correntes trifásicas da carga 4 em regime permanente.	117
4.32	Componente fundamental das correntes trifásicas da carga 4 em regime permanente.	117
4.33	Componentes harmônicos mais relevantes das correntes trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.	118
4.34	Componente fundamental das correntes trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.	118
4.35	Componentes harmônicos mais relevantes das tensões de linha trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.	120
4.36	Componente fundamental das tensões de linha trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.	120
4.37	Componentes harmônicos mais relevantes das tensões de linha trifásicas da carga durante a operação da carga 4 em regime permanente.	121

4.38	Componente fundamental das tensões de linha trifásicas da carga durante a operação da carga 4 em regime permanente.	121
4.39	Valor coletivo das Tensões de Entrada, Referência e da Carga.	122
4.40	Perfil das correntes da carga durante a presença dos distúrbios de tensão.	123
4.41	Perfil das correntes da fonte durante a presença de distúrbios de tensão.	124
4.42	Valor coletivo das correntes da fonte, de referência e da carga (filtrada).	124
4.43	Tensão no capacitor do elo CC.	125
4.44	Tensões de linha na fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio1.	126
4.45	Tensões de linha na fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio2.	126
4.46	Tensões de linha na fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio3.	126
4.47	Tensões de linha na fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio4.	127
4.48	Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio1.	127
4.49	Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio2.	127
4.50	Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio3.	128
4.51	Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio4.	128
4.52	Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 1 . .	128
4.53	Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 2 . .	129
4.54	Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3 . .	129
4.55	Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4 . .	129
4.56	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 1. . .	130
4.57	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 2. . .	130
4.58	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3. . .	131
4.59	Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4. . .	131
4.60	Tensões de linha, de referência e medidas, em regime permanente na presença do distúrbio 4	132
4.61	Correntes da fonte, de referência e medidas, em regime permanente na presença do distúrbio 4	133
4.62	Espectro harmônico das correntes da carga em regime permanente na presença do distúrbio 4.	134
4.63	Componente fundamental das correntes da carga em regime permanente na presença do distúrbio 4.	134
4.64	Espectro harmônico das correntes da fonte em regime permanente na presença do distúrbio 4.	135

4.65	Componente fundamental das correntes da fonte em regime permanente na presença do distúrbio 4.	135
4.66	Espectro harmônico das tensões de linha da fonte em regime permanente na presença do distúrbio 4.	136
4.67	Componente fundamental das tensões de linha da fonte em regime permanente na presença do distúrbio 4.	136
4.68	Espectro harmônico das tensões de linha da carga em regime permanente na presença do distúrbio 4.	137
4.69	Componente fundamental das tensões de linha da carga em regime permanente na presença do distúrbio 4.	137
5.1	Diagrama de blocos do protótipo experimental	140
5.2	Diagrama unifilar do circuito de potência do protótipo	141
5.3	Foto do protótipo - Vista frontal.	143
5.4	Foto do protótipo - indutores e transformadores.	144
5.5	Foto do protótipo - Inversores e placas de medição.	144
5.6	Foto do protótipo - Circuito de controle.	146
5.7	Tensão de linha AB da fonte e correntes da fase B da fonte, carga e filtro paralelo, durante o instante de entrada da carga.	148
5.8	Tensões trifásicas da fonte e seus componentes fundamentais.	149
5.9	Espectros harmônicos das tensões das fases A, B e C da fonte.	149
5.10	Tensões trifásicas da carga e seus componentes fundamentais.	150
5.11	Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da carga.	150
5.12	Tensões dos trafos série e seus componentes fundamentais.	151
5.13	Espectros harmônicos das tensões dos trafos série.	151
5.14	Correntes trifásicas da carga e seus componentes fundamentais.	152
5.15	Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da carga.	152
5.16	Correntes trifásicas da fonte e seus componentes fundamentais.	153
5.17	Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da fonte.	153
5.18	Tensão da fase B da fonte e correntes da fase B da fonte, carga e filtro paralelo.	154
5.19	Tensões trifásicas da fonte e seus componentes fundamentais.	155
5.20	Espectros harmônicos das tensões das fases A, B e C da fonte.	155
5.21	Tensões trifásicas da carga e seus componentes fundamentais.	156

5.22	Espectros harmônicos das tensões das fases A, B e C da carga.	156
5.23	Correntes trifásicas da carga e seus componentes fundamentais.	157
5.24	Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da carga.	157
5.25	Correntes trifásicas da fonte e seus componentes fundamentais.	158
5.26	Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da fonte.	159
A.1	Classificação da tensão em regime permanente em relação ao valor de referência	181
B.1	Resposta em frequência do filtro média móvel dos controles do UPQC-i.	192
B.2	Topologia do filtro passivo de potência de segunda ordem.	193
B.3	Resposta em frequência do filtro de potência do conversor série.	194
B.4	Resposta em frequência do filtro de potência do conversor paralelo.	194

Lista de Tabelas

3.1	Configurações das cargas utilizadas nas simulações	45
3.2	Fator de Potência de Deslocamento para operação da Carga 4	60
3.3	Distúrbios na tensão da fonte utilizados nas simulações	63
3.4	Fator de Potência de Deslocamento durante a operação da carga 4 e a presença do distúrbio 4	79
4.1	Fator de Potência de Deslocamento para o caso real1	119
4.2	Fator de Potência de Deslocamento para o caso real2	138
A.1	Classificação da duração das variações de tensão segundo a norma IEEE Std 1159-1995	179
A.2	Valores de referência das distorções harmônicas totais de tensão	184
A.3	Valores de referência das distorções harmônicas individuais de tensão	184
A.4	Faixas de classificação para as flutuações de tensão	188
A.5	Classificação das VTCDs para o sistema elétrico brasileiro	189

LISTA DE ABREVIACÕES

AD *analog to digital*

ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica

APF *Active Power Filters*

APLC *Active Power Line Conditioners*

APQC *active power quality conditioners*

AT alta tensão

BSES *Backup Stored Energy System*

BT baixa tensão

CA Corrente Alternada

CC Corrente Contínua

CENELEC *European Committee for Electrotechnical Standardization*

COPPE Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia

CMOS *Complementary Metal-Oxide Semiconductor*

CSI *Current Source Inverter*

DIT_h Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

DRC duração relativa da transgressão para tensão crítica

DRC_E duração relativa de transgressão de tensão crítica equivalente

DRP duração relativa da transgressão para tensão precária

DRP_E duração relativa de transgressão de tensão precária equivalente

DSP *Digital Signal Processor*

DTT Distorção harmônica total de tensão

DVR *Dynamic Voltage Restorer*

D-STATCOM *Distribution Static Synchronous Compensator*

ELEPOT *Eletrônica de Potência*

EMC *Electromagnetic Compatibility*

EMTDC *Electromagnetic Transients including DC*

FACTS *Flexible AC Transmission System*

FIR *Finite Impulse Response*

FP *fator de potência*

FD *fator de desequilíbrio*

GTO *gate turn-off thyristors*

HVDC *High Voltage Direct Current*

ICC *índice de unidades consumidoras com tensão crítica*

IEEE *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEC *International Electrotechnical Commission*

IGBT *Insulated Gate Bipolar Transistor*

IRPC *Instantaneous Reactive Power Compensators*

LES *line energy supply*

MT *média tensão*

MOSFET *Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor*

ONS *Operador Nacional do Sistema Elétrico*

P&D *Pesquisa e Desenvolvimento*

PRODIST *Procedimentos de Distribuição*

PWM *Pulse Width Modulation*

PSCAD *Power Systems Computer Aided Design*

QEE *qualidade da energia elétrica*

SCVS *Series Compensator for Voltage Sags*

SES *stored energy system*

SSC *Static Series Compensator*

SSSC *Static Synchronous Series Compensator*

SVC *Static Var compensator*

SVR *Static Voltage Regulator*

STATCOM *Static Synchronous Compensator*

TS *Transfer Switch*

VSC *Voltage Source Converter*

VSI *Voltage Source Inverter*

VTCD *Variação de Tensão de Curta Duração*

UPQC-i *Condicionador Universal de Potência para Compensação de VTCD,
Harmônicos e Desbalanços de Corrente e Tensão*

UFRJ *Universidade Federal do Rio de Janeiro*

UPQC *Unified Power Quality Conditioner*

UPS *Uninterruptible Power Supply*

USPTO *United States Patent and Trademark Office*

Capítulo 1

Introdução

Este capítulo tem como objetivo apresentar os tópicos abordados nesta tese de doutorado e situar o leitor sobre os temas aqui tratados. Ainda neste capítulo introdutório, serão apresentados a motivação e os objetivos do trabalho proposto.

1.1 Objetivo e Motivação

O crescente número de equipamentos controlados por microprocessadores e cargas alimentadas por dispositivos de eletrônica de potência localizados em várias instalações industriais, assim como o crescimento de empresas implementando processos contínuos, tais como: indústrias de siderurgia, semicondutores, têxteis, papel e plásticos, têm direcionado igualmente a atenção tanto das empresas fornecedoras de energia elétrica, como também das empresas consumidoras para a natureza sensível das questões relacionadas à qualidade de energia.

Uma energia, entregue aos consumidores, de baixa qualidade pode resultar em desligamentos indesejáveis de processos industriais, na deterioração da qualidade de produção e, em alguns casos extremos, danos em equipamentos. Como uma consequência, tais problemas inevitavelmente resultam em perdas financeiras. Em uma indústria de vidro americana, por exemplo, estima-se que uma interrupção do fornecimento de energia de cinco ciclos, menos de um décimo de segundo, pode custar cerca de *US\$200.000,00* [1]. Como resultado desta vulnerabilidade, em várias instalações industriais/comerciais têm sido feitos investimentos em equipamentos de melhoria da qualidade de energia, tais como sistemas de suprimento ininterrupto de energia (UPS).

Se por um lado a demanda das empresas consumidoras por uma melhor qualidade do fornecimento da energia elétrica vem aumentando ao longo dos anos, por outro lado, estas mesmas empresas muitas das vezes possuem em suas instalações cargas não-lineares que injetam correntes harmônicas na rede elétrica piorando a qualidade da energia na mesma.

Alguns dos problemas de qualidade de energia mais críticos são as interrupções, as variações e flutuações de tensão, os componentes harmônicos de corrente e tensão, dentre outros. Estes problemas são causados por vários fenômenos, muitos deles de origem natural (descargas atmosféricas, por exemplo). Outras causas de distúrbios são: a operação de equipamentos elétricos nas indústrias (partida de grandes motores e a energização de transformadores); a ocorrência de faltas dentro do próprio sistema de potência, provocando variações de tensão de curta duração (transitórios) ou em regime permanente nos consumidores finais etc.

Recentemente, diversos debates relacionados aos procedimentos para a distribuição de energia elétrica brasileira, que serão futuramente apresentados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), têm abordado, cada vez mais, a questão da qualidade da energia elétrica (QEE).

Diante do exposto, é notável a relevância do tema “qualidade da energia elétrica”, na conjuntura da elaboração deste trabalho. Isto pode ser observado no aumento da demanda por soluções para os problemas de QEE, principalmente nos setores industriais do mercado de energia elétrica. Esta demanda, por sua vez, vem despertando o interesse da comunidade científica na realização de trabalhos voltados para o desenvolvimento de protótipos industriais de equipamentos condicionadores de energia.

Neste contexto, o dispositivo *Unified Power Quality Conditioner* (UPQC) [2] é apresentado como uma possível solução para alguns problemas de QEE. As principais funcionalidades deste dispositivo são a filtragem ativa e a correção de desbalanços de tensão e corrente. Dependendo da modelagem e da estratégia de controle utilizados, pode-se realizar, ainda, a correção de fator de potência, a compensação de Variação de Tensão de Curta Duração (VTCDD) e a compensação de flutuação de tensão.

A concepção do dispositivo UPQC é oriunda da associação e operação em conjunto de um filtro ativo série e outro paralelo. Desta forma, a modelagem tradicional do UPQC segue aquelas adotadas para os filtros ativos série e paralelo separadamente, ou seja, o inversor paralelo comporta-se como uma fonte de corrente não-senoidal (componentes fundamentais e harmônicas) e o série como uma fonte de tensão não-senoidal (componentes fundamentais e harmônicas). Entretanto, alguns trabalhos [3, 4, 5, 6] apresentam uma modelagem invertida para os filtros série e paralelo do UPQC, onde o filtro ativo série é representado por uma fonte de corrente senoidal e o paralelo por uma fonte de tensão senoidal.

O objetivo deste trabalho é estudar e desenvolver um protótipo de um condicionador de energia baseado na operação combinada de um filtro ativo série e um filtro ativo paralelo, modelados como fontes senoidais de corrente e tensão, respectivamente. Tal dispositivo, doravante denominado UPQC-i, caracteriza-se pelas funcionalidades de compensação de harmônicos e desbalanços de tensão e corrente, correção de fator de potência, compensação de flutuação de tensão, regulação de

tensão e compensação de VTCD.

A modelagem e a estratégia de controle do equipamento serão avaliadas no programa de simulação computacional de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC . Os resultados das simulações indicam o comportamento real do protótipo esperado na prática e, por este motivo, devem fazer parte do processo de concepção de um equipamento, permitindo que o modelo do equipamento seja testado de forma exaustiva num ambiente seguro.

Uma das etapas de construção do protótipo é a implementação do circuito de controle baseado na estratégia de controle simulada. O circuito de controle do protótipo UPQC-i utiliza um microprocessador do tipo DSP. Desta forma, a estratégia de controle precisa ser traduzida em uma linguagem que será embarcada no DSP. Assim, faz parte das contribuições e motivações deste trabalho o desenvolvimento de uma biblioteca, implementada no programa de simulação PSCAD, que facilite este processo.

O ambiente de trabalho, denominado PSCAD/DSPSIM, possibilita que a estratégia de controle seja implementada no programa de simulação PSCAD através do desenvolvimento de um código de programação na linguagem C, consistindo no mesmo código que será utilizado para embarcar o controle no microprocessador do tipo DSP. Desta forma, todo o esforço de desenvolvimento do controle do protótipo experimental será realizado no âmbito de uma plataforma segura, dentro de um ambiente de simulação computacional, de forma mais rápida, com menos riscos e menores custos.

1.2 Descrição dos demais Capítulos

A tese inclui o estudo do condicionador de energia, denominado UPQC-i, através da sua modelagem digital no programa de simulação PSCAD e da implementação prática do protótipo laboratorial deste condicionador. Além disso, pretende-se desenvolver uma biblioteca para o programa de simulação PSCAD que cria um novo ambiente de trabalho, facilitando o processo de implementação experimental.

O segundo capítulo apresenta alguns conceitos sobre o termo “condicionamento

de energia” e os equipamentos condicionadores de energia. Os filtros ativos de potência são apresentados como uma das principais tecnologias aplicadas no condicionamento da energia elétrica, sendo uma das soluções para os problemas de QEE. São apresentados, de forma resumida, os princípios básicos de operação dos filtros ativos série e paralelo e, também, alguns equipamentos condicionadores de energia que utilizam estes princípios.

No terceiro capítulo, é apresentado o condicionador de energia UPQC-i que será objeto de estudo do presente trabalho. A sua modelagem ideal e a sua estratégia de controle são discutidas neste capítulo e avaliadas através de simulações computacionais realizadas no programa PSCAD.

No quarto capítulo, é realizada uma discussão inicial sobre a importância das simulações num processo de desenvolvimento. Em seqüência, a biblioteca PSCAD/DSPSIM, desenvolvida para facilitar a implementação prática do circuito de controle baseado na estratégia de controle simulada, é apresentada. Encerrando, o modelo real do UPQC-i é implementado e simulado no PSCAD utilizando a biblioteca PSCAD/DSPSIM e os resultados obtidos são analisados.

O protótipo do UPQC-i é apresentado no quinto capítulo e os resultados experimentais são comentados.

No sexto capítulo, as conclusões são apresentadas e alguns temas para trabalhos futuros são sugeridos com o objetivo de dar continuidade ao presente trabalho.

Como este trabalho está relacionado com a existência de problemas de QEE, a título de informação, o Apêndice A disserta sobre seu conceito, apresenta algumas das suas principais definições e termos técnicos e as principais normas internacionais. Descreve, ainda, de forma um pouco mais detalhada, as principais ações realizadas no Brasil que visam a regulamentação das suas questões no contexto nacional.

Capítulo 2

Estado da arte dos equipamentos condicionadores de energia

A comunidade científica mundial, em conjunto com o setor industrial, vêm realizando diversas ações no intuito de identificar, caracterizar e definir os problemas de QEE nos sistemas elétricos de potência, principalmente porque tais problemas estão diretamente relacionados com os custos do setor produtivo.

Outro fato notório é que estes mesmos fatores econômicos estão provocando um aumento gradual, ao longo das últimas três décadas, das pesquisas e dos desenvolvimentos de equipamentos que visam eliminar ou minimizar os problemas de QEE. Neste capítulo será apresentado um resumo dos principais equipamentos correlacionados com o tema do presente trabalho.

2.1 Considerações Iniciais

O termo “condicionamento de energia” consiste na aplicação de soluções para a correção de problemas de QEE que afetam as cargas dos consumidores finais de energia (ex.: variações de tensão, interrupções, flutuações de tensão e distorções harmônicas) [7]. Desta forma, os condicionadores de energia são equipamentos cuja funcionalidade principal consiste na eliminação ou minimização dos problemas de QEE.

Em 1988, Hingorani [8] introduziu o conceito “*custom-power*” que baseia-se na utilização de controladores estáticos nos sistemas de distribuição possibilitando que as companhias concessionárias de energia agreguem valor ao seu produto, fornecendo uma energia com a confiabilidade e a qualidade demandadas por seus consumidores.

Já a definição de *custom-power* segundo a força tarefa do IEEE, denominada “*Distribution Custom Power Task Force*”, consiste no “emprego de controladores estáticos de eletrônica de potência, em sistemas de distribuição de média tensão (1kV até 38kV), para fornecer um nível compatível de qualidade de energia necessário para adequar o desempenho de determinados equipamentos ou processos” [9].

Esta limitação do conceito *custom-power* apenas para aplicações em média tensão, possui motivações econômicas. Os prejuízos provocados pelos problemas de QEE são muito maiores nas indústrias de grande porte, que na sua grande parte são alimentadas em média tensão (MT). Num cenário competitivo, garantir um fornecimento de energia com qualidade pode ser um diferencial importante para as concessionárias de energia atraírem estes grandes consumidores.

Visando disponibilizar informações detalhadas sobre equipamentos *custom power* como uma opção para a solução de problemas de qualidade de energia, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) publicou um guia para aplicações de equipamentos *custom power* em sistemas de distribuição de energia em MT [9]. Neste documento foram analisados uma série de equipamentos aplicados na solução de problemas relacionados com afundamentos, elevações e interrupções de tensão, como: Compensador Estático Série (*Static Series Compensator* - SSC), Regulador Estático de Tensão (*Static Voltage Regulator* - SVR), Sistema de Armazenamento

de Energia Reserva (*Backup Stored Energy System* - BSES) e chave de transferência (*Transfer Switch* - TS). Para a compensação de componentes harmônicos e potência reativa, foram analisados os seguintes equipamentos: Compensador Estático Paralelo (*Distribution Static Synchronous Compensator* - D-STATCOM), Compensador Estático de Var para distribuição (*Static Var compensator* - SVC), capacitor série para distribuição.

Nota-se que o termo *custom-power* define um subconjunto dentro do universo dos equipamentos condicionadores de energia, caracterizado pela classe de tensão para a qual o equipamento foi projetado. Já o princípio básico de funcionamento de um equipamento condicionador de energia independe da sua classe de tensão de operação. Esta limitação de escopo não significa que não existam similaridades entre os equipamentos condicionadores de energia para baixa tensão e os equipamentos *custom-power*. Na verdade, as tecnologias utilizadas em MT e baixa tensão (BT) são muito parecidas.

Como o interesse maior do presente trabalho está no princípio de funcionamento destes equipamentos e não nas suas classes de tensão de operação (baixa, média ou alta tensão), o termo condicionadores de energia será adotado como referência aos equipamentos aplicados na melhoria da QEE.

A necessidade do condicionamento da energia visando corrigir os problemas de QEE é muito antiga. Entretanto, são evidentes as mudanças nas características dos problemas de QEE atuais, conforme apresentado no Apêndice A. Conseqüentemente, são necessários novos critérios, metodologias e tecnologias para a escolha adequada da melhor solução para o condicionamento da energia, levando-se em consideração os tipos de distúrbios de QEE que se deseja compensar.

Neste contexto, a tecnologia dos filtros ativos tem evoluído ao longo dos últimos 30 anos com o objetivo de suprir as novas necessidades de condicionamento de energia. Na próxima seção, será apresentado um breve histórico da evolução dos filtros ativos de potência, bem como os seus princípios básicos de operação.

Com a evolução das pesquisas, diversos equipamentos específicos para o condicionamento de energia foram desenvolvidos pela comunidade científica em conjunto com a indústria. Muitos destes equipamentos receberam nomes distintos como forma de

destacar as suas funcionalidades. Entretanto, o princípio básico de funcionamento destes equipamentos permite classificá-los como, simplesmente, filtros ativos de potência. Nas seções seguintes, são apresentadas descrições sucintas, configurações básicas e os principais objetivos de alguns destes equipamentos condicionadores de energia.

2.2 Filtros Ativos de Potência

A tecnologia dos filtros ativos de potência surgiu no início da década de 70. Esta época é marcada pelo crescimento da utilização de cargas não-lineares, baseadas em tiristores, cuja operação piora o fator de potência e introduz correntes harmônicas no sistema elétrico provocando o surgimento de componentes harmônicos de tensão [10].

Antes do surgimento dos filtros ativos, a compensação de correntes harmônicas era realizada utilizando-se técnicas passivas de correção de formas de onda, tais como: filtros passivos ou conversores multipulso CA-CC. Os conversores multipulsos são constituídos pela associação paralela ou série de conversores de seis pulsos e são apropriados para a alimentação de cargas não lineares com potências mais elevadas com o objetivo de reduzir os componentes harmônicos de ordem baixa e seus múltiplos [11, 12]. Já os filtros passivos são constituídos pela associação de resistores, indutores e capacitores, e dependendo da configuração, podem ser do tipo sintonizado e amortecido. Geralmente, operam em paralelo com o barramento do sistema de alimentação, proporcionando um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas. Dependendo do projeto, o filtro passivo pode melhorar o fator de potência. Entretanto, os filtros passivos não são seletivos e funcionam como um sorvedouro para os harmônicos provenientes de todos os ramais paralelos ao filtro, podendo provocar fenômenos de ressonância com a impedância paralela do sistema.

Diante das limitações dos filtros passivos e do aumento dos componentes harmônicos introduzidos nos sistemas elétricos, identificou-se a necessidade do desenvolvimento de soluções dinâmicas e flexíveis para estes crescentes problemas de QEE. Em 1976, L. Gyugyi e E.C. Strycula [13] introduziram os conceitos básicos dos filtros ativos de potência.

Inicialmente, os filtros ativos foram concebidos visando a compensação de componentes harmônicos de corrente. Entretanto, logo constatou-se a sua capacidade de compensar outros distúrbios como correntes reativas e correntes de seqüência negativa, presentes nos sistemas de distribuição [14].

Com a evolução das pesquisas, o papel dos filtros ativos, no condicionamento da energia dos sistemas de distribuição, tornou-se muito mais amplo em relação a sua concepção inicial. Atualmente, os filtros ativos de potência são largamente utilizados para os seguintes propósitos:

- compensação de componentes harmônicos de corrente e tensão;
- compensação de potência reativa;
- compensação de correntes e tensões de seqüência zero e negativa (desequilíbrio de corrente e tensão num sistema trifásico);
- regulação de tensão;
- compensação de variações de tensão de curta duração;
- eliminação de flutuação de tensão, evitando-se a cintilação luminosa;

Essas funcionalidades podem ser alcançadas individualmente ou em conjunto, dependendo do tipo de configuração e das estratégias de controle e de chaveamento utilizados. Devido a esta vasta lista de funcionalidades, os filtros ativos receberam diversas denominações desde a sua concepção inicial, entre elas: condicionadores ativos de linha de energia (*Active Power Line Conditioners* - APLC), compensadores instantâneos de energia reativa (*Instantaneous Reactive Power Compensators* - IRPC), filtros ativos de potência (*Active Power Filters* - APF) e condicionadores ativos de qualidade de energia (*active power quality conditioners* - APQC).

Existem diversos tipos de classificações para os filtros ativos. Por exemplo, eles podem ser divididos entre Corrente Alternada (CA) e Corrente Contínua (CC). Os filtros ativos também podem ser classificados pela sua topologia série, paralela ou híbrida [10], ou então quanto ao sistema de fases para o qual foi projetado, podendo ser monofásico a dois fios ou trifásicos a três ou quatro fios [15].

O circuito de potência dos filtros ativos é composto em geral por inversores de fonte de tensão (VSI¹-PWM²) ou inversores de fonte de corrente (CSI³-PWM). Os inversores são uma classe de conversores de energia, baseados em eletrônica de potência, que transformam uma fonte de corrente ou tensão CC em CA. O lado CC é constituído de um elemento armazenador de energia, ligado ao lado CA através de um conjunto de chaves semicondutoras (ex: MOSFET, IGBT, GTO) conectadas numa topologia em ponte. O elemento armazenador de energia é representado por um indutor, no caso de um inversor de fonte de corrente, e um capacitor, no caso de um inversor de fonte de tensão.

As Figuras 2.1 e 2.2 apresentam as configurações típicas do circuito de potência de um filtro ativo CA, trifásico, baseado num inversor VSI-PWM e CSI-PWM, respectivamente.

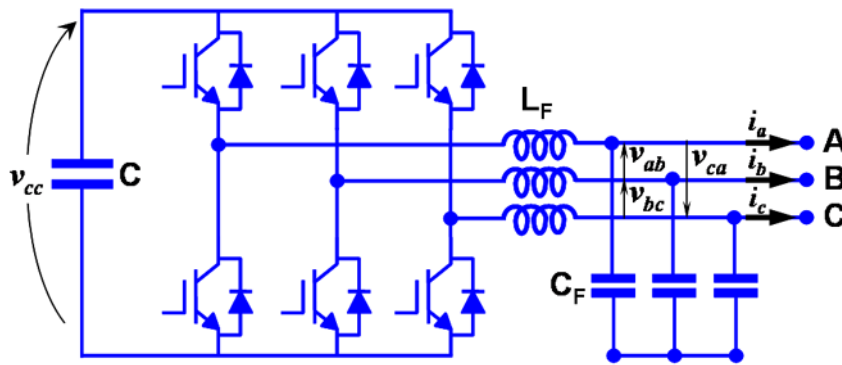


Figura 2.1: Filtro ativo trifásico com um inversor de fonte de tensão.

Em geral, estes tipos de inversores utilizam técnicas de chaveamento em alta frequência (entre 1kHz e 20kHz) como forma de possibilitar a síntese de formas de onda de corrente e tensão capazes de eliminar os conteúdos harmônicos, que causam problemas de QEE nos sistemas elétricos. Uma das mais conhecidas e utilizadas é a *Pulse Width Modulation* (PWM). Observa-se que é comum a utilização de filtros passivos de potência na saída dos inversores (L_f e C_f nas Figuras 2.1 e 2.2), como forma de se evitar que os harmônicos de ordem elevada, produzidos pelo chaveamento em alta frequência das chaves semicondutoras, se propaguem para o sistema elétrico.

¹Termo em inglês *Voltage Source Inverter* (VSI) traduzido como inversor de fonte de tensão

²*Pulse Width Modulation* (PWM) é um termo em inglês que significa modulação por largura de pulso e representa uma técnica de controle do chaveamento das chaves estáticas de um inversor.

³Termo em inglês *Current Source Inverter* (CSI) traduzido como inversor de fonte de corrente

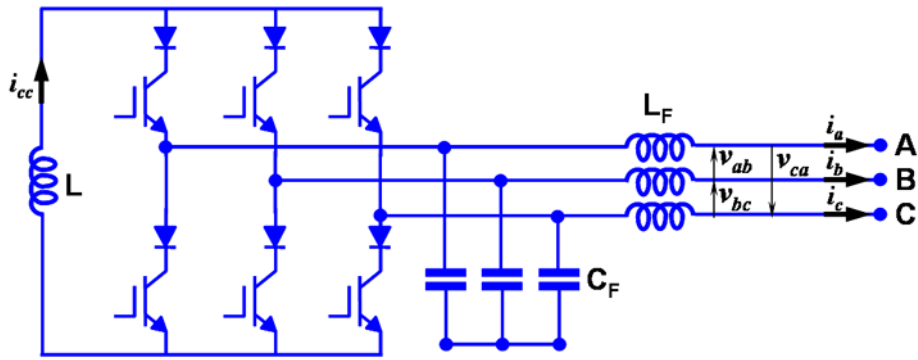


Figura 2.2: Filtro ativo trifásico com um inversor de fonte de corrente.

A estrutura dos inversores de fonte de tensão é a configuração mais adotada para as aplicações de filtros ativos, por ser mais leve e mais barata em relação a configuração com inversores de fonte de corrente [15].

O desempenho de um filtro ativo depende em grande parte da estratégia de controle adotada. Duas das principais teorias que são bastante utilizadas no desenvolvimento de estratégias de controle são: a teoria das potências ativa e reativa instantâneas desenvolvida inicialmente por *Akagi et al.* [16, 17] e a teoria $d-q$ (*Synchronous frame*) [18].

2.2.1 Princípio Básico de Operação dos Filtros Ativos

Os filtros ativos possuem duas topologias básicas: a paralela e a série. Outras topologias podem ser obtidas a partir da combinação dessas topologias básicas e, eventualmente, em conjunto com filtros passivos.

Diversas formas de implementação de filtros ativos baseadas nestas topologias são apresentadas na literatura científica [15]. Os filtros ativos são bastante aplicados em sistemas trifásicos de potência, principalmente no setor industrial onde as cargas de maior potência são predominantemente trifásicas.

Os princípios básicos de operação dos filtros ativos série e paralelo serão apresentados, de forma sucinta, a seguir.

Filtro ativo paralelo

Os primeiros estudos sobre filtros ativos foram realizados com o foco na topologia paralela, com o objetivo de realizar a compensação das correntes harmônicas produzidas por determinadas cargas, como por exemplo os retificadores a tiristor com indutor no elo CC.

Desta forma, o filtro ativo paralelo convencional, ilustrado na Figura 2.3, é modelado como uma fonte de correntes harmônicas conectada em paralelo ao mesmo barramento onde a carga geradora dos harmônicos encontra-se conectada. As correntes não-senoidais a serem sintetizadas pelo inversor do filtro ativo e injetadas no barramento devem ter a mesma fase e amplitude dos componentes harmônicos produzidos pela carga, de modo que a corrente drenada do sistema elétrico seja apenas o componente fundamental da corrente consumida pela carga.

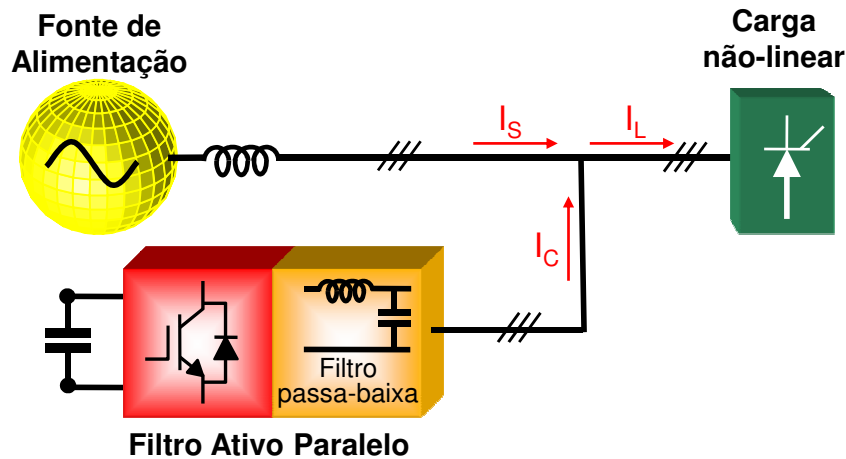


Figura 2.3: Filtro ativo paralelo.

Se as tensões e correntes de um circuito CA genérico estiverem em regime permanente, ambas podem ser decompostas usando a *Série de Fourier* [19]. Com base na Figura 2.3 e aplicando-se este princípio, as correntes da carga podem ser descritas conforme a expressão

$$i_{l_k}(t) = i_{l_{k1}}(t) + \sum_{h=2}^{\infty} i_{l_{kh}}(t) ; k = (a, b, c) , \quad (2.1)$$

onde,

- $i_{l_{k1}}(t)$: componente fundamental da corrente da carga;
- $i_{l_{kh}}(t)$: componente harmônico de ordem h da corrente da carga.

Esta análise pode ser realizada, tanto para um sistema trifásico, onde as expressões se repetem para cada uma das fases, como para um sistema monofásico.

Para se permitir que apenas o componente $i_{l_{k1}}(t)$ seja drenado do sistema elétrico, representado na Figura 2.3 pela fonte de alimentação, é necessário que o filtro ativo paralelo injete no barramento, onde a carga está conectada, uma corrente, $i_c(t)$, exatamente igual ao somatório de todos os componentes harmônicos da corrente da carga:

$$i_{c_k}(t) = \sum_{h=2}^{\infty} i_{l_{kh}}(t) ; k = (a, b, c) . \quad (2.2)$$

Aplicando-se a lei de Kirchhoff para as correntes da Figura 2.3 obtém-se:

$$i_{s_k}(t) + i_{c_k}(t) = i_{l_k}(t) ; k = (a, b, c) . \quad (2.3)$$

Aplicando-se (2.1) e (2.2) em (2.3), pode-se escrever:

$$i_{s_k}(t) = i_{l_{k1}}(t) ; k = (a, b, c) , \quad (2.4)$$

onde verifica-se que as correntes drenadas da fonte de alimentação são compostas apenas pelos componentes fundamentais das correntes da carga.

Quando consideramos a operação dos filtros ativos paralelos, especificamente em sistemas trifásicos, pode-se ainda realizar uma análise visando a compensação de eventuais desequilíbrios de corrente entre as três fases.

Em regime permanente é possível decompor as correntes trifásicas distorcidas e desequilibradas em três séries de Fourier. Assim, em cada frequência harmônica se tem um conjunto de três fasores desequilibrados. A partir da teoria dos componentes ou coordenadas simétricas [20], é possível decompor cada conjunto de três fasores

desequilibrados em uma soma de três conjuntos simétricos de fasores equilibrados, denominados componentes ou coordenadas simétricas de seqüência positiva, negativa e zero. Os três fasores de mesma magnitude que representam os componentes de seqüência positiva das correntes numa dada freqüência têm a mesma seqüência de fases destas, enquanto que os componentes de seqüência negativa possuem a seqüência de fases oposta e os componentes de seqüência zero estão todos em fase.

Considerando-se que os componentes fundamentais das correntes da carga podem ser expressos por:

$$i_{l_{k1}}(t) = \sqrt{2}I_{l_{k1}} \sin(\omega_1 t + \delta_{l_{k1}}) ; k = (a, b, c) , \quad (2.5)$$

a transformação em componentes simétricos pode ser aplicada aos respectivos fasores:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{l_{01}} \\ \dot{I}_{l_{+1}} \\ \dot{I}_{l_{-1}} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{l_{a1}} \\ \dot{I}_{l_{b1}} \\ \dot{I}_{l_{c1}} \end{bmatrix} , \quad (2.6)$$

onde os índices “0”, “+” e “-” correspondem aos componentes de seqüência zero, positiva e negativa, respectivamente. O “.” sobre as variáveis indica fasor e α é o operador complexo dado por:

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ = e^{j\frac{2\pi}{3}} . \quad (2.7)$$

A transformada inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{l_{a1}} \\ \dot{I}_{l_{b1}} \\ \dot{I}_{l_{c1}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{l_{01}} \\ \dot{I}_{l_{+1}} \\ \dot{I}_{l_{-1}} \end{bmatrix} . \quad (2.8)$$

Aplicando-se estas transformações é possível escrever as expressões dos componentes fundamentais das correntes da carga (fases a, b e c) em termo dos seus componentes simétricos no tempo:

$$\left. \begin{aligned}
i_{l_{a1}}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{01}} \sin(w_1t + \delta_{01}) + \sqrt{2}I_{l_{+1}} \sin(w_1t + \delta_{+1}) + \\
&\quad + \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1}) \\
i_{l_{b1}}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{01}} \sin(w_1t + \delta_{01}) + \sqrt{2}I_{l_{+1}} \sin(w_1t + \delta_{+1} - \frac{2\pi}{3}) + \\
&\quad + \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1} + \frac{2\pi}{3}) \\
i_{l_{c1}}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{01}} \sin(w_1t + \delta_{01}) + \sqrt{2}I_{l_{+1}} \sin(w_1t + \delta_{+1} + \frac{2\pi}{3}) + \\
&\quad + \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1} - \frac{2\pi}{3})
\end{aligned} \right\} \cdot \quad (2.9)$$

Assumindo-se um sistema trifásico a três fios, ou seja, sem a conexão com o neutro, uma carga trifásica pode ser conectada na configuração delta ou estrela não aterrada. Nesta situação, não existirá o componente de seqüência zero nas correntes e (2.9) pode ser reescrita como se segue:

$$\left. \begin{aligned}
i_{l_{a1}}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{+1}} \sin(w_1t + \delta_{+1}) + \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1}) \\
i_{l_{b1}}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{+1}} \sin(w_1t + \delta_{+1} - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1} + \frac{2\pi}{3}) \\
i_{l_{c1}}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{+1}} \sin(w_1t + \delta_{+1} + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1} - \frac{2\pi}{3})
\end{aligned} \right\} \cdot \quad (2.10)$$

As cargas desequilibradas conectadas ao sistema elétrico são responsáveis pela introdução de componentes de seqüência negativa nas correntes e conseqüentemente pela introdução de componentes de seqüência negativa na tensão por causa das quedas de tensão provocadas pela circulação destes componentes pelas impedâncias do circuito. Por este motivo, os componentes de seqüência negativa de corrente no sistema elétrico são considerados indesejáveis.

A partir do princípio básico de injeção de correntes de compensação, é possível utilizar os filtros ativos paralelos para a compensação destes componentes indesejáveis fazendo com que as correntes de compensação injetadas pelo filtro ativo paralelo trifásico sejam iguais aos componentes fundamentais de seqüência negativa das correntes trifásicas da carga:

$$\left. \begin{aligned}
i_{c_a}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1}) \\
i_{c_b}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1} + \frac{2\pi}{3}) \\
i_{c_c}(t) &= \sqrt{2}I_{l_{-1}} \sin(w_1t + \delta_{-1} - \frac{2\pi}{3})
\end{aligned} \right\} \cdot \quad (2.11)$$

Em resumo, a utilização dos filtros ativos paralelos objetiva injetar correntes paralelas para compensar os componentes de corrente indesejáveis produzidos pelas cargas, de maneira a garantir um formato adequado para as correntes drenadas do sistema elétrico.

Filtro ativo série

A Figura 2.4 apresenta a configuração básica de um filtro ativo série. Ele consiste num inversor conectado em série com o sistema elétrico por meio de transformadores de acoplamento monofásicos. Assim como a concepção original do filtro ativo paralelo objetiva a compensação de componentes harmônicos de corrente provenientes das cargas, a concepção inicial do filtro ativo série é focada na compensação de componentes harmônicos de tensão provenientes do sistema elétrico [10].

O princípio básico de operação dos filtros ativos série segue o princípio da compensação de tensão série, de forma que o inversor conectado em série com a fonte de alimentação é modelado como uma fonte de tensão.

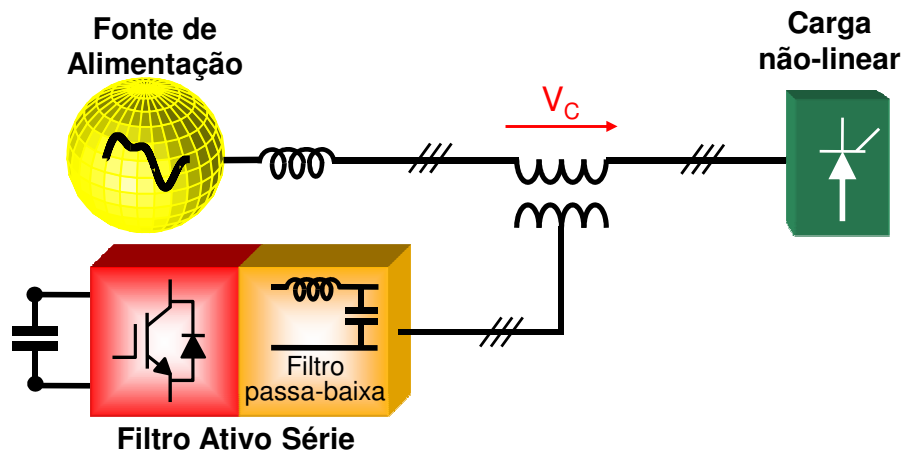


Figura 2.4: Filtro ativo série.

A mesma análise matemática realizada para o filtro ativo paralelo pode ser aplicada de forma dual para o filtro ativo série, demonstrando o seu princípio de compensação. Desta forma, as tensões fornecidas pelo sistema elétrico também podem ser decompostas em um somatório de componentes harmônicos e componentes simétricos da parcela fundamental. Considerando-se um sistema elétrico ideal, onde a tensão de fornecimento deve conter apenas o componente fundamental de seqüên-

cia positiva, um filtro ativo série trifásico pode ser utilizado para sintetizar tensões, $v_{c_k}(t)$ ($k = a, b, c$), que quando somadas com as tensões da fonte irão anular os componentes de tensão indesejáveis (componentes fundamentais de seqüência negativa e componentes harmônicos), fornecendo para a carga apenas tensões trifásicas balanceadas e sem harmônicos.

2.3 Condicionadores de energia baseados em filtros ativos

Serão apresentados a seguir alguns condicionadores de energia, correlacionados ao tema do presente trabalho, que utilizam os princípios dos filtros ativos de potência, série, paralelo e a combinação entre eles.

2.3.1 Compensador Estático Série

O Compensador Estático Série que será apresentado nesta seção é um equipamento *custom power*. De acordo com as nomenclaturas sugeridas pelo IEEE [9] o termo em inglês *Static Series Compensator* (SSC) que é utilizado para identificá-lo não deve ser confundido com o equipamento FACTS *Static Synchronous Series Compensator* (SSSC) - que é um compensador síncrono estático operando como um compensador série - e nem com o *Static Synchronous Compensator* (STATCOM), cuja sigla SSC, embora pouco usual, também é utilizada em algumas literaturas como referência a este último.

O Compensador Estático Série (SSC) é um dispositivo baseado em eletrônica de potência que sintetiza formas de onda a partir de um inversor de fonte de tensão (VSI) conectado em série com o sistema de distribuição, através de transformadores monofásicos, conforme ilustra a Figura 2.5. Dependendo do tipo de controle implementado, é possível corrigir os desbalanços de tensão provenientes da fonte, realizar a regulação de tensão na carga, compensar afundamentos e elevações de tensão e realizar o cancelamento dos componentes harmônicos de ordem baixa da tensão da fonte. Deste modo, o SSC atua no sentido de aumentar a qualidade da

tensão fornecida às cargas sensíveis ou críticas dos consumidores, isolando-os dos principais distúrbios do sistema. Com isto, verifica-se uma diminuição das perdas de receita relacionadas com problemas de QEE, pois deixam de afetar os processos dos consumidores.

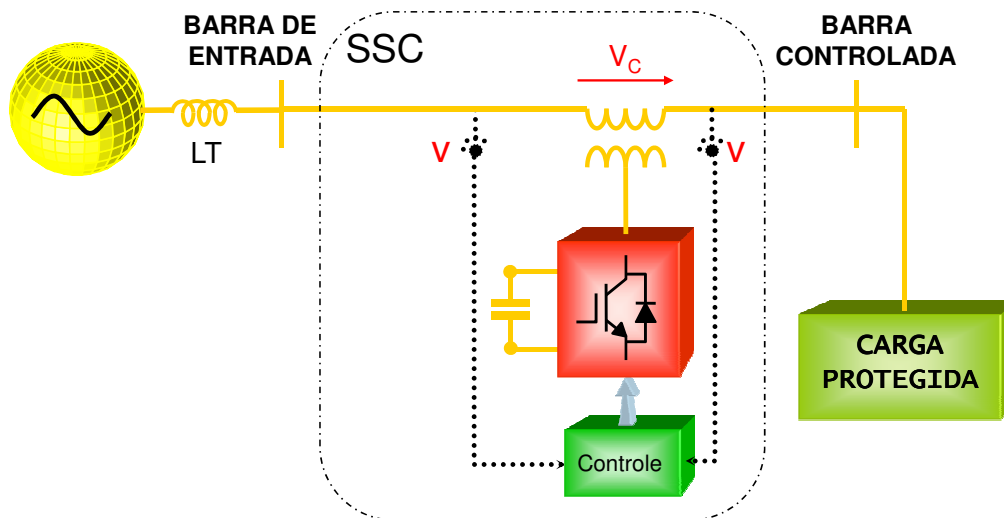


Figura 2.5: Configuração Básica do Compensador Estático Série.

O SSC é mais conhecido pelo seu nome comercial *Dynamic Voltage Restorer* (DVR), traduzido para a língua portuguesa como “Restaurador Dinâmico de Tensão”. Segundo informações disponibilizadas pelo escritório de marcas e patentes dos Estados Unidos (*United States Patent and Trademark Office - USPTO*), no ano de 1997 a Westinghouse Electric Corporation solicitou o registro tanto do nome *Dynamic Voltage Restorer*, quanto da sigla DVR, cedidos posteriormente para a Siemens Power Transmission & Distribution, Inc. Entretanto, tais solicitações foram negadas, pelo referido escritório, sob a alegação de que o nome *Dynamic Voltage Restorer* é uma mera descrição do produto ao qual se refere, e o pioneirismo da utilização de um termo descritivo não garante o direito de apropriação exclusiva de tal nome; já a sigla DVR foi considerada conflitante com a já registrada marca DVR para “reguladores de tensão elétrica”, sob a propriedade da empresa Marathon Electric. Diante destes entendimentos, os nomes “*Static Series Compensator*” e “*Dynamic Voltage Restorer*”, e respectivas siglas, são comumente utilizados como sinônimos na literatura técnica-científica.

Na sua forma mais básica (Figura 2.5), a estratégia de controle do SSC realiza a compensação dos afundamentos de tensão fornecendo apenas potência reativa,

injetando tensões em quadratura com as correntes do alimentador. Entretanto, a capacidade de compensação deste tipo de configuração é bastante limitada [21]. Como forma de contornar estas limitações é comum a utilização de fontes de armazenamento de energia (Banco de capacitores, baterias, volantes de inércia - *flywheel*) conectadas ao barramento CC do conversor, conforme ilustra a Figura 2.6. Esta configuração é denominada SES SSC, onde a sigla SES vem do termo inglês *stored energy system*, que pode ser traduzido para português como sistema de energia armazenada. Durante a ocorrência dos afundamentos de tensão, o SSC fornece a energia armazenada necessária para manter a tensão na carga constante. Portanto, o elemento armazenador de energia é diretamente responsável pela capacidade de compensação do SSC, pois o tempo e a severidade de um afundamento de tensão definem a quantidade de energia necessária para a compensação deste distúrbio.

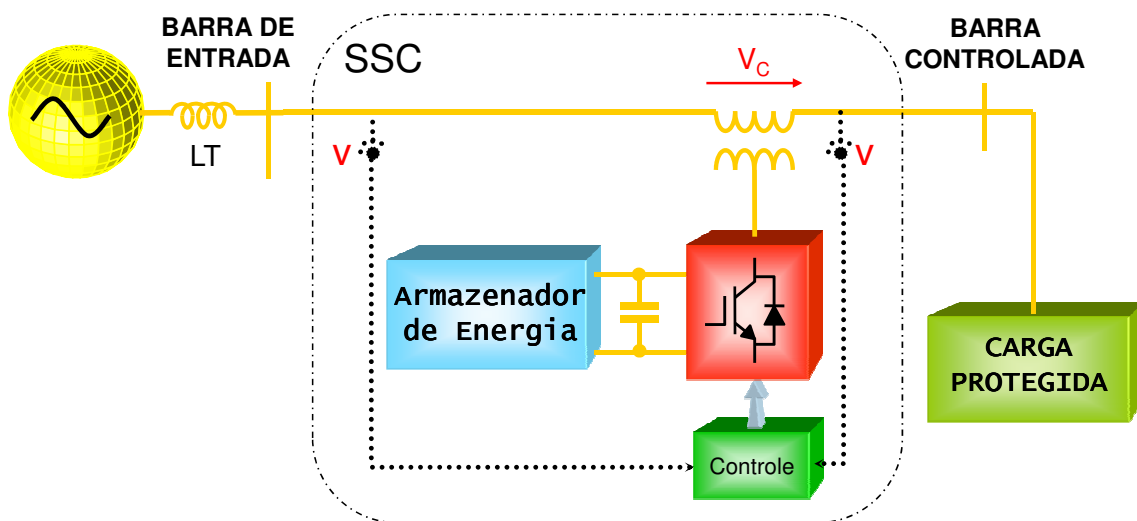


Figura 2.6: SSC com sistema de armazenamento de energia.

Existe ainda uma configuração para o SSC que utiliza a energia do próprio alimentador (*line energy supply* - LES) para realizar a compensação dos afundamentos de tensão. Isto é possível conectando-se um retificador não controlado a diodos em paralelo com o alimentador conforme ilustrado na Figura 2.7. O LES SSC é uma alternativa mais barata em relação a topologia SES SSC.

Entretanto, o retificador nesta configuração opera sob os efeitos dos distúrbios ocorridos na fonte, justamente no momento em que o equipamento necessita de realizar a compensação. Em outras palavras, o retificador deve cumprir o seu papel de fornecer energia para o elo CC, inclusive na presença de afundamentos, elevações

e, até mesmo, desbalanços na tensão da fonte. Diante deste fato, o capacitor do elo CC deve ser projetado para minimizar os efeitos desta limitação. Uma forma de se resolver este problema consiste em conectar o retificador na barra controlada, diminuindo bastante o valor do capacitor do elo CC.

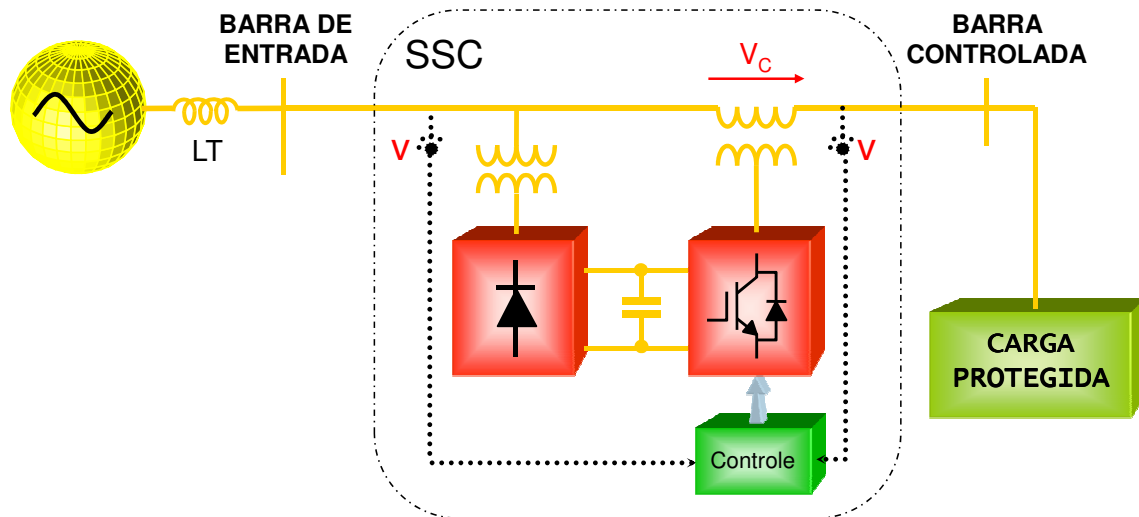


Figura 2.7: SSC com suprimento de energia pela rede.

2.3.2 Compensador Estático Paralelo (D-STATCOM)

A configuração típica de um Compensador Estático Paralelo tem como base um inversor trifásico com um capacitor no lado CC. Sua conexão com o sistema de distribuição é realizada por meio de transformadores de acoplamento, conforme ilustra a Figura 2.8.

O primeiro compensador estático paralelo baseado em conversores de tensão surgiu no Japão em 1976 e foi desenvolvido por um grupo de pesquisas japoneses ligado à Mitsubishi Electric Corporation e a Kansay Electric Co. Ltda [22]. Nesta época, este compensador ainda não tinha o nome de *Static Synchronous Compensator* (STATCOM), mas seu funcionamento era basicamente igual ao atual [23]. Este equipamento pode ser utilizado para fazer o controle do fator de potência, a regulação de tensão no ponto de conexão e melhorar a estabilidade dinâmica do sistema elétrico [24, 25].

Originalmente, o STATCOM foi concebido como sendo um equipamento do tipo

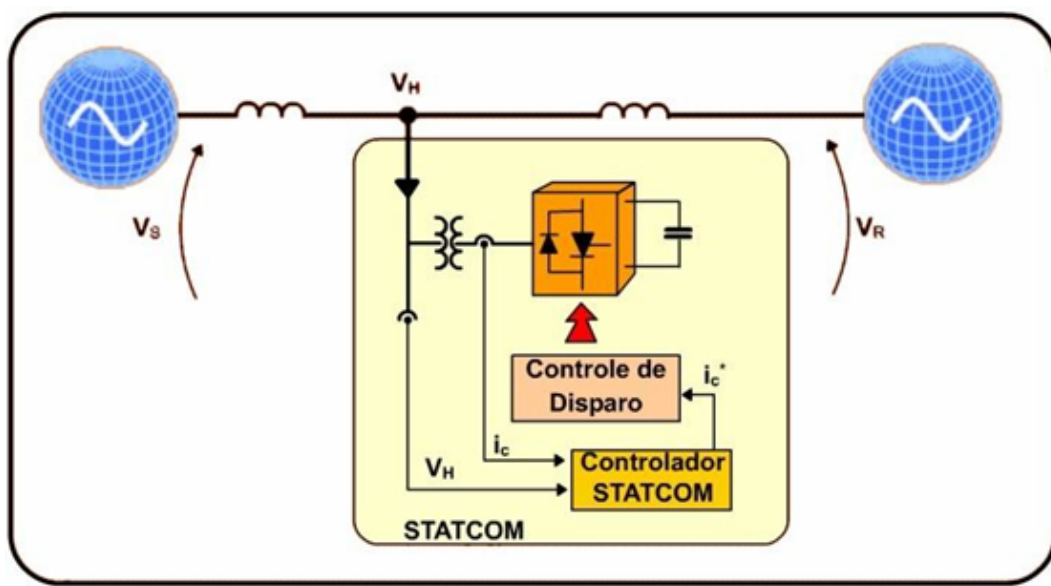


Figura 2.8: Configuração Básica do STATCOM.

FACTS (*Flexible AC Transmission System*) para ser aplicado em sistemas de transmissão, com o objetivo de melhorar a dinâmica do sistema elétrico, aumentando a sua estabilidade através da compensação de reativos. Entretanto, além das aplicações com potências da ordem de 50 a 100 MVA, outros STATCOM's com potências inferiores vêm sendo utilizados em redes de distribuição [23].

Na linha dos equipamentos condicionadores de energia *custom power*, o nome D-STATCOM é adotado como referência a um dispositivo do tipo Compensador Estático Paralelo (*Static Shunt Compensator*) aplicado, especificamente, na melhoria da QEE dos sistemas de distribuição.

O D-STATCOM também pode ser utilizado para auxiliar na redução dos componentes harmônicos nos sistemas de distribuição. Isto é possível utilizando-se os conversores de tensão acionados em altas frequências de chaveamento (PWM), permitindo um comportamento de um filtro ativo.

2.3.3 Compensador Estático Série-Paralelo

O compensador estático série paralelo é projetado para realizar tanto a compensação dos distúrbios de tensão provenientes do sistema, evitando que estes afetem uma carga sensível, quanto a compensação das correntes produzidas por cargas não-

lineares, evitando que elas introduzam problemas de QEE no sistema elétrico como: distorções harmônicas, flutuações de tensão, fator de potência [9].

A Figura 2.9 apresenta uma configuração típica de um compensador estático série paralelo, a partir da combinação de um inversor de fonte de tensão série e outro paralelo [26, 27, 28, 5]. Esta configuração é conhecida na literatura científica como Condicionador Unificado de Qualidade de Energia (*Unified Power Quality Conditioner* - UPQC), sendo aplicada em sistemas monofásicos e trifásicos.

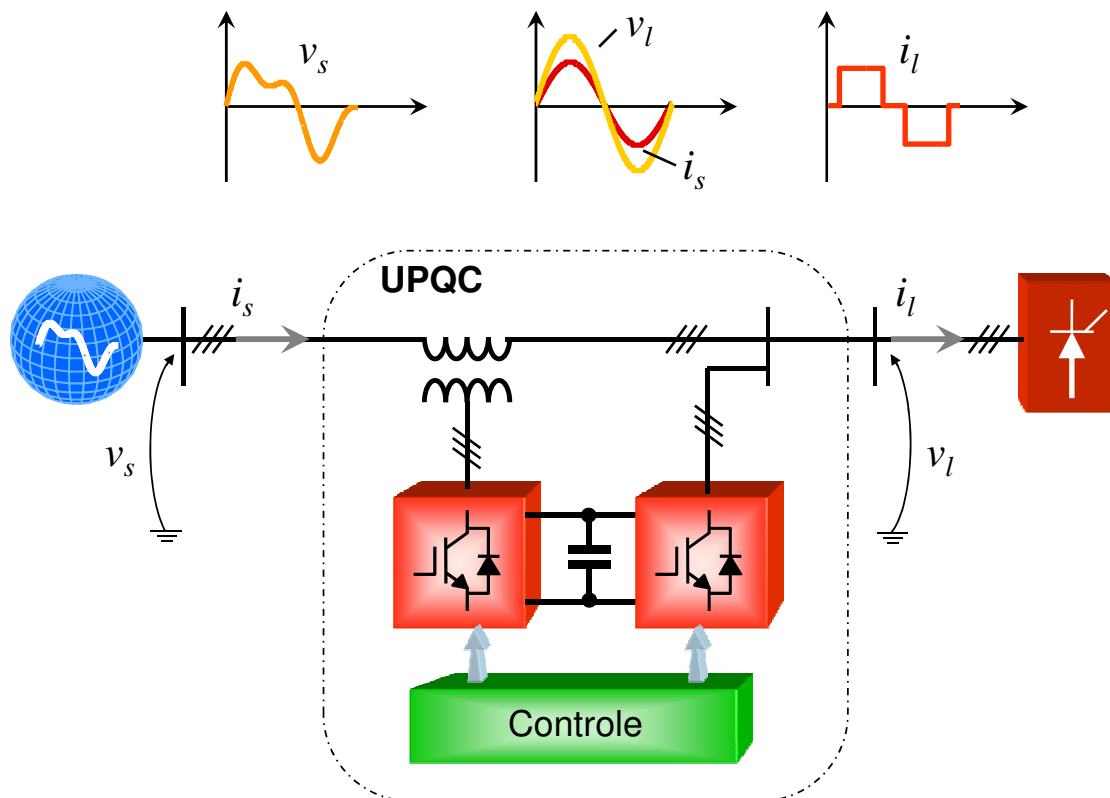


Figura 2.9: Configuração Básica do UPQC.

Embora o UPQC seja amplamente aplicado em sistemas trifásicos a três fios, o seu funcionamento em sistemas desequilibrados a quatro fios também é viável. Em [19], é apresentado um protótipo de um filtro ativo de potência série-paralelo trifásico a quatro fios cuja funcionalidade é a compensação simultânea das correntes da carga e tensões da fonte. Nesta implementação foram utilizados dois conversores de tensão trifásicos convencionais com três ramos numa configuração *back-to-back*, porém com o capacitor do lado CC em comum dividido e com seu ponto central diretamente conectado ao neutro do sistema trifásico a quatro fios. As estratégias de controle foram implementadas utilizando-se circuitos analógicos, de tal forma a forçar os

conversores série e paralelo a se comportarem como fontes controladas de tensão e corrente, respectivamente. O conversor paralelo ainda realiza a compensação da corrente de neutro da carga, de forma a eliminar a sua propagação para o sistema.

Na literatura científica são propostas diversas estratégias de controle para a compensação de correntes da carga e tensões da fonte. A definição destas estratégias depende da modelagem adotada para os filtros ativos série e paralelo.

A modelagem mais direta para o UPQC é realizada considerando-se a mesma modelagem dos filtros ativos série e paralelo independentes, ou seja, o filtro ativo série é modelado como uma fonte de tensão controlada e o paralelo como uma fonte de corrente controlada [26, 27, 28]. Desta forma, o objetivo do filtro ativo série é injetar tensões que, somadas com as tensões da fonte, fornecem para a carga tensões senoidais livres dos componentes indesejáveis das tensões da fonte. Já o filtro ativo paralelo objetiva injetar, no barramento onde encontra-se conectado, os componentes da corrente da carga que não devem se propagar para o sistema.

Entretanto, considerando-se a operação conjunta dos dois filtros ativos série e paralelo, pode-se considerar uma segunda modelagem onde o filtro ativo paralelo representa uma fonte de tensão senoidal e o filtro ativo série uma fonte de corrente senoidal [3, 4, 5, 6].

Ambas as modelagens produzem, em última análise, o mesmo efeito de fornecer para a carga tensões senoidais balanceadas e reguladas, mesmo na presença de tensões do sistema desbalanceadas, com harmônicos e não reguladas; além de compensar todos os componentes indesejáveis de corrente, drenando do sistema elétrico uma corrente senoidal e em fase com as tensões de seqüência positiva do sistema.

Na prática, as fontes de corrente e tensão modeladas são implementadas através de inversores PWM de tensão ou corrente controlados por estratégias de chaveamento, que de forma geral possuem a função de garantir que os sinais de compensação, calculados pelas estratégias de controle do filtro série e paralelo, sejam fielmente sintetizados pelos inversores PWM. Portanto, adotar uma modelagem para o UPQC que propicie a geração de sinais de compensação mais comportados pode influenciar de maneira positiva na dinâmica da malha de controle de chaveamento e, portanto, no desempenho do condicionador como um todo.

2.4 Sumário

O termo “condicionamento de energia” consiste na aplicação de soluções para a correção de problemas de qualidade da energia que afetam as cargas dos consumidores finais de energia. Desta forma, o termo “condicionador de energia” é utilizado para qualificar os equipamentos aplicados nos sistemas elétricos visando a melhoria da qualidade da energia elétrica.

Ao longo dos últimos 30 anos, os filtros ativos têm evoluído como uma importante tecnologia no contexto dos equipamentos condicionadores de energia. Atualmente, os filtros ativos vêm sendo utilizados na compensação de harmônicos e desequilíbrios de corrente e tensão, na correção de fator de potência, na eliminação de flutuação de tensão, na regulação de tensão e na compensação de variações de tensão de curta duração.

Os filtros ativos podem ter configurações monofásicas, trifásicas a três fios ou trifásicas a quatro fios, podendo ser do tipo série, paralelo ou uma combinação série-paralelo. Existem ainda, configurações híbridas de filtros ativos com passivos.

O princípio básico de funcionamento do filtro ativo paralelo segue o princípio da compensação das correntes paralelas, e o princípio básico de funcionamento do filtro ativo série segue o princípio da compensação das tensões série.

Foram apresentados alguns condicionadores de energia, que utilizam os princípios dos filtros ativos de potência. Dos condicionadores apresentados, o compensador estático série paralelo, também conhecido como UPQC, é o mais relevante para o presente trabalho. Este tipo de condicionador realiza a compensação dos distúrbios de tensão provenientes do sistema, evitando que estes afetem uma carga sensível. Também realizam a compensação dos distúrbios nas correntes produzidas pelas cargas não-lineares, evitando que elas se propaguem pelo sistema elétrico.

Existem duas principais modelagens para o condicionador série-paralelo: na primeira, o filtro série é representado por uma fonte de tensão não-senoidal e o paralelo por uma fonte de corrente não-senoidal; na segunda, o filtro série é modelado como uma fonte de corrente senoidal e o paralelo como uma fonte de tensão senoidal.

Capítulo 3

Contribuições as estratégias de controle do UPQC-i

O condicionador de energia objeto deste trabalho, denominado UPQC-i, consiste em um filtro ativo série-paralelo capaz de compensar tanto os distúrbios provenientes das tensões da fonte, quanto das correntes das cargas. O filtro ativo série é modelado como uma fonte de corrente senoidal, enquanto que o filtro ativo paralelo é modelado como uma fonte de tensão senoidal. O presente capítulo apresenta as estratégias de controle que foram adotadas com base nesta modelagem. Em seguida, o modelo ideal do UPQC-i implementado no programa de simulação computacional de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC e os resultados das simulações computacionais são apresentados com o objetivo de demonstrar e avaliar o seu princípio de funcionamento.

3.1 Modelagem do UPQC-i

O condicionador de energia que será estudado no presente trabalho possui uma configuração trifásica a três fios e é composto pela operação combinada de um filtro ativo série e outro paralelo, ambos implementados por inversores de fonte de tensão (VSI), conectados entre si através de um elemento armazenador de energia, no caso em questão, um capacitor no elo de corrente contínua dos inversores. O inversor que implementa o filtro ativo série é modelado como uma fonte de corrente senoidal, contendo apenas o componente fundamental de seqüência positiva, e o inversor que implementa o filtro ativo paralelo é modelado como uma fonte de tensão senoidal, também contendo apenas o componente fundamental de seqüência positiva, conforme ilustra a Figura 3.1.

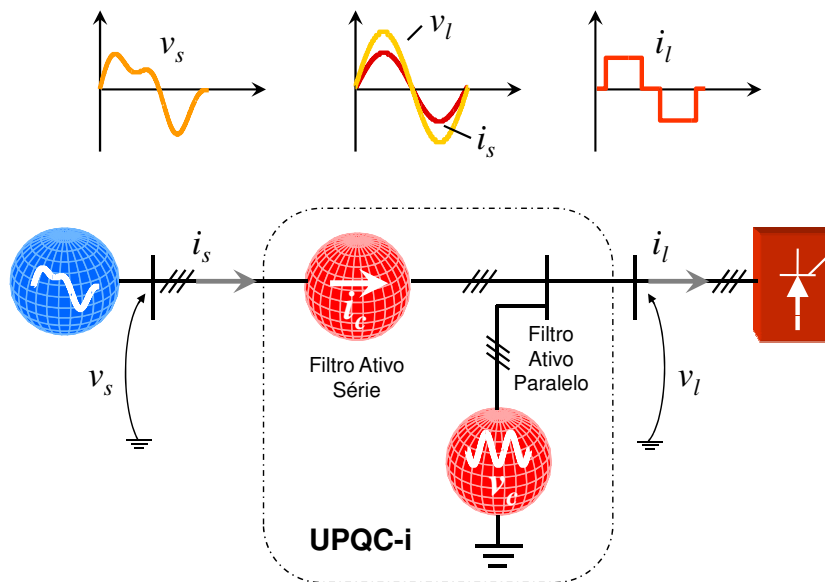


Figura 3.1: Modelagem do UPQC-i com fontes ideais.

O condicionador em questão será chamado de UPQC-i, onde o sufixo “i” é utilizado para caracterizar a modelagem invertida dos filtros ativos série e paralelo, em relação à modelagem tradicional do UPQC. O UPQC-i possui a função de compensar ou minimizar os problemas de QEE que afetam de forma mais relevante os processos industriais críticos, podendo representar perdas econômicas em última análise. Tais problemas de QEE, oriundos do sistema elétrico ou das cargas, são: VTCD, harmônicos de tensão, flutuações de tensão, desequilíbrios de tensão, harmônicos de corrente, desequilíbrios de corrente e baixo fator de potência.

A análise desta modelagem será realizada com o auxílio da representação monofásica, para cada uma das três fases, apresentada no diagrama de circuitos da Figura 3.2.

Antes de prosseguir nesta análise, é importante revisarmos o conceito de fontes ideais. As fontes são elementos de circuito elétrico, considerados ativos, capazes de fornecer energia na forma de tensão e corrente. Uma fonte ideal de tensão fornece tensões bem definidas nos seus terminais, independentemente da corrente consumida pela carga. Em outras palavras a corrente de uma fonte ideal de tensão é função apenas do circuito ao qual se encontra conectada. O dual da fonte ideal de tensão é a fonte ideal de corrente, que impõe uma corrente ao circuito e deixa a cargo deste a definição das tensões em seus terminais.

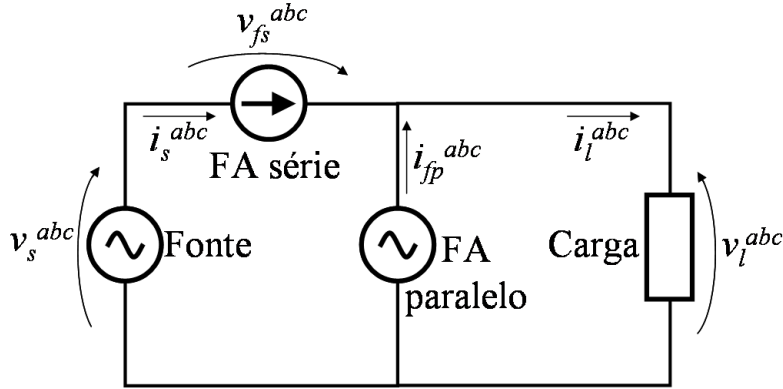


Figura 3.2: Circuito simplificado por fases do modelo do UPQC-i.

Considerando-se que as tensões da fonte de um sistema trifásico a três fios estejam desequilibradas e contenham distorções harmônicas, pode-se descrevê-las por:

$$v_s^{abc}(t) = v_{s+1}^{abc}(t) + v_{s-1}^{abc}(t) + \sum_{h=2}^{\infty} v_{s_h}^{abc}(t), \quad (3.1)$$

onde,

- $v_s^{abc}(t)$: tensões trifásicas do sistema elétrico (fonte);
- $v_{s+1}^{abc}(t)$: componentes fundamentais de seqüência positiva das tensões trifásicas do sistema elétrico (fonte);
- $v_{s-1}^{abc}(t)$: componentes fundamentais de seqüência negativa das tensões trifásicas do sistema elétrico (fonte);

- $v_{s_h}^{abc}(t)$: componente harmônico de ordem h das tensões trifásicas do sistema elétrico (fonte).

Da mesma forma, considerando-se uma carga trifásica desequilibrada e com conteúdo harmônico pode-se escrever:

$$i_l^{abc}(t) = i_{l_{+1}}^{abc}(t) + i_{l_{-1}}^{abc}(t) + \sum_{h=2}^{\infty} i_{l_h}^{abc}(t) , \quad (3.2)$$

onde,

- $i_l^{abc}(t)$: correntes trifásicas da carga;
- $i_{l_{+1}}^{abc}(t)$: componentes fundamentais de seqüência positiva das correntes trifásicas da carga;
- $i_{l_{-1}}^{abc}(t)$: componentes fundamentais de seqüência negativa das correntes trifásicas da carga;
- $i_{l_h}^{abc}(t)$: componente harmônico de ordem h das correntes trifásicas da carga.

Os componentes de seqüência positiva das correntes da carga, $i_{l_{+1}}^{abc}(t)$, podem conter uma defasagem angular em relação aos componentes de seqüência positiva das tensões da fonte, $v_{s_{+1}}^{abc}(t)$, de modo que estes componentes da corrente podem ser divididos em uma parcela ativa, em fase com a tensão, e uma parcela reativa, defasada de 90° elétricos em relação à tensão.

A partir da modelagem do filtro ativo série como uma fonte de corrente senoidal, é possível fazer com que a sua corrente, denominada $i_s^{abc}(t)$, seja igual à parcela ativa do componente $i_{l_{+1}}^{abc}(t)$ da corrente da carga. Desta forma, todos os outros componentes de corrente produzidos pela carga só possuem um único caminho de circulação no circuito da Figura 3.2, que é através da fonte de tensão do filtro ativo paralelo. Esta fonte de tensão, por sua vez, força que a tensão aplicada na carga, denominada $v_l^{abc}(t)$, seja igual ao componente $v_{s_{+1}}^{abc}(t)$ da tensão da fonte. Aplicando-se a segunda lei de kirchhoff é fácil provar que a tensão nos terminais da fonte de corrente é composta por todos os outros componentes da tensão da fonte.

Assim, a corrente drenada da fonte de alimentação possui um formato senoidal e em fase com o componente fundamental de seqüência positiva da tensão da fonte. Isto significa que as correntes harmônicas, desequilibradas e com fator de potência não unitário produzidas pela carga não são propagadas pela fonte de alimentação. Já a tensão aplicada na carga é equilibrada e possui um formato senoidal sem conteúdos harmônicos, independente da tensão fornecida pela fonte de alimentação. Desta forma, os problemas de QEE provenientes do sistema elétrico, referentes aos harmônicos, desequilíbrios e flutuações de tensão, não se propagam para a carga e os problemas de QEE provenientes da carga não se propagam para o sistema elétrico.

Conforme apresentado na Seção 2.3.1, durante a ocorrência de um distúrbio do tipo VTCD o filtro ativo deve fornecer a energia ativa necessária para manter a tensão na carga constante. O UPQC-i realiza isto retirando esta energia do próprio sistema elétrico. Na presença de um VTCD a corrente sintetizada pelo filtro ativo série associada com a tensão do sistema (fonte) produz a mesma potência ativa consumida pela carga, que é alimentada pela tensão sintetizada pelo inversor do filtro ativo paralelo. Tal tensão está em fase com o componente $v_{s+1}^{abc}(t)$ da tensão da fonte, porém com um valor de amplitude igual ao valor nominal da tensão no barramento da carga.

Na situação em que a carga é a mesma antes e durante a ocorrência do VTCD, a amplitude da corrente drenada da fonte - que é imposta e sintetizada pelo filtro ativo série - será maior durante do que antes da ocorrência do distúrbio, caso este seja do tipo afundamento de tensão; e menor, caso seja uma elevação de tensão.

Nesta topologia, o filtro ativo paralelo é conectado ao barramento da carga. Uma das conseqüências negativas é que a todo instante circula pelo inversor série a corrente total que é drenada do sistema elétrico (fonte). Durante a ocorrência de um afundamento na tensão da fonte, o efeito é que a corrente drenada da fonte eleva-se em relação ao seu valor de operação para manter constante a potência entregue à carga. Isto influencia diretamente a especificação dos valores nominais dos inversores.

3.2 Estratégia de Controle do UPQC-i

Um dos objetivos da modelagem adotada para os inversores série e paralelo é possibilitar uma estratégia de controle mais simples e com um desempenho satisfatório, otimizando os algoritmos de controle para a sua implementação prática em microprocessadores do tipo DSP.

Antes de se descrever a estratégia de controle do condicionador de energia UPQC-i, a teoria das potências ativa e reativa instantâneas, denominada Teoria p-q, e o circuito de sincronismo PLL serão apresentados de forma sucinta.

3.2.1 Teoria p-q

Em 1983, Akagi et al [16, 17] propuseram um conjunto de definições para a potência real (ativa) e para a potência imaginária (reativa) no domínio do tempo. Inicialmente, esta teoria foi desenvolvida apenas para sistemas trifásicos a três fios com uma pequena menção a sistemas com neutro. Posteriormente, ela foi estendida em detalhes para sistemas trifásicos a quatro fios por Watanabe et al [29].

Em situações em que o sistema apresenta tensões e correntes senoidais e balanceadas, as definições das potências ativa e reativa convencionais proporcionam resultados satisfatórios. Porém, uma análise mais detalhada mostra que a validade física destas definições não é confirmada quando o sistema apresenta tensões e/ou correntes distorcidas e/ou desequilibradas.

Ao contrário da teoria convencional, a Teoria p-q apresenta resultados satisfatórios tanto em sistemas em que as tensões e correntes são senoidais e balanceadas, quanto naqueles em que as tensões e correntes estão desbalanceadas e/ou distorcidas. Na verdade, pode-se dizer que a teoria convencional é um caso particular da Teoria p-q, não havendo nenhuma contradição entre ambas.

A Teoria p-q é caracterizada pela aplicação da Transformação de Clarke nas tensões e correntes do sistema trifásico, resultando na transformação algébrica das tensões e correntes nas coordenadas a-b-c para um outro sistema de coordenadas α - β -0, obtendo-se, assim, um novo sistema de referência estacionário, onde as coordenadas

α - β -0 são ortogonais. A transformação direta para as tensões é caracterizada por meio de

$$\begin{bmatrix} v_0(t) \\ v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix}, \quad (3.3)$$

e a transformação inversa é obtida por:

$$\begin{bmatrix} v_a(t) \\ v_b(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1 & 0 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0(t) \\ v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \end{bmatrix}. \quad (3.4)$$

As matrizes de transformação (Transformadas de Clarke) utilizadas em (3.3) e (3.4) também podem ser aplicadas para as correntes. Uma vez determinadas as tensões e correntes nas coordenadas de Clarke, as potências instantâneas de seqüência zero, real e imaginária são definidas por meio de

$$\begin{bmatrix} p_0(t) \\ p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0(t) & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha(t) & v_\beta(t) \\ 0 & v_\beta(t) & -v_\alpha(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0(t) \\ i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix}. \quad (3.5)$$

A potência ativa trifásica instantânea, $p_3\phi$, em termos das variáveis nas coordenadas a-b-c e α - β -0 é dada pela equação (3.6), que é o resultado da composição da potência real, p , com a potência de seqüência zero, p_0 :

$$p_3\phi = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = p + p_0. \quad (3.6)$$

Já a potência imaginária, q , é definida por:

$$q = \frac{1}{\sqrt{3}} [(v_a - v_b) i_c + (v_b - v_c) i_a + (v_c - v_a) i_b] = -v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha. \quad (3.7)$$

As correntes e tensões em (3.5) podem conter harmônicos e desequilíbrios. Desta

forma, as potências instantâneas real (p), imaginária (q) e de seqüência zero (p_0) podem ser separadas em componentes médios (\bar{p} , \bar{q} e \bar{p}_0) e oscilantes (\tilde{p} , \tilde{q} e \tilde{p}_0).

Considerando-se um circuito trifásico a três fios, ou seja, sem a utilização do condutor neutro, (3.5) pode ser simplificada:

$$\begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha(t) & v_\beta(t) \\ v_\beta(t) & -v_\alpha(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix}, \quad (3.8)$$

onde os componentes de seqüência zero são eliminados. A operação inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha(t) & v_\beta(t) \\ v_\beta(t) & -v_\alpha(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p(t) \\ q(t) \end{bmatrix}. \quad (3.9)$$

3.2.2 PLL trifásico

Os circuitos de sincronismo do tipo PLL trifásico são estruturas robustas, que podem rejeitar altos níveis de ruído e harmônicos ou desequilíbrio que estejam contidos nas tensões trifásicas do sistema elétrico [30]. Desta forma, é possível realizar o sincronismo com relação aos componentes de seqüência positiva de um conjunto genérico de tensões ou correntes trifásicas.

Os circuitos de sincronismo PLL podem ser do tipo p-PLL e q-PLL. Ambos possuem um sentido físico que pode ser explicado com o auxílio da teoria p-q, e se diferenciam pela utilização das potências instantâneas real e imaginária, respectivamente. Os diagramas de blocos destes circuitos são apresentados na Figura 3.3.

Diversos estudos bem detalhados sobre as características e funcionamento destes circuitos de sincronismo podem ser encontrados na literatura [30, 31] e, portanto, não serão analisados neste documento.

O PLL utilizado na estratégia de controle do UPQC-i é o q-PLL, pois o seu algoritmo produz um sinal de sincronismo ($\Theta_c = wt + \phi$) que está em fase com o componente de seqüência positiva da coordenada “ α ” do sinal de entrada.

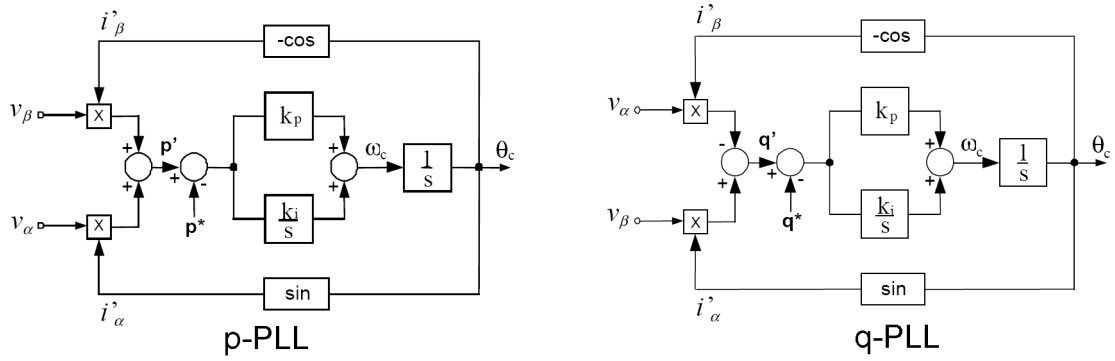


Figura 3.3: Circuitos de sincronismo p-PLL e q-PLL.

Os sinais de entrada v_α e v_β devem ser normalizados e os ganhos proporcional e integral do controlador PI que fornecem uma resposta dinâmica satisfatória com estabilidade são, respectivamente, 20 e 1000.

3.2.3 Descrição da estratégia de controle

Nesta seção serão apresentadas duas estratégias de controle para o UPQC-i, assim denominadas: reduzida e adaptativa. A diferença entre elas está no controle do filtro ativo paralelo. Ambas são compostas pelo circuito de sincronismo, pelos algoritmos de controle do filtro ativo série e paralelo, modelados como fontes ideais conforme a Figura 3.1, e pelo controle da tensão do elo de corrente contínua, responsável pelo fluxo de energia entre as fontes ideais e pela correta operação dos inversores VSI na modelagem real a ser apresentada no Capítulo 4.

O algoritmo de controle será proposto para a operação do UPQC-i num sistema trifásico a três fios. Portanto, uma vez definidas as grandezas elétricas utilizadas no controle, pode-se reduzir o número de medições necessárias excluindo-se a leitura de uma das três fases.

As grandezas elétricas de entrada de ambas as estratégias de controle são: duas tensões de linha da fonte (v_{abs} e v_{bcs}), duas correntes da carga (i_{al} e i_{bl}) e a tensão do elo CC. As tensões e correntes são convertidas para pu nas bases 311V e 20A, respectivamente.

A Figura 3.4 apresenta o diagrama de blocos da estratégia de controle redu-

zida. As tensões de linha da fonte e as correntes da carga são convertidas para as coordenadas α - β de acordo com as transformações de Clarke definidas por:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha(t) \\ v_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ab}(t) \\ v_{bc}(t) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

e

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3}/2 & 0 \\ 1/2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \end{bmatrix}. \quad (3.11)$$

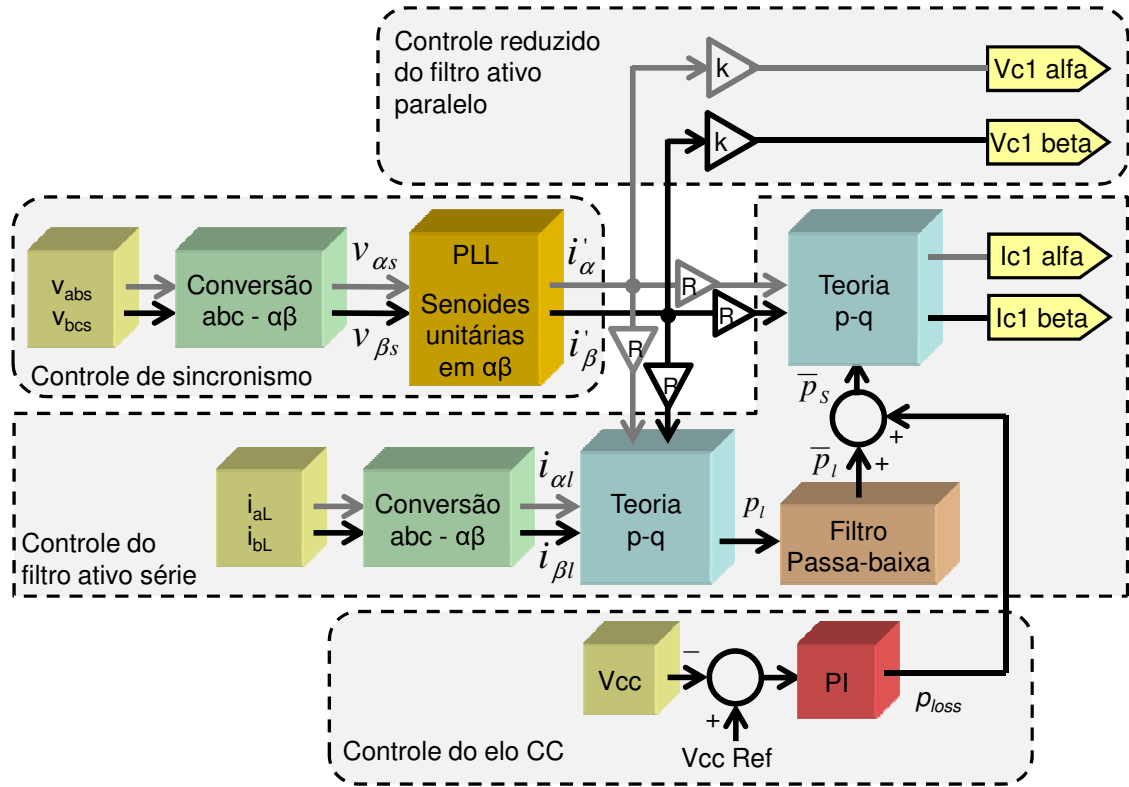


Figura 3.4: Diagrama de blocos do algoritmo de controle reduzido do UPQC-i.

As tensões da fonte, convertidas para as coordenadas α - β , são utilizadas como sinais de entrada do circuito de sincronismo q-PLL (Figura 3.3), fazendo-se o sinal de referência $q^* = 0$. O q-PLL atingirá o sincronismo em regime permanente quando o valor médio do sinal de entrada (q') do controlador PI for nulo (igual a zero). Nesta situação, a frequência angular w_c (rad/s), gerada pelo q-PLL, será igual à frequência angular fundamental do sistema w (rad/s) e os sinais de realimentação i'_α

e i'_β , que são senóides de amplitude unitária, estarão em fase com os componentes de seqüência positiva das tensões da fonte (sistema) v_α e v_β . É importante ressaltar que as variáveis i'_α e i'_β têm nomenclatura de corrente proveniente do circuito q-PLL.

As lógicas de controle que serão explicadas utilizam a Teoria p-q com os sinais senoidais unitários do q-PLL, i'_α e i'_β no lugar dos componentes v_α e v_β de (3.8), respectivamente. Isto simplifica o cálculo da transformação inversa, dado por (3.9), pois o somatório dos quadrados dos sinais i'_α e i'_β fornece um valor unitário constante.

No controle reduzido do filtro ativo paralelo a tensão na carga é controlada o tempo todo sem a necessidade de se identificar a ocorrência ou não de um distúrbio de tensão do tipo VTCD. As tensões de referência do filtro ativo paralelo $v_{c1\alpha}$ e $v_{c1\beta}$ são calculadas multiplicando-se os sinais $i'_\alpha(t)$ e $i'_\beta(t)$ por um fator $k(\Omega)$, sempre constante, para modular estes sinais de amplitudes unitárias em um valor constante, por exemplo o valor nominal de tensão do barramento.

O diagrama de blocos do controle adaptativo é apresentado na Figura 3.5. Ele tem este nome por distinguir dois pontos de operação para o controle do filtro ativo paralelo: com ou sem a ocorrência de VTCD.

A ocorrência de VTCDs nas tensões da fonte é detectada quando a amplitude do componente de seqüência positiva destas tensões sofre variações que excedem os limites preestabelecidos. Para se calcular estes componentes primeiramente utiliza-se a teoria p-q para se determinar a potência real instantânea (p), através de:

$$\begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i'_\alpha(t) & i'_\beta(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{\alpha s}(t) \\ v_{\beta s}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.12)$$

O cálculo do componente médio (\bar{p}) desta potência é realizado por um filtro passa-baixa. Finalmente, os componentes de seqüência positiva das tensões da fonte $v_{+1\alpha s}$ e $v_{+1\beta s}$ são calculados aplicando-se esta potência média no cálculo inverso, dado pela equação matricial:

$$\begin{bmatrix} v_{+1\alpha s}(t) \\ v_{+1\beta s}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i'_\alpha(t) & 0 \\ i'_\beta(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p} \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.13)$$

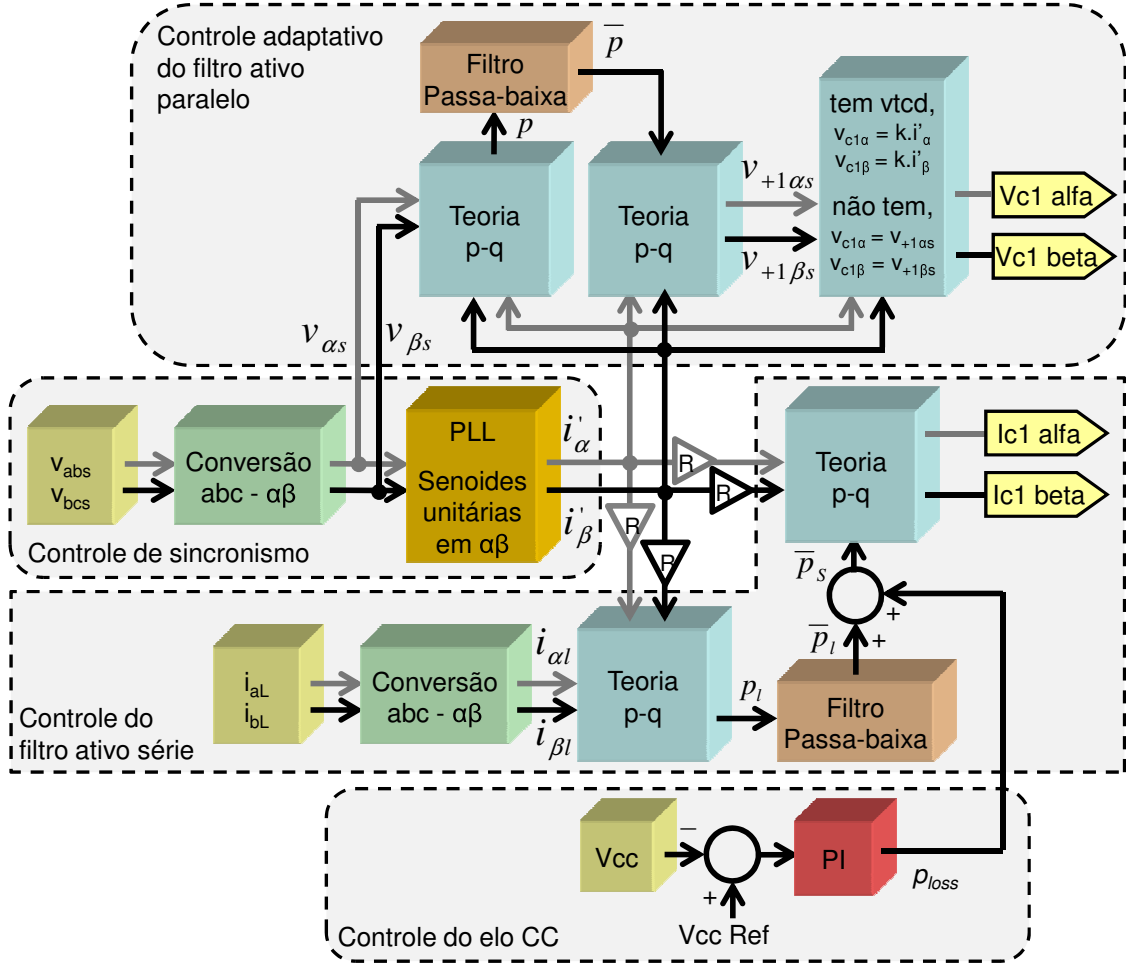


Figura 3.5: Diagrama de blocos do algoritmo de controle adaptativo do UPQC-i.

O cálculo da amplitude dos componentes de seqüência positiva das tensões da fonte, no domínio do tempo, é realizado através da expressão do valor coletivo:

$$\hat{v} = \sqrt{v_{+1\alpha_s}^2(t) + v_{+1\beta_s}^2(t)}. \quad (3.14)$$

Caso o valor da amplitude permaneça dentro dos limites preestabelecidos, os sinais de referência que o filtro ativo paralelo deverá sintetizar, denominados $v_{C1\alpha}$ e $v_{C1\beta}$, são exatamente iguais aos componentes fundamentais de seqüência positiva das tensões da fonte, $v_{+1\alpha_s}(t)$ e $v_{+1\beta_s}(t)$. Como os sinais senoidais unitários, $i'_\alpha(t)$ e $i'_\beta(t)$, provenientes do q-PLL, estão em fase com os componentes $v_{+1\alpha_s}(t)$ e $v_{+1\beta_s}(t)$, para o caso em que a amplitude calculada esteja fora dos limites preestabelecidos, estes sinais, $i'_\alpha(t)$ e $i'_\beta(t)$, são utilizados como sinais de referência para o filtro ativo paralelo, desde que multiplicados por um fator $k(\Omega)$ para modular estes sinais unitá-

rios de tal forma a fixar as suas amplitudes dentro dos limites preestabelecidos. Na simulação ideal, que será apresentada neste capítulo, este fator $k(\Omega)$ foi calculado para regular a tensão nos limites máximo ou mínimo preestabelecidos, durante a ocorrência de elevações ou afundamentos de tensão, respectivamente.

Analisando-se a operação do condicionador UPQC-i durante a ocorrência de variações de tensão na fonte, percebe-se que quando o componente fundamental de seqüência positiva da tensão da fonte é diferente daquele fornecido pelo filtro ativo paralelo à carga, surge, necessariamente, nos terminais do filtro ativo série (fonte de corrente) uma tensão fundamental de seqüência positiva, cuja amplitude é exatamente igual a esta diferença. Como o filtro ativo série possui a função de fixar correntes senoidais e em fase com os componentes fundamentais de seqüência positiva das tensões da fonte, estas correntes associadas às tensões sobre os seus terminais indicam a síntese, por parte do filtro ativo série, de uma potência instantânea real média positiva ou negativa, dependendo se o distúrbio é do tipo afundamento ou elevação de tensão, respectivamente. Na implementação real, tal potência média positiva ou negativa é fornecida ou absorvida pelo capacitor do elo de corrente contínua que, por sua vez, recebe ou fornece esta potência através do filtro ativo paralelo. Em última análise, existe uma circulação de potência real média entre os filtros ativos série-paralelo do UPQC-i.

Diante do exposto, a estratégia de controle adaptativa atende aos valores limites de tensão preestabelecidos e ao mesmo tempo minimiza a circulação de potência instantânea média real entre os filtros ativos paralelo e série, pois a compensação do afundamento ou elevação de tensão, e conseqüentemente a síntese de potência ativa pelos filtros ativos série e paralelo, só ocorre quando a tensão da fonte encontra-se fora da faixa considerada normal. Já o controle reduzido é um caso particular do controle adaptativo, pois a amplitude da carga é mantida constante no seu valor nominal (ganho $k(\Omega)$ constante) mesmo que a variação de tensão na fonte esteja dentro dos limites considerados normais.

Até este ponto, foram descritas as estratégias de controle do filtro ativo paralelo (reduzido e adaptativo) e do sincronismo. O controle do filtro ativo série também recebe os sinais de sincronismo do q-PLL, $i'_\alpha(t)$ e $i'_\beta(t)$. Multiplicados pelo ganho unitário $R(\Omega)$, estes sinais são utilizados nas transformações direta e inversa da teoria

p-q para se calcular as correntes senoidais de referência, que devem ser sintetizadas pela fonte de corrente que modela o filtro série.

A potência real instantânea das correntes da carga é calculada por:

$$\begin{bmatrix} p_l(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R.i'_\alpha(t) & R.i'_\beta(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha l}(t) \\ i_{\beta l}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.15)$$

O componente médio desta potência, denominado $\bar{p}_l(t)$, é calculado utilizando-se, por exemplo, um filtro passa-baixa projetado para ter um ganho unitário para a frequência igual a zero e uma frequência de corte adequada para remover as frequências presentes em $\bar{p}_l(t)$.

Simultaneamente, o algoritmo de controle da tensão do elo CC calcula o sinal $p_{loss}(t)$ utilizando um controlador clássico do tipo proporcional-integral (PI), cujo objetivo é zerar o erro entre o valor da tensão medida e o valor de referência desejado. Quando isto ocorrer, a saída do controlador PI fornece o sinal $p_{loss}(t)$ que representará, na transformação inversa, a parcela da corrente fundamental de referência que deve ser drenada da fonte para manter a tensão no elo de corrente contínua igual ao valor de referência. Nesta potência estão inclusas as perdas do UPQC-i.

Somando-se os sinais $\bar{p}_l(t)$ e $p_{loss}(t)$, conforme (3.16), obtém-se o sinal $\bar{p}_s(t)$. Este sinal é, então, utilizado na transformação inversa da teoria p-q (3.17) para se calcular os sinais de referência da fonte de corrente que modela o filtro ativo série, denominados $i_{C1\alpha}(t)$ e $i_{C1\beta}(t)$.

$$\bar{p}_s(t) = \bar{p}_l(t) + p_{loss}(t). \quad (3.16)$$

$$\begin{bmatrix} i_{C1\alpha}(t) \\ i_{C1\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R.i'_\alpha(t) & 0 \\ R.i'_\beta(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_s(t) \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.17)$$

Na transformação inversa, as correntes de referência, $i_{C1\alpha}(t)$ e $i_{C1\beta}(t)$, podem ser divididas em duas parcelas, dadas por:

$$\begin{aligned} i_{C1\alpha}(t) &= i_{l\alpha+1}(t) + i_{ploss\alpha}(t) \\ i_{C1\beta}(t) &= i_{l\beta+1}(t) + i_{ploss\beta}(t) \end{aligned} \quad (3.18)$$

onde $i_{l\alpha+1}(t)$ e $i_{l\beta+1}(t)$ são referentes ao componente de potência $\bar{p}_l(t)$ e correspondem à parcela ativa dos componentes fundamentais de seqüência positiva das correntes da carga.

Quando as tensões senoidais, impostas nas cargas pelo filtro paralelo, forem iguais aos componentes de seqüência positiva da tensão da fonte, para se manter o balanço de potência entre a fonte e a carga, as correntes senoidais da fonte (sintetizadas pelo filtro série) são iguais aos componentes da carga, $i_{l\alpha+1}(t)$ e $i_{l\beta+1}(t)$, a menos, é claro, dos componentes $i_{ploss\alpha}(t)$ e $i_{ploss\beta}(t)$ para se manter a tensão no capacitor constante.

Por outro lado, quando os componentes de seqüência positiva das tensões da fonte sofrerem variações, o balanço de potência entre a carga e a fonte é obtido somente quando a amplitude das correntes de referência $i_{C1\alpha}(t)$ e $i_{C1\beta}(t)$, sintetizadas pelo filtro série, aumentar ou diminuir, dependendo se a variação for um afundamento ou elevação, respectivamente. Entretanto, devido à estratégia de controle adotada, os componentes $i_{l\alpha+1}(t)$ e $i_{l\beta+1}(t)$ não se alteram por causa desta condição e continuam fornecendo os componentes fundamentais de seqüência positiva das correntes da carga. O que ocorre, é que no instante inicial de um afundamento na tensão da entrada, a potência consumida pela carga passa a ser maior do que aquela fornecida pela fonte, logo, essa diferença de potência é suprida pela energia armazenada no capacitor do elo CC. Com isto, a tensão sobre o capacitor diminui e o erro na entrada do controlador PI irá aumentar, fazendo com que o sinal de saída $p_{loss}(t)$ também aumente. Um sinal maior de $p_{loss}(t)$ provoca o aumento dos componentes de corrente $i_{ploss\alpha}(t)$ e $i_{ploss\beta}(t)$, que compõem os sinais de referência de corrente $i_{C1\alpha}(t)$ e $i_{C1\beta}(t)$. Portanto, após o transitório inicial, o sinal $p_{loss}(t)$ do controlador PI alcança um novo ponto de operação, responsável por manter o balanço da potência entre a fonte e a carga.

Após a determinação dos sinais de compensação do filtro ativo paralelo ($v_{C1\alpha}$ e $v_{C1\beta}$) e do série ($i_{C1\alpha}$ e $i_{C1\beta}$) é necessário realizar a transformação das coordenadas α - β para as coordenadas a-b-c. As transformações realizadas por (3.19) e (3.20)

forneem as tensões e as correntes, respectivamente, que deverão ser sintetizadas pelas fontes ideais que modelam o UPQC-i.

$$\begin{bmatrix} v_{C1a}(t) \\ v_{C1b}(t) \\ v_{C1c}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/3 & 0 \\ -1/3 & 1/\sqrt{3} \\ -1/3 & -1/\sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{C1\alpha}(t) \\ v_{C1\beta}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.19)$$

$$\begin{bmatrix} i_{C1a}(t) \\ i_{C1b}(t) \\ i_{C1c}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2/\sqrt{3} & 0 \\ -1/\sqrt{3} & 1 \\ -1/\sqrt{3} & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{C1\alpha}(t) \\ i_{C1\beta}(t) \end{bmatrix}. \quad (3.20)$$

3.3 Modelo digital ideal do UPQC-i

Uma das formas de se realizar a comprovação da modelagem e da estratégia de controle, apresentadas para o condicionador UPQC-i, é através de simulações computacionais utilizando-se programas de simulação de transitórios eletromagnéticos. O programa escolhido para a realização desta tarefa é o PSCAD . Maiores informações sobre a importância das simulações e sobre o PSCAD serão apresentadas nas Seções 4.1 e 4.2.

Para se realizar as simulações, é necessário implementar digitalmente o modelo ideal do UPQC-i no PSCAD, conforme ilustra a Figura 3.6. Pode-se observar nesta figura, que o modelo digital ideal utiliza uma fonte ideal de corrente do PSCAD para representar o filtro ativo série e sintetizar as correntes de compensação calculadas pela estratégia de controle. De forma análoga uma fonte ideal de tensão é utilizada para representar o filtro ativo paralelo e sintetizar as tensões de compensação, também calculadas pela estratégia de controle.

As estratégias de controle apresentadas na Seção 3.2 são implementadas em linguagem Fortran, contendo expressões matemáticas que traduzem exatamente os diagramas de bloco ilustrados na Figura 3.5.

A energia fornecida pelas fontes ideais de corrente e tensão que modelam o UPQC-i é proveniente da fonte de alimentação. Portanto, a energia, no lado de

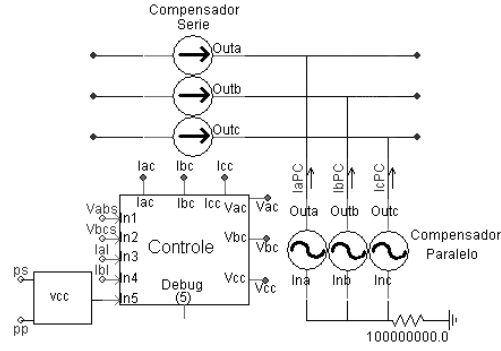


Figura 3.6: Diagrama de blocos do modelo ideal do UPQC-i no PSCAD.

corrente alternada, fornecida ou absorvida pela fonte de corrente do filtro ativo série é, respectivamente, absorvida ou fornecida pela fonte de tensão do filtro ativo paralelo, de tal forma que a energia líquida, calculada por:

$$E_l(t) = \int_{-\infty}^t (p_{fs}(\tau) + p_{fp}(\tau)) d\tau, \quad (3.21)$$

onde,

- p_{fs} : potência absorvida ou fornecida do filtro ativo série;
- p_{fp} : potência absorvida ou fornecida do filtro ativo paralelo;

deve ser nula em regime permanente. Na implementação real, esta transferência de energia é realizada através do capacitor do elo de corrente contínua que interliga os dois filtros ativos. Se por algum motivo a energia líquida entre os filtros ativos não for nula, ela será armazenada no capacitor do elo de corrente contínua, caso esta resultante seja negativa; ou absorvida do capacitor, caso seja positiva, obedecendo o balanço energético dado por:

$$E_c(t) + E_l(t) = 0, \quad (3.22)$$

onde,

- E_c : energia do capacitor do elo CC.

Esta variação de energia num capacitor representa uma variação quadrática na tensão dos seus terminais dada por:

$$E_C(t) = \frac{1}{2} C v^2(t) . \quad (3.23)$$

Desta forma, controlar a tensão do capacitor de forma a mantê-la constante, consiste em manter nula a energia líquida entre os filtros ativos. Como no modelo ideal os filtros ativos série e paralelo são representados por fontes ideais, não existe um elo de corrente contínua interligando-as. Entretanto, pode-se incluir a modelagem do capacitor do elo CC e estimar a tensão sobre os seus terminais. Substituindo-se (3.23) e (3.21) em (3.22) tem-se:

$$\frac{1}{2} C v^2(t) + \int_{-\infty}^t (p_{fs}(\tau) + p_{fp}(\tau)) d\tau = 0 , \quad (3.24)$$

e manipulando-se seus termos obtém-se o valor da tensão sobre os terminais do capacitor, dado por:

$$v(t) = \sqrt{-\frac{2}{C} \int_{-\infty}^t (p_{fs}(\tau) + p_{fp}(\tau)) d\tau} \quad (3.25)$$

A Figura 3.7 apresenta o diagrama de blocos modelado digitalmente no PSCAD para calcular o valor da tensão nos terminais do capacitor fictício do modelo digital ideal do UPQC-i. Este diagrama está contido dentro do bloco, denominado Vcc, da Figura 3.6. O valor do capacitor adotado para esta modelagem é de $9400\mu F$, que consiste no valor do capacitor projetado para o inversor real, que será utilizado na implementação do protótipo experimental do UPQC-i.

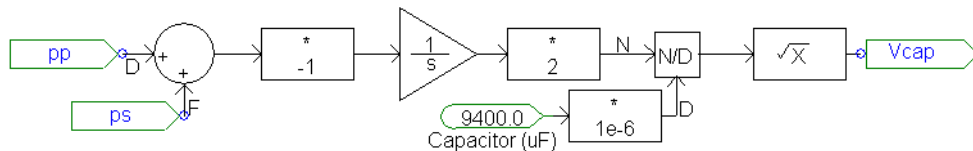


Figura 3.7: Diagrama de blocos do cálculo da tensão no capacitor do elo CC fictício.

3.4 Simulação do modelo digital ideal do UPQC-i

Esta seção apresenta as simulações que foram realizadas no PSCAD, utilizando-se o modelo digital ideal do UPQC-i.

O circuito utilizado nas simulações apresenta três blocos distintos, conforme ilustra a Figura 3.8: a fonte de tensão, o modelo digital ideal do condicionador de energia UPQC-i, denominado simplesmente UPQC-i, e a carga.

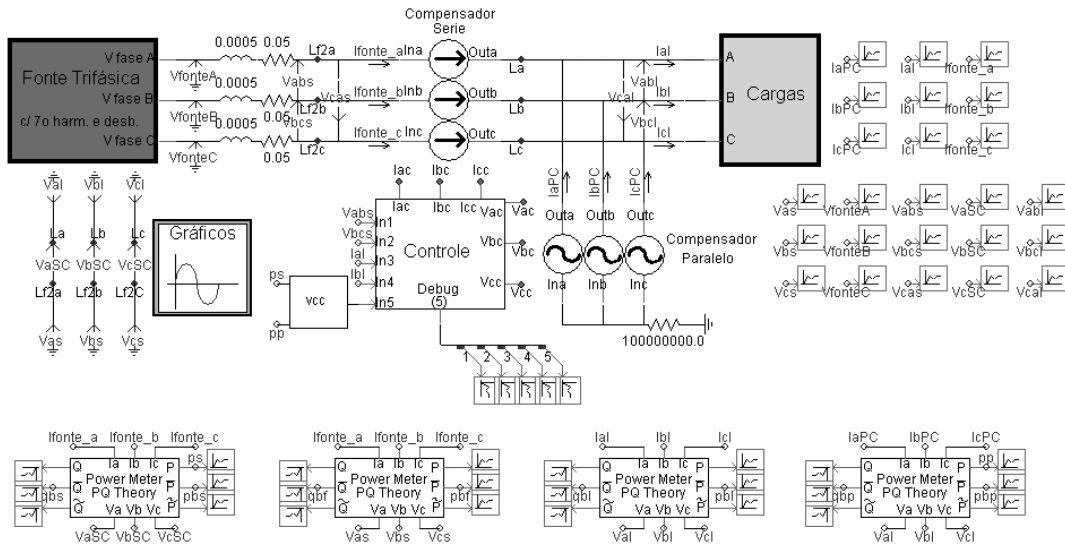


Figura 3.8: Diagrama de circuitos da simulação do modelo digital ideal do UPQC-i.

A fonte é implementada de forma a compor tensões trifásicas com componentes fundamentais de seqüência positiva e negativa, além de um componente harmônico de sétima ordem. A configuração dos níveis destes componentes de tensão é realizada em função de um percentual em relação ao componente fundamental. A impedância da fonte é representada pela associação em série de um resistor de $50 m\Omega$ e um indutor de $0,5 mH$.

O módulo que implementa a carga utilizada na simulação é composto por quatro configurações formadas pela associação de duas cargas: a primeira, denominada carga A, consiste numa carga bifásica composta por um resistor de 14Ω em série com um indutor de $45 mH$, alimentada em $220 V$ e $60 Hz$. Esta carga tem uma potência aparente de $2200 VA$, com um fator de potência de $0,64$, ou seja, uma potência ativa de $1400 W$ e reativa de $1697 var$. A segunda carga, denominada carga B, é composta por um retificador trifásico com indutores de comutação de $1,2 mH$ alimentando uma

carga no lado contínuo composta por um indutor de $10mH$ em série com um resistor de 20Ω .

Foram realizadas duas simulações com nove segundos de duração. A primeira, intitulada “ideal1”, será apresentada na Seção 3.4.1. A tensão do sistema (fonte) é mantida senoidal e regulada no seu valor nominal e são realizadas variações nas cargas conectadas ao UPQC-i, objetivando analisar o seu comportamento frente à conexão e desconexão de quatro configurações de cargas distintas, descritas na Tabela 3.1, obtidas pela combinação das cargas A e B descritas no parágrafo anterior. Na segunda simulação, intitulada “ideal2”, a carga é mantida constante e a tensão da fonte assume quatro características distintas conforme será apresentada na Seção 3.4.2.

Tabela 3.1: Configurações das cargas utilizadas nas simulações

Configuração	Descrição
Carga 1	Carga A conectada entre as fases A e C
Carga 2	Carga B conectada nas três fases
Carga 3	Carga B sem a conexão da fase A
Carga 4	Cargas 1 e 2 conectadas simultaneamente

Nas simulações, foi fixado um valor inicial de $300V$ para a tensão no capacitor do elo de corrente contínua. Para tanto, calculou-se o valor da energia armazenada no capacitor referente a esta tensão inicial e este resultado foi atribuído ao valor inicial do bloco integrador da Figura 3.7.

Os controladores PI utilizados no controle do UPQC-i possuem a seguinte função de transferência:

$$FT_{PI}(S) = K_p + \frac{1}{sT_i}, \quad (3.26)$$

onde,

- K_p : ganho proporcional;
- T_i : constante de tempo de integração.

O ganho proporcional do controlador PI do q-PLL é $20rad$ e a sua constante de tempo de integração é $1ms.rad^{-1}$.

O ganho proporcional do controlador PI do controle de tensão do elo CC é 4 e a sua constante de tempo de integração é $6,67ms$.

Os filtros passa-baixa utilizados nos controles possuem um ganho unitário para a frequência zero e uma frequência de corte de aproximadamente 30 Hz. A sua implementação como um filtro digital do tipo média móvel é detalhada no Apêndice B.

Os resultados das simulações computacionais *ideal1* e *ideal2* são apresentados nas Seções 3.4.1 e 3.4.2, respectivamente. Ambos utilizam as seguintes bases:

- Tensão de Base (alternada) = $311V$.
- Corrente de Base (alternada) = $20A$.

Na simulação ideal, a saída da fonte ideal de tensão será função da tensão do elo CC fictício, segundo a relação entre a tensão do lado CA e a tensão do lado CC de um inversor trifásico VSI operando com a técnica de chaveamento seno-PWM triangular dada por:

$$V_{ca_{pico}} = m_a \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot V_{cc} , \quad (3.27)$$

onde,

- $V_{ca_{pico}}$: valor de pico da tensão de linha nos terminais de saída do lado CA;
- m_a : índice de modulação de amplitude;
- V_{cc} : tensão nos terminais do capacitor do lado CC.

Considerando-se um $m_a = 0,8$ a tensão de Base (contínua) é igual a $450V$.

3.4.1 Resultado da simulação computacional ideal1

A Figura 3.9 apresenta o valor coletivo (agregado) [19] das tensões trifásicas da fonte e da carga, ou seja, na entrada e na saída do UPQC-i, definido por:

$$\hat{v}_{abc} = \sqrt{v_a^2(t) + v_b^2(t) + v_c^2(t)}. \quad (3.28)$$

Observa-se a indicação dos instantes de conexão e desconexão dos diferentes tipos de cargas. A Carga 1 é conectada no instante 1,5s permanecendo nesta condição durante um segundo. Após este período, a mesma é desconectada do circuito, que permanece sem nenhuma carga conectada, durante um segundo. Esta mesma operação de conexão e desconexão das cargas acontece, de forma semelhante, para as Cargas 2, 3 e 4, iniciando-se nos instantes 3,5s 5,5s e 7,5s, respectivamente.

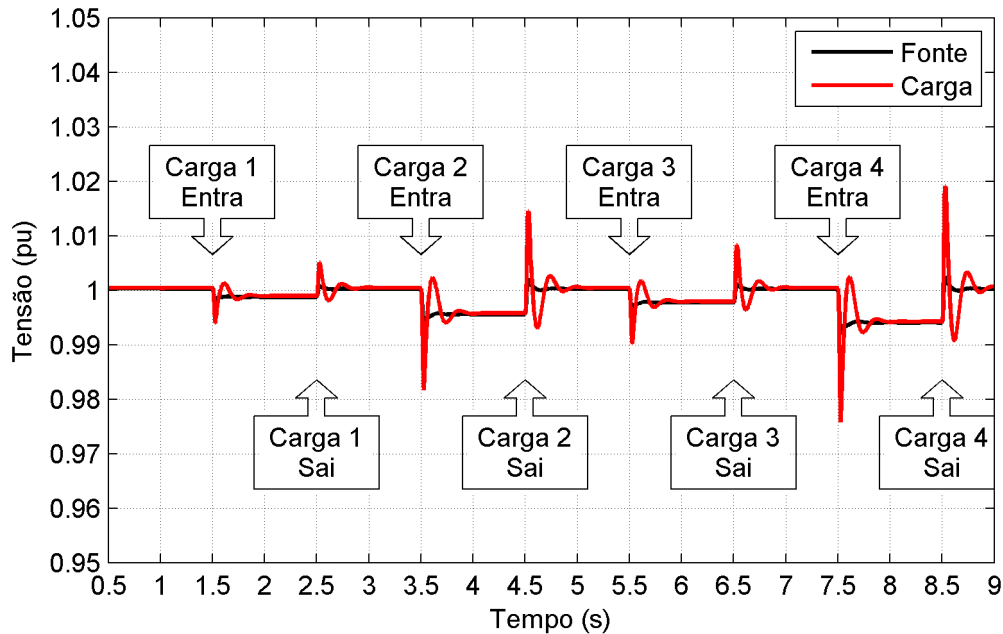


Figura 3.9: Valor coletivo das Tensões de Entrada e da Carga

Conforme apresentado anteriormente, nesta simulação as tensões da fonte não sofrem nenhum distúrbio de VTCD. Isto pode ser observado através do seu valor coletivo.

Verifica-se que o valor coletivo das tensões de saída do UPQC-i mantém-se constante, acompanhando o valor coletivo das tensões de entrada. Os transitórios observados ocorrem nos instantes de conexão e desconexão das cargas, entretanto, as

amplitudes destes transitórios são pequenas, não introduzem distúrbios significativos nas tensões de saída e estão dentro dos limites observados em normas.

As Figuras 3.10 e 3.11 apresentam as correntes consumidas pelas cargas e aquelas que são efetivamente drenadas da fonte. Devido a escala adotada para representar estes gráficos, não é possível analisar detalhadamente as formas de onda. Estes gráficos estão disponibilizados apenas para apresentar os perfis destas correntes durante todo o período da simulação. Os gráficos mais detalhados destas correntes serão apresentados posteriormente.

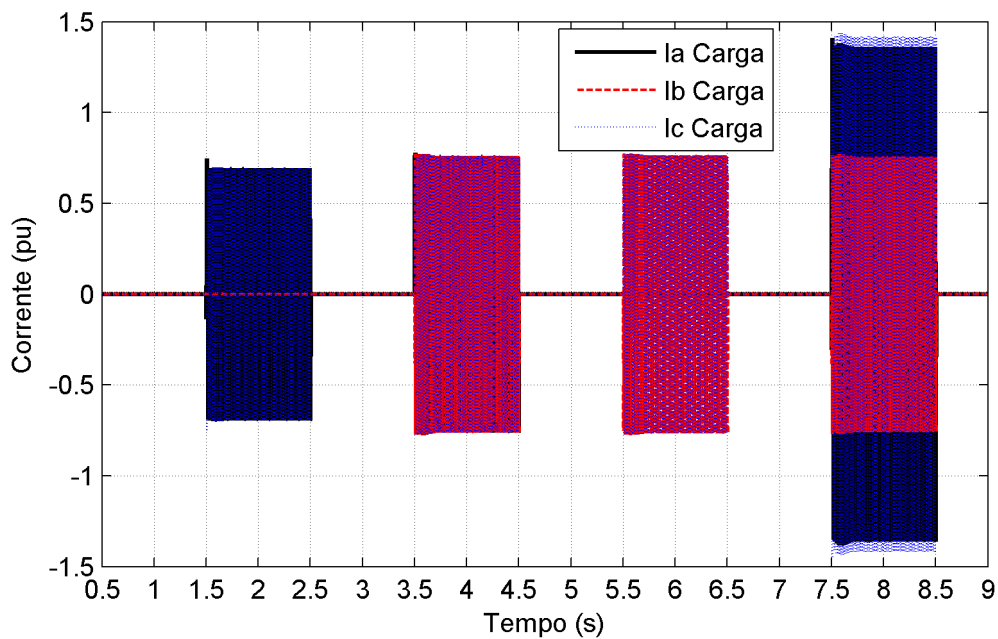


Figura 3.10: Perfil das correntes trifásicas produzidas pelas conexões e desconexões das cargas 1, 2, 3 e 4

O perfil das correntes da fonte indica a presença de transitórios durante a conexão e desconexão das cargas, devido à dinâmica do capacitor do elo CC.

A amplitude das correntes da fonte e da carga em função do tempo pode ser calculada utilizando os conceitos do valor coletivo

$$\hat{i}_{abc} = \sqrt{i_{+1a}^2(t) + i_{+1b}^2(t) + i_{+1c}^2(t)}, \quad (3.29)$$

onde,

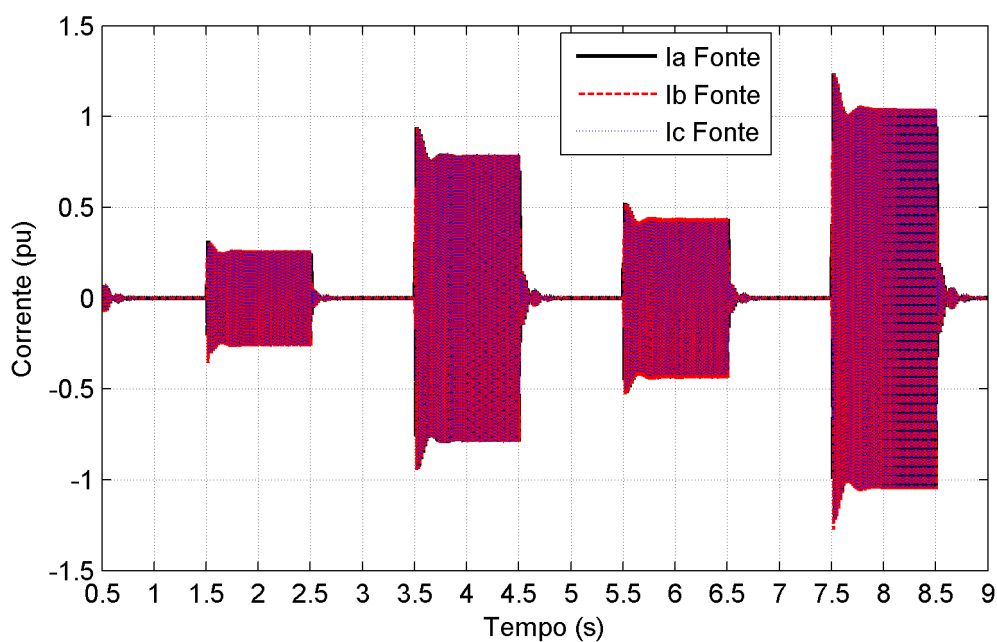


Figura 3.11: Perfil das correntes trifásicas, drenadas da fonte, durante as conexões e desconexões das cargas 1, 2, 3 e 4

- $i_{+1a}, i_{+1b}, i_{+1c}$: componentes fundamentais de seqüência positiva das correntes.

Devido à presença de conteúdos harmônicos e de desequilíbrios nas correntes das cargas, para calcular o valor coletivo é necessário filtrar o resultado. Desta forma, é possível compará-lo com o valor coletivo das correntes da fonte, conforme apresenta a Figura 3.12. A diferença entre o valor coletivo das correntes da carga e da fonte, indica a compensação de correntes reativas realizada pelo filtro paralelo, ou seja, a fonte de tensão que modela o filtro ativo paralelo fornece os componentes de corrente reativa demandadas pelas cargas. Nestes gráficos são observados ainda os transitórios nas correntes da fonte.

O gráfico da Figura 3.13 apresenta o comportamento da tensão sobre o capacitor do elo de corrente contínua. A menos dos pequenos transitórios ocorridos durante as manobras de conexão e desconexão das cargas, o valor da tensão sobre o capacitor tende ao valor de referência de $1pu$. Existe ainda um transitório ocorrido nos instantes iniciais referente à dinâmica de elevar-se o valor inicial de $0,66pu$ da tensão do capacitor até a referência de $1pu$.

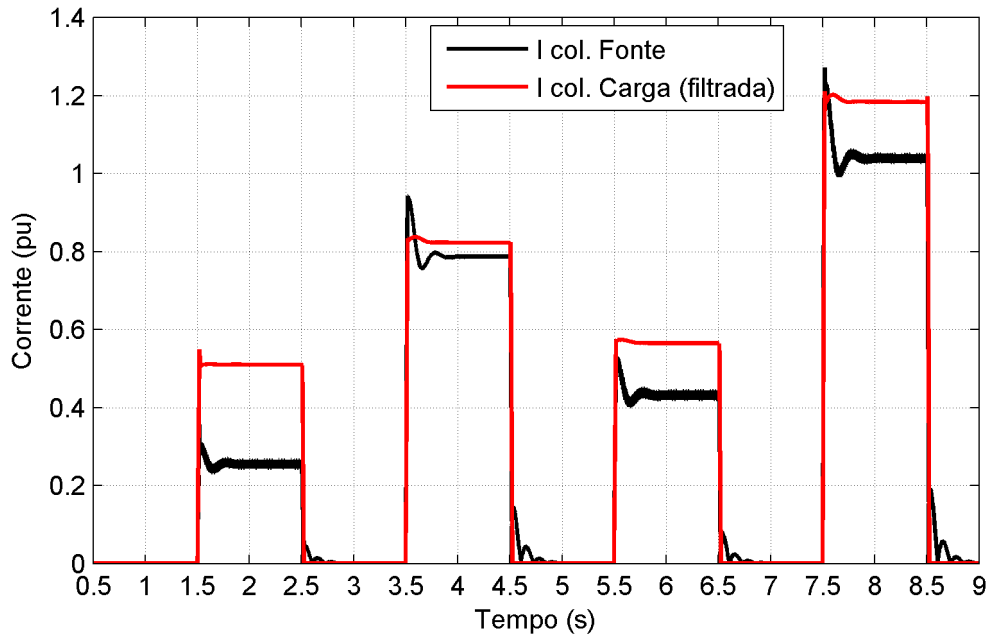


Figura 3.12: Valor coletivo das correntes da fonte e da carga (filtrada)

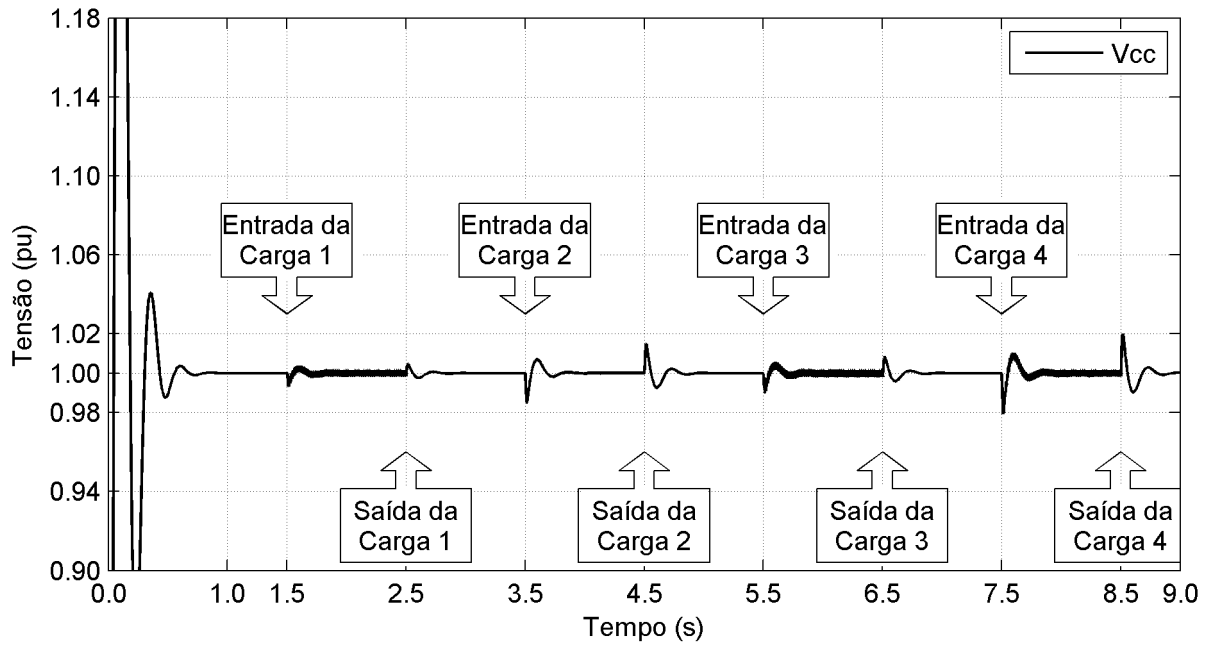


Figura 3.13: Tensão no capacitor do elo CC

Quatro conjuntos de gráficos serão analisados para cada uma das quatro configurações de carga. Os gráficos em questão apresentam o comportamento das correntes e tensões trifásicas das cargas e da fonte, destacando os instantes de conexão e desconexão das cargas, cobrindo um período fundamental de dois ciclos, anteriores e posteriores aos instantes de conexão e desconexão.

A análise do valor coletivo das tensões da fonte e da carga já indicou que elas não sofrem variações significativas durante as conexões e desconexões das cargas. Através da análise qualitativa das Figuras 3.14, 3.15, 3.16 e 3.17 podemos reafirmar isto e constatar que as tensões da fonte possuem uma forma de onda senoidal e não apresentam desequilíbrios perceptíveis. Isto era esperado, pois elas foram geradas sem nenhum distúrbio.

Do mesmo modo, as tensões da carga sintetizadas pelo filtro ativo paralelo são apresentadas nas Figuras 3.18, 3.19, 3.20 e 3.21. Analisando-se estes gráficos, verifica-se que, mesmo durante as transições de conexão e desconexão das cargas, as tensões também apresentam uma forma de onda senoidal e sem desequilíbrios.

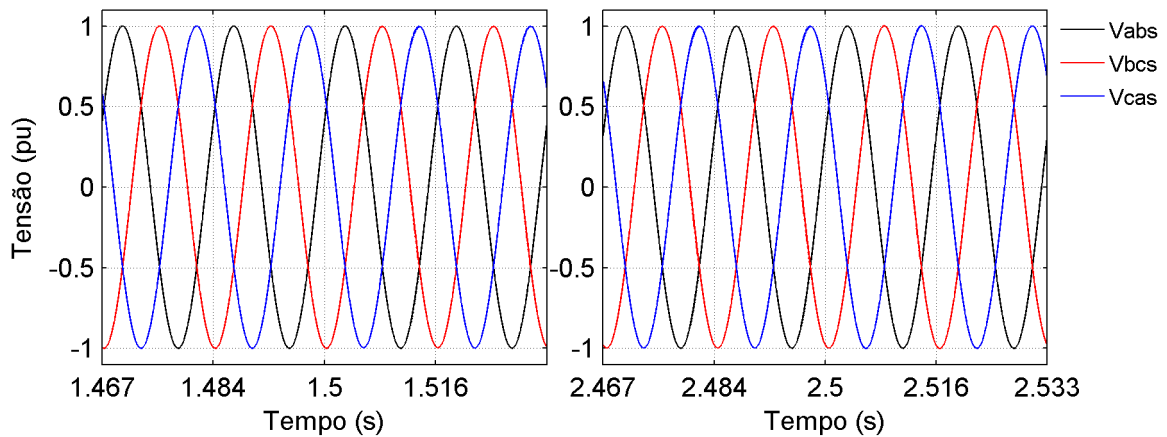


Figura 3.14: Tensões de linha na fonte durante a conexão e desconexão da carga1

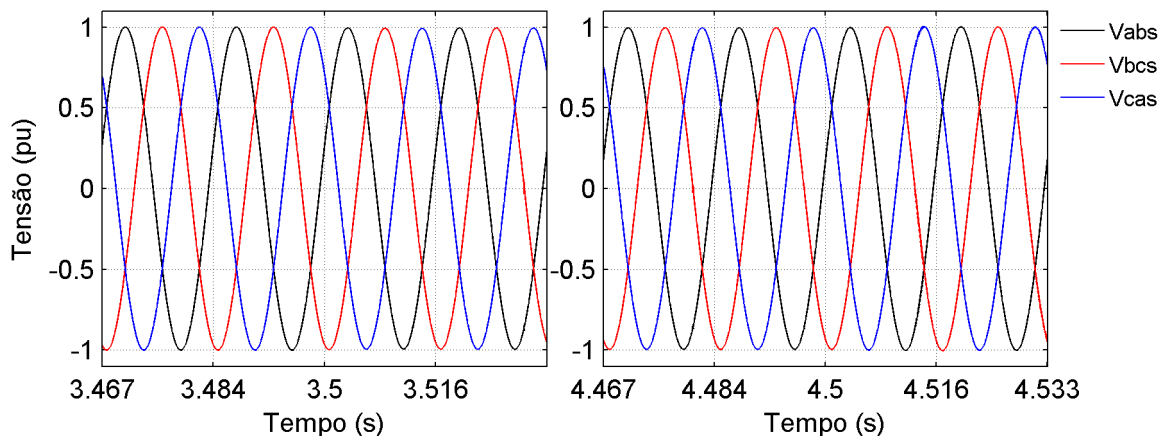


Figura 3.15: Tensões de linha na fonte durante a conexão e desconexão da carga2

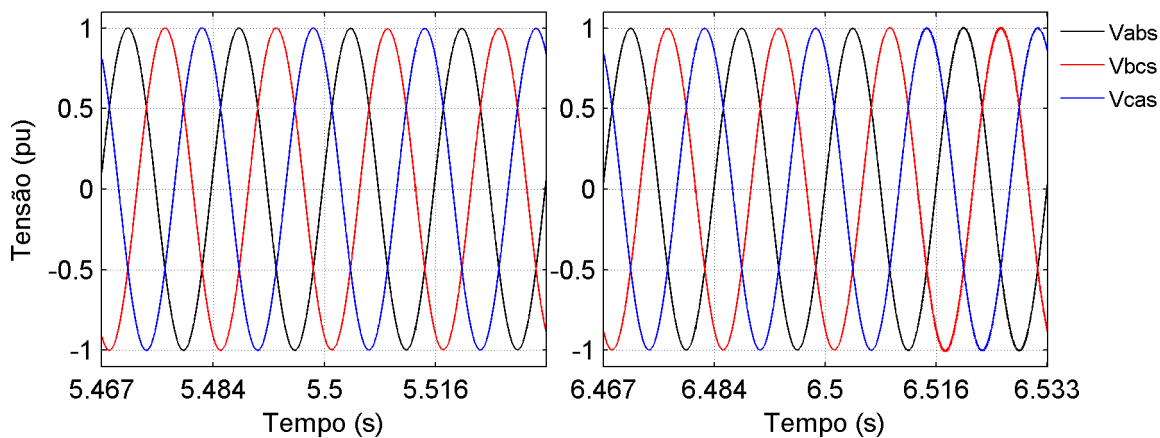


Figura 3.16: Tensões de linha na fonte durante a conexão e desconexão da carga3

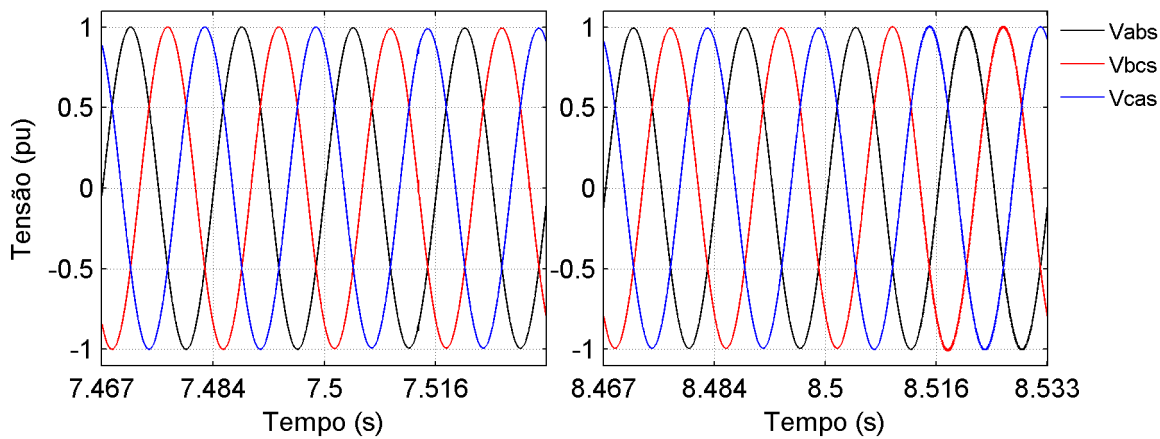


Figura 3.17: Tensões de linha na fonte durante a conexão e desconexão da carga4

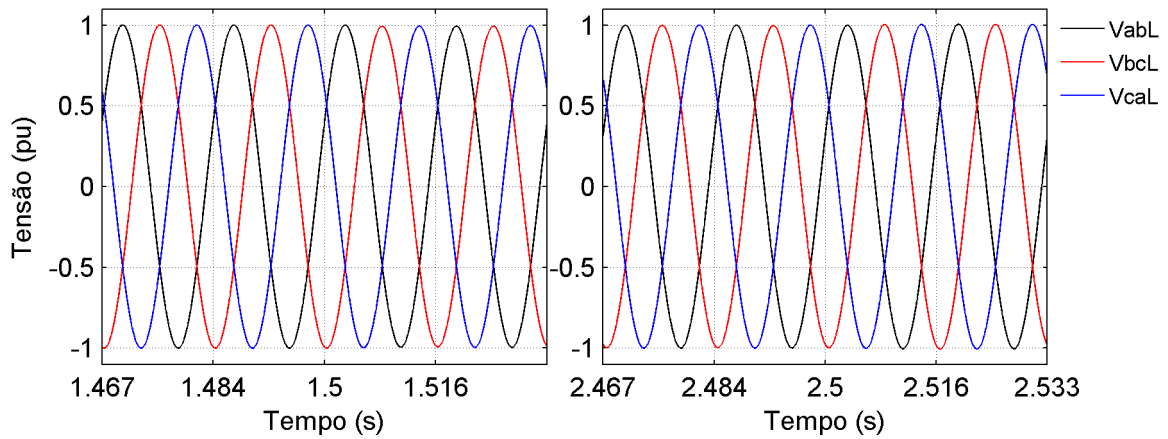


Figura 3.18: Tensões de linha na carga 1 durante a sua conexão e desconexão

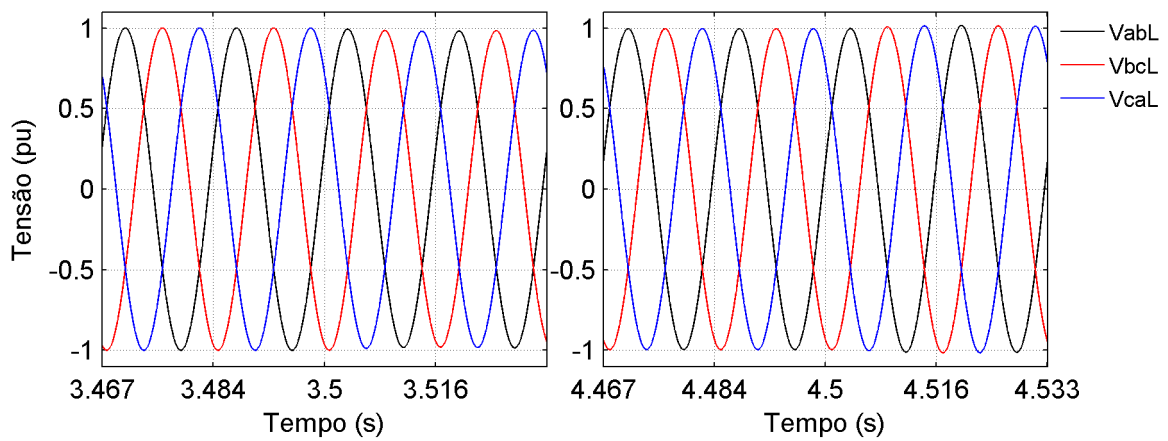


Figura 3.19: Tensões de linha na carga 2 durante a sua conexão e desconexão

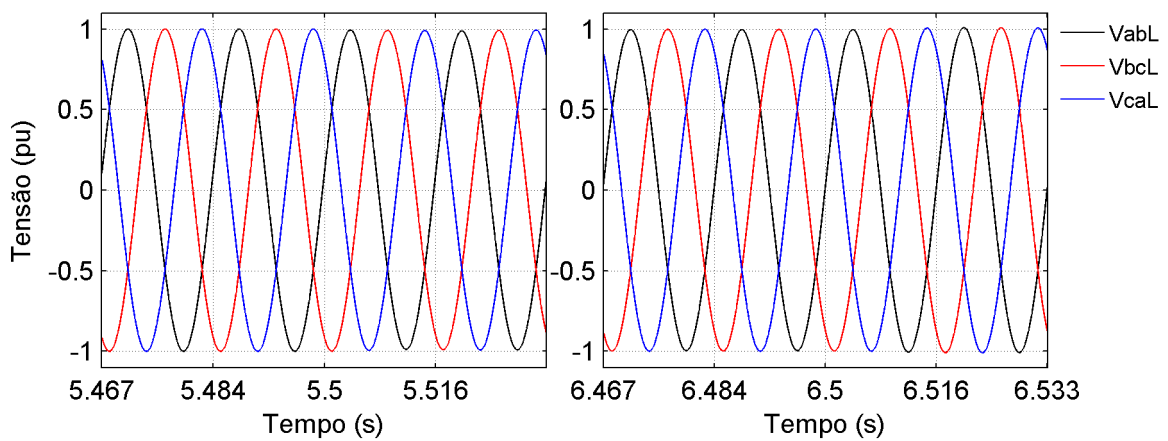


Figura 3.20: Tensões de linha na carga 3 durante a sua conexão e desconexão

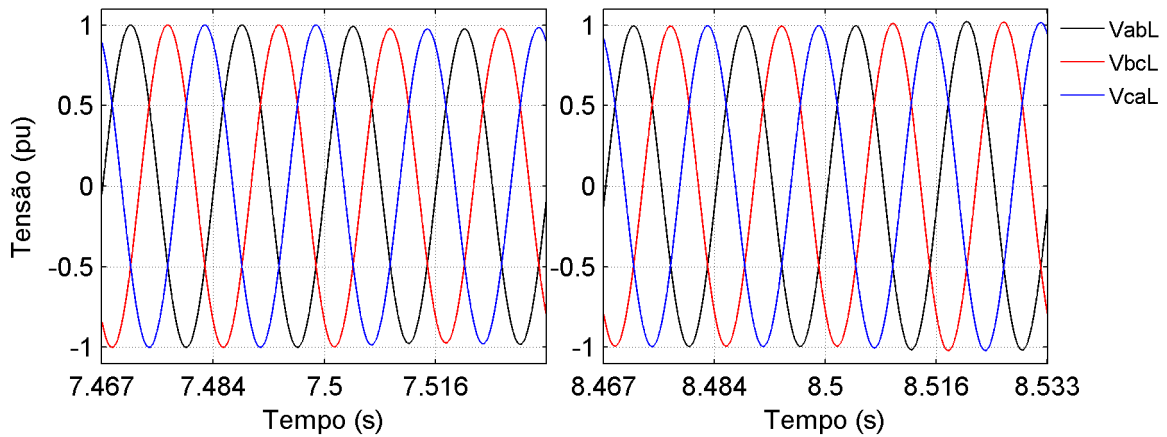


Figura 3.21: Tensões de linha na carga 4 durante a sua conexão e desconexão

As Figuras 3.22, 3.23, 3.24 e 3.25 mostram o exato instante que as cargas são conectadas no circuito. Na operação da Carga 1 verifica-se o comportamento das correntes de uma carga bifásica conectada entre as fases A e C, onde a corrente da fase A é exatamente oposta a corrente da fase C e inexistente a circulação de corrente na fase B, indicando a presença de desequilíbrio. Na operação da Carga 2, observa-se a circulação de correntes distorcidas nas três fases. Na operação da carga 3 percebe-se um desequilíbrio na corrente, devido a operação do retificador com apenas duas fases, além de pequenas distorções. Na operação da carga 4 constata-se a presença de três correntes de formatos totalmente distintos, indicando a presença de desequilíbrios e componentes harmônicas de corrente.

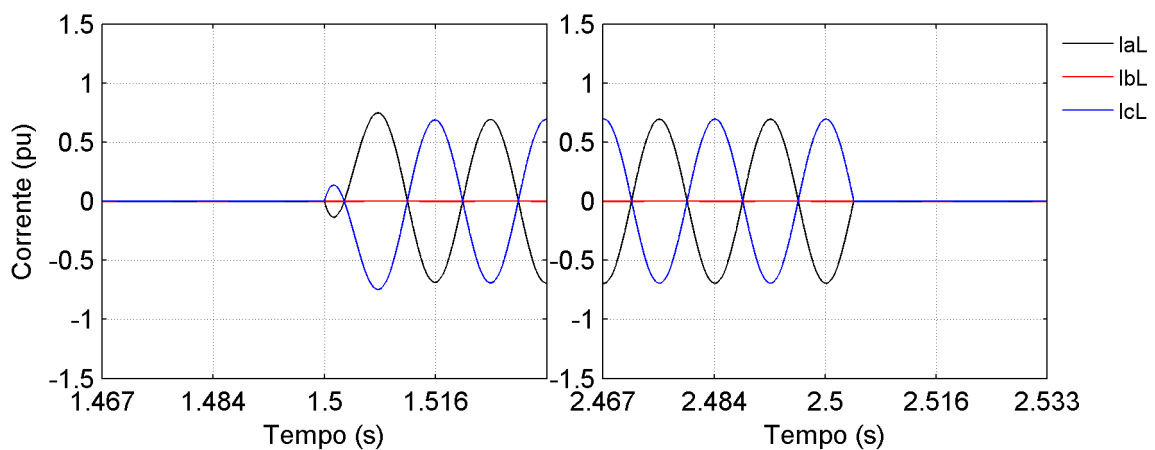


Figura 3.22: Correntes trifásicas da carga 1 durante a sua conexão e desconexão

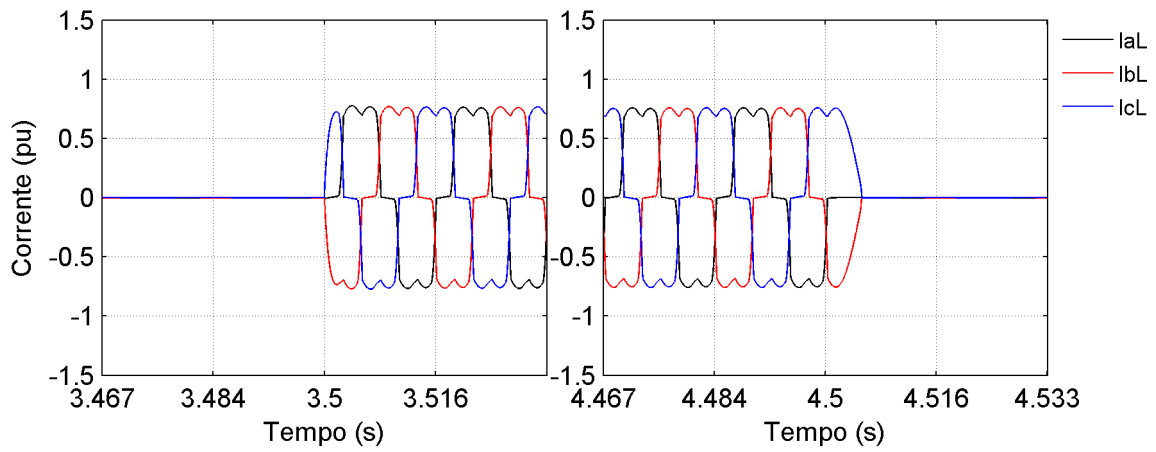


Figura 3.23: Correntes trifásicas da carga 2 durante a sua conexão e desconexão

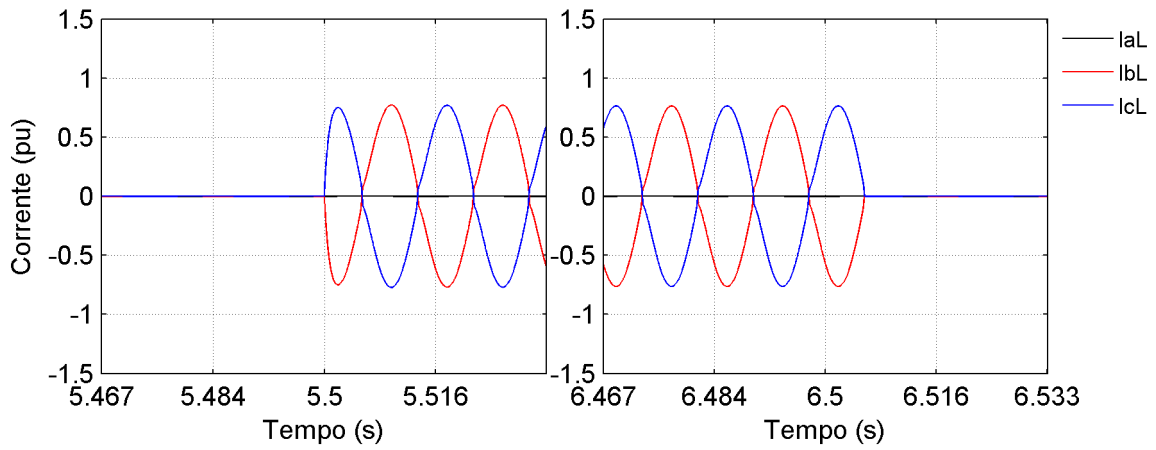


Figura 3.24: Correntes trifásicas da carga 3 durante a sua conexão e desconexão

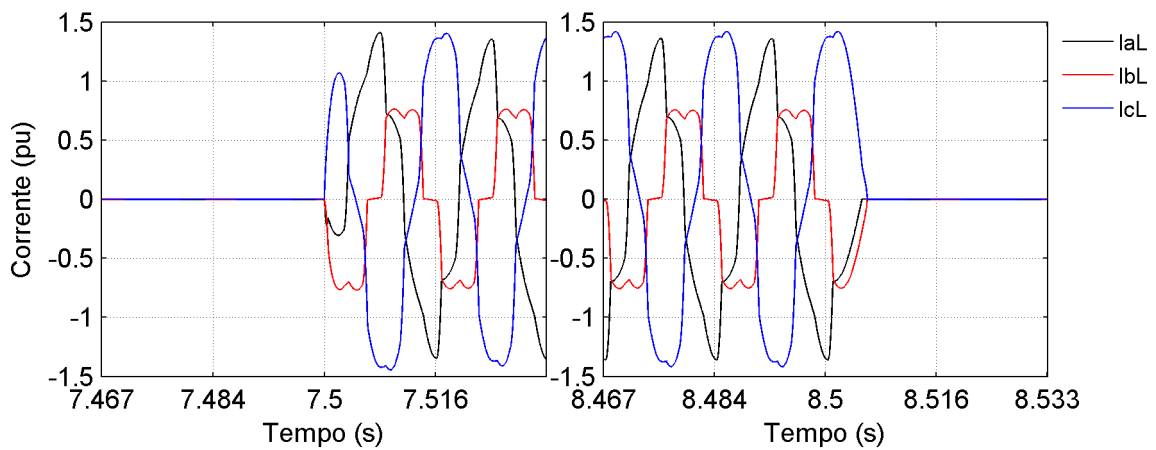


Figura 3.25: Correntes trifásicas da carga 4 durante a sua conexão e desconexão

As Figuras 3.26, 3.27, 3.28 e 3.29, apresentam os gráficos das correntes na fonte, após a compensação realizada pelo UPQC-i. Verifica-se que em todas as quatro situações de carga as correntes drenadas da fonte estão equilibradas e possuem um formato senoidal.

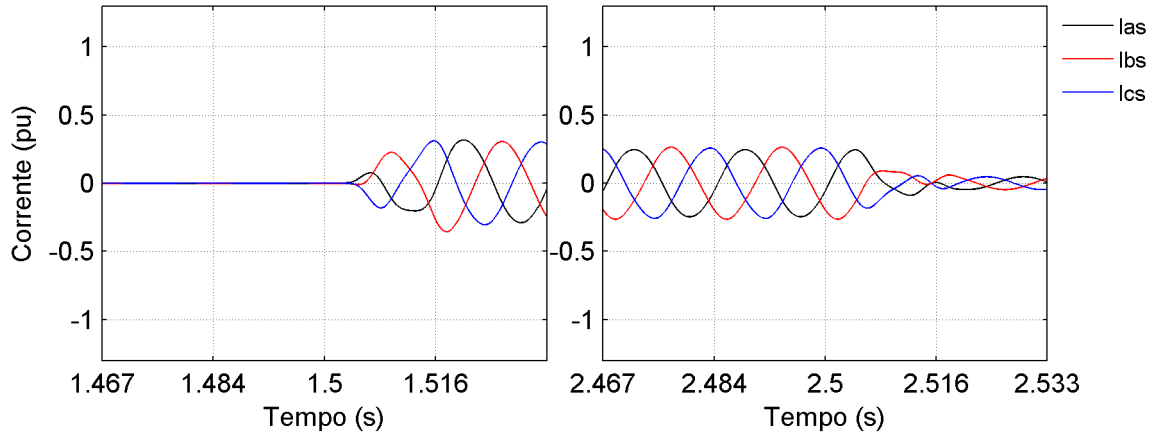


Figura 3.26: Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga1

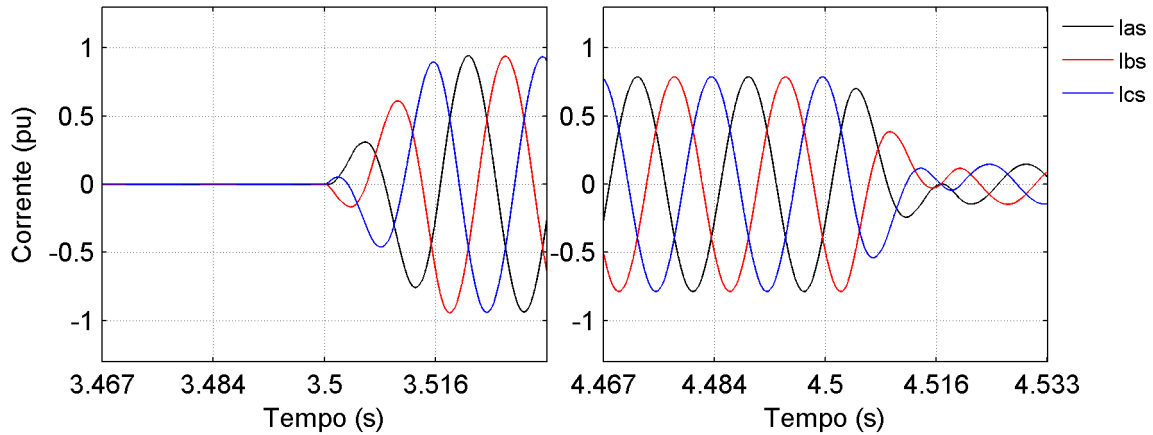


Figura 3.27: Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga2

Além desta análise qualitativa dos instantes de transição de carga, uma análise quantitativa irá avaliar a operação em regime permanente do UPQC-i. Para esta análise escolheu-se a operação da Carga 4 durante o último período fundamental que antecede a sua desconexão. Para este período são determinados os componentes harmônicos, os índices de distorção total harmônica, o componente fundamental e o desbalanço de seqüência negativa das correntes e tensões, da fonte e da carga.

A Figura 3.30 apresenta o espectro harmônico das correntes trifásicas da Carga 4. Os índices de distorção harmônica total para as três fases estão indicados no

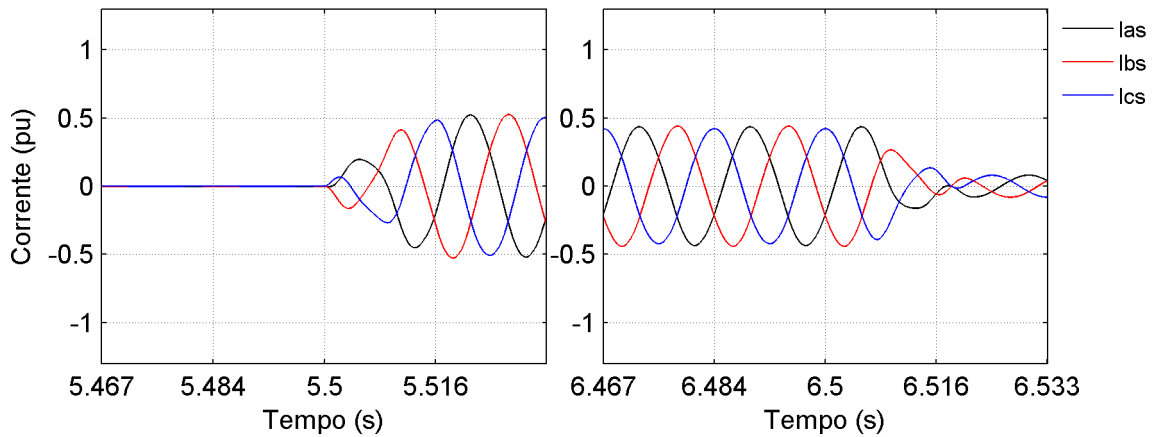


Figura 3.28: Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga3

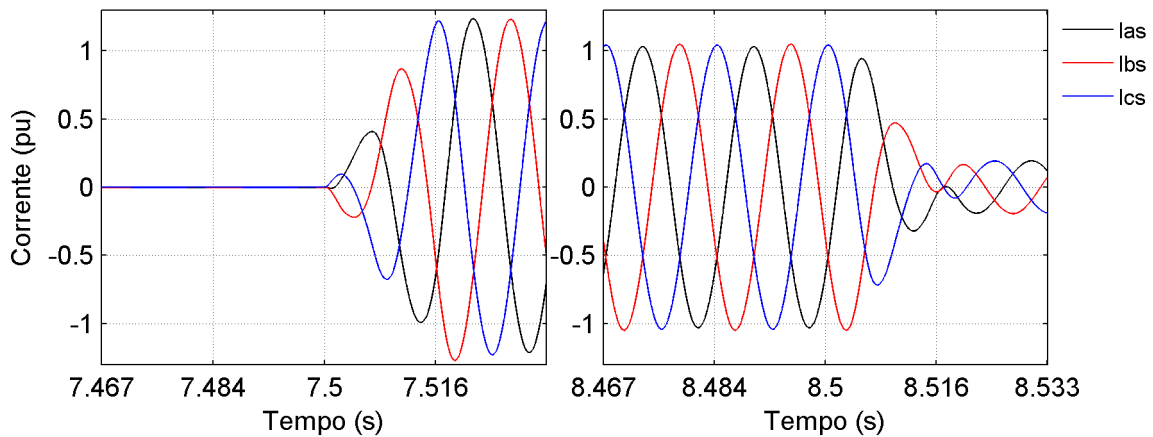


Figura 3.29: Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga4

próprio gráfico e reafirmam, quantitativamente, a existência de um alto conteúdo harmônico nas correntes das três fases. Em relação ao desequilíbrio dos componentes fundamentais das correntes da Carga 4, a Figura 3.31 mostra um detalhe das correntes das três fases e os seus respectivos componentes fundamentais. Aplicando-se a transformação de Fortescue para as coordenadas simétricas nestes componentes fundamentais, chega-se ao valor de 35% de desbalanço de seqüência negativa.

Esta mesma análise é realizada nas correntes da fonte, conforme apresentam os gráficos das Figuras 3.32 e 3.33. O espectro harmônico das correntes trifásicas da fonte indicam um baixo conteúdo harmônico e o índice de distorção total situa-se por volta de 0,5%. Já o desbalanço de seqüência negativa foi reduzido para 0,5%. Com isto, verificam-se as funcionalidades de compensação de desequilíbrio e harmônicos de corrente do UPQC-i, sem a presença de distúrbios de tensão na fonte.

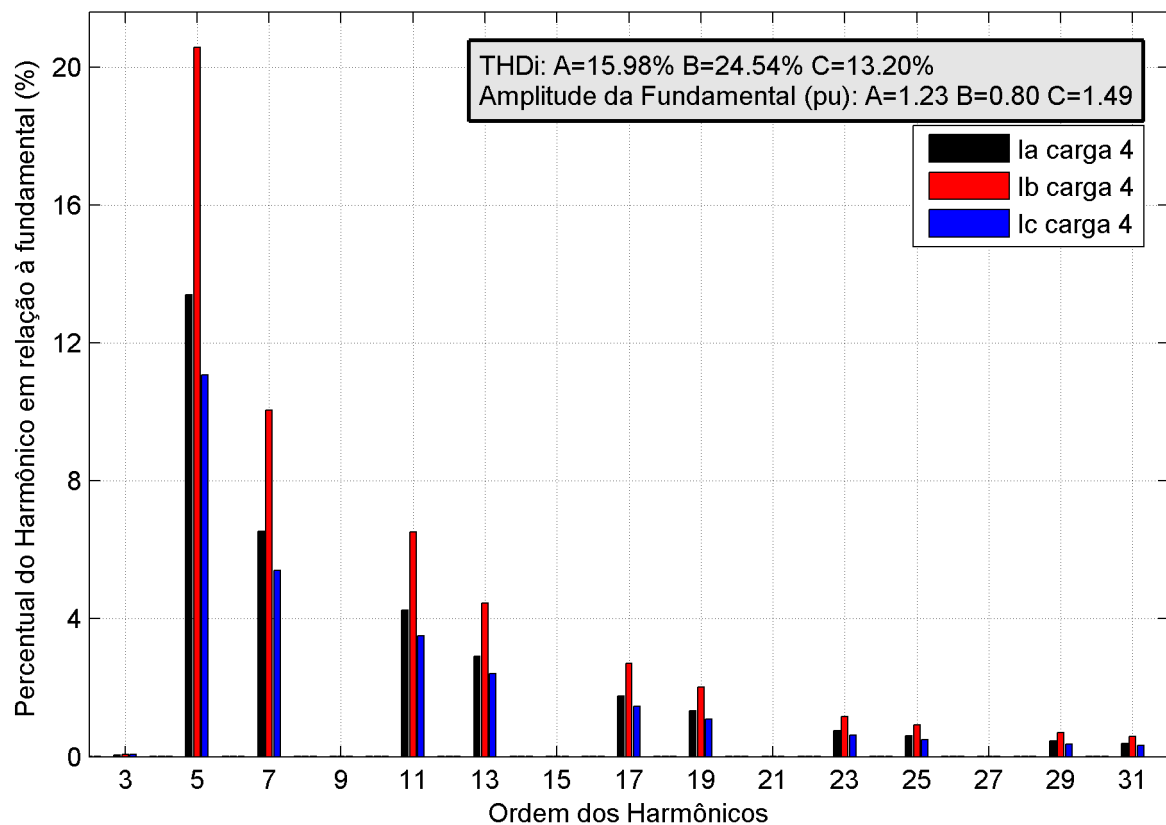


Figura 3.30: Componentes harmônicos mais relevantes das correntes trifásicas da carga 4 em regime permanente

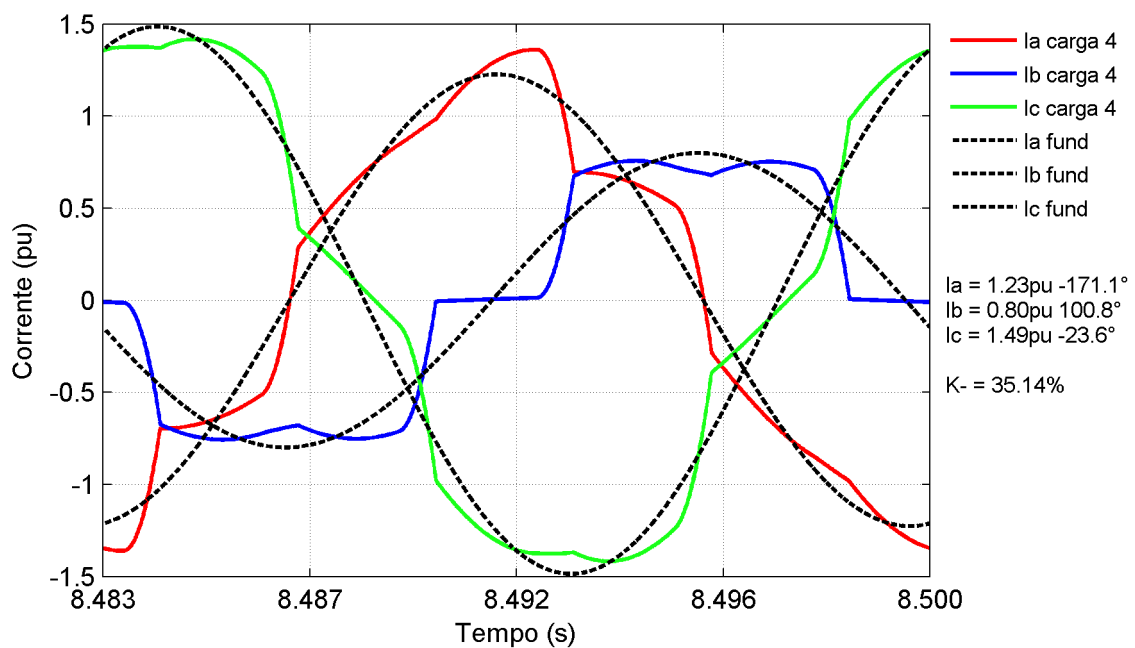


Figura 3.31: Componente fundamental das correntes trifásicas da carga 4 em regime permanente

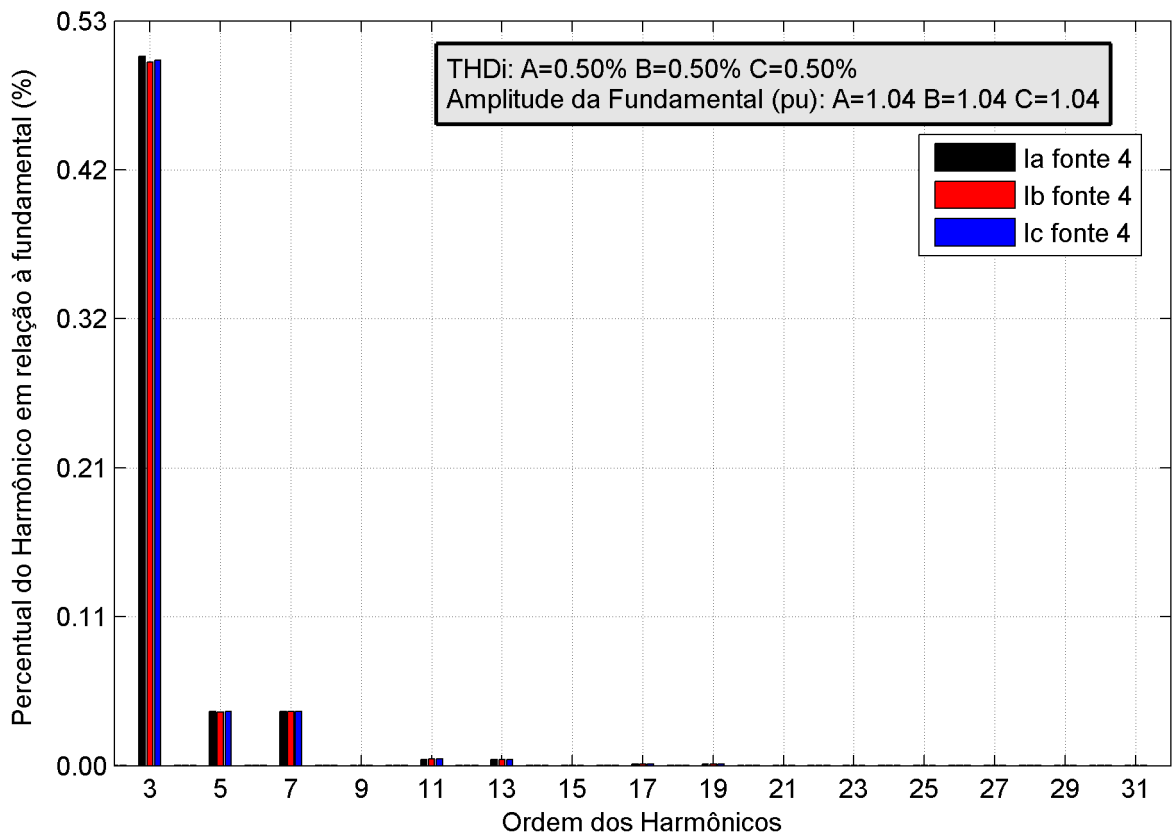


Figura 3.32: Componentes harmônicos mais relevantes das correntes trifásicas A, B e C da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente

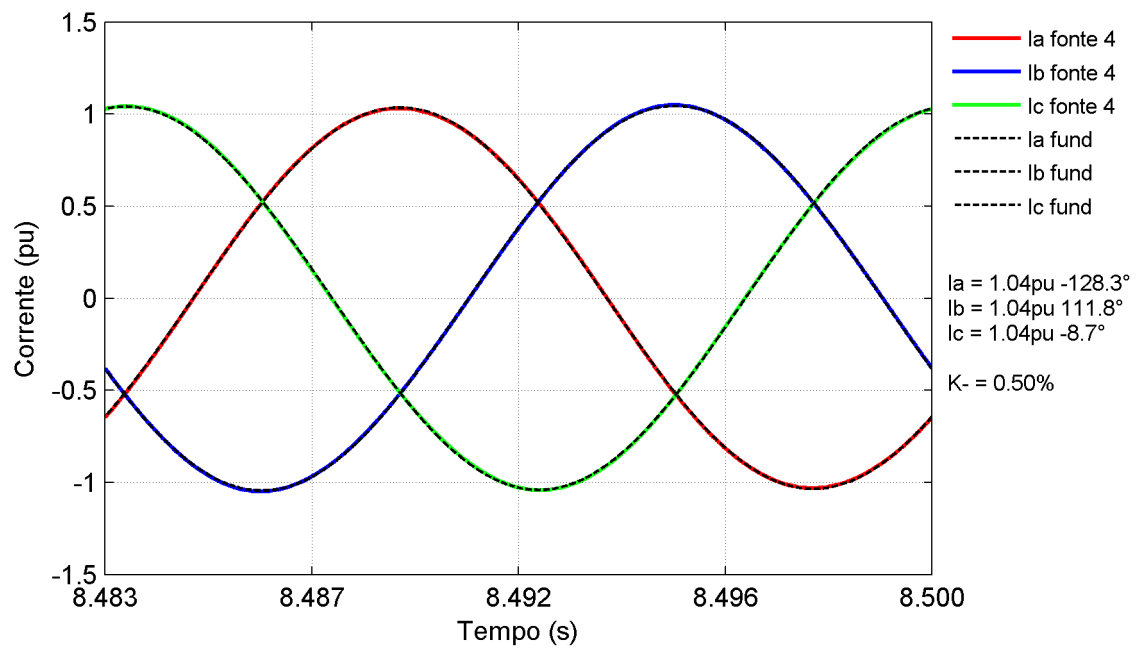


Figura 3.33: Componente fundamental das correntes trifásicas A, B e C da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente

As Figuras 3.34 e 3.36 apresentam os espectros harmônicos para as tensões trifásicas da fonte e da carga, respectivamente. Os índices totais de distorção harmônica para ambas as tensões são praticamente nulos. A ausência de desequilíbrios nas tensões também pode ser comprovada pelos gráficos das Figuras 3.35 e 3.37, onde os percentuais de desbalanço de seqüência negativa das tensões trifásicas da fonte e da carga também são praticamente nulos. Observando-se as legendas que acompanham estes gráficos constata-se que as amplitudes e ângulos dos componentes fundamentais das tensões da fonte e da carga são praticamente iguais, conforme determina a estratégia de controle do filtro ativo paralelo do UPQC-i.

A Tabela 3.2 apresenta a caracterização do fator de potência de deslocamento (FPD), para a operação em regime permanente da Carga 4, com base nas informações das amplitudes e ângulos dos componentes fundamentais das Figuras 3.31, 3.33, 3.35 e 3.37. Os resultados demonstram a capacidade do UPQC-i em realizar a correção do fator de potência, mesmo sob a presença das correntes das cargas, não-senoidais e desequilibradas.

Tabela 3.2: Fator de Potência de Deslocamento para operação da Carga 4

Fase	Fonte			Carga		
	$\phi_{V_1}(\text{°})$	$\delta_{I_1}(\text{°})$	FPD	$\phi_{V_1}(\text{°})$	$\delta_{I_1}(\text{°})$	FPD
A	-128,2	-128,3	1,00	-128,4	-171,1	0,73
B	111,8	111,8	1,00	111,6	100,8	0,98
C	-8,2	-8,7	1,00	-8,4	-23,6	0,96

Após a análise de todos os gráficos apresentados nesta simulação, denominada ideal1, é possível concluir que o modelo digital ideal do UPQC-i foi capaz de realizar a compensação de correntes desequilibradas, com alto conteúdo harmônico e com baixo fator de potência, consumidas pelas cargas. Desta forma, o UPQC-i evita que os componentes indesejados das correntes das cargas sejam propagados para a fonte. Esta conclusão é válida para a situação em que as tensões da fonte não apresentam distúrbios de QEE. A operação do UPQC-i na presença de distúrbios nas tensões da fonte será analisada na simulação, denominada ideal2, apresentada na Seção 3.4.2.

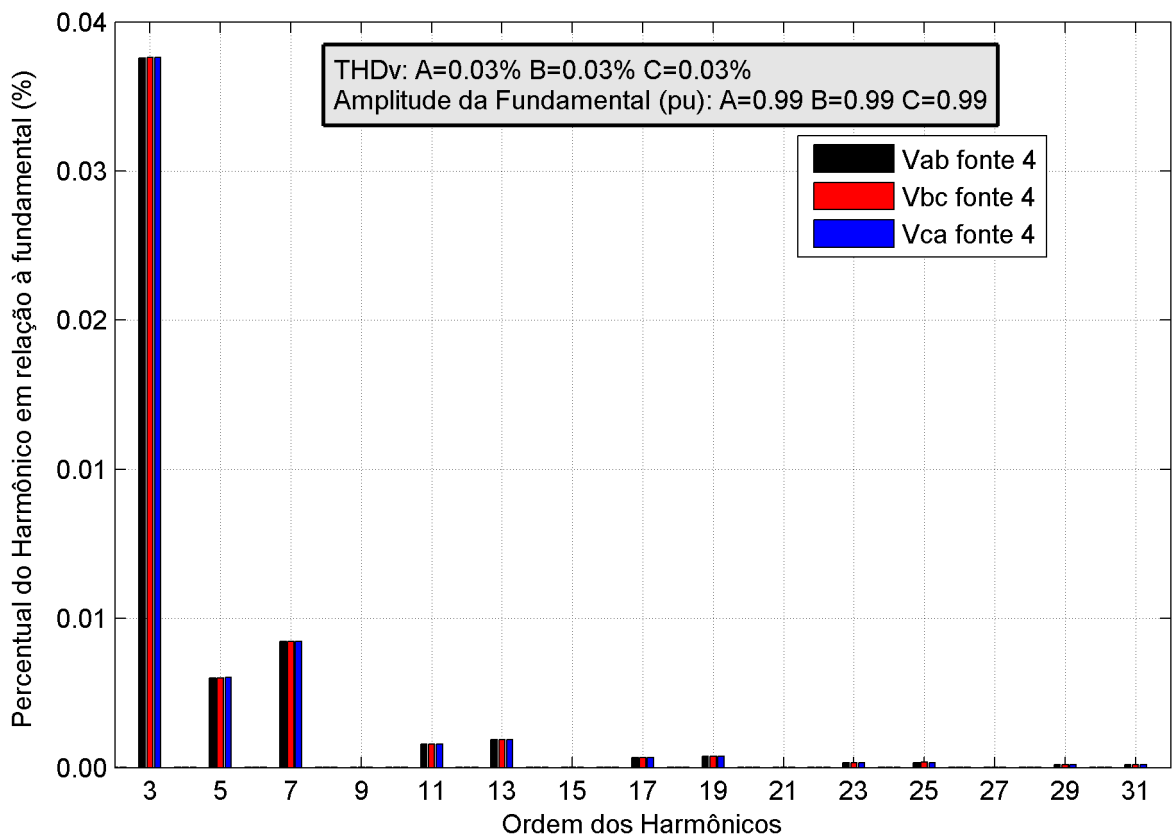


Figura 3.34: Componentes harmônicos mais relevantes das tensões de linha trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.

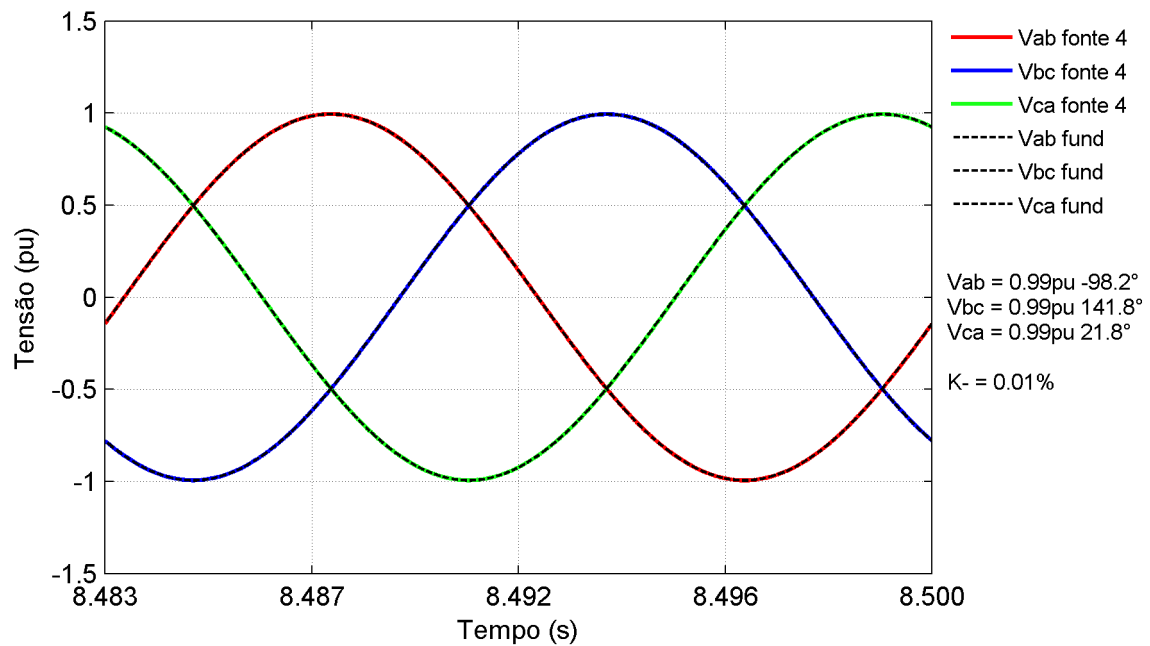


Figura 3.35: Componente fundamental das tensões de linha trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.

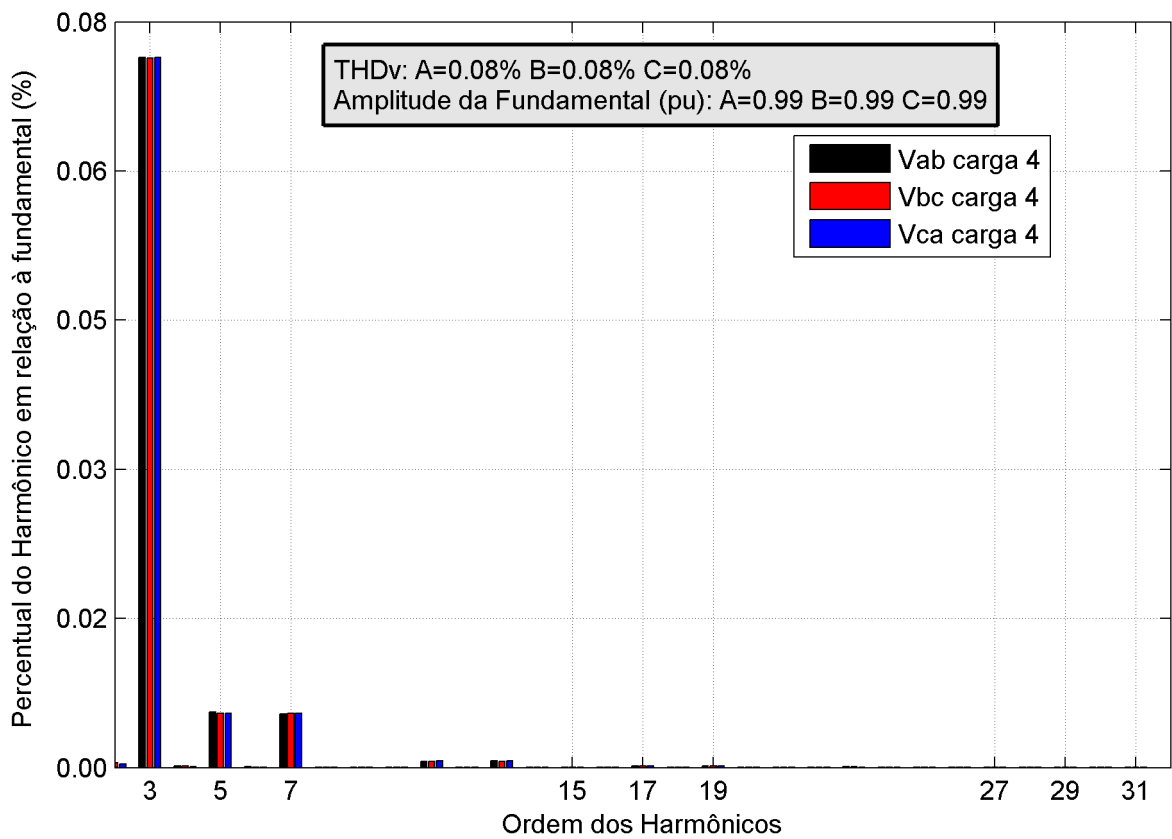


Figura 3.36: Componentes harmônicos mais relevantes das tensões de linha trifásicas da carga durante a operação da carga 4 em regime permanente.

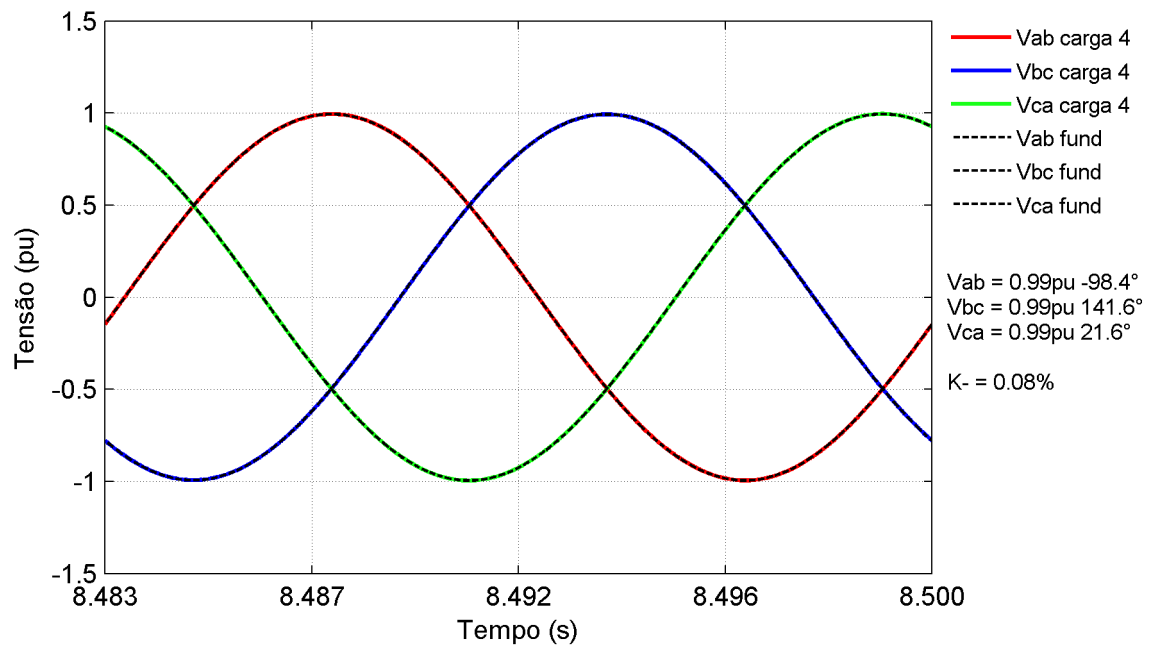


Figura 3.37: Componente fundamental das tensões de linha trifásicas da carga durante a operação da carga 4 em regime permanente.

3.4.2 Resultado da simulação computacional ideal2

Nesta simulação, a Carga 4 (Tabela 3.1) é conectada no instante $t = 1,0s$ e permanece neste estado. A tensão da fonte assume quatro distúrbios distintos ao longo da simulação conforme apresentado na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Distúrbios na tensão da fonte utilizados nas simulações

Configuração	Descrição
Distúrbio 1	10% de componente harmônica de sétima ordem
Distúrbio 2	10% de componente de desequilíbrio de tensão
Distúrbio 3	VTCD trifásico de 70% (tensão fundamental = $0,7pu$)
Distúrbio 4	Distúrbios 1, 2 e 3 simultâneos

Os resultados que serão apresentados nesta seção visam comprovar a capacidade de compensação do modelo digital ideal do UPQC-i, na presença de distúrbios na tensão da fonte. A Figura 3.38 apresenta o valor médio da tensão coletiva das tensões trifásicas da fonte e da carga, ou seja, na entrada e na saída do UPQC-i. No instante de conexão da Carga 4 observa-se um pequeno transitório nos valores coletivos das tensões da fonte e da carga. Conforme identificado no gráfico, os distúrbios 1, 2, 3 e 4, ocorrem nos instantes $1,5s$, $3,5s$, $5,5s$ e $7,5s$, respectivamente, são sustentados durante um segundo e depois são extintos. Após a extinção de um distúrbio, a tensão da fonte retorna a normalidade até o início do próximo distúrbio ou o final da simulação.

Na ocorrência dos distúrbios 1 e 2 não se observam variações no valor médio da tensão coletiva das tensões da fonte e da carga, isto porque o componente fundamental de seqüência positiva da fonte permanece no seu valor nominal, adicionando-se apenas um desequilíbrio de 10% (distúrbio 2) ou um componente harmônico de sétima ordem de 10 % (distúrbio 1). Entretanto, a variação de tensão presente na composição dos distúrbios 3 e 4, pode ser percebida pela queda no valor coletivo médio das tensões da fonte para $0,7pu$ durante a presença destes distúrbios. Conforme mencionado na seção 3.2.3, o algoritmo de controle implementado no modelo ideal do UPQC-i utiliza a estratégia de compensar os distúrbios do tipo VTCD fixando as amplitudes da saída no valor limite estabelecido em norma. Utilizando-se

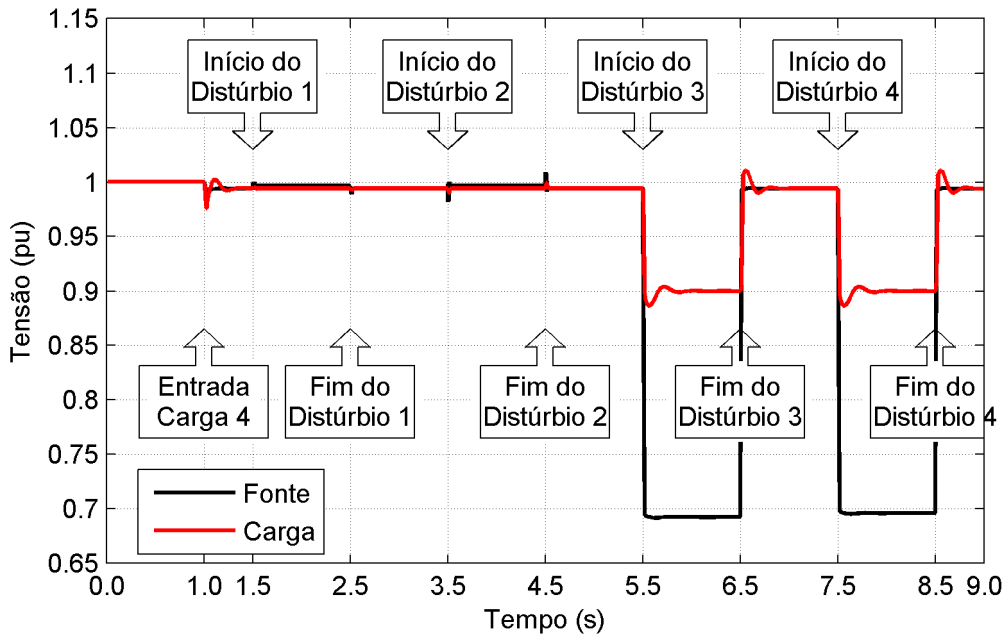


Figura 3.38: Valor coletivo das tensões da fonte e da carga

as classificações da Tabela A.5 o VTCD em questão é do tipo afundamento momentâneo de tensão, que estabelece o limite inferior de $0,9pu$ para a sua caracterização. Desta forma, o controle do UPQC-i fixa a amplitude da tensão da saída em $0,9pu$, eliminando a ocorrência do afundamento nas tensões da carga, tanto para a ocorrência do distúrbio 3 quanto do distúrbio 4. O transitório observado no valor coletivo das tensões na carga após o início do afundamento de tensão ($t = 5,5$ e $t = 7,5$) (Figura 3.38) pode ser considerado um afundamento na carga de alguns ciclos, demonstrando uma limitação desta estratégia de controle. Este fato será detalhado na seção 3.5.

As Figuras 3.39 e 3.40 apresentam os perfis de corrente da carga e da fonte, respectivamente. A não uniformidade dos tons de cinza do gráfico das correntes da carga é um indicador da existência de desequilíbrio. Já no gráfico das correntes da fonte a uniformidade sugere a presença de correntes equilibradas.

As variações presentes nos perfis das correntes da carga e da fonte são observadas de forma mais clara no gráfico do valor coletivo destas correntes apresentado na Figura 3.41. Novamente, o valor coletivo médio das correntes da carga é maior em relação ao valor coletivo das correntes da fonte, devido à existência de correntes reativas nas cargas. Entretanto, o gráfico apresenta um valor coletivo maior para as

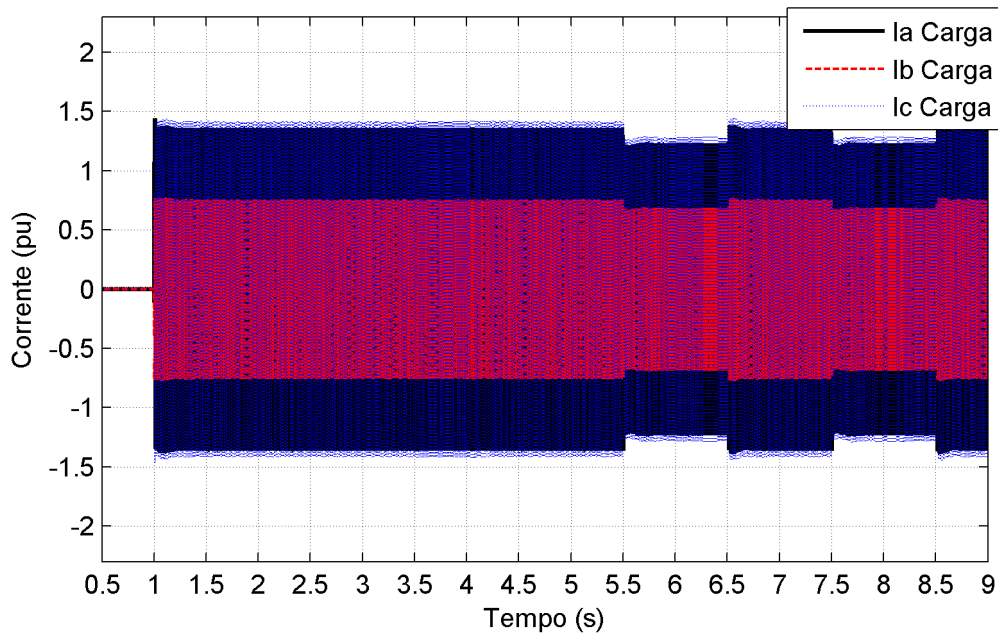


Figura 3.39: Perfil das correntes da carga.

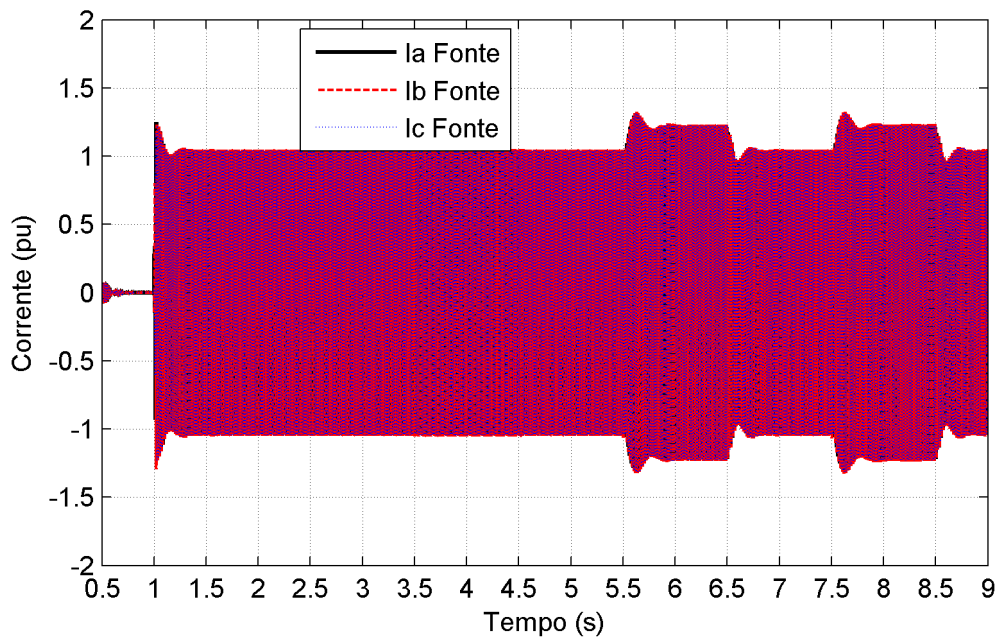


Figura 3.40: Perfil das correntes da fonte.

correntes da fonte em relação às da carga durante a presença dos distúrbios 3 e 4. A diminuição do valor coletivo da carga é devida ao fato de que, durante a ocorrência do afundamento de tensão, as tensões sobre a carga são fixadas no valor de $0,9pu$, de forma a obedecer o valor limite permitido em norma. Como as correntes das cargas em questão são dependentes das tensões sobre elas aplicadas, conclui-se que

deverá ocorrer uma diminuição da amplitude destas correntes. O fato de o valor coletivo das correntes da fonte aumentar já é esperado, visto que para a fonte suprir a potência ativa da carga, com uma tensão menor do que aquela aplicada na carga, a sua corrente necessariamente deverá ser maior.

O gráfico da tensão no capacitor do elo de corrente contínua é apresentado na Figura 3.42. O controle de tensão realizado pelo UPQC-i também mostra-se eficiente na presença simultânea de distúrbios de QEE nas tensões da fonte e nas correntes da carga. Os pequenos transitórios, existentes durante os instantes de ocorrência e extinção dos distúrbios, são eliminados pelo controle, fazendo com que a tensão do elo CC se estabilize no valor da referência.

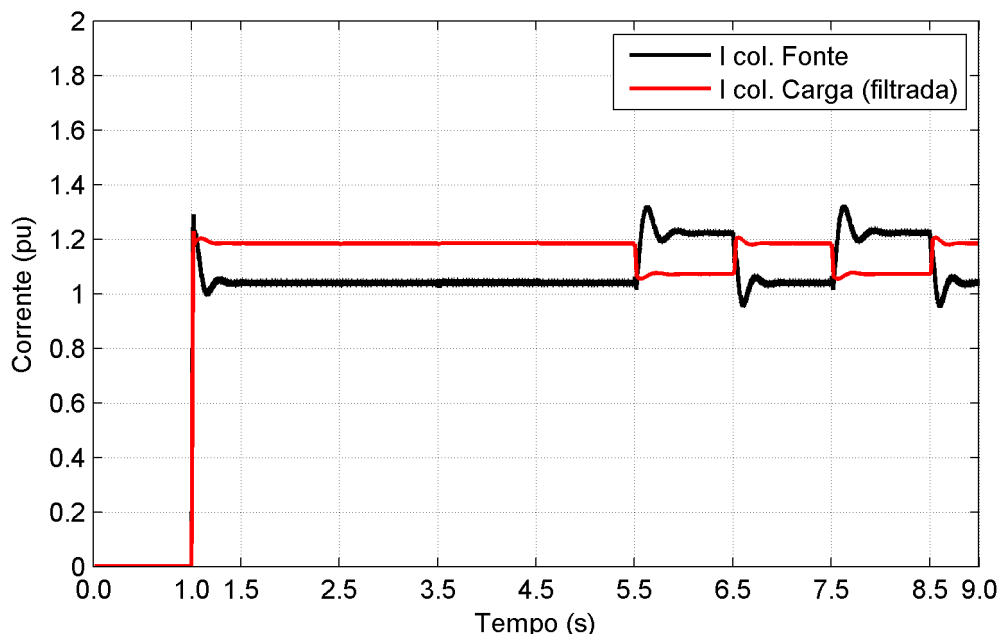


Figura 3.41: Valor coletivo das correntes da fonte e da carga (filtrada)

Os gráficos que serão apresentados a seguir apresentam o comportamento das correntes e tensões trifásicas das cargas e da fonte, destacando os instantes de ocorrência e extinção dos distúrbios na tensão da fonte, cobrindo um período fundamental de dois ciclos, anteriores e posteriores para cada um destes instantes.

As Figuras 3.43, 3.44, 3.45 e 3.46 apresentam os gráficos das tensões de linha da fonte referentes aos distúrbios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Pode-se observar claramente as alterações das formas de onda das tensões. Sem a presença do condicionador UPQC-i para realizar a compensação destes distúrbios, estas seriam as

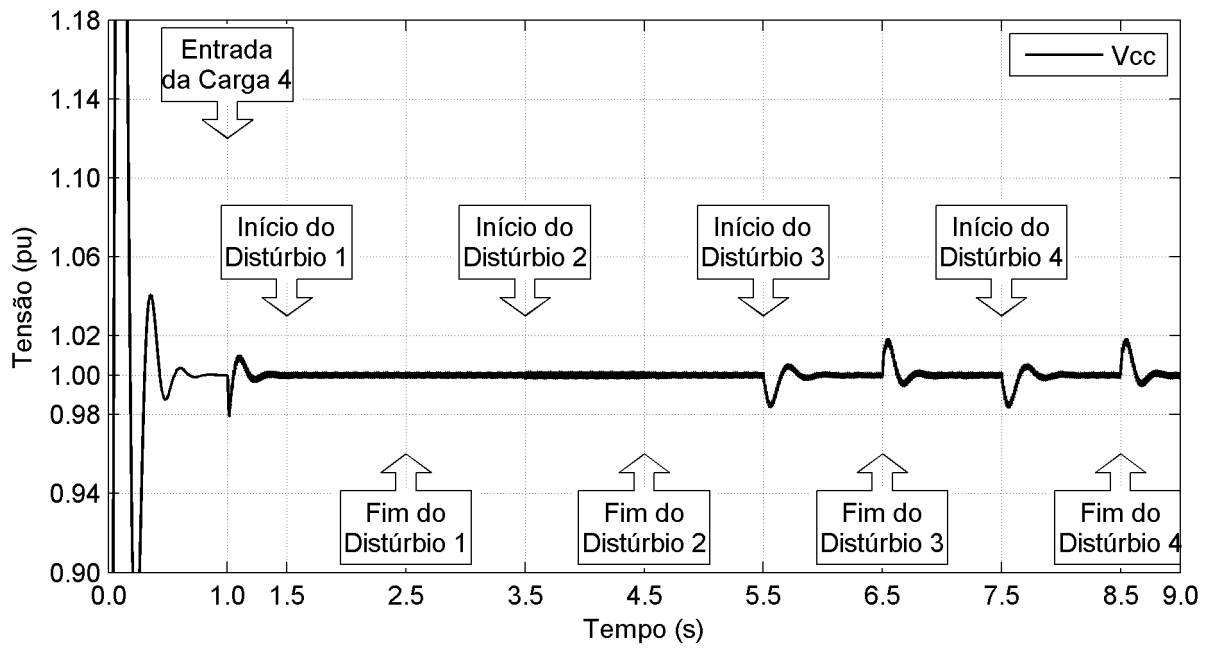


Figura 3.42: Tensão no capacitor do elo CC

tensões fornecidas para a carga.

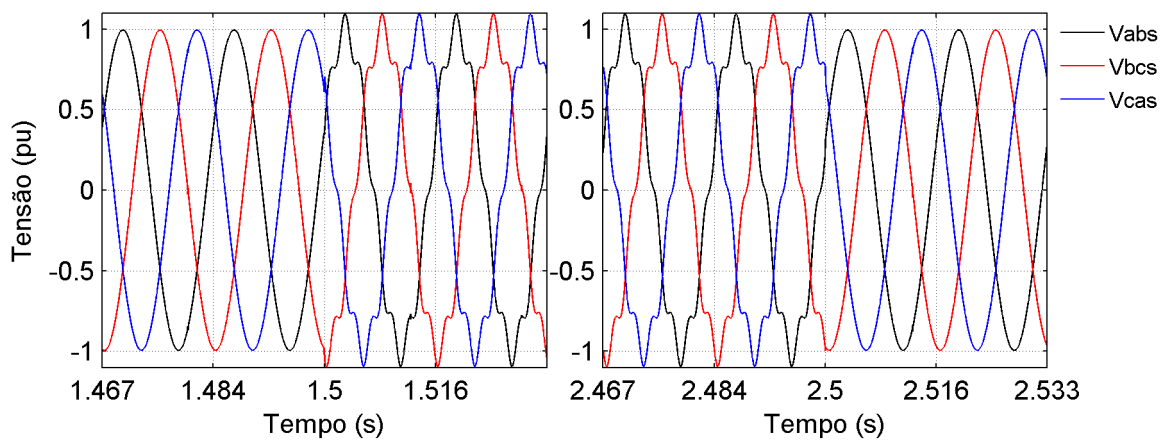


Figura 3.43: Tensões de linha da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio1

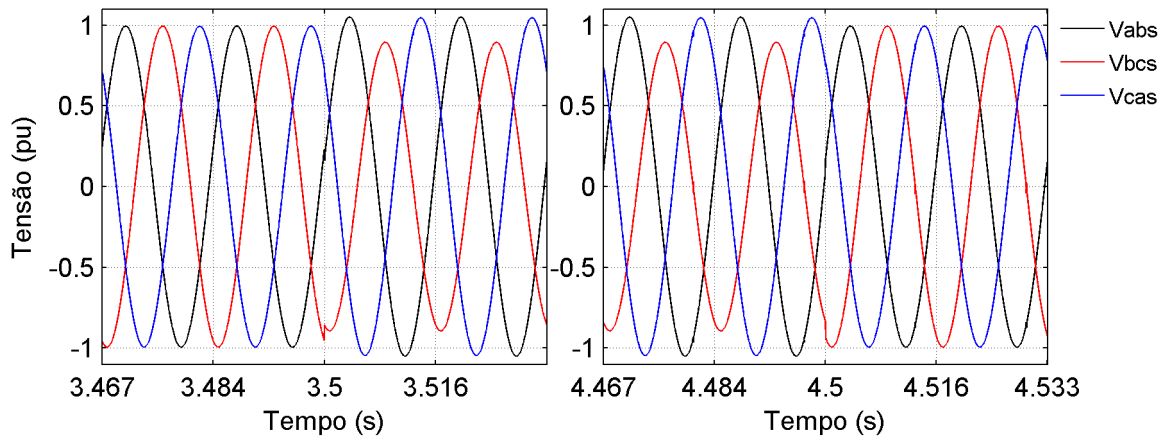


Figura 3.44: Tensões de linha da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio2

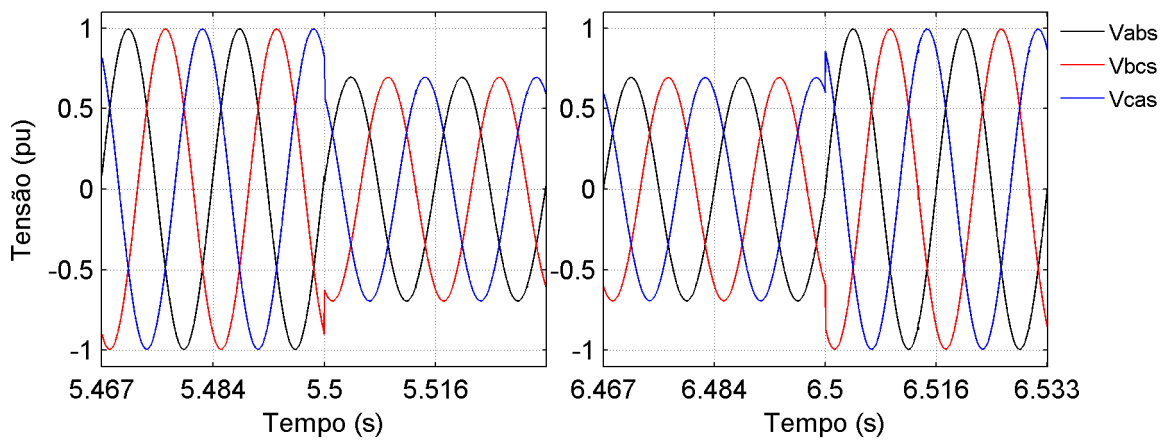


Figura 3.45: Tensões de linha da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio3

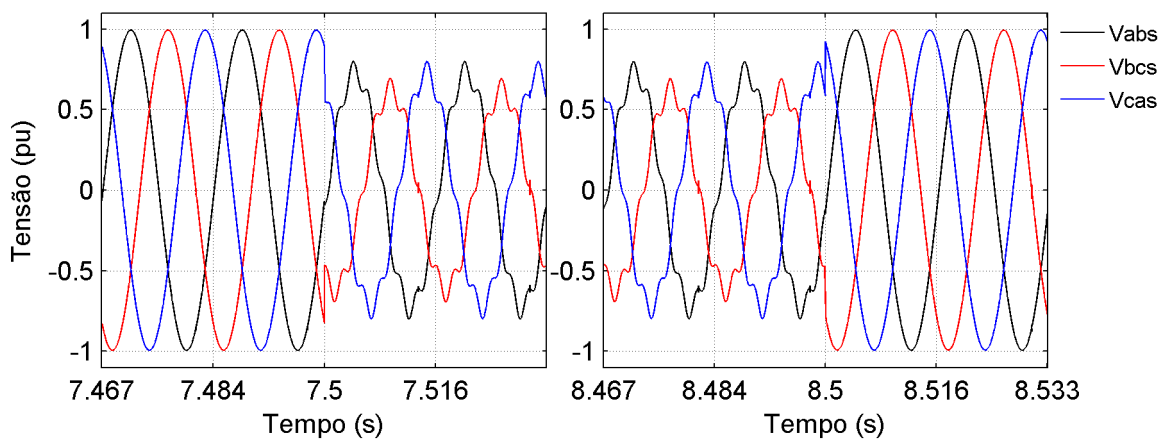


Figura 3.46: Tensões de linha da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio4

A estratégia de controle adotada para o UPQC-i é capaz de identificar os distúrbios ocorridos nas tensões da fonte e realizar a compensação de tal forma a fornecer, para as cargas conectadas ao seu barramento de saída, tensões senoidais e equilibradas, conforme apresentam os gráficos das Figuras 3.47, 3.48, 3.49 e 3.50, referentes aos distúrbios 1, 2, 3 e 4, respectivamente.

Durante a ocorrência dos distúrbios 1 e 2, onde não existe uma variação do componente fundamental de seqüência positiva, as tensões fornecidas para a carga praticamente não sofrem variações. Entretanto, observa-se novamente, através dos gráficos das Figuras 3.49 e 3.50, a atuação do controle de correção de VTCD, fixando as amplitudes das tensões fornecidas para as cargas num valor limite de $0,9pu$, abaixo do nominal, para o qual as mesmas encontram-se em conformidade com as normas aplicadas no Brasil.

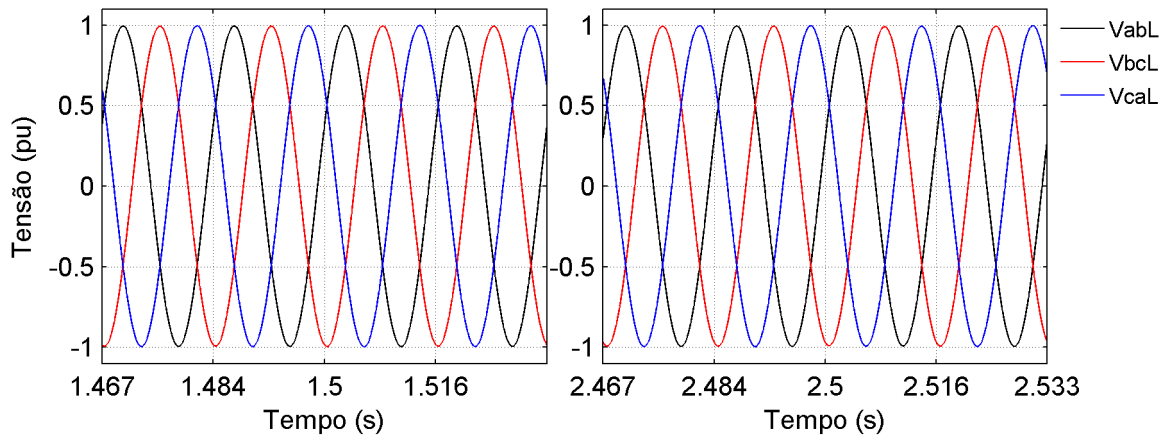


Figura 3.47: Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio1

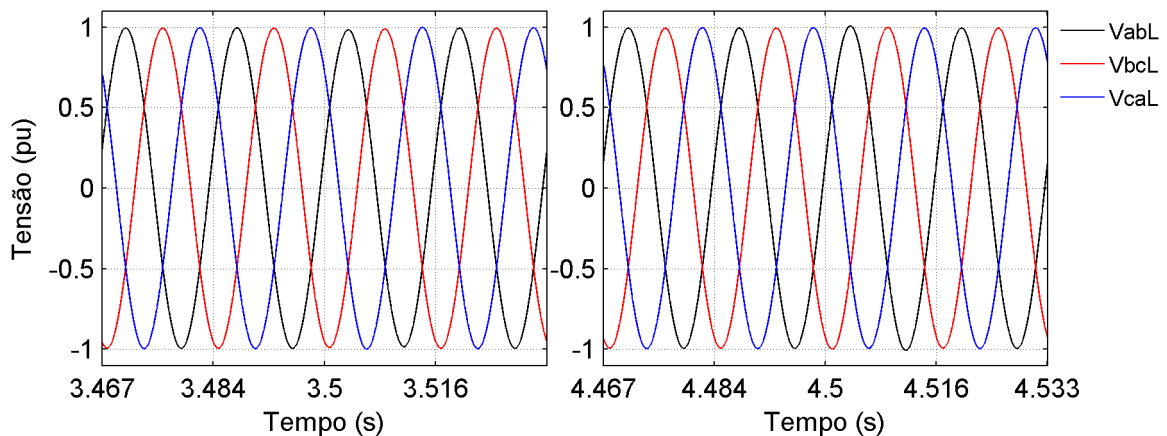


Figura 3.48: Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio2

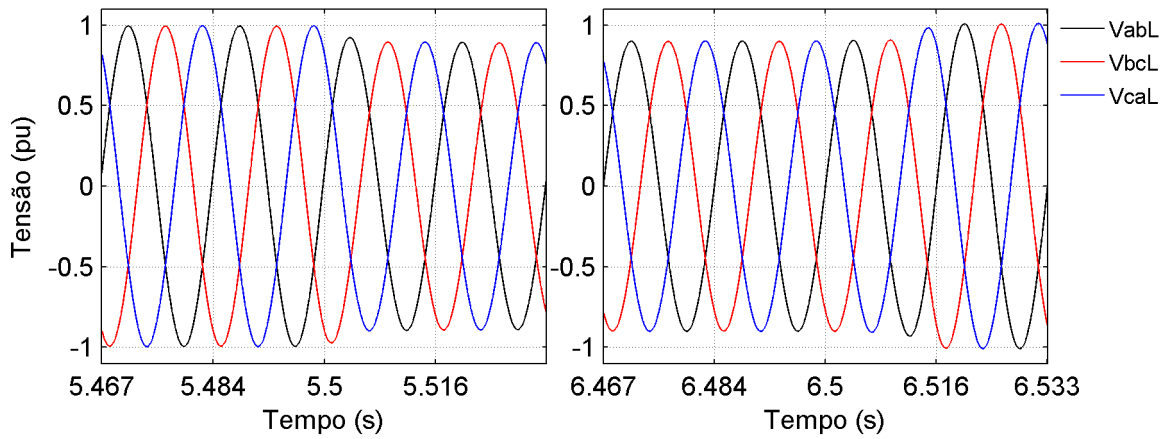


Figura 3.49: Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio3

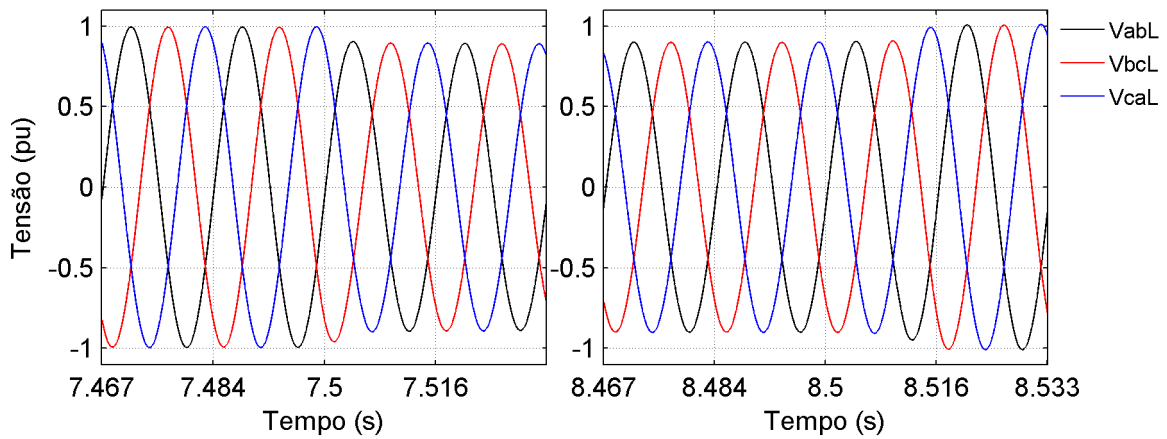


Figura 3.50: Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio4

Como para esta simulação, a carga 4, caracterizada na Tabela 3.1, é mantida conectada ao longo da simulação, espera-se que as suas correntes não sofram variações, independente dos problemas de qualidade de tensão. Isto pode ser comprovado analisando-se os gráficos apresentados nas Figuras 3.51, 3.52, 3.53 e 3.54, que apresentam as formas de onda para as correntes das cargas durante a ocorrência dos distúrbios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Apenas as correntes da carga, durante a presença dos distúrbios 3 e 4, apresentam uma diminuição de amplitude, devido à tensão sobre a carga estar um pouco abaixo do valor nominal, porém dentro da faixa adequada estabelecida por norma.

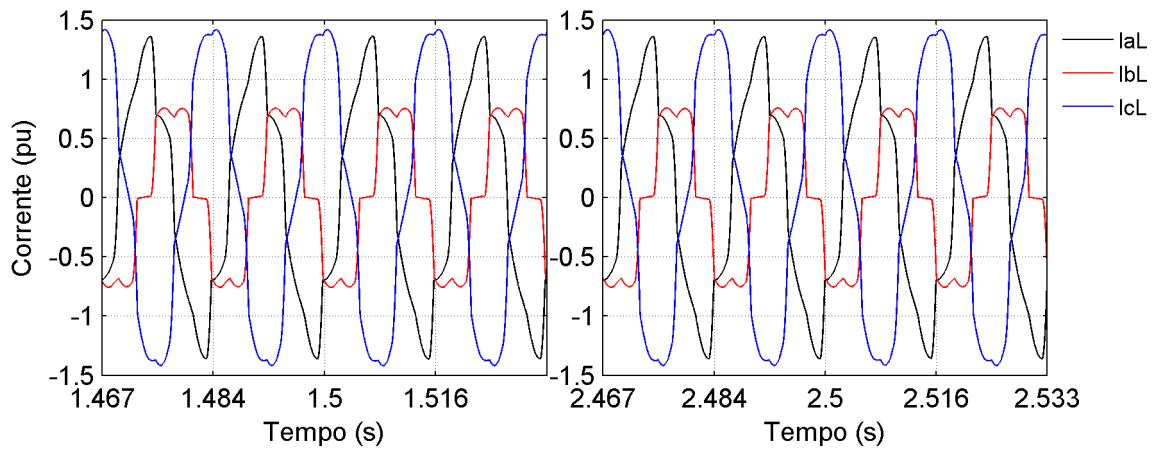


Figura 3.51: Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 1

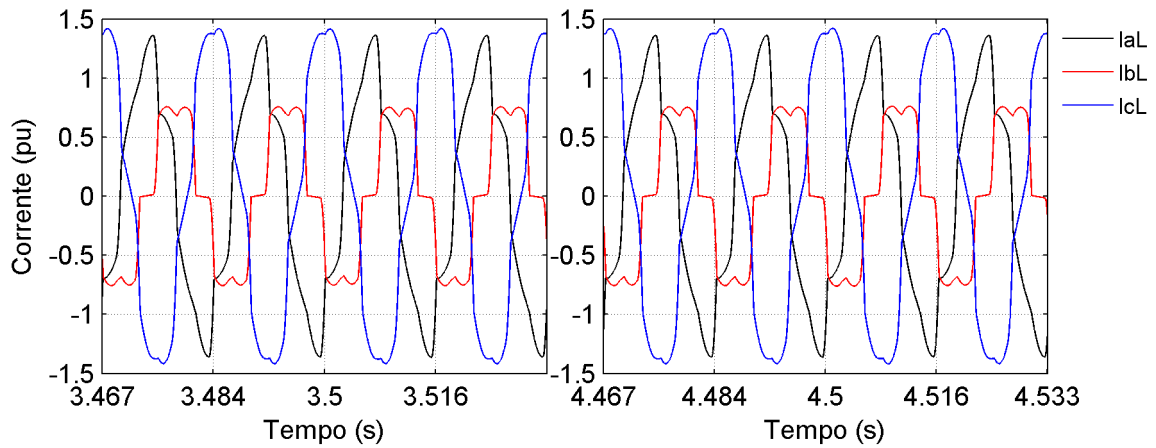


Figura 3.52: Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 2

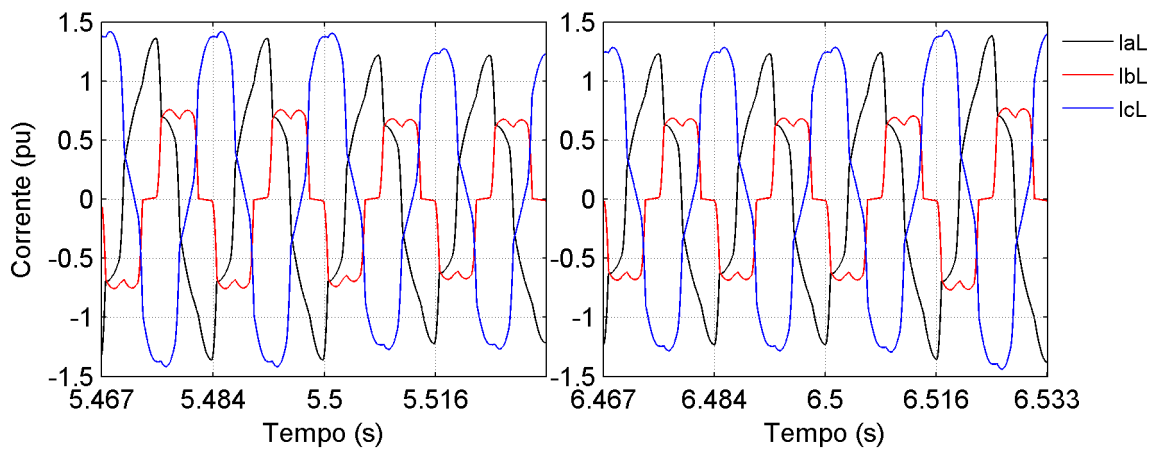


Figura 3.53: Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3

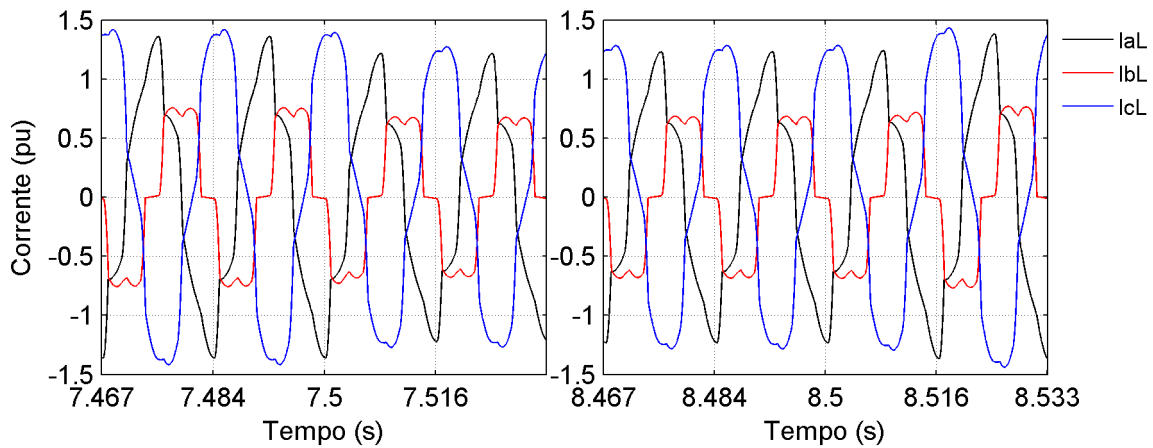


Figura 3.54: Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4

As Figuras 3.55, 3.56, 3.57 e 3.58 apresentam os gráficos das correntes da fonte referentes aos distúrbios 1, 2, 3 e 4. O formato senoidal destas correntes de mesma amplitude e defasadas simetricamente, indicam a capacidade do UPQC-i de evitar que os problemas de QEE produzidos pelas correntes das cargas se propaguem para a fonte. Durante os distúrbios 1 e 2, as correntes da fonte visualmente não se alteram. Durante os afundamentos de tensão (distúrbios 3 e 4) observa-se uma dinâmica mais lenta, visto que as correntes da fonte impostas pelo filtro série não respondem de forma imediata. No transitório inicial, parte da energia armazenada no capacitor do elo CC é fornecida para a carga, fazendo com que a sua tensão diminua e o controle da tensão do elo CC atua corrigindo o erro, sintetizando correntes de referência para o filtro série drenar mais energia da rede. Esta limitação será analisada na Seção 3.5.

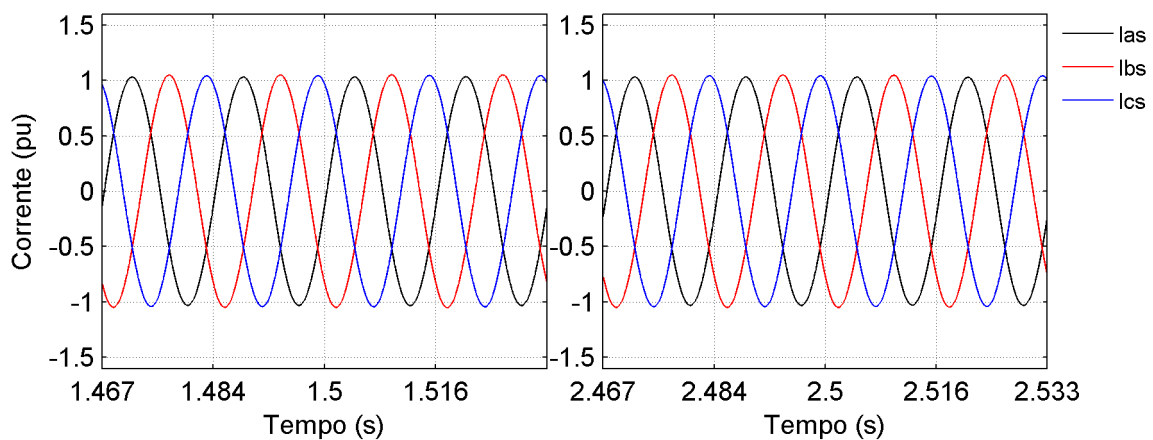


Figura 3.55: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 1

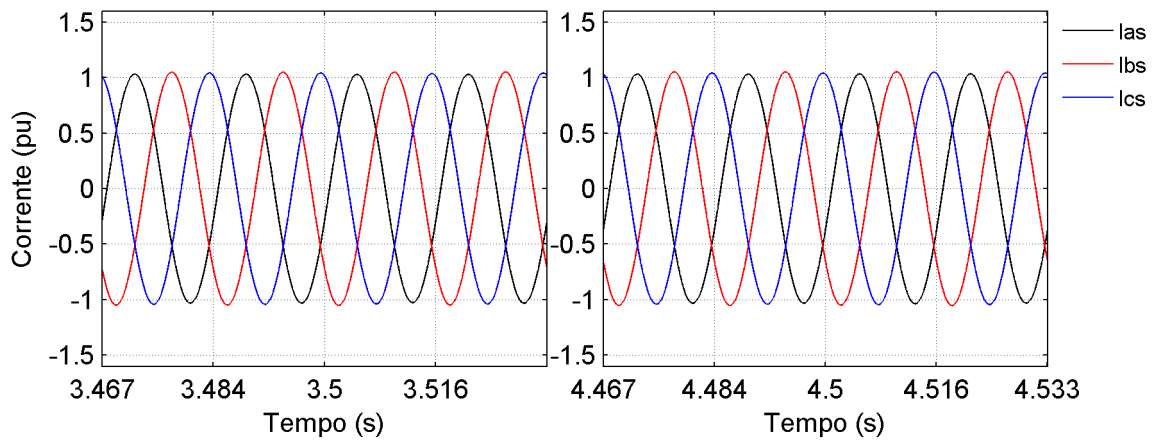


Figura 3.56: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 2

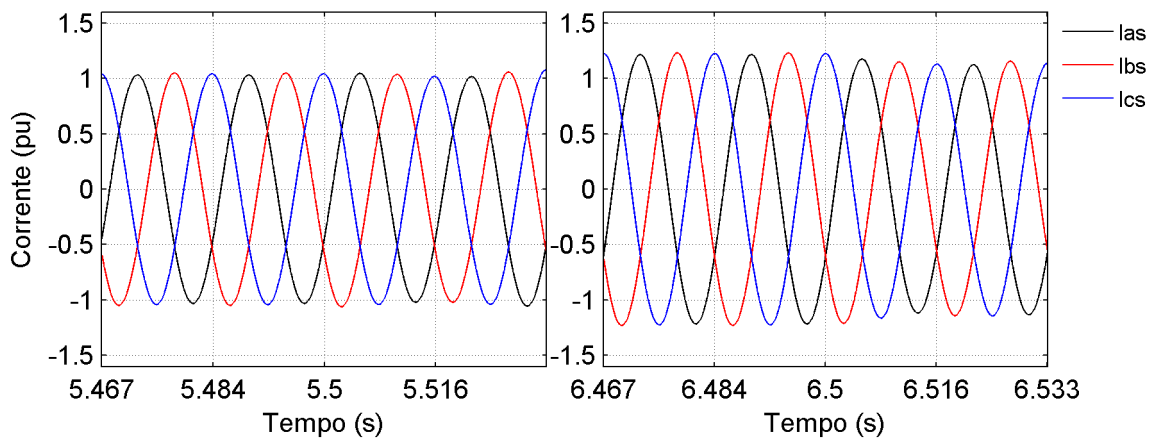


Figura 3.57: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3

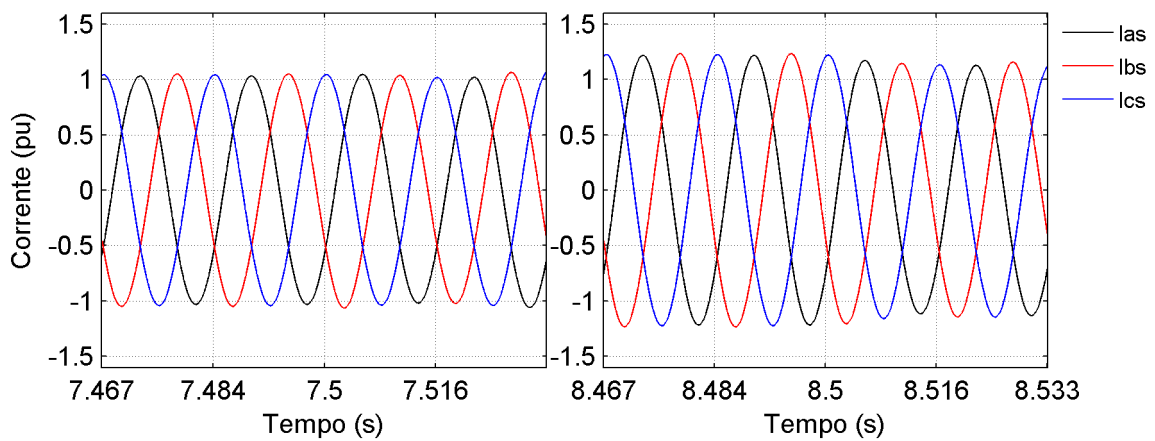


Figura 3.58: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4

Os resultados, que serão apresentados agora, permitem realizar uma análise quantitativa da operação do UPQC-i em regime permanente, alimentando a carga 4 frente a tensões com a presença do distúrbio 4. Em outras palavras, se por um lado a geração de correntes desequilibradas, com harmônicos e de fator de potência não unitário são características inerentes às cargas em questão, por outro lado, as tensões fornecidas pela fonte possuem um afundamento de tensão de $0,7pu$, 10% de desbalanço de seqüência negativa e 10% de componente harmônico de sétima ordem. O período utilizado nos gráficos subseqüentes equivale ao último período fundamental anterior à extinção do distúrbio 4, no instante $8,5s$.

Os gráficos da Figura 3.59 apresentam índices de distorções harmônicas totais para as correntes da carga entre 13% e 25%. Na Figura 3.60 são apresentados os gráficos das correntes da carga e seus respectivos componentes fundamentais. Os resultados indicam um desequilíbrio de seqüência negativa da ordem de 35%.

Estas mesmas análises podem ser realizadas para as correntes da fonte através dos gráficos das Figuras 3.61 e 3.62. Os índices de distorções harmônicas totais para as correntes da fonte situam-se abaixo de 0,5%, assim como o percentual de desequilíbrio de seqüência negativa para estas correntes.

A partir destes resultados, é possível afirmar que a modelagem e a estratégia de controle propostas para o condicionador UPQC-i são eficazes para a compensação de harmônicos e desequilíbrios presentes nas correntes das cargas, evitando-se a propagação destes componentes indesejáveis para a fonte de alimentação.

No gráfico da Figura 3.63 Observa-se um percentual de distorção total harmônica para as tensões de linha da fonte da ordem de 10%, devido principalmente ao componente harmônico de sétima ordem. O desequilíbrio de seqüência negativa dos seus componentes fundamentais (Figura 3.64) situa-se por volta de 10% e as suas amplitudes são inferiores ao valor nominal devido ao afundamento momentâneo de tensão. Os gráficos das Figuras 3.65 e 3.66 apresentam índices mínimos de distorções harmônicas totais para as tensões da carga. As amplitudes dos componentes fundamentais destas tensões são iguais para as três fases e fixadas no valor de $0,9pu$, que é o limite para a caracterização ou não de um afundamento de tensão. O desequilíbrio destas tensões situa-se em torno de 0,1%, também considerado desprezível.

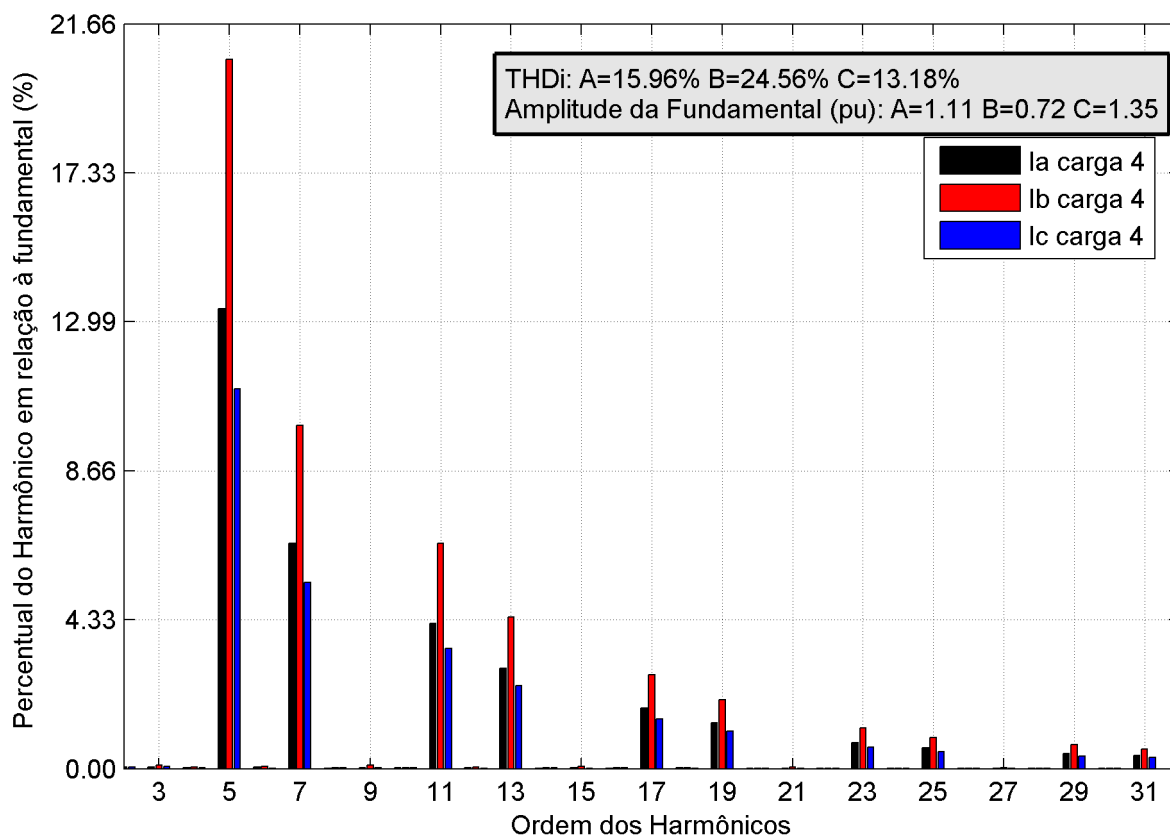


Figura 3.59: Espectro harmônico das correntes da carga 4 durante a presença do distúrbio 4

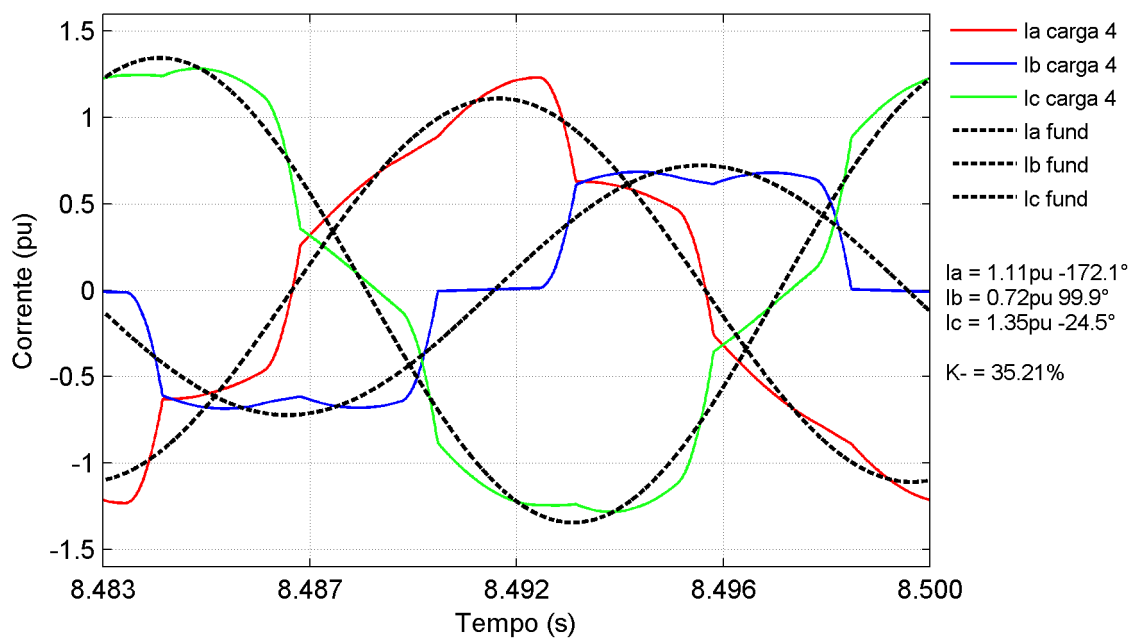


Figura 3.60: Componentes fundamentais das correntes da carga 4 durante a presença do distúrbio 4

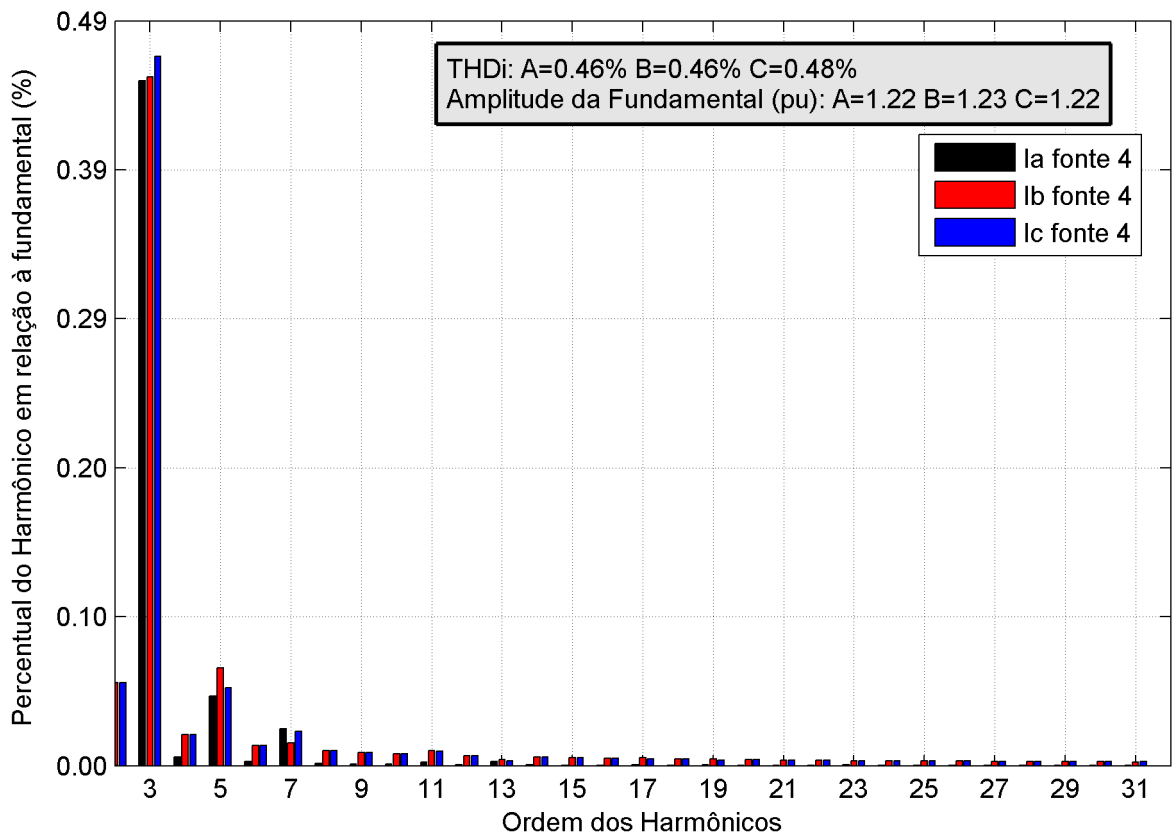


Figura 3.61: Espectro harmônico das correntes da fonte compensadas, na presença do distúrbio 4

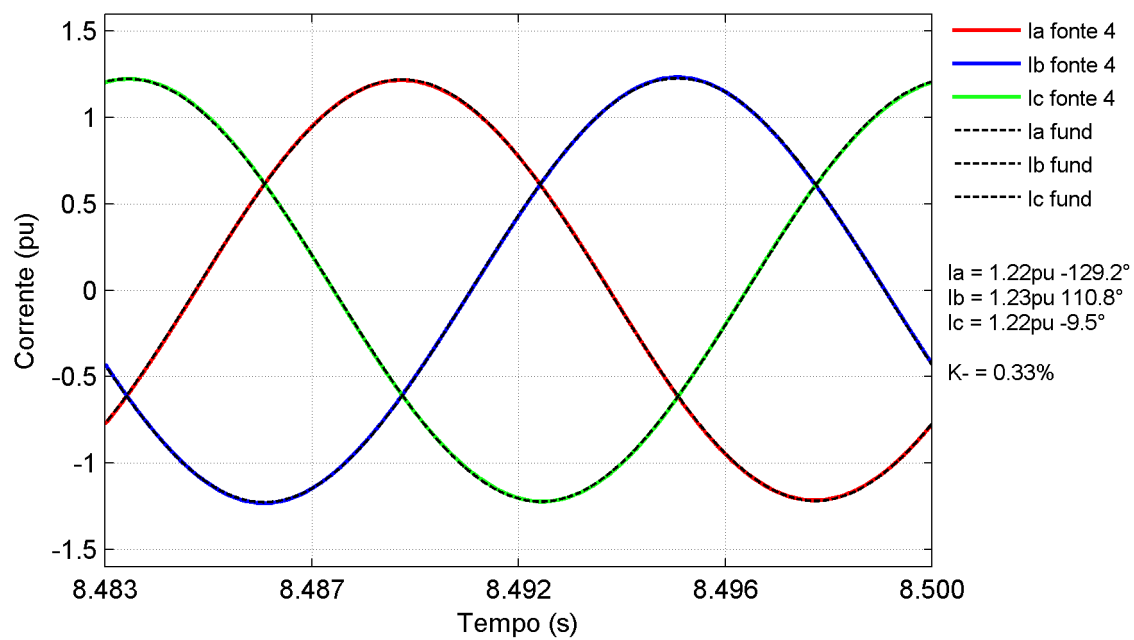


Figura 3.62: Componentes fundamentais das correntes da fonte compensadas, na presença do distúrbio 4

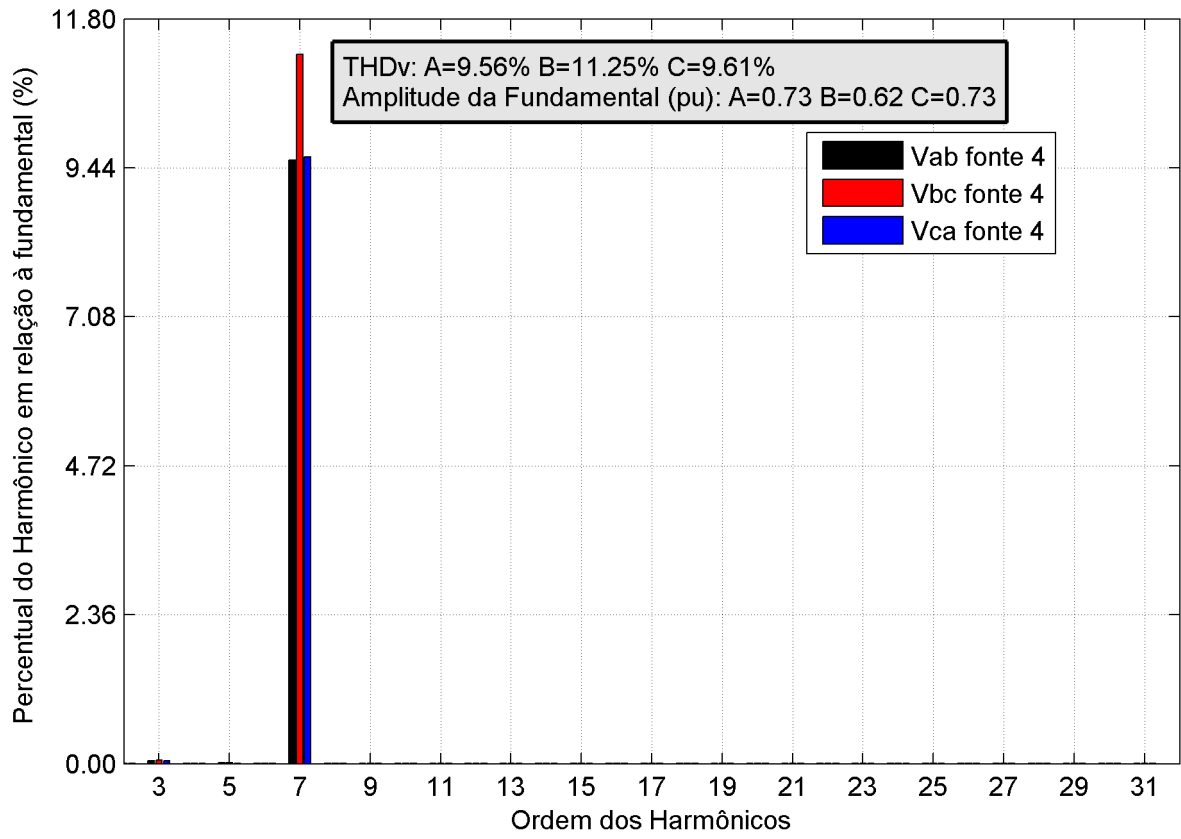


Figura 3.63: Espectro harmônico das tensões de linha da fonte com o distúrbio 4.

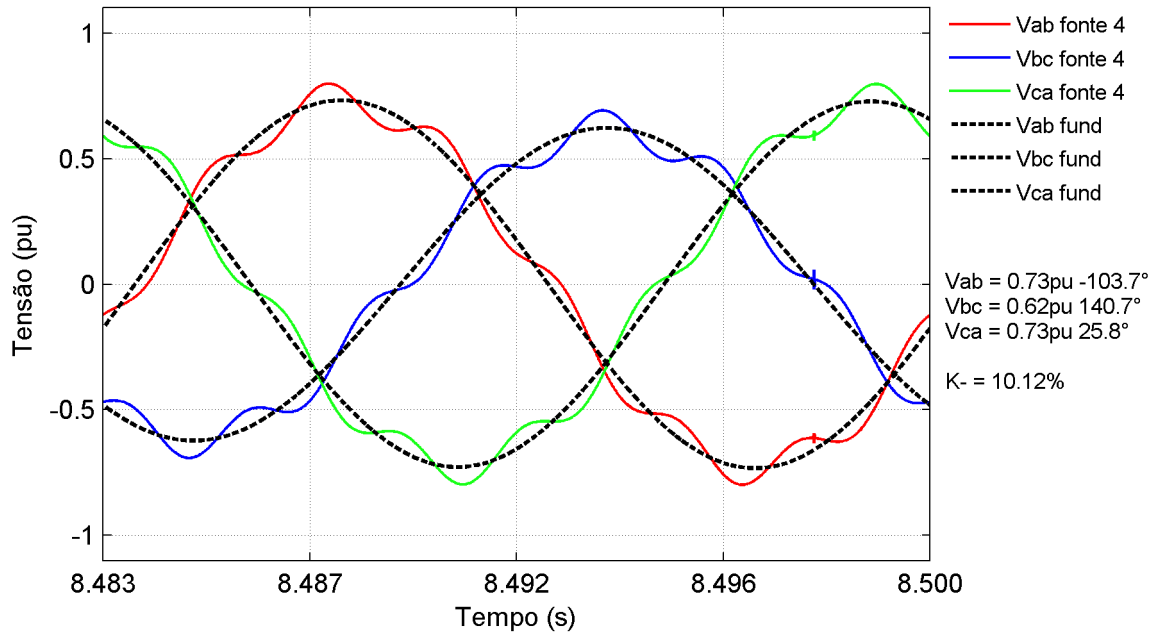


Figura 3.64: Componentes fundamentais das tensões de linha da fonte com o distúrbio 4.

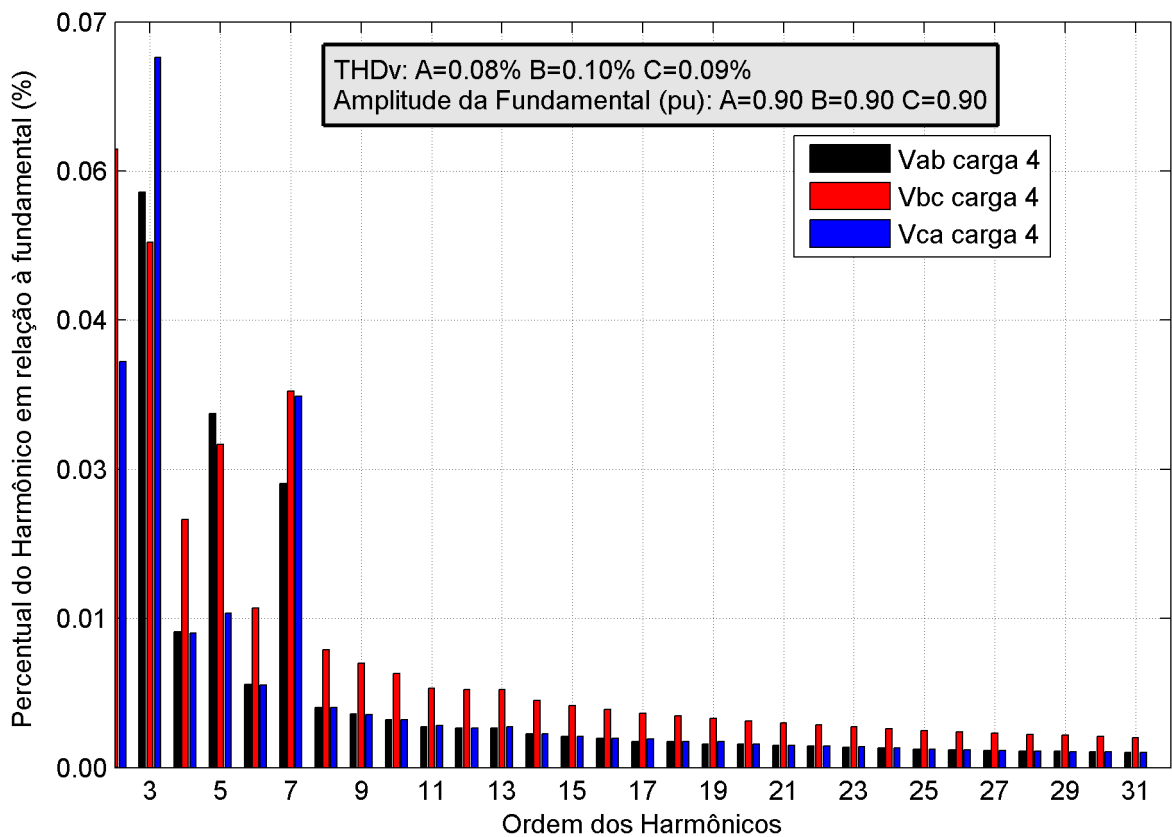


Figura 3.65: Espectro harmônico das tensões de linha na carga 4 em regime permanente na presença do distúrbio 4.

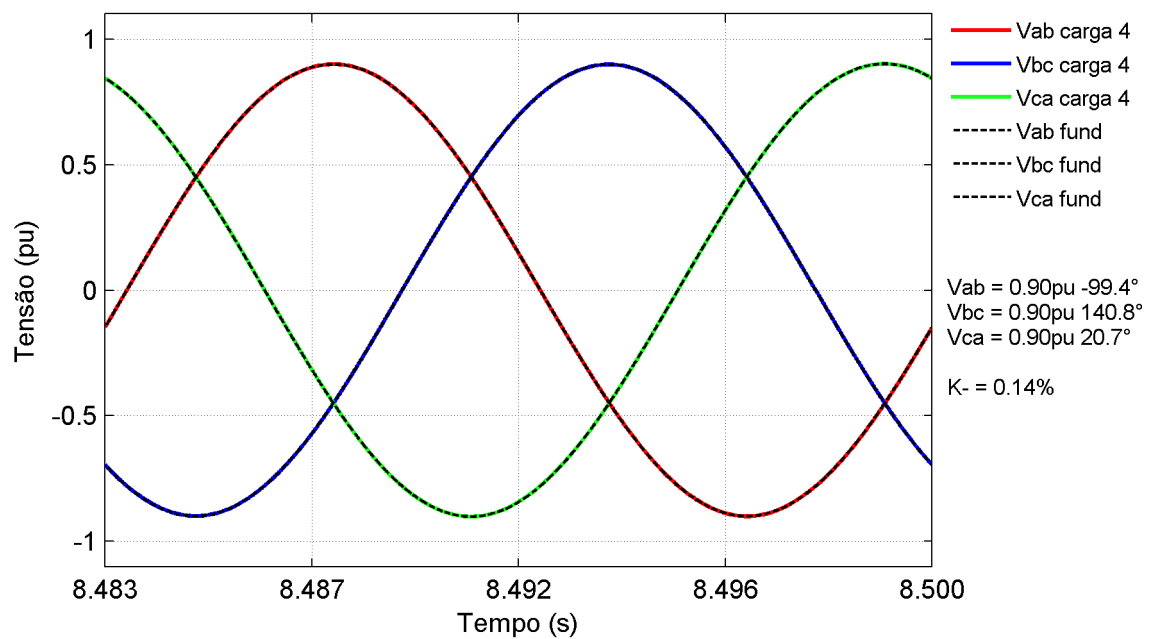


Figura 3.66: Componentes fundamentais das tensões de linha na carga 4 em regime permanente na presença do distúrbio 4.

A Tabela 3.4 apresenta o fator de potência de deslocamento (FPD), para a operação em regime permanente da Carga 4 durante a presença do distúrbio 4. O cálculo do FPD¹ utiliza as informações das amplitudes e ângulos dos componentes fundamentais das Figuras 3.60, 3.62, 3.64 e 3.66. Os resultados demonstram a capacidade do UPQC-i em realizar a correção do fator de potência, mesmo frente às severas condições de problemas de QEE.

Tabela 3.4: Fator de Potência de Deslocamento durante a operação da carga 4 e a presença do distúrbio 4

Fase	Fonte			Carga		
	$\phi_{V_1}(\text{°})$	$\delta_{I_1}(\text{°})$	FPD	$\phi_{V_1}(\text{°})$	$\delta_{I_1}(\text{°})$	FPD
A	-128,9	-129,2	1,000	-129,4	-172,1	0,73
B	105,6	110,8	-0,996	110,8	99,9	0,98
C	-3,8	-9,5	0,995	-9,3	-24,5	0,97

Após a análise de todos os gráficos apresentados nesta simulação, denominada ideal2, é possível concluir que o modelo ideal do UPQC-i é capaz de realizar a compensação do afundamento de tensão ocorrido na fonte, do desequilíbrio e dos componentes harmônicos presentes nestas tensões, fornecendo para a carga tensões senoidais equilibradas e reguladas. Ao mesmo tempo o UPQC-i realiza a compensação das correntes desequilibradas, com alto conteúdo harmônico e com baixo fator de potência, produzidas pelas cargas. Conclui-se que o UPQC-i evita que os problemas de QEE presentes nas tensões da fonte afetem as tensões da carga e os problemas de QEE presentes nas correntes da carga não afetem as correntes da fonte.

3.5 Análise da resposta dinâmica e proposição de estratégia de controle modificada

Na simulação apresentada na Seção 3.4.2 as correntes da carga e da fonte, principalmente esta última, apresentam um comportamento dinâmico muito lento durante

¹valores positivos e negativos indicam corrente em atraso e em avanço em relação a tensão, respectivamente.

o transitório após o instante da ocorrência de VTCDs. Isto pode ser observado na Figura 3.41 e em detalhe nas Figuras 3.53 e 3.54, para as correntes da carga, e nas Figuras 3.57 e 3.58, para as correntes da fonte. Quase não se percebe a mudança de estado das correntes nos dois ciclos posteriores aos instantes de ocorrência dos afundamentos ($t = 5,5s$ e $t = 7,5s$).

A explicação para esta dinâmica lenta encontra-se no fato de que tanto na estratégia de controle reduzida quanto na adaptativa, quem estabelece a parcela da potência real instantânea circulante entre os filtros ativos série e paralelo, necessária para a compensação do afundamento ou elevação de tensão é a parcela p_{loss} calculada pelo controle da tensão do elo CC (Figura 3.5).

Na implementação real, o ponto de operação da parcela p_{loss} encontra-se em torno de um valor que representa as perdas do filtro ativo. No modelo ideal este ponto de operação é em torno do valor zero, pois o capacitor modelado é ideal e não são consideradas as perdas. Isto é verdade somente para os casos onde não ocorre a compensação de afundamentos ou elevações de tensão. Já para a situação em que existe essa compensação, o controlador PI do regulador de tensão do elo CC deverá encontrar um novo ponto de operação para p_{loss} em torno do valor que representa a potência circulante entre os dois filtros ativos do UPQC-i.

O gráfico da Figura 3.67 apresenta o comportamento da variável de controle p_{loss} para a simulação ideal2 (Seção 3.4.2). Nesta simulação, os dois últimos distúrbios de tensão envolvem a compensação de VTCD e os dois primeiros não. O valor de p_{loss} situa-se em torno de zero quando não há compensação de VTCD, caso contrário, ele assume um novo ponto de operação diferente de zero.

Diante do exposto, fez-se necessário introduzir uma alteração na estratégia de controle do filtro ativo série com o objetivo de melhorar a dinâmica do modelo do UPQC-i. Na nova estratégia de controle apresentada na Figura 3.68, intitulada “modificada”, o cálculo da potência real instantânea da carga (p_l) é dado por:

$$\begin{bmatrix} p_l \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{C1\alpha}(t) & v_{C1\beta}(t) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha l}(t) \\ i_{\beta l}(t) \end{bmatrix}, \quad (3.30)$$

onde,

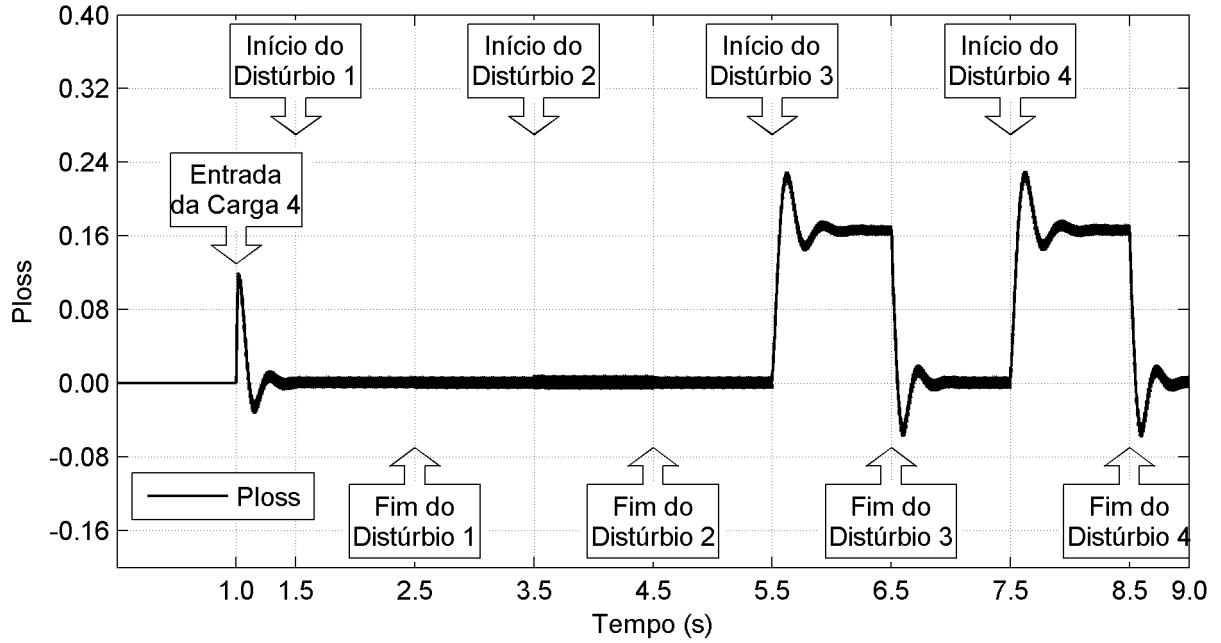


Figura 3.67: Variável de controle p_{loss} durante a simulação ideal2.

- $v_{c1\alpha}$ e $v_{c1\beta}$: tensões de compensação do filtro paralelo nas coordenadas $\alpha\beta$;
- $i_{\alpha l}$ e $i_{\beta l}$: correntes da carga nas coordenadas $\alpha\beta$.

Nesta situação, a potência p_l representa numericamente a potência ativa instantânea da carga. Entretanto, o mesmo não ocorre no algoritmo proposto inicialmente, onde a potência p_l é apenas uma variável auxiliar para a determinação da parcela ativa dos componentes de seqüência positiva das correntes da carga, pois na transformação direta e inversa as tensões utilizadas no cálculo são senoides unitárias nas coordenadas $\alpha\beta$ que não representam numericamente nem a amplitude dos componentes de seqüência positiva das tensões da carga e nem as da fonte. Conforme explicado na Seção 3.2.3, esta simplificação elimina o cálculo de divisão na transformação inversa da teoria pq , dada por (3.9), sendo considerada importante na implementação real da estratégia de controle em aritmética de ponto fixo, como é o caso dos microcontroladores de ponto fixo.

Na estratégia modificada esta simplificação não é realizada. O cálculo da transformação inversa da teoria pq para a determinação das correntes de compensação $i_{C1\alpha}(t)$ e $i_{C1\beta}(t)$ é dado por:

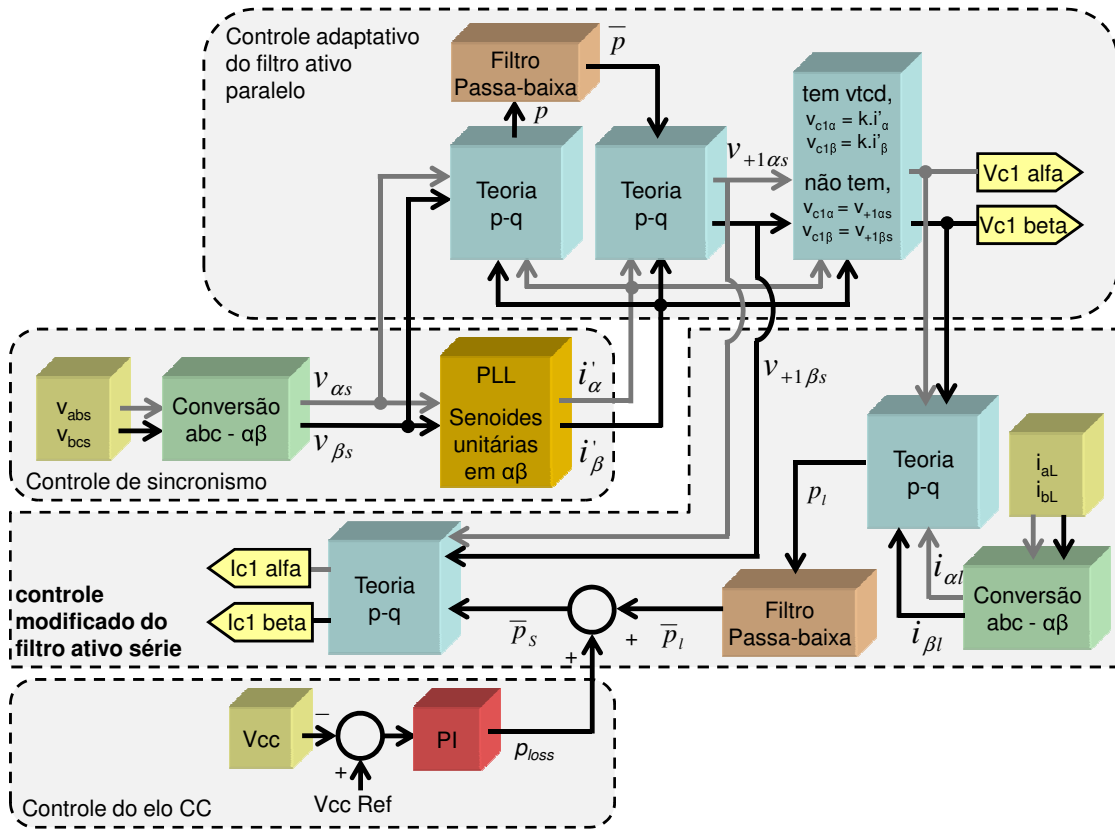


Figura 3.68: Diagrama de blocos do algoritmo de controle adaptativo modificado.

$$\begin{bmatrix} i_{C1\alpha}(t) \\ i_{C1\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{+1\alpha}^2 + v_{+1\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{+1\alpha s}(t) & 0 \\ v_{+1\beta s}(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}_s \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (3.31)$$

onde, \bar{p}_s é dado por (3.16).

Na implementação em algoritmo de ponto fixo, o cálculo de divisão pode ser realizado através de uma biblioteca matemática para a função inversa implementada por consulta em tabela de memória ou por aproximação de séries matemáticas (ex.: série de Taylor).

Executou-se novamente a simulação ideal2 com o algoritmo de controle modificado. Esta simulação, intitulada “ideal3”, será utilizada para a comparação da resposta dinâmica entre as estratégias de controle adaptativa (Figura 3.5) e modificada (Figura 3.68), frente a compensação de VTCD.

A Figura 3.69 apresenta o comportamento da variável de controle p_{loss} durante a simulação ideal3. A estratégia modificada garante que mesmo durante a compen-

sação do afundamento de tensão, nos períodos $5,5s \leq t \leq 6,5s$ e $7,5s \leq t \leq 8,5s$, p_{loss} permanece num ponto de operação em torno do valor zero. Desta forma o controlador PI do elo CC não é mais responsável pela determinação da potência média ativa instantânea circulante.

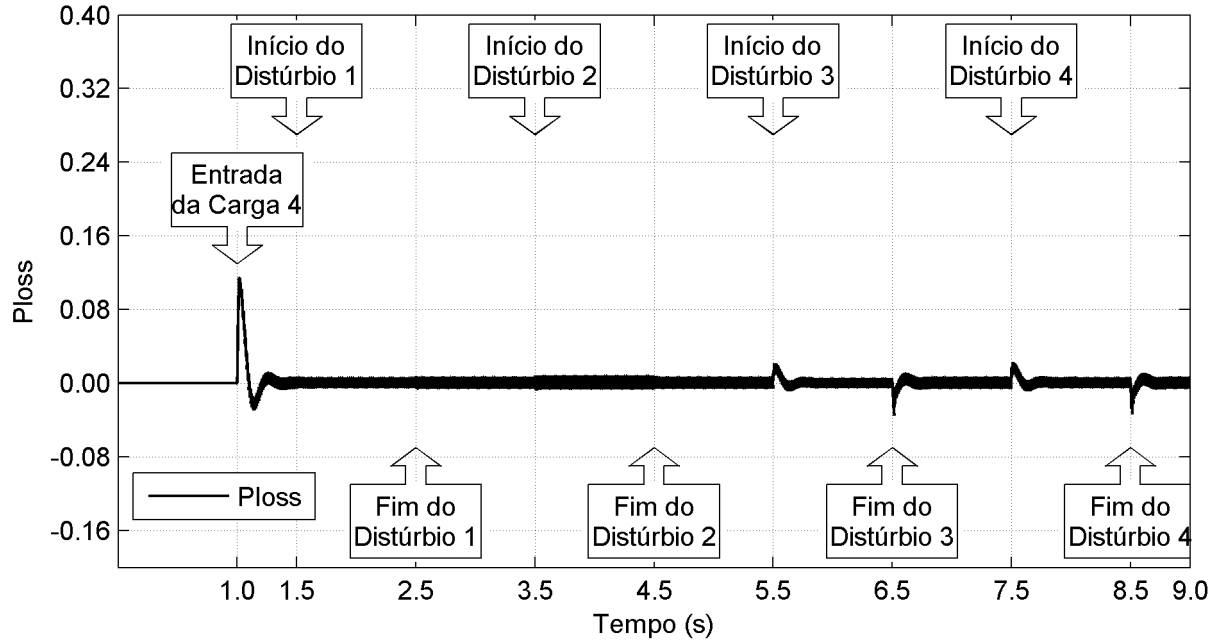


Figura 3.69: Variável p_{loss} do controle modificado durante a simulação ideal3.

As Figuras 3.70 e 3.71 apresentam os gráficos das correntes da carga no transitório de início ($t = 5,5s$ e $t = 7,5s$) e de extinção ($t = 6,5s$ e $t = 8,5s$) do afundamento de tensão na fonte para a operação com o controle modificado. Comparando-se estes gráficos com aqueles da simulação ideal2 com o controle adaptativo concebido originalmente (Figuras 3.53 e 3.54), não se observa grandes diferenças. Entretanto, analisando-se o valor coletivo dos componentes fundamentais das correntes da carga no instante de ocorrência do distúrbio 3 ($t = 5,5s$) observa-se um melhor desempenho dinâmico da estratégia modificada, conforme apresenta a Figura 3.72. Enquanto que com a estratégia adaptativa proposta originalmente o tempo de acomodação² é de $275ms$, com o controle modificado este tempo cai para $36ms$.

²tempo decorrido após a aplicação do distúrbio necessário para que a resposta alcance uma faixa de $\pm 2\%$ do módulo da variação (valor final - inicial) em torno do valor final.

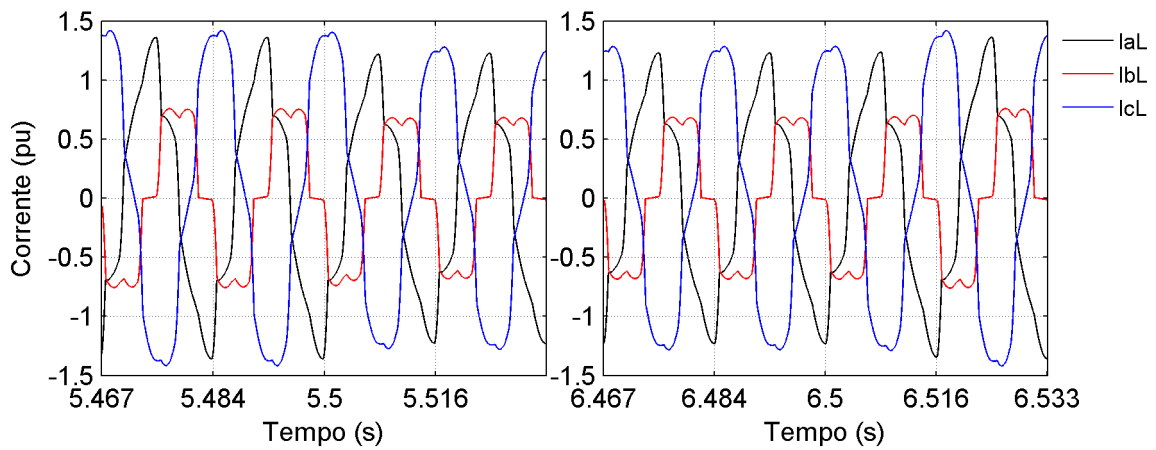


Figura 3.70: Correntes trifásicas da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3, utilizando o controle modificado.

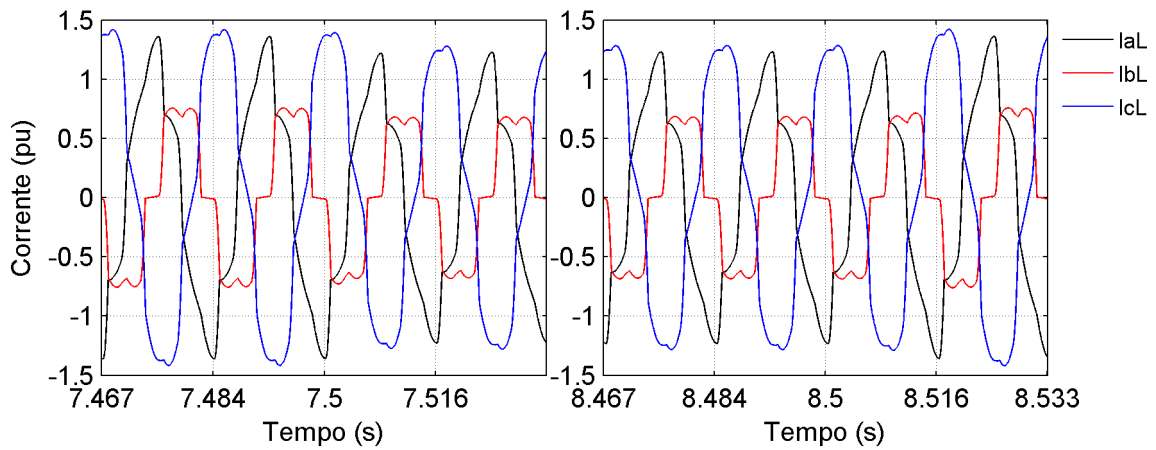


Figura 3.71: Correntes trifásicas da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4, utilizando o controle modificado.

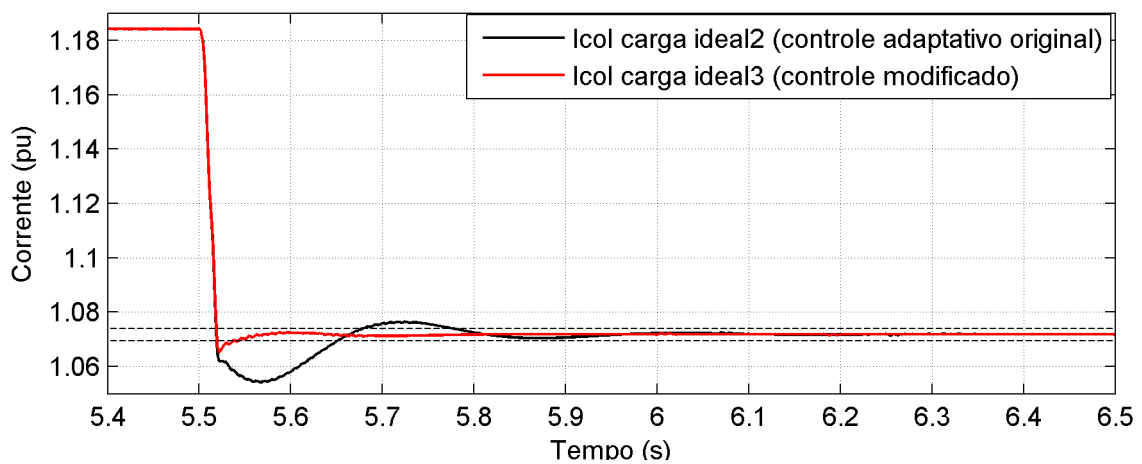


Figura 3.72: Comparação entre as estratégias de controle - dinâmica do valor coletivo das correntes da carga.

A mesma análise é realizada para as correntes da fonte comparando-se as Figuras 3.73 e 3.74, referentes ao controle modificado, com as Figuras 3.57 e 3.58, referentes ao controle adaptativo. Com o controle modificado o filtro ativo série atua imediatamente após os transitórios do afundamento, tanto de início ($t = 5,5$ e $t = 7,5$) quanto de extinção ($t = 6,5$ e $t = 8,5$), enquanto que com o controle adaptativo a dinâmica do filtro série é bem mais lenta e praticamente não se observa alteração na corrente da fonte durante os dois ciclos subsequentes ao início e a extinção dos afundamentos.

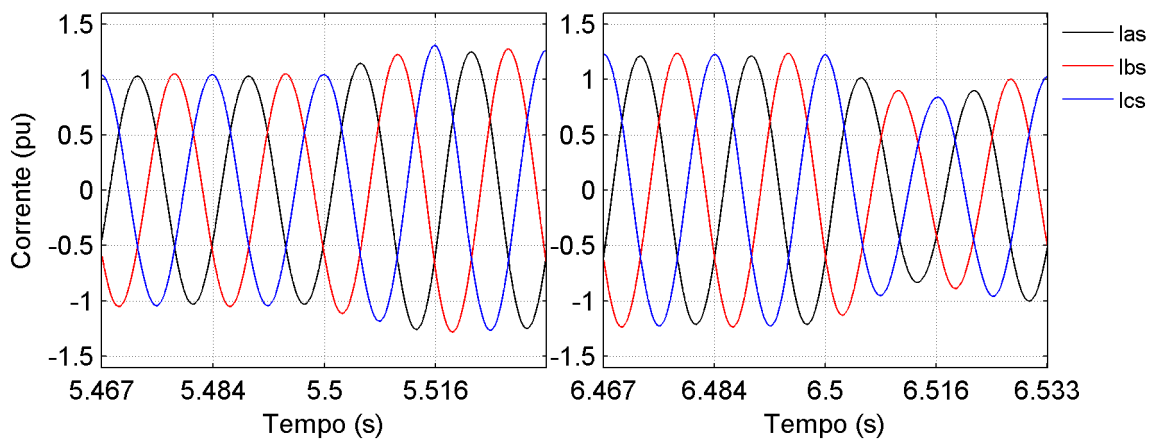


Figura 3.73: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3, utilizando o controle modificado.

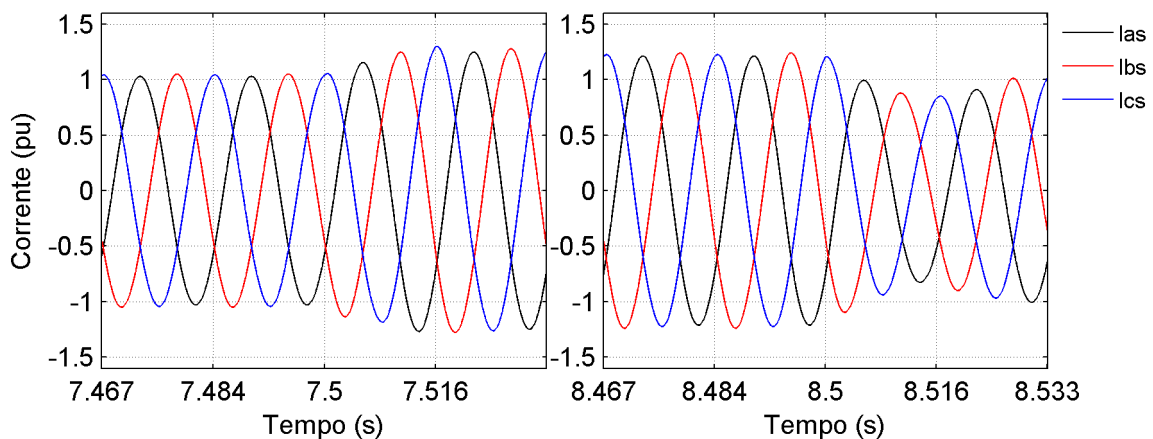


Figura 3.74: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4, utilizando o controle modificado.

O gráfico do valor coletivo das correntes da fonte referente aos controles, modificado e adaptativo é apresentado na Figura 3.75. Os tempos de acomodação são $200ms$ e $500ms$, respectivamente. Este transitório está relacionado com a dinâmica

do capacitor do elo CC do modelo ideal, conforme se observa no gráfico da variável de controle p_{loss} (Figura 3.69).

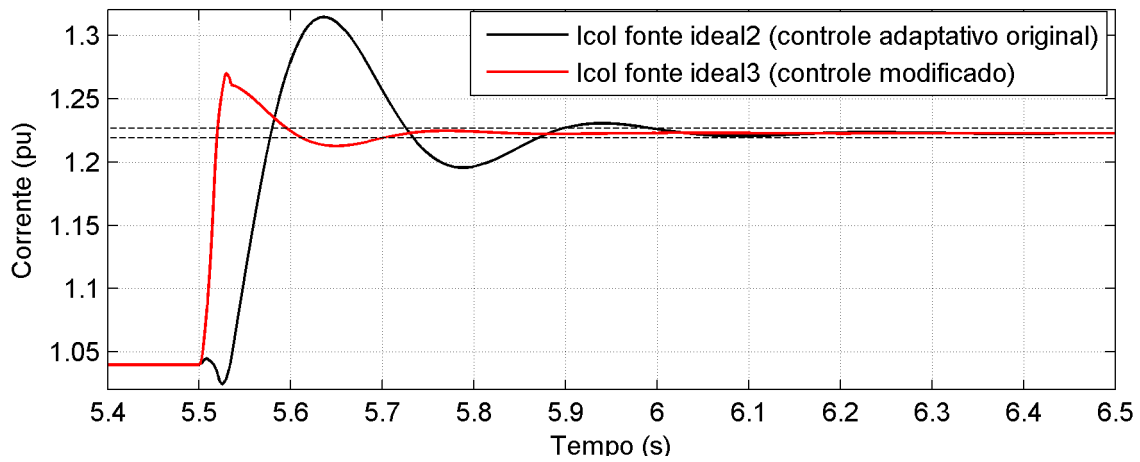


Figura 3.75: Comparação entre as estratégias de controle - dinâmica do valor coletivo das correntes da fonte.

O desempenho da dinâmica da tensão da carga também melhorou na estratégia modificada. O gráfico da Figura 3.76 apresenta o valor coletivo das tensões da carga para os dois controles. Observa-se que no controle adaptativo existe uma oscilação que pode ser considerada como um afundamento de tensão com $150ms$ de duração, o que não ocorre no caso do controle modificado.

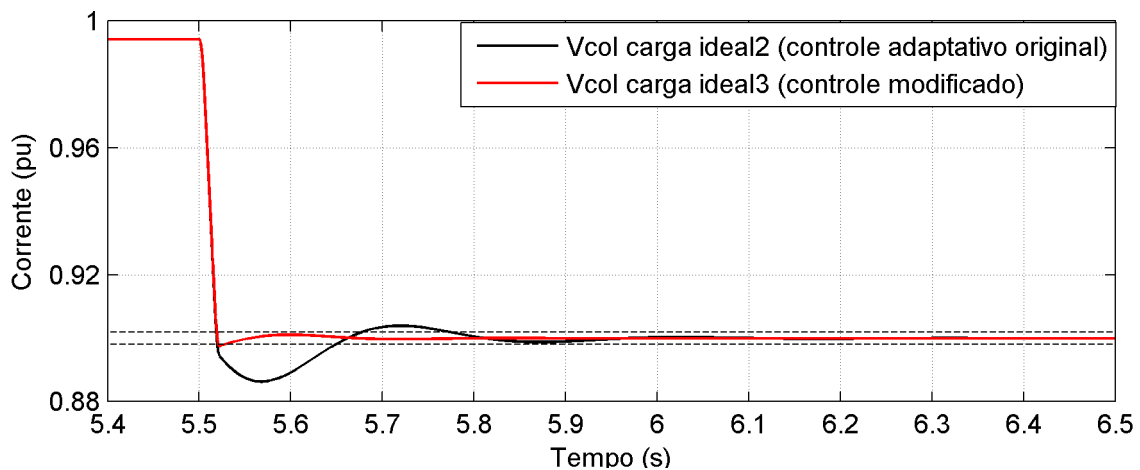


Figura 3.76: Comparação entre as estratégias de controle - dinâmica do valor coletivo das tensões da carga.

3.6 Sumário

O condicionador de energia, denominado UPQC-i, consiste na associação de um filtro ativo série e outro paralelo operando em conjunto através da interligação dos respectivos elos de corrente contínua, denominada configuração “back-to-back”. Para o presente trabalho, objetiva-se a análise da configuração trifásica a três fios deste condicionador, visando a sua implementação prática através da associação de dois invertores de fonte de tensão.

Foi proposta uma modelagem para este condicionador série-paralelo em que o filtro paralelo é modelado como uma fonte de tensão senoidal e o filtro série é modelado como uma fonte de corrente senoidal. Nesta modelagem, o único caminho para a diferença entre as correntes da carga e as correntes impostas pelo filtro série é através do filtro paralelo. Da mesma forma, as diferenças entre as tensões da fonte e as tensões impostas pelo filtro paralelo aparecem naturalmente sobre os terminais do filtro série.

O algoritmo de controle, proposto para o modelo ideal do UPQC-i, é baseado na medição de duas tensões de linha da sua entrada (fonte), duas correntes de linha da sua saída (carga) e, ainda, da tensão no capacitor do elo de corrente contínua, que, para o modelo ideal, foi estimada matematicamente. O objetivo do algoritmo proposto é dotar o condicionador UPQC-i das seguintes funcionalidades: compensação de desequilíbrios e harmônicos de tensão e corrente, correção de fator de potência e minimização de VTCD e flutuação de tensão.

O modelo digital ideal do UPQC-i foi implementado no programa de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD. O desempenho dinâmico da estratégia de controle proposta inicialmente apresentou um desempenho insatisfatório diante da compensação de VTCD. Foi proposto um novo algoritmo de controle, intitulado “modificado”, cujo desempenho nestas situações foi superior.

Em termos gerais, as simulações realizadas apresentaram resultados satisfatórios que comprovam a capacidade de compensação deste condicionador de energia, frente a distúrbios simultâneos nas tensões, provenientes da fonte de alimentação, e nas correntes, provenientes das cargas.

Capítulo 4

Modelagem Digital do UPQC-i

Neste capítulo, será apresentada uma ferramenta computacional que foi desenvolvida, no âmbito deste trabalho, sob a forma de uma biblioteca para a interface gráfica de simulação PSCAD, com o objetivo de otimizar e facilitar a implementação experimental da estratégia de controle proposta. Este ambiente de trabalho permite que a estratégia de controle seja implementada e simulada no PSCAD/EMTDC na forma de um *software* (rotina de interrupção), utilizando-se a mesma lógica e o mesmo tipo de programação utilizados na implementação prática do controle em processadores digitais de sinais (DSP).

O modelo do UPQC-i baseado em fontes ideais de tensão e corrente, apresentado no Capítulo 3, é substituído por um modelo digital real baseado em dois inversores trifásicos de frequência, acoplados através do lado de corrente contínua (configuração *back-to-back*) e com filtros passivos de potência nas suas saídas de corrente alternada, para a eliminação dos harmônicos em torno da frequência de chaveamento dos inversores.

Por fim, os resultados das simulações computacionais serão apresentados.

4.1 Simulações Computacionais

Simulação pode ser entendida, no seu sentido mais lato, como um método de utilização de modelos visando estudar a natureza de certos fenômenos [32], ou o processo de imitar aspectos importantes do comportamento do sistema em estudo, pela construção e experimentação com um modelo do sistema [33].

A importância da simulação é particularmente notória em situações em que é difícil, complexo ou impossível levar a cabo as experiências pretendidas, por uma ou mais das seguintes razões:

- Elevado custo do equipamento em estudo;
- Custo excessivo da experiência a efetuar;
- Questões associadas a margens de segurança;
- Impossibilidade de eliminar perturbações no processo real;
- A instalação não existe fisicamente (por exemplo, ainda será construída);
- Outras alternativas (construção de protótipos) são menos adequadas;
- Em processos de otimização generalizados, o modelo poderá ter que ser resolvido (simulado) um grande número de vezes.

Analisando do ponto de vista deste projeto, questões como custos, margens de segurança, otimização são fatores mais do que suficientes para justificar a utilização de simulação.

O fator tempo é tão importante quanto os fatores acima. Utilizando a simulação, é possível modificar de maneira fácil e rápida os parâmetros do modelo em estudo, obtendo os resultados de maneira rápida e segura.

4.2 O programa de simulação

O programa de simulação de transitórios eletromagnéticos PSCAD/EMTDC foi adotado neste trabalho.

O *Power Systems Computer Aided Design* (PSCAD) é uma interface gráfica que foi desenvolvida para o programa de simulação de transitórios eletromagnéticos EMTDC . O PSCAD permite ao usuário construir um circuito de forma gráfica, realizar a simulação, analisar os resultados e gerenciar os dados de forma integrada, dentro de um ambiente gráfico. As suas funcionalidades de traçar os gráficos à medida que calcula, juntamente com os blocos de controle e de medição, permitem que o usuário altere os parâmetros do sistema, durante a execução das simulações, e visualize os resultados diretamente.

O programa de simulação EMTDC representa e resolve equações diferenciais no domínio do tempo para os sistemas eletromagnéticos e eletro-mecânicos. As soluções obtidas com o EMTDC , bem como com outros programas similares, são baseadas em cálculos de passo fixo, conforme apresentado no artigo clássico publicado em 1969 por Hermann Dommel [34].

A estrutura do programa EMTDC foi desenvolvida de tal forma a possibilitar o usuário a introduzir o seu próprio código no algoritmo de solução principal. As funções ou subrotinas criadas pelo usuário podem ser automaticamente compiladas pelo PSCAD ou podem ser pré-compiladas e agrupadas (*linked*) com um caso compilado do PSCAD e a biblioteca do EMTDC . O usuário pode escrever o seu próprio código tanto na linguagem de programação Fortran ou C.

4.3 Ambiente de Trabalho PSCAD/DSPsim

Diante do projeto de um novo equipamento os pesquisadores, muitas das vezes, utilizam programas de simulação de transitórios eletromagnéticos para a modelagem dos circuitos de controle e de potência. Nesta fase, a preocupação maior é de validar o algoritmo de controle proposto em conjunto com o circuito de potência e verificar se as funcionalidades idealizadas foram alcançadas.

A tarefa em questão define uma etapa substancial, se não a mais importante, de todo o processo de desenvolvimento do equipamento. É durante a realização das simulações computacionais que eventuais alterações e otimizações podem ser propostas ao modelo, antes que o mesmo seja disponibilizado para a implementação

experimental. Portanto, a comprovação do modelo do equipamento, que consiste fundamentalmente no seu circuito de potência aliado ao algoritmo de controle, deve ser classificada como requisito indispensável neste processo de concepção e prototipagem de um equipamento.

O modelo matemático do circuito de potência, geralmente é desenvolvido com precisão e detalhes suficientes para aproximar-se ao máximo do comportamento físico. Desta forma, o modelo final fornece todos subsídios para a determinação dos valores nominais dos componentes elétricos bem como a interconexão entre os mesmos.

Em geral, os algoritmos de controle implementados em *softwares* de simulação, como o PSCAD, utilizam blocos matemáticos da biblioteca padrão fornecida junto com o simulador, que no caso do PSCAD utilizam a linguagem Fortran. Muitas vezes, estas bibliotecas são fornecidas em arquivos do tipo objeto e não permitem a visualização do código de programação dos blocos matemáticos. Portanto, o modelo matemático testado em simulação fornece o algoritmo que deve ser materializado experimentalmente em um circuito de controle baseado em alguma tecnologia que seja capaz de realizar os cálculos matemáticos do algoritmo de controle.

A tecnologia de implementação de um circuito de controle pode ser dividida em dois grandes grupos: digital ou analógico. Com o advento dos computadores na década de 70, a teoria de controle digital [35] evoluiu bastante de forma a suportar a demanda por aplicações que utilizam o controle microprocessado. Nesta linha tecnológica surge na década de 80 o *Digital Signal Processor* (DSP) [36], que consiste em um microprocessador especializado desenvolvido para o processamento digital de sinais, podendo também realizar computações diversas. Por isto, o tradicional controle analógico vem sendo migrado para o controle digital, de modo a utilizar todos os benefícios do processamento digital.

Rapidamente, a popularização desta tecnologia nas mais diversas aplicações tornou-se uma realidade. Não distante a esta tendência, é notória a utilização de DSPs pelos mais diversos fabricantes de equipamentos baseados em eletrônica de potência. Pode-se afirmar que, na época da elaboração deste trabalho, esta é uma tecnologia de ponta que encontra-se no estado da arte.

Isto pode ser verificado analisando-se diversos trabalhos apresentados pela comunidade científica que tratam da implementação de protótipos de equipamentos *custom power* utilizando os microprocessadores DSPs de forma bem sucedida [37][38][39][40][41].

De fato, a experiência dos trabalhos mencionados indica que a utilização dos DSPs como núcleo principal do circuito de controle dos protótipos no contexto dos dispositivos de eletrônica de potência é bastante positiva com relação aos fatores custo, tempo, flexibilidade, disponibilidade e confiabilidade.

Conforme será apresentado no capítulo 5, a implementação do circuito de controle do protótipo laboratorial do UPQC-i utilizará a tecnologia de controle digital dos microprocessadores DSPs de ponto fixo através de *software* embarcado.

Portanto, existe a necessidade de se traduzir o algoritmo de controle para a tecnologia adotada que, para o presente trabalho, consiste na implementação de um *software* utilizando a linguagem de programação C.

Objetivando um menor esforço desta tarefa, bem como analisando as questões de segurança, custo e tempo envolvidas neste processo, é conveniente que a implementação do código a ser embarcado no microprocessador seja realizada e testada em um ambiente controlado e seguro, antes da realização dos testes experimentais em conjunto com o circuito de potência do protótipo.

Existem diversas alternativas de implementação deste ambiente largamente utilizadas pela comunidade científica. Uma delas consiste na modelagem e simulação da planta em um programa computacional, a ser controlada pelo DSP. Neste caso, existe uma interface que realiza a comunicação entre o DSP e o programa de simulação. Esta técnica é utilizada, por exemplo, pelo *software* de simulação Matlab que, através dos seus pacotes Simulink, Real-Time Workshop, Embedded Target for TI C2000 DSP, e Link for Code Composer Studio, disponibiliza uma plataforma integrada para o desenvolvimento, a simulação e verificação dos sistemas de controle embarcados nos DSPs da família C2000 da Texas Instruments.

Uma outra alternativa mais sofisticada, consiste nos simuladores digitais em tempo real. O RTDS[42], por exemplo, é um simulador digital de sistemas de po-

tência com capacidade de operação em tempo real.

Os custos relacionados com a aquisição dos pacotes do Matlab necessários para a utilização deste ambiente de desenvolvimento são bastante elevados, se comparados aos custos do programa de simulação PSCAD. Quando analisamos os custos de aquisição de simuladores digitais em tempo real, estes valores são ainda maiores.

Portanto, a utilização de uma das alternativas apresentadas está intimamente ligada com a disponibilidade de recursos para o investimento na aquisição destas ferramentas.

Para auxiliar a tarefa de desenvolver o *software* a ser embarcado no DSP optou-se por uma solução de baixo custo que consiste no desenvolvimento de um ambiente de trabalho no simulador PSCAD, disponível no Laboratório de Eletrônica de Potência da UFRJ.

O desenvolvimento deste ambiente, denominado PSCAD/DSPSIM, faz parte do escopo deste trabalho como uma de suas contribuições.

4.3.1 Descrição do PSCAD/DSPsim

O PSCAD/DSPSIM consiste numa biblioteca desenvolvida no PSCAD, no âmbito deste trabalho, contendo blocos de modelos matemáticos escritos na linguagem de programação Fortran denominados *definições*.

A biblioteca PSCAD/DSPSIM é composta por um módulo denominado DSP que possui: 16 (dezesesseis) entradas analógicas, que na simulação representam entradas de variáveis do tipo real; 12 saídas PWM, representadas por variáveis do tipo inteiras; e dezesseis entradas e saídas digitais, representadas por variáveis do tipo inteiras, sendo oito entradas e oito saídas. É possível utilizar mais de um bloco DSP por simulação.

A biblioteca PSCAD/DSPSIM possui uma definição denominada **Medição e Controle** que simula os ganhos dos circuitos de medição e condicionamento que fazem parte de um sistema de controle real.

Dentro do módulo DSP estão a maioria das definições implementadas para simular o controle com código C escrito para microprocessadores do tipo DSP da família TMS320F2812 da Texas Instruments.

A principal definição da biblioteca PSCAD/DSPSIM, denominada `Intr_Handler`, consiste numa interface entre o PSCAD e um código fonte esqueleto escrito na linguagem de programação C que, além de conter declarações e códigos específicos para realizar a compatibilidade, disponibiliza uma seção bem definida onde o usuário deve escrever o código do controle, exatamente da mesma forma que seria implementado no ambiente de programação do DSP. Em geral, este código caracteriza-se por ser implementado e executado dentro de uma rotina de interrupção.

A definição `Intr_Handler`, ilustrada na Figura 4.1, recebe as entradas analógicas já convertidas para digital, as entradas digitais, o sinal de interrupção e três sinais de controle do PSCAD para serem utilizados como variáveis dentro do código C.

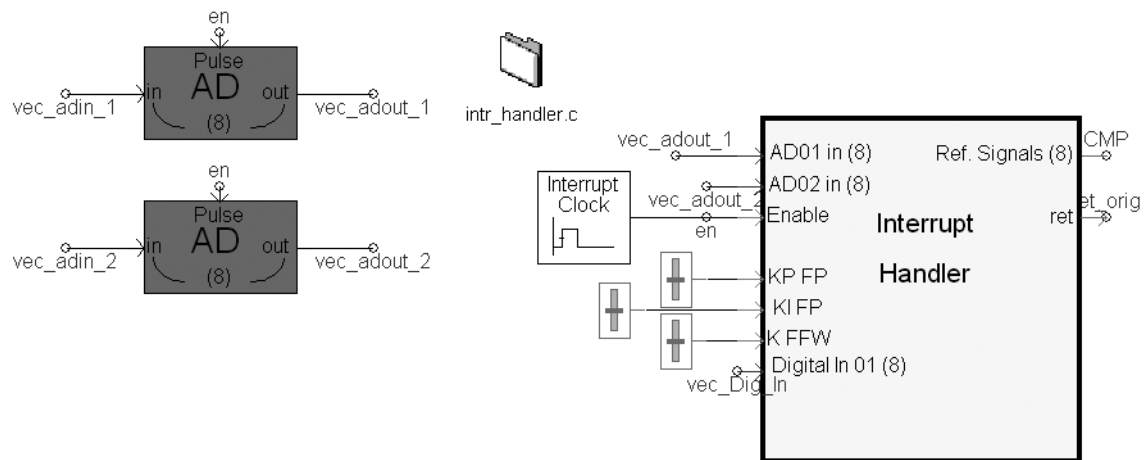


Figura 4.1: Ilustração gráfica das definições: `IntrHandler`, `ADNEW400` e `Interrupt Clock`.

Existem ainda outras definições dentro do módulo DSP: `ADNEW400`, responsável pela conversão analógica para digital (AD) de até dezesseis entradas; e `Interrupt Clock`, que fornece um sinal indicando o instante de execução do código de controle em C, simulando o relógio (*clock*) das rotinas de interrupção de um microprocessador DSP. Estas definições estão ilustradas na Figura 4.1. O sinal de interrupção também é utilizado pelo bloco `ADNEW400` para habilitar e desabilitar a conversão AD, produzindo um sinal convertido para o formato Q12 (aritmética de

ponto fixo) amostrado com a mesma frequência da rotina de interrupção, que poderá ser acessado dentro do código C da mesma forma que na implementação com o DSP real.

O módulo DSP contempla outros dois módulos responsáveis por sintetizar os sinais de referência provenientes do código C (rotina de interrupção) e disponibilizar 6 sinais PWM, cada um, utilizando a técnica seno-PWM. Tais módulos estão ilustrados na Figura 4.2. Observa-se que faz parte das entradas destes módulos um gerador de onda triangular, responsável por modelar o clock interno do DSP para a geração dos sinais seno-PWM. Embora seja possível utilizar a técnica de chaveamento PWM por vetores espaciais (SV-PWM) no DSP real, esta modelagem não foi contemplada na biblioteca PSCAD/DSPsim neste momento.

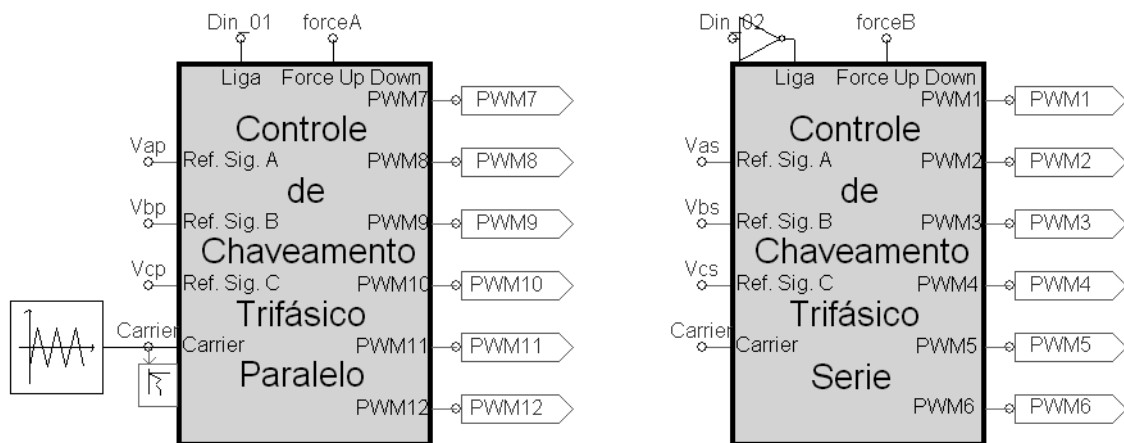


Figura 4.2: Ilustração gráfica dos módulos de geração dos sinais seno-PWM.

4.3.2 Limitações e características do PSCAD/DSPsim

A biblioteca desenvolvida é uma ferramenta importante para auxiliar a implementação do software de controle no DSP, entretanto ela possui algumas limitações listadas a seguir:

- portabilidade de funções de biblioteca:

Na programação de DSPs, algumas funções matemáticas são disponibilizadas por meio de bibliotecas de funções escritas em linguagem *assembly* utilizando o conjunto de instruções específico do DSP. Por exemplo, isto é feito com as

funções trigonométricas seno e cosseno. Quando há necessidade de utilizá-las é preciso implementar funções equivalentes na biblioteca PSCAD/DSPSIM, pois o conjunto de instruções do processador onde o programa PSCAD roda é diferente, logo não é possível utilizar diretamente as funções da biblioteca do DSP.

Como forma de contornar parcialmente este problema, as funções seno e cosseno foram emuladas na biblioteca PSCAD/DSPSIM na forma de funções escritas em linguagem C. Elas recebem como entrada e retornam como saída variáveis do mesmo tipo e formato-Q daquelas da biblioteca original do DSP que será utilizada na prática.

Mesmo assim, existem algumas limitações como: no caso de uma eventual falha (*bug*) existente na função original, o efeito dela provavelmente não será notado na função emulada; ou então no caso dos valores de retorno da função original e da emulada serem ligeiramente diferentes.

- variáveis de tipo inteiro (*integer*) de 16/32 bits:

Normalmente o tipo de variável *integer* possui o tamanho do comprimento da palavra (*word length*) do processador. Esta diferença deve ser levada em consideração no momento da declaração das variáveis caso o tamanho da palavra do DSP seja diferente do tamanho da palavra do processador que executa o PSCAD. Este problema pode ser eliminado definindo-se tipos específicos que garantam a quantidade de *bits* correta das variáveis, independentemente da plataforma.

- erros de truncamento:

Como os dados numéricos em um DSP são armazenados em um número finito de *bits*, a parte da representação numérica que é suprimida é chamada de erro de truncamento. O erro de truncamento está relacionado com o tamanho da palavra do processador de tal forma que se um algoritmo é rodado em processadores com diferentes tamanhos de palavra o erro de truncamento será diferente.

- erros de transbordamento (*overflow*):

Mesmo com o cuidado de se declarar variáveis com a mesma quantidade de *bits*, pode ser que o resultado de um cálculo realizado pela unidade lógica

aritmética do DSP seja maior do que o valor máximo permitido pelo seu registrador, introduzindo um erro considerável que provavelmente inviabilizará o algoritmo. Por outro lado este mesmo cálculo quando realizado pela unidade lógica aritmética do processador que roda o PSCAD pode ser executado sem maiores problemas caso o tamanho do registrador seja suficientemente maior para receber o resultado do cálculo sem que ocorra o transbordamento.

- variáveis de aritmética saturada:

Nos DSPs é possível configurar o comportamento de uma variável para que frente à ocorrência de um transbordamento ela sature no seu valor máximo ou mínimo. Isto não é possível de se realizar na biblioteca PSCAD/DSPSIM.

- ausência de ferramenta para análise do fator de escalonamento das variáveis no formato Q;

Uma tarefa importante de qualquer programação em ponto fixo é a escolha correta das bases do formato Q. Na biblioteca PSCAD/DSPSIM não existe uma ferramenta para auxiliar no escalonamento das variáveis, na verificação dos limites das variáveis e da faixa de operação das mesmas durante a execução do algoritmo. Um exemplo deste tipo de ferramenta é a caixa de ferramentas (*toolbox*) de ponto fixo do programa Matlab.

- tempo de execução do algoritmo no DSP:

A biblioteca PSCAD/DSPSIM não é capaz de estimar o tempo de execução da rotina de interrupção quando executada no DSP. Esta informação é importante, pois este tempo tem que ser menor do que o período de interrupção. Desta forma, deve-se verificar no próprio DSP do tempo de execução do código desenvolvido no PSCAD/DSPSIM antes de utilizá-lo em definitivo como na rotina de interrupção do DSP.

- escolha apropriada do passo de simulação:

Para que a biblioteca PSCAD/DSPSIM funcione corretamente é preciso que o passo de simulação no PSCAD seja no mínimo a metade do período de interrupção e de preferência que seja um submúltiplo inteiro deste.

4.4 Modelagem do UPQC-i no PSCAD/DSPsim

O condicionador de energia UPQC-i, conforme proposto no Capítulo 3, foi modelado digitalmente no PSCAD utilizando-se a estrutura de paginação disponibilizada por este simulador digital.

Na primeira página, compondo o nível mais alto, observa-se na Figura 4.3, três blocos representando: uma fonte trifásica, que pode fornecer tensões desbalanceadas e com harmônicos; uma carga, que pode assumir 4 (quatro) configurações distintas, que serão apresentadas mais adiante; e o condicionador UPQC-i.

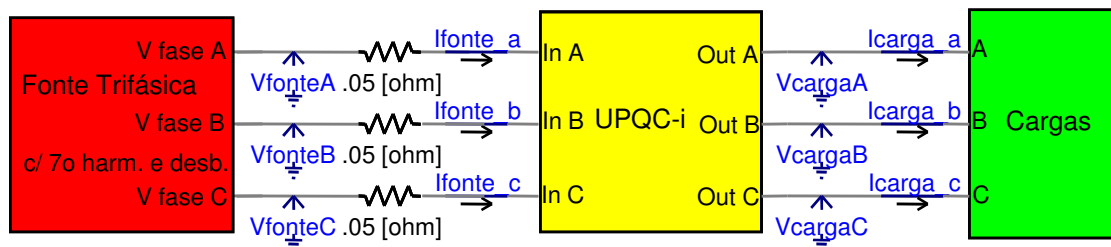


Figura 4.3: Ilustração gráfica da primeira página da Simulação.

O módulo responsável pela implementação do modelo digital real do UPQC-i é ilustrado na Figura 4.4. Podemos dividir este módulo em três partes: o circuito de potência, o circuito de controle e o circuito de medição/condicionamento.

O principal elemento do circuito de potência é o bloco **Inversor**, que consiste em dois inversores trifásicos de fonte de tensão na configuração *back-to-back* com uma capacitância de $9,4mF$ no elo de corrente contínua. Um dos inversores trifásicos de tensão, que representa o filtro ativo série, é controlado por correntes senoidais de referência. Este inversor é conectado em série com o sistema de potência, por meio do circuito primário de três transformadores monofásicos com relação de transformação 1:1, cujos circuitos secundários são ligados em Y não aterrado, através de um filtro passa-baixo de potência RLC de segunda ordem, ao inversor em questão. O outro inversor trifásico representa o filtro ativo paralelo que é conectado ao sistema de potência em paralelo com a carga, também através de filtros passivos RLC para a eliminação dos harmônicos de chaveamento. Este inversor é controlado por tensões senoidais modelando uma fonte trifásica de tensão senoidal.

O circuito de medição e condicionamento é representado pela definição

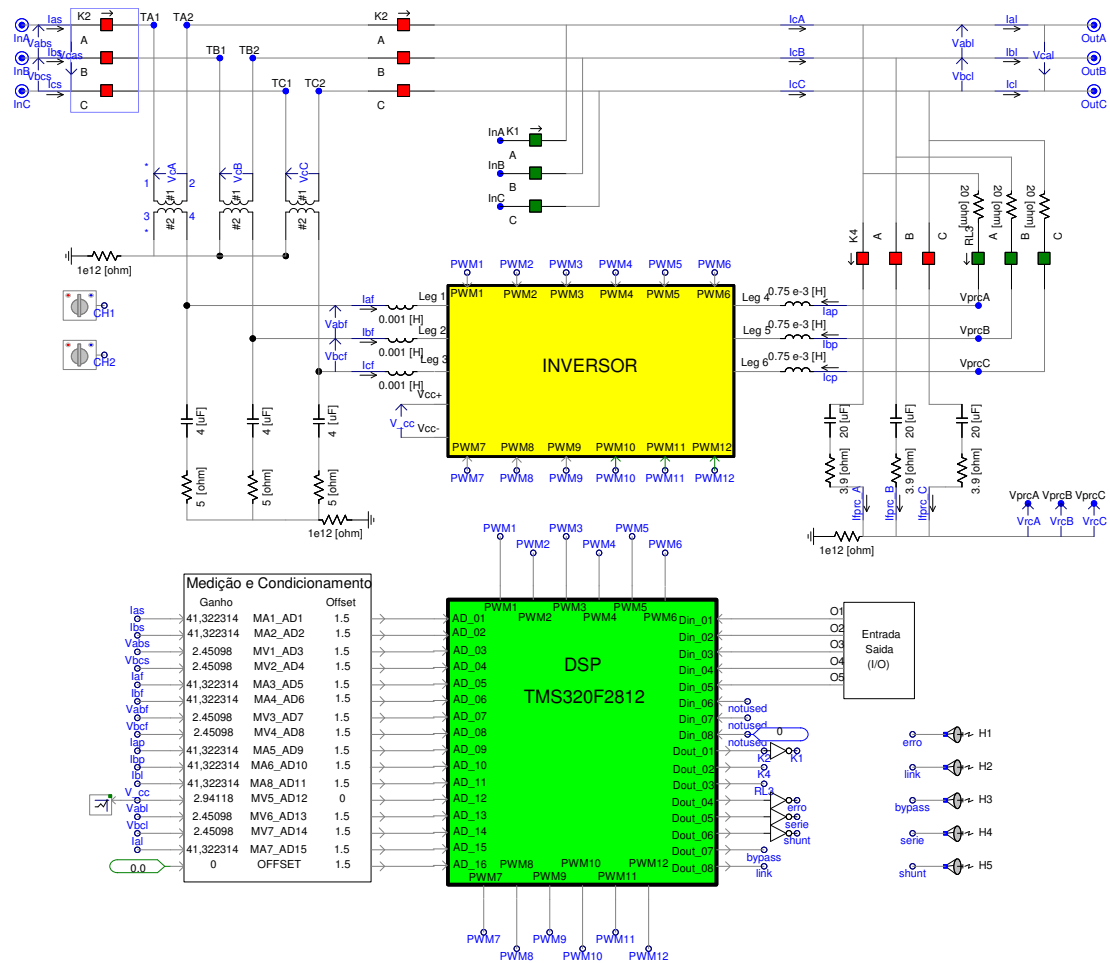


Figura 4.4: Modelo digital do UPQC-i utilizando a biblioteca PSCAD/DSPSIM.

Medição e Condicionamento, que faz parte da biblioteca PSCAD/DSPSIM. Os ganhos e deslocamentos aplicados neste bloco garantem sinais analógicos de excursão entre 0 e 3 volts, que são enviados às entradas analógicas do módulo DSP, de forma semelhante à implementação experimental.

O módulo DSP, conforme descrito na Seção 4.3.1, representa todo o circuito de controle do UPQC-i, responsável por receber os sinais provenientes das medições, realizar a conversão AD, processar o algoritmo de controle implementado via código C para DSP, fornecer os sinais de disparo das chaves de potência dos inversores trifásicos e realizar tarefas de comando e sinalização através das suas entradas e saídas digitais.

Nesta simulação, o algoritmo de controle é implementado em código C, através de programação em ponto fixo escrito da mesma forma que a implementação real

no DSP, com o auxílio da biblioteca PSCAD/DSPSIM. Ele é dividido em cinco blocos: sinais de referência do filtro paralelo, sinais de referência do filtro série, controle do elo de CC e controle de chaveamento dos inversores série e paralelo. Os três primeiros compõem o controle adaptativo modificado (Figura 3.5), apresentado na Seção 3.5 como aquele de melhor desempenho nas simulações computacionais.

Os controles de chaveamento série e paralelo, têm como objetivo comum realizar uma realimentação para compensar os erros de fase e de amplitude introduzidos pelos filtros passivos RLC existentes nas saídas dos inversores de tensão dos filtros série e paralelo. Os sinais de saída destas realimentações são armazenados em registradores (emulados pela biblioteca PSCAD/DSPSIM) da mesma forma que na implementação prática no DSP. A biblioteca envia estes sinais para o bloco que modela a função seno-PWM do DSP real, que por sua vez converte estes sinais em pulsos de disparo enviados para as chaves dos inversores através das saídas PWM do bloco DSP.

O filtro ativo paralelo é modelado como uma fonte de tensão que deve sintetizar os sinais de referência calculados pelo controle do filtro paralelo da Figura 3.5. Na modelagem real do UPQC-i, a fonte de tensão ideal é substituída por um inversor de fonte de tensão controlado por tensão e a realimentação do controle de chaveamento pode ser implementada com um controle do tipo *feed-forward*, conforme mostrado no diagrama de blocos da Figura 4.5.

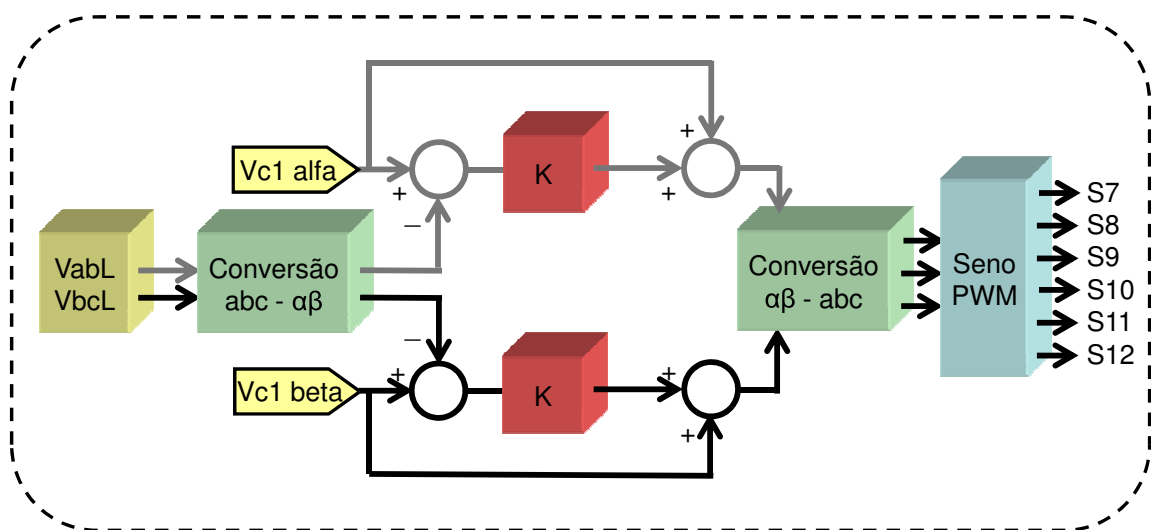


Figura 4.5: Diagrama de blocos do controle de chaveamento do inversor paralelo do UPQC-i.

O controle de chaveamento do inversor paralelo realiza a medição de duas tensões de linha da carga, ou seja, na saída dos filtros passivos, convertendo-as para as coordenadas α - β . O objetivo do controle é fazer com que estas tensões da carga acompanhem o sinal de tensão de referência do filtro paralelo. Para tanto, é realizado o cálculo dos erros entre estas duas tensões. A estes sinais de erro aplica-se um ganho proporcional e soma-se este resultado às tensões de referência. O sinal resultante é convertido para as coordenadas a-b-c e fornecidas para o controle seno-PWM (SPWM).

O controle SPWM adotado na implementação do UPQC-i, é a técnica do tipo PWM, originalmente analógica, mais utilizada no controle de inversores. Ela consiste no controle do disparo das chaves dos inversores, a partir da comparação de um sinal de referência senoidal com uma onda triangular portadora de frequência f_s . Duas constantes que indicam as principais características desta modulação PWM são: i) a razão de modulação da frequência (m_f), dada por:

$$m_f = \frac{f_s}{f_1}, \quad (4.1)$$

onde, f_s é a frequência da onda portadora (triangular) e f_1 é a frequência do sinal de controle; e ii) a razão de modulação da amplitude (m_a), dada por:

$$m_a = \frac{\hat{V}_{control}}{\hat{V}_{tri}}, \quad (4.2)$$

onde, $\hat{V}_{control}$ é a amplitude do sinal de controle e \hat{V}_{tri} é a amplitude da onda portadora (triangular). Maiores detalhes sobre este tipo modulação podem ser encontrados em [43].

O diagrama de blocos do controle de chaveamento do inversor série é apresentado na Figura 4.6. O filtro ativo série é modelado como uma fonte de corrente que deve sintetizar os sinais de corrente de referência produzidos pelo controle do filtro série, apresentado na Figura 3.5. No modelo real do UPQC-i, a fonte de corrente é substituída por um inversor de fonte de tensão controlado por corrente. Neste caso, além de eliminar o efeito dos filtros passivos de potência localizados na saída do inversor série, o controle deve realizar a conversão do sinal de referência de corrente

para um sinal de referência de tensão. Para tanto, utilizou-se um controlador PI numa malha de realimentação, conforme apresentado na Figura 4.6.

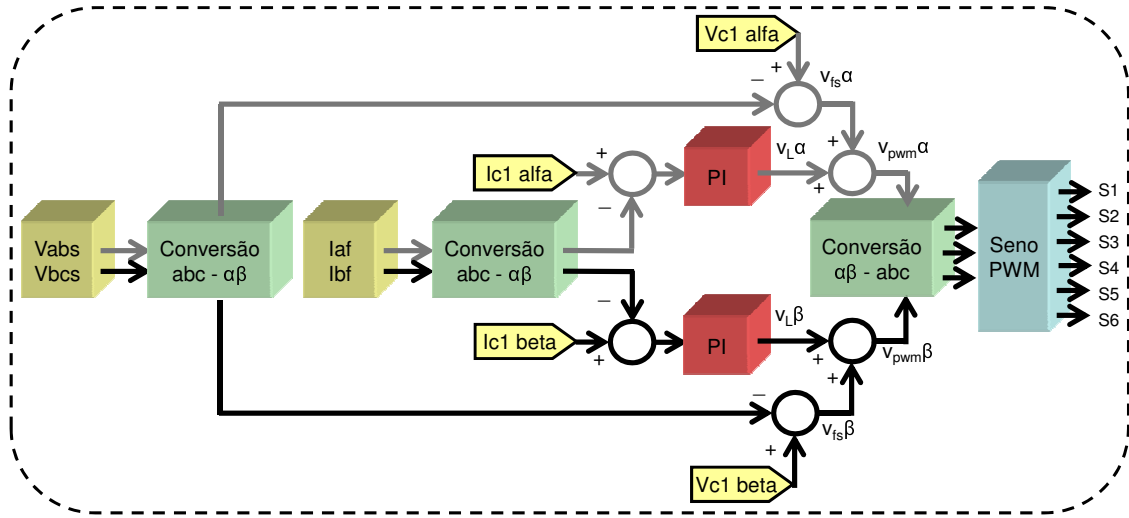


Figura 4.6: Diagrama de blocos do controle de chaveamento do inversor série do UPQC-i.

Para auxiliar a análise do controle PI de corrente, a Figura 4.7 apresenta o circuito de saída do inversor de fonte de tensão do filtro ativo série, simplificado pelo seu equivalente monofásico. O inversor é representado por uma fonte de tensão, denominada v_{pwm}^{abc} . As tensões sobre os indutores do filtro passivo são denominadas v_L^{abc} e as tensões sobre o capacitor, denominadas v_{fs}^{abc} , são exatamente as tensões dos terminais dos transformadores monofásicos.

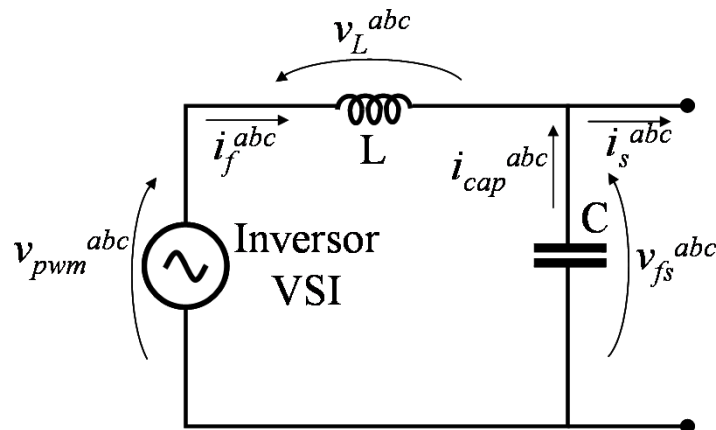


Figura 4.7: Circuito de saída do inversor de fonte de tensão.

As correntes i_s^{abc} são aquelas produzidas pelo filtro ativo série, controladas pelos sinais de referência de corrente do filtro ativo série ($i_{c1\alpha}$ e $i_{c1\beta}$). Elas devem possuir

uma forma de onda senoidal na frequência fundamental do sistema, de maneira a respeitar a modelagem do filtro ativo série. O filtro LC possui uma alta impedância para a corrente na frequência fundamental, logo, as correntes i_s^{abc} são iguais aos componentes fundamentais das correntes i_f^{abc} .

O controle de chaveamento do inversor série realiza a medição das correntes i_f^{abc} . Após convertê-las para as coordenadas α - β , é realizada a comparação com as correntes de referência $i_{c1\alpha}$ e $i_{c1\beta}$. O resultado desta comparação fornece o sinal de erro da entrada do controlador PI. Quando o controlador PI consegue anular o sinal de erro da sua entrada, as saídas dos controladores PI representam as tensões v_L^{abc} , da Figura 4.7, nas coordenadas α - β .

Para se determinar as tensões $v_{fs}^{\alpha\beta}$, basta subtrair as tensões da fonte, cujas medições já são realizadas, das tensões de referência do filtro ativo paralelo. Aplicando-se a lei de Kirchhoff, as tensões que devem ser sintetizadas pelo inversor de fonte de tensão PWM, nas coordenadas α - β , são dadas por:

$$v_{pwm}^{\alpha\beta} = v_{fs}^{\alpha\beta} + v_L^{\alpha\beta} . \quad (4.3)$$

Os parâmetros dos controladores PI da Figura 4.6 foram ajustados para um ganho proporcional de 0,85 e uma constante de tempo de integração de $333\mu s$. O ganho proporcional da malha de controle do chaveamento paralelo da Figura 4.5 foi ajustado para 1,2.

4.5 Simulações Computacionais do UPQC-i usando o PSCAD/DSPsim

As simulações seguintes utilizam as mesmas condições de carga e fonte de tensão adotadas na simulação ideal da Seção 3.4.

A fonte é implementada em um módulo separado, utilizando-se os elementos da biblioteca padrão do PSCAD, para compor tensões trifásicas com componente fundamental de sequência positiva e negativa, além de um componente harmônico

de sétima ordem. Através de cursores, é possível determinar o nível do componente fundamental, bem como os níveis dos componentes de seqüência negativa e de sétimo harmônico, em razão da fundamental.

O módulo que implementa a carga assume quatro configurações distintas apresentadas na Tabela 3.1, a partir da combinação das cargas A e B. A carga A consiste numa carga bifásica composta por um resistor de 14Ω em série com um indutor de $45mH$, que quando alimentada em 220V e 60Hz consome uma potência aparente de $2200VA$, com um fator de potência de 0,64, ou seja uma potência ativa de $1400W$ e reativa de $1697var$. A carga B consistem em um retificador trifásico com indutores de comutação de $1,2mH$ alimentando uma carga no lado contínuo composta por um indutor de $10mH$ em série com um resistor de 20Ω .

Assim como nas simulações ideais apresentadas na Seção 3.4, foram realizadas duas simulações com um tempo total de 9 (nove) segundos, cada uma. Na primeira, denominada real1, a tensão do sistema (fonte) é mantida senoidal e regulada no seu valor nominal e são realizadas variações nas cargas conectadas ao UPQC-i, objetivando analisar o seu comportamento frente a conexão e desconexão de quatro configurações de cargas distintas. Na segunda simulação, intitulada real2, a carga é mantida fixa ao longo de toda simulação e a tensão da fonte assume quatro características distintas descritas na Tabela 3.3.

Os parâmetros do controlador PI do q-PLL e do controlador PI do controle de tensão do elo CC são os mesmos adotados para o modelo ideal, na Seção 3.4.

A frequência ajustada no componente `Interrupt Clock` dentro do módulo DSP, é de 20kHz. Esta é a frequência do relógio de interrupção é de 20kHz, já a frequência do gerador de onda triangular, também presente no módulo DSP, foi ajustada para 10kHz.

A seguir são apresentados os resultados das simulações computacionais real1 e real2. Ambas utilizam as mesmas bases de tensão (311V) e corrente (20A) das simulações ideais para uma razão de modulação da amplitude (m_a) do controle de chaveamento seno-PWM é 0,8.

4.5.1 Resultados da simulação computacional real1

A carga utilizada nesta simulação, intitulada “real 1”, possui as mesmas quatro configurações da simulação “ideal 1” (seção 3.4.1) indicadas na Tabela 3.1. As cargas 1, 2, 3 e 4 permanecem conectadas nos períodos $[1,5 \geq t < 2,5]$, $[3,5 \geq t < 4,5]$, $[5,5 \geq t < 6,5]$ e $[7,5 \geq t < 8,5]$, respectivamente. A tensão da fonte é senoidal com amplitude nominal e equilibrada. A Figura 4.8 apresenta o valor coletivo das tensões trifásicas da fonte, de referência e da carga.

O valor coletivo das tensões na carga (saída do UPQC-i) mantém-se constante, acompanhando o valor de referência. As tensões de referência são mantidas constantes no valor nominal de $1pu$. Logo, o valor coletivo das tensões de referência acompanha o valor coletivo das tensões da fonte. Assim como na simulação ideal1, os transitórios ocorridos nos instantes de conexão e desconexão das cargas, não introduzem distúrbios significativos nas tensões de saída e estão dentro dos limites observados em normas.

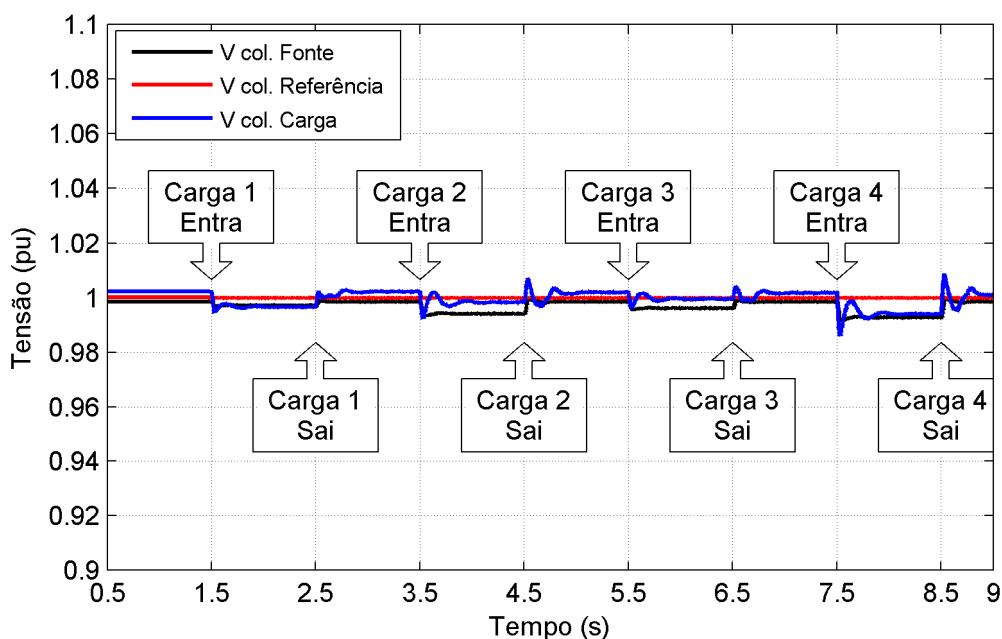


Figura 4.8: Valor coletivo das Tensões de Entrada, Referência e da Carga.

As Figuras 4.9 e 4.10 apresentam as correntes consumidas pelas cargas e aquelas que são drenadas da fonte. Estes gráficos estão disponibilizados apenas para ilustrar os perfis destas correntes durante a simulação. Observa-se que ambos apresentam um comportamento semelhante àqueles observados na simulação ideal1 (seção 3.4.1).

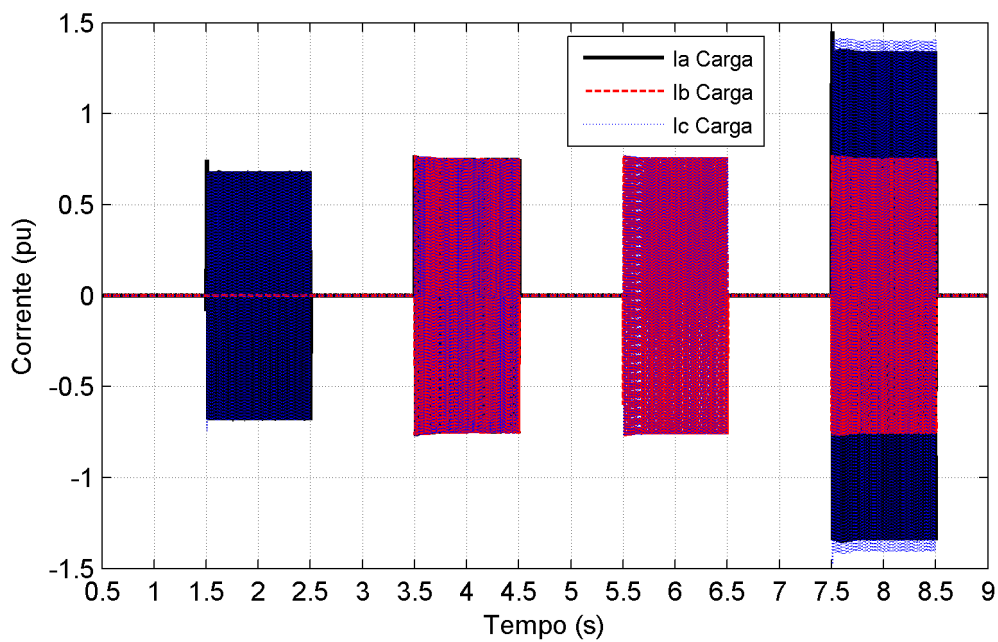


Figura 4.9: Perfil das correntes trifásicas produzidas pelas conexões e desconexões das cargas 1, 2, 3 e 4.

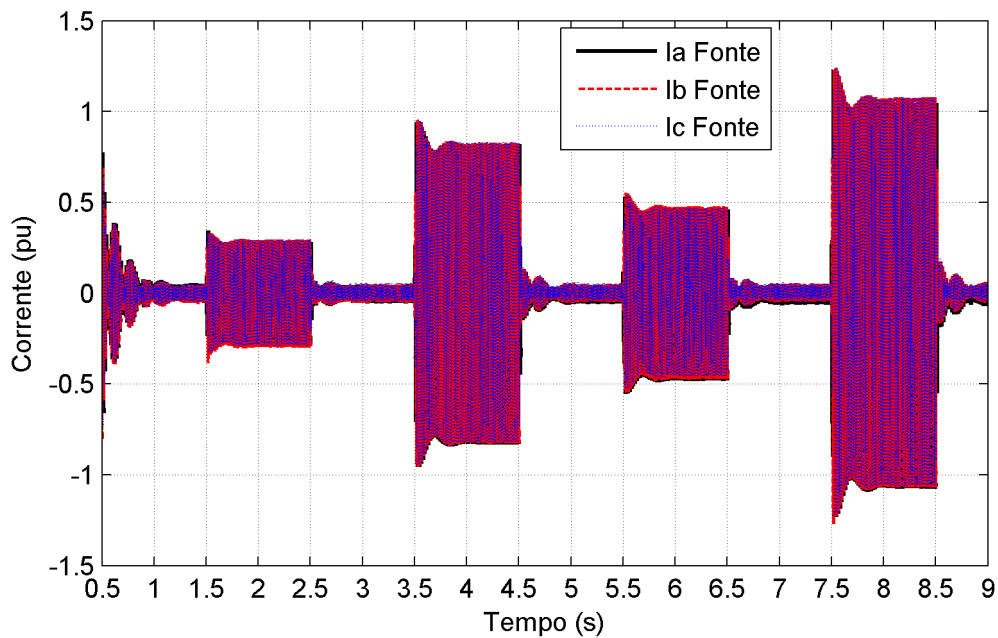


Figura 4.10: Perfil das correntes trifásicas, drenadas da fonte, durante as conexões e desconexões das cargas 1, 2, 3 e 4.

O valor coletivo das correntes da fonte, de referência e da carga são apresentados na Figura 4.11. As correntes da fonte são impostas pelo filtro ativo série a partir dos sinais de referência de corrente calculados pelo controle. Observa-se no gráfico em questão que o valor coletivo das correntes da fonte acompanha o valor coletivo dos sinais de referência.

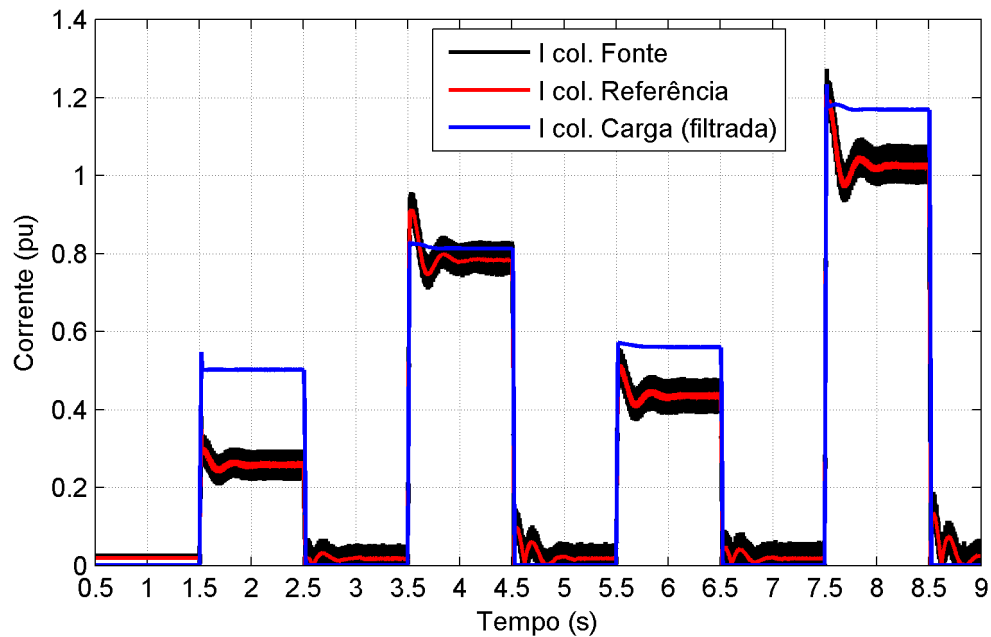


Figura 4.11: Valor coletivo das correntes da fonte, de referência e da carga (filtrada)

O gráfico da Figura 4.12 apresenta o comportamento da tensão sobre o capacitor do elo de corrente contínua. A menos dos pequenos transitórios ocorridos durante as manobras de conexão e desconexão das cargas, o valor da tensão sobre o capacitor tende ao valor de referência de $1pu$. O transitório inicial ($t < 1,5$) é devido ao fato de que a tensão sobre o capacitor, proveniente do seu carregamento através dos diodos do inversor, está bem abaixo ($\approx 300V$) do valor de referência ($450V$), no momento em que o chaveamento do UPQC-i é habilitado.

Os gráficos subsequentes apresentam dois intervalos distintos de quatro ciclos do período fundamental, cada um. No primeiro intervalo, o instante central consiste no momento da conexão da carga, e no segundo a sua desconexão. Ressalta-se que os gráficos entre estes dois intervalos não são representados.

Analisando-se as Figuras 4.13, 4.14, 4.15 e 4.16 verifica-se que as tensões da fonte possuem um formato senoidal e sem desequilíbrios, mesmo nos instantes de

conexão e desconexão das cargas. As tensões das cargas sintetizadas pelo filtro ativo paralelo são apresentadas nas Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20. Percebe-se o efeito do chaveamento do inversor pela linha mais grossa do gráfico indicando a presença de componentes harmônicos em alta frequência. Entretanto, durante as transições de conexão e desconexão das cargas, as tensões apresentam um formato senoidal e sem desequilíbrios.

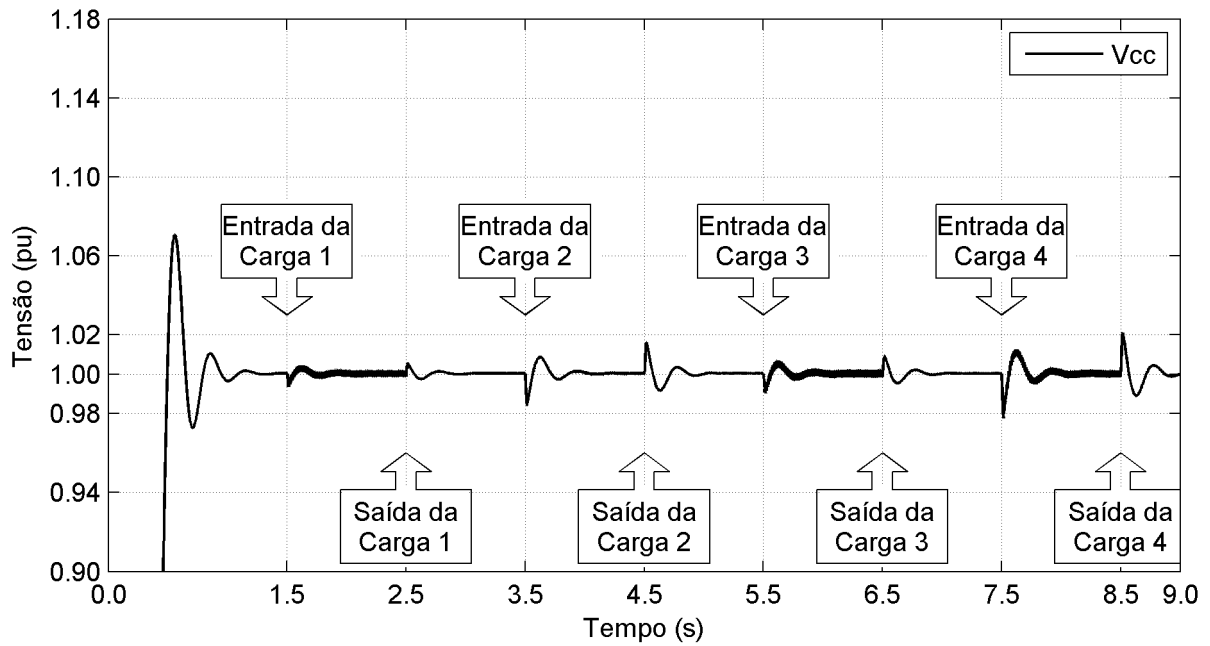


Figura 4.12: Tensão no capacitor do elo CC.

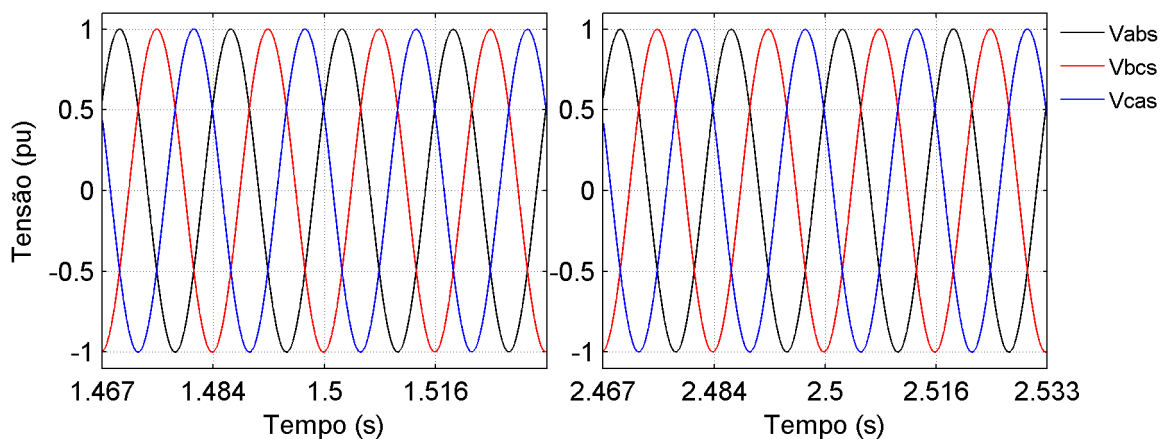


Figura 4.13: Tensões de linha da entrada durante a conexão e desconexão da carga 1.

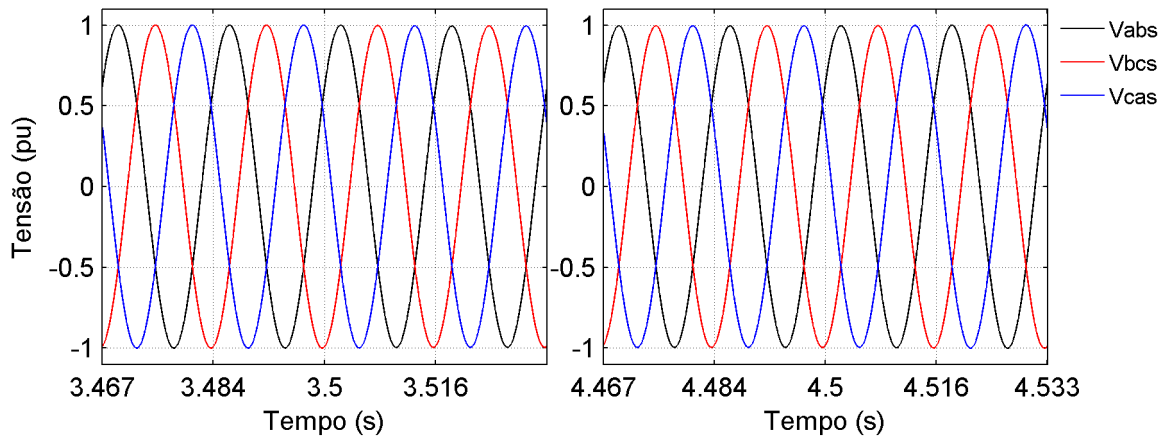


Figura 4.14: Tensões de linha da entrada durante a conexão e desconexão da carga2.

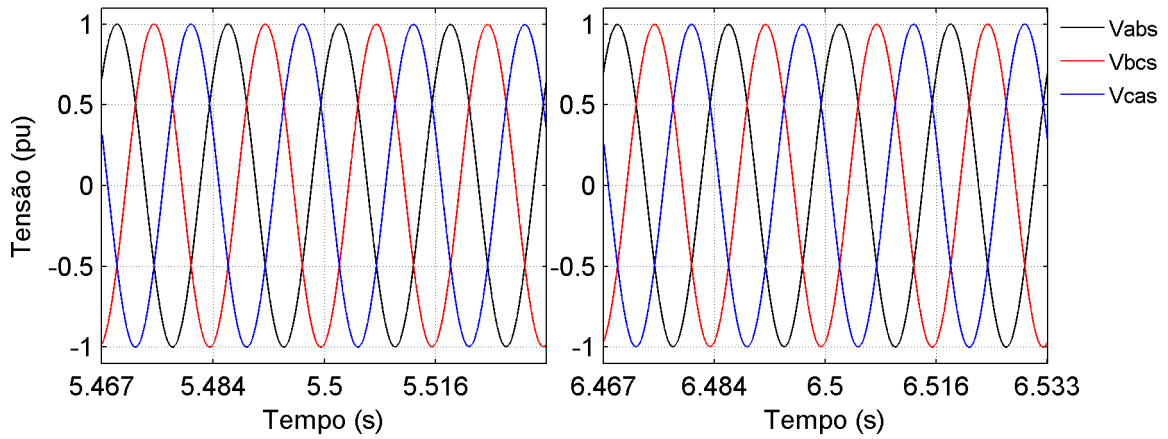


Figura 4.15: Tensões de linha da entrada durante a conexão e desconexão da carga3.

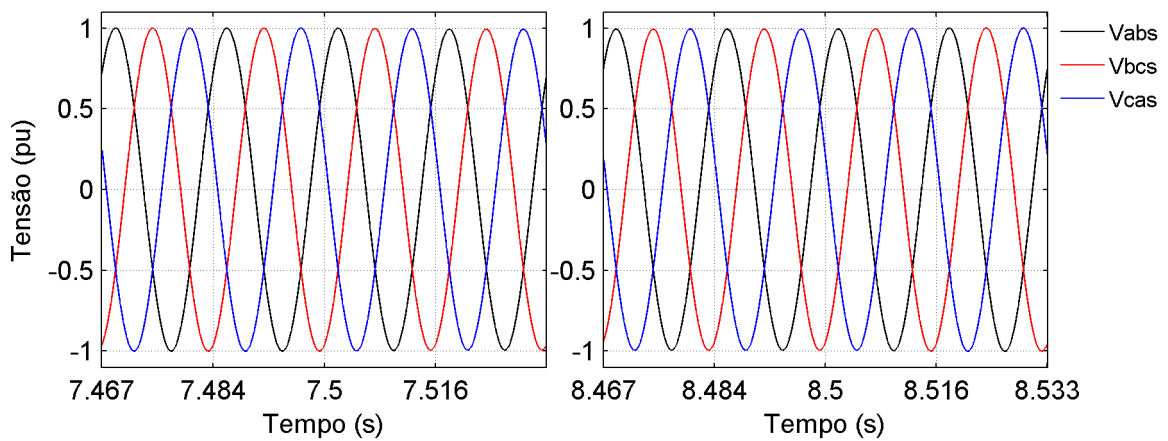


Figura 4.16: Tensões de linha da entrada durante a conexão e desconexão da carga4.

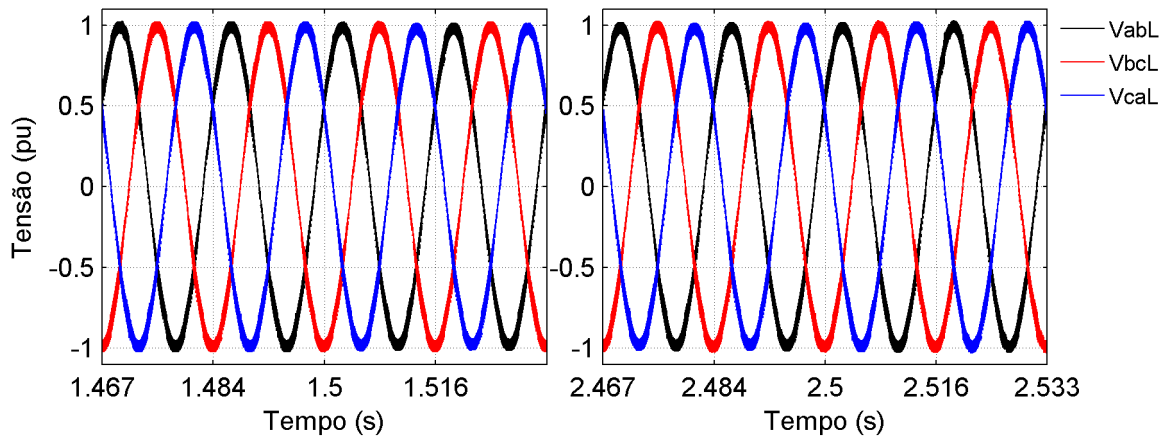


Figura 4.17: Tensões de linha da carga 1 durante a sua conexão e desconexão.

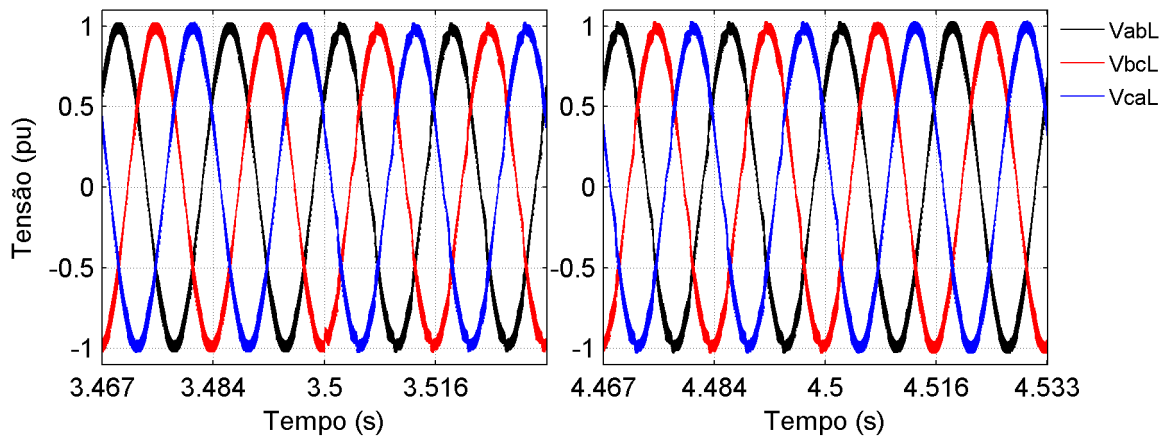


Figura 4.18: Tensões de linha da carga 2 durante a sua conexão e desconexão.

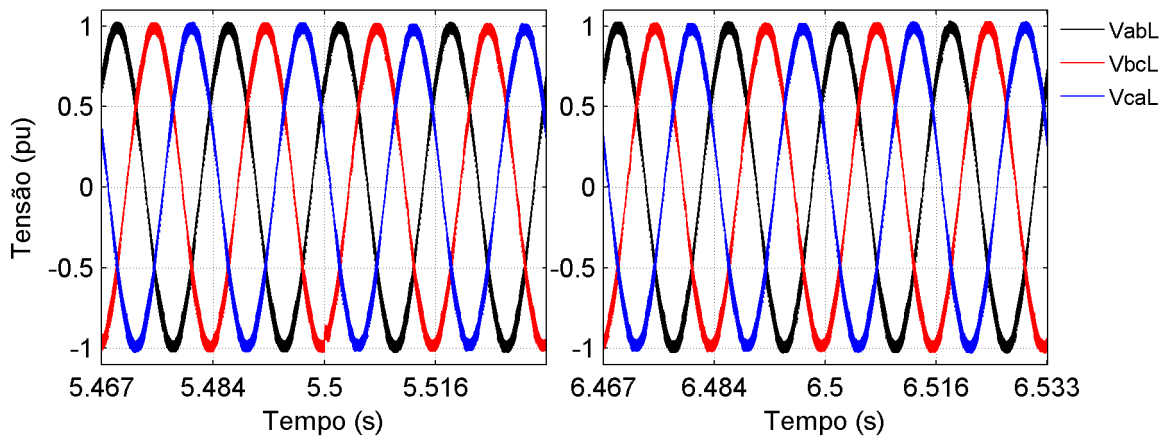


Figura 4.19: Tensões de linha da carga 3 durante a sua conexão e desconexão.

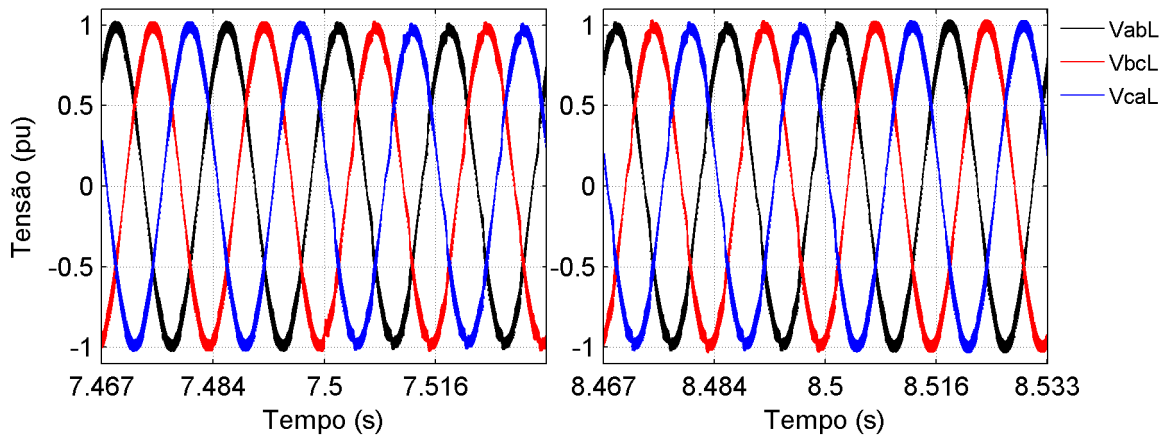


Figura 4.20: Tensões de linha da carga 4 durante a sua conexão e desconexão.

Com relação às correntes das cargas, as Figuras 4.21, 4.22, 4.23 e 4.24 mostram o instante que elas são conectadas no circuito. Na operação da Carga 1 verifica-se o comportamento das correntes de uma carga bifásica conectada entre as fases A e C, onde a corrente da fase A é exatamente oposta a da fase C e inexistente a circulação de corrente na fase B, indicando a presença de desequilíbrios nas correntes. Na operação da Carga 2, observa-se a circulação de correntes não senoidais nas três fases, indicando a presença de conteúdos harmônicos. Na operação da carga 3 percebe-se um desequilíbrio na corrente, devido a operação do retificador com apenas duas fases, além da presença de leves distorções harmônicas. A Carga 4 consome três correntes de formatos totalmente distintos, indicando a presença de desequilíbrios e componentes harmônicos de corrente.

As Figuras 4.25, 4.26, 4.27 e 4.28, apresentam os gráficos das correntes na fonte, após a compensação. Verifica-se que em todas as quatro situações as correntes drenadas da fonte estão equilibradas e possuem um formato senoidal. Como foi utilizado o controle modificado apresentado na seção 3.5, percebe-se que a corrente da fonte responde rapidamente ao degrau da carga (conexão e desconexão). A sobre-elevação de corrente nos dois primeiros ciclos após a conexão é demandada pelo controle para carregar o capacitor do elo CC fazendo com que a sua tensão volte para o valor de referência, após o transitório devido à conexão e desconexão da carga. Pelo mesmo motivo, existem correntes nos dois ciclos seguintes à desconexão da carga, devolvendo para o sistema a energia excedente no capacitor do elo CC.

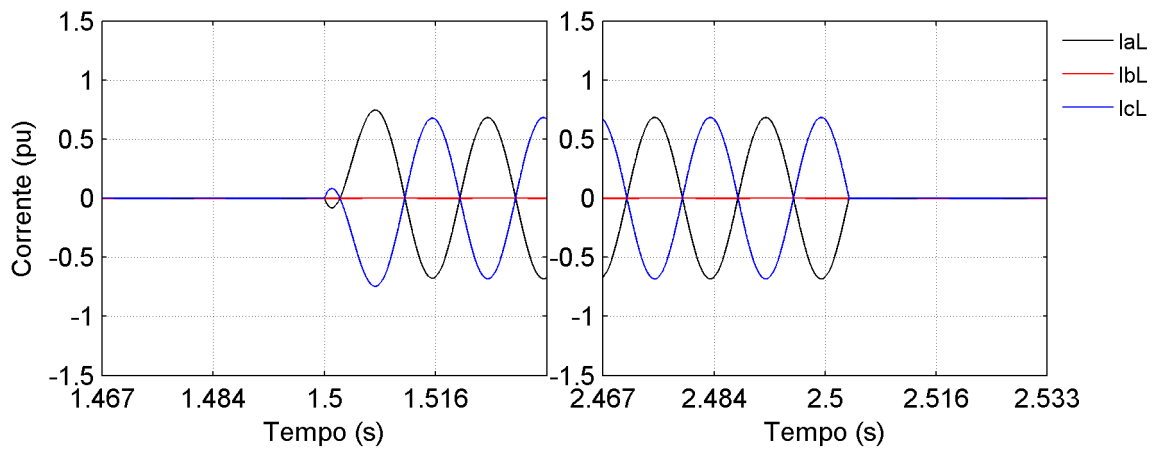


Figura 4.21: Correntes trifásicas da carga 1 durante a sua conexão e desconexão.

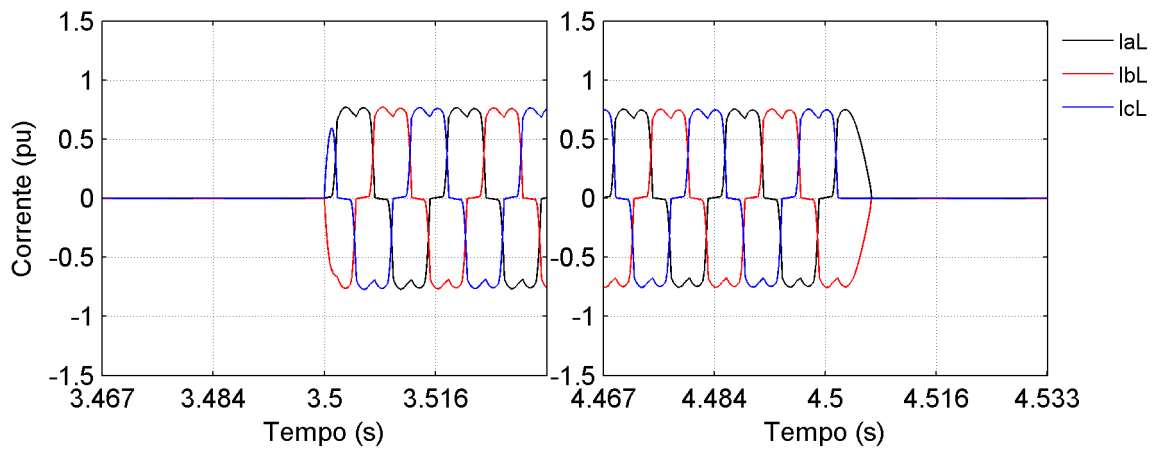


Figura 4.22: Correntes trifásicas da carga 2 durante a sua conexão e desconexão.

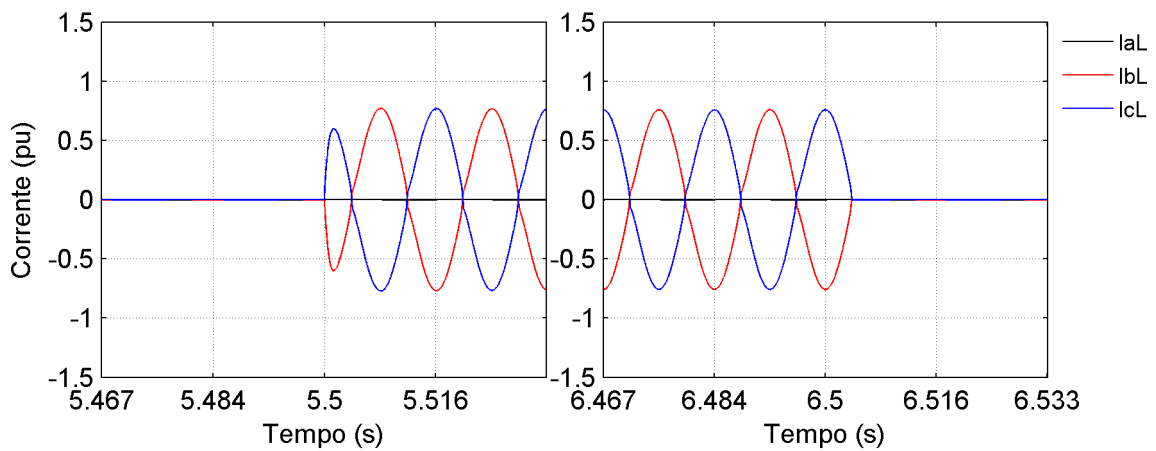


Figura 4.23: Correntes trifásicas da carga 3 durante a sua conexão e desconexão.

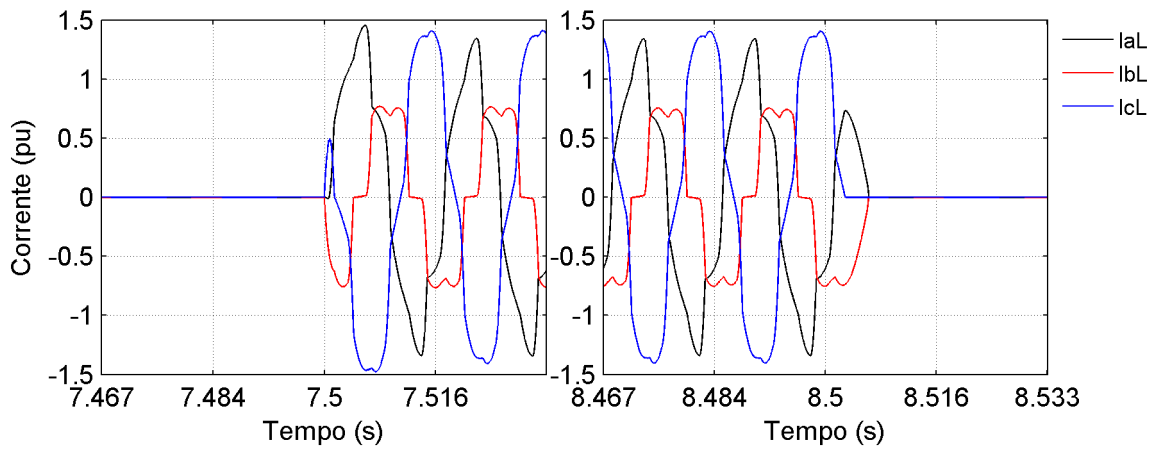


Figura 4.24: Correntes trifásicas da carga 4 durante a sua conexão e desconexão.

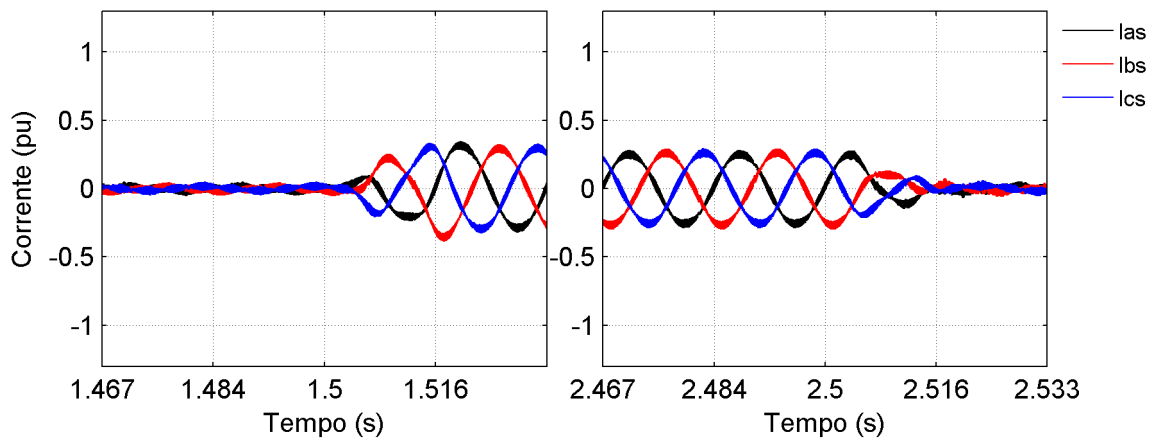


Figura 4.25: Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga1.

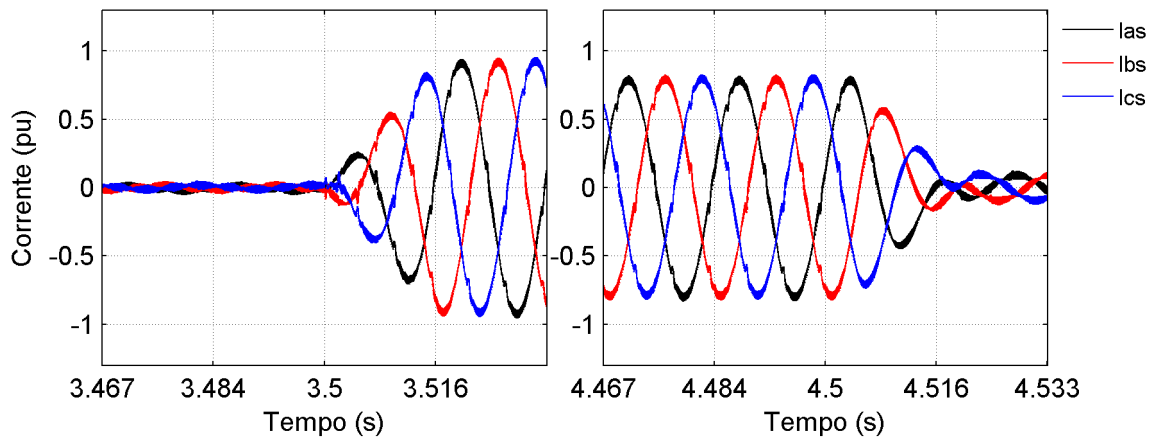


Figura 4.26: Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga2.

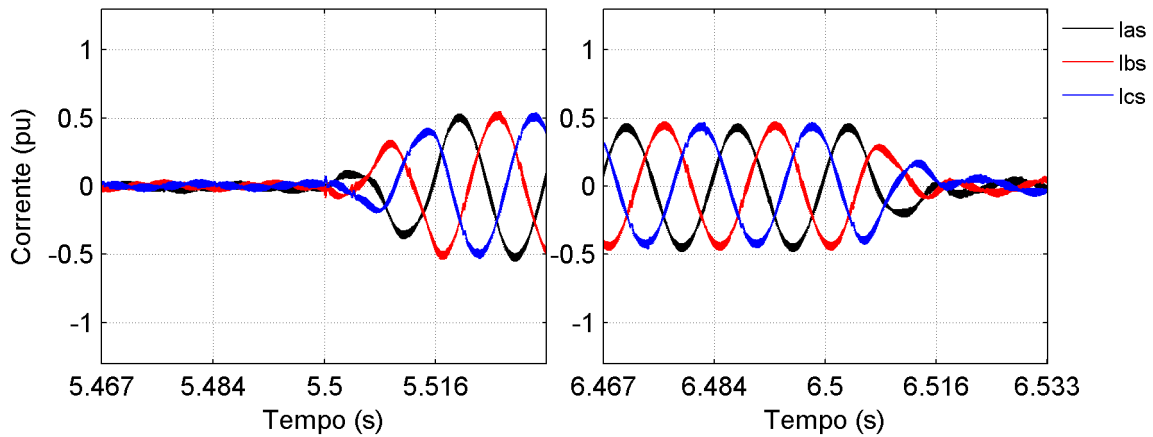


Figura 4.27: Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga3.

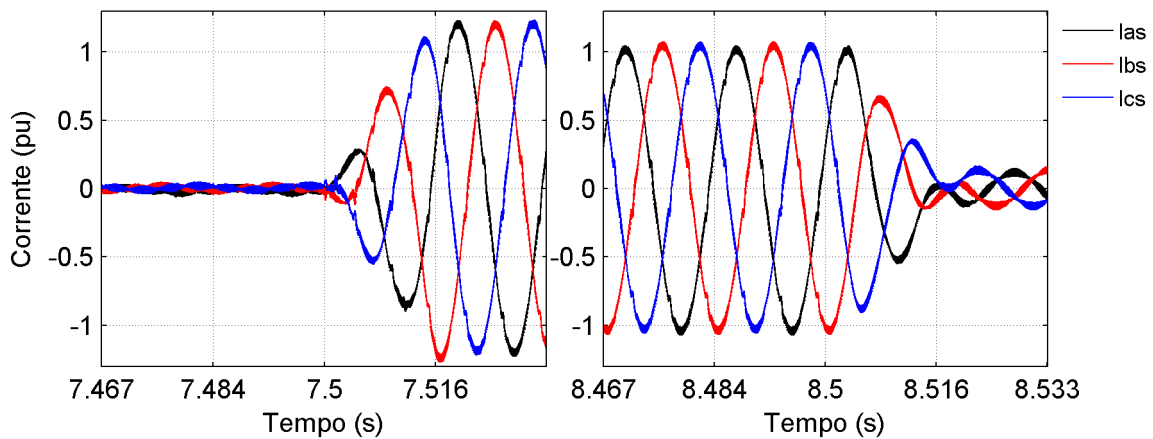


Figura 4.28: Correntes trifásicas da fonte durante a conexão e desconexão da carga4.

Um dos aspectos importantes que deve ser observado consiste na comparação dos sinais de referência e as respectivas grandezas medidas. Esta análise permite verificar o desempenho das estratégias de controle de chaveamento. O gráfico da Figura 4.29 apresenta os três sinais de referência de tensão e as suas respectivas medições sobre os terminais da carga 4, durante o seu último período fundamental de funcionamento em regime permanente. Observando-se a ampliação de parte do gráfico, referente a uma das fases, percebe-se um efeito de pequenos degraus no sinal de referência, devido ao período de interrupção em que o código de controle (rotina de interrupção) está submetido, fazendo com que a sua execução seja realizada uma única vez em intervalos regulares de $50\mu s$. É possível visualizar a presença de variações em alta frequência nas tensões medidas, devido ao chaveamento do inversor.

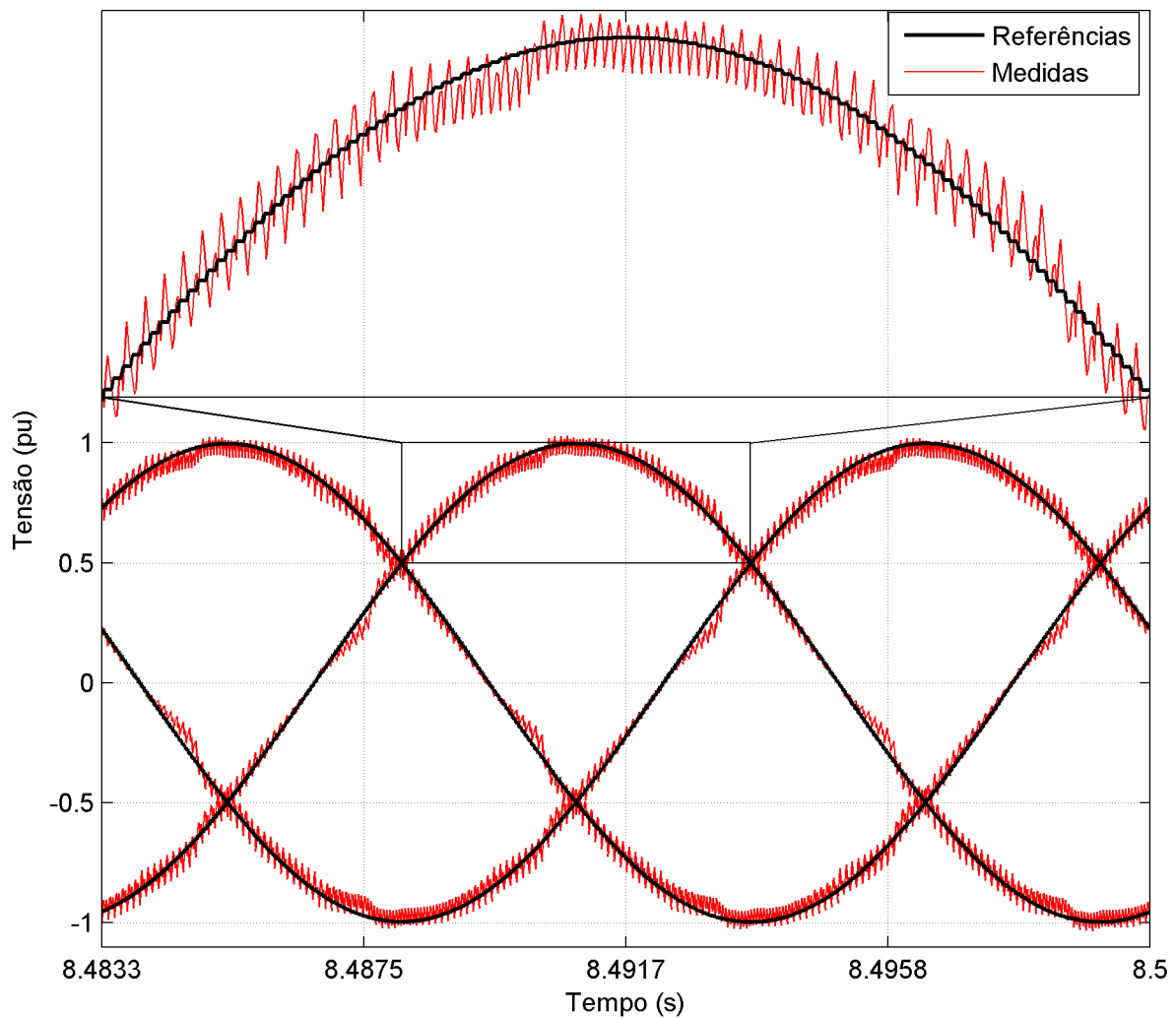


Figura 4.29: Tensões de linha de referência e medida da carga 4 em regime permanente.

A mesma análise pode ser realizada para os três sinais de referência de corrente e as suas respectivas medições na fonte, apresentados nos gráficos da Figura 4.30. No detalhe ampliado de uma das fases, verifica-se que o valor medido acompanha a referência. Em alguns instantes, principalmente quando a corrente da carga tem uma variação de corrente (di/dt) maior, percebe-se um aumento no erro entre os sinais medido e de referência, mas que não compromete o desempenho do UPQC-i.

Continuando as análises para este mesmo intervalo de interesse, as Figuras 4.31 e 4.32 apresentam o espectro harmônico e os componentes fundamentais das correntes das cargas, respectivamente. A presença de altos conteúdos harmônicos nestas correntes é quantificada pelos índices de THD das três fases, que situam-se entre 12% e 24%. O percentual de desbalanço de seqüência negativa calculado é de 35%.

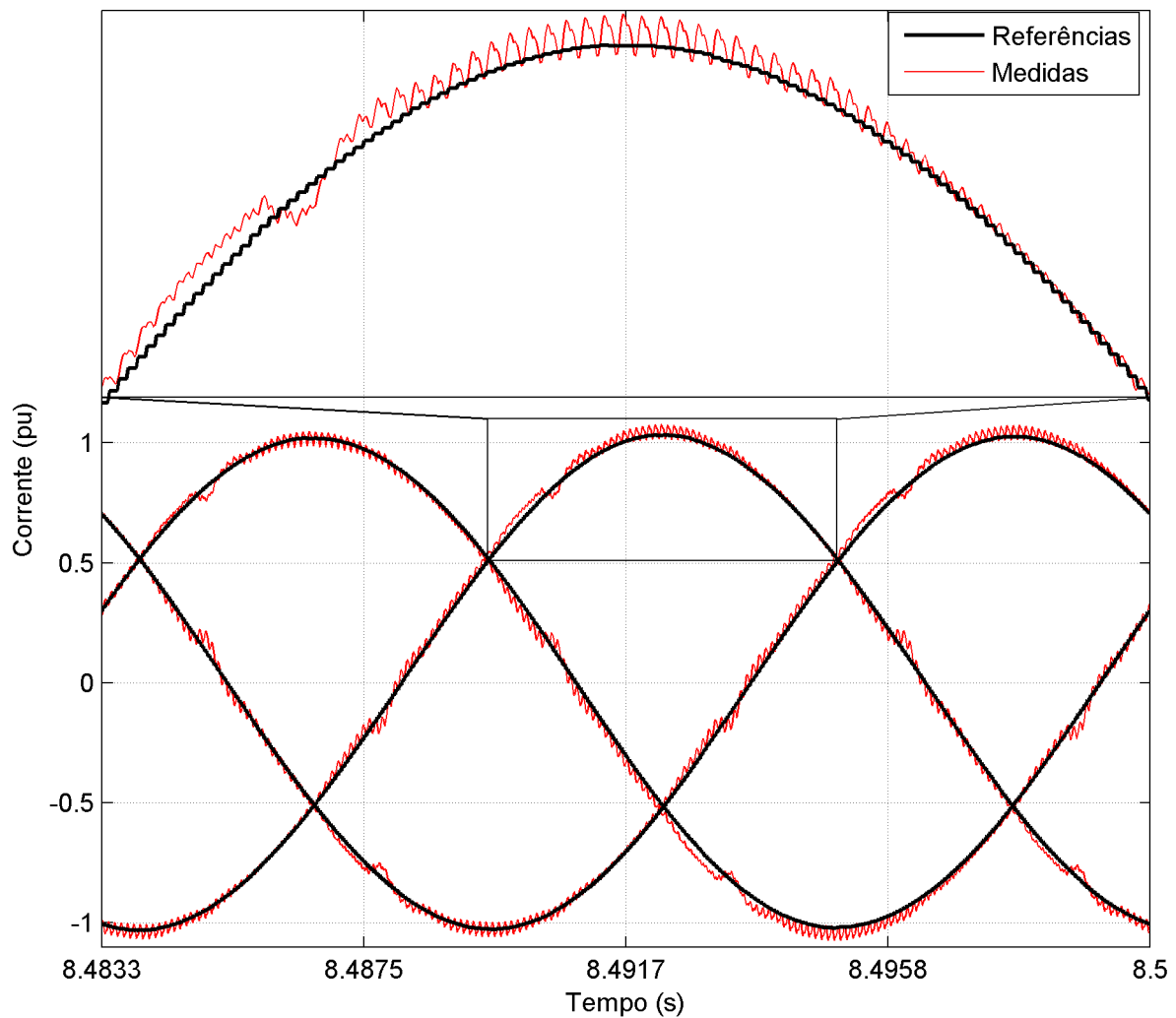


Figura 4.30: Correntes trifásicas da fonte, de referência e medidas, durante a operação da carga 4 em regime permanente.

Com a operação do UPQC-i os distúrbios presentes nas correntes da carga não se propagam para a fonte. Isto pode ser observado pelos índices de distorção harmônica total, situados abaixo de 3%, apresentados nos gráficos da Figura 4.33. Observa-se que o espectro harmônico possui alguns componentes em torno da 167^a ordem, devidas ao chaveamento dos inversores e atenuadas pelos filtros passivos RLC. Nota-se, ainda, a presença de componentes harmônicos de ordem baixa ($< 53^{\text{a}}$) que contribuem para que os THDs situam-se um pouco abaixo de 3%. Isto significa que embora tenha ocorrido uma melhora efetiva do THD a compensação não foi total. Entretanto, esta limitação não invalida a capacidade de compensação do UPQC-i. O gráfico da Figura 4.34 apresenta os componentes fundamentais das correntes da fonte praticamente sem desequilíbrio.

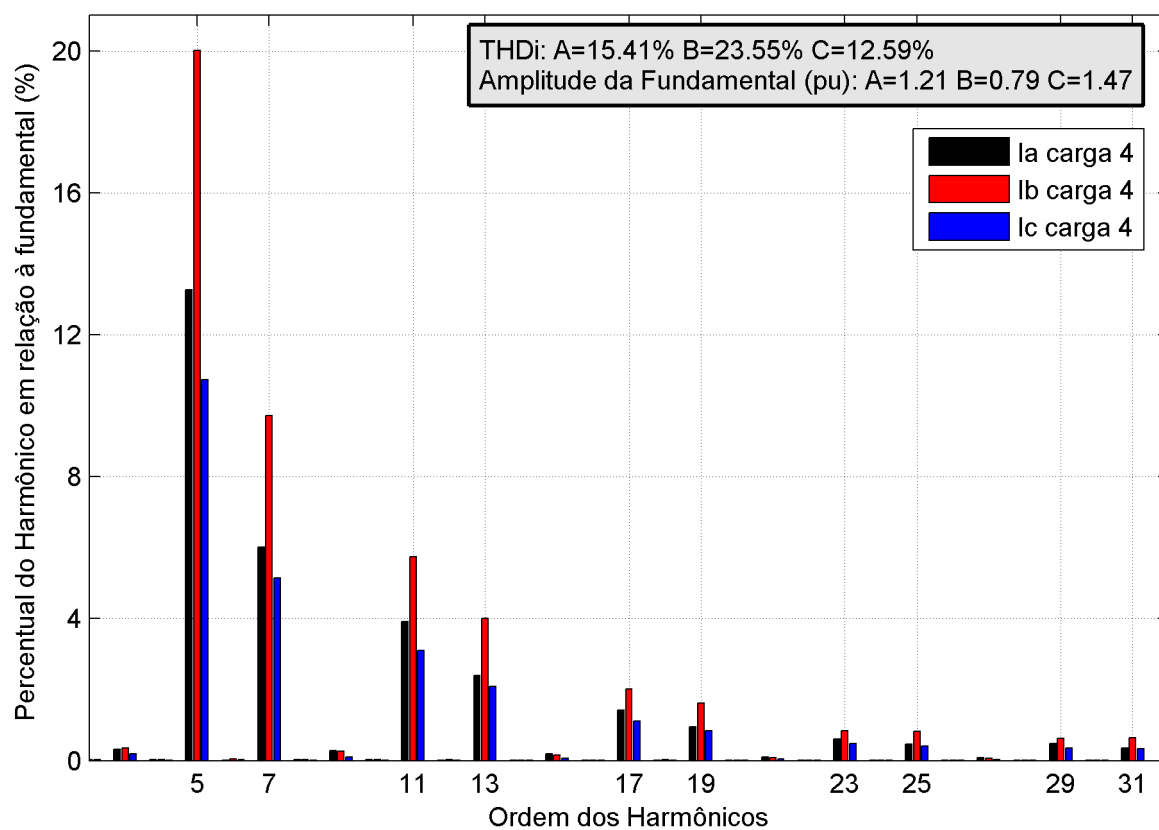


Figura 4.31: Componentes harmônicos mais relevantes das correntes trifásicas da carga 4 em regime permanente.

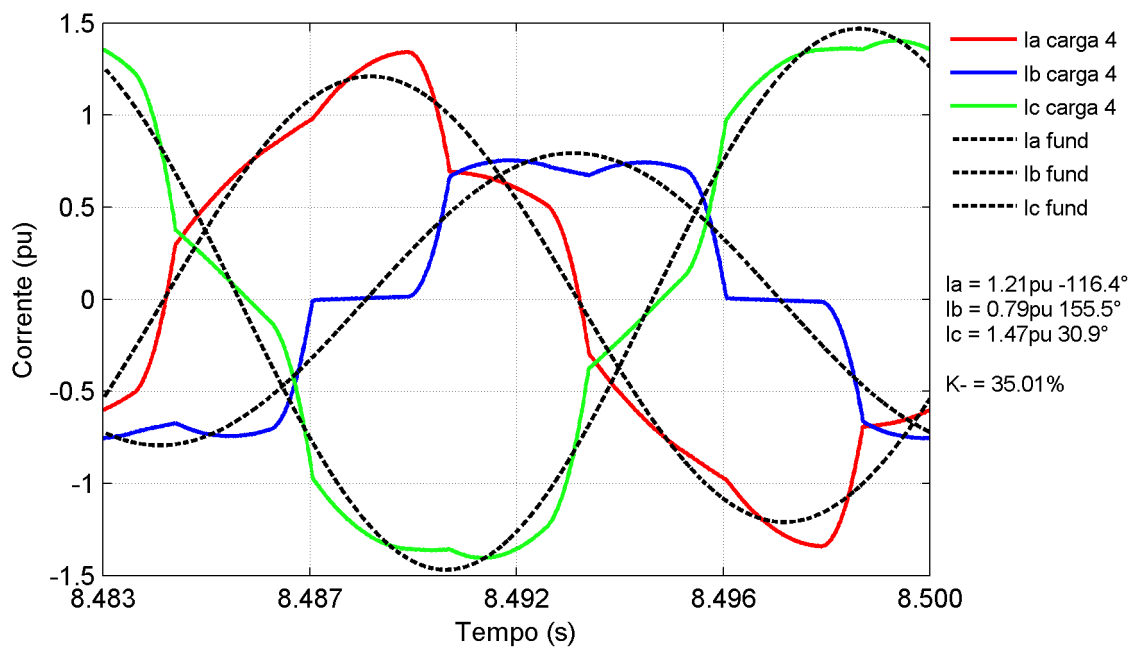


Figura 4.32: Componente fundamental das correntes trifásicas da carga 4 em regime permanente.

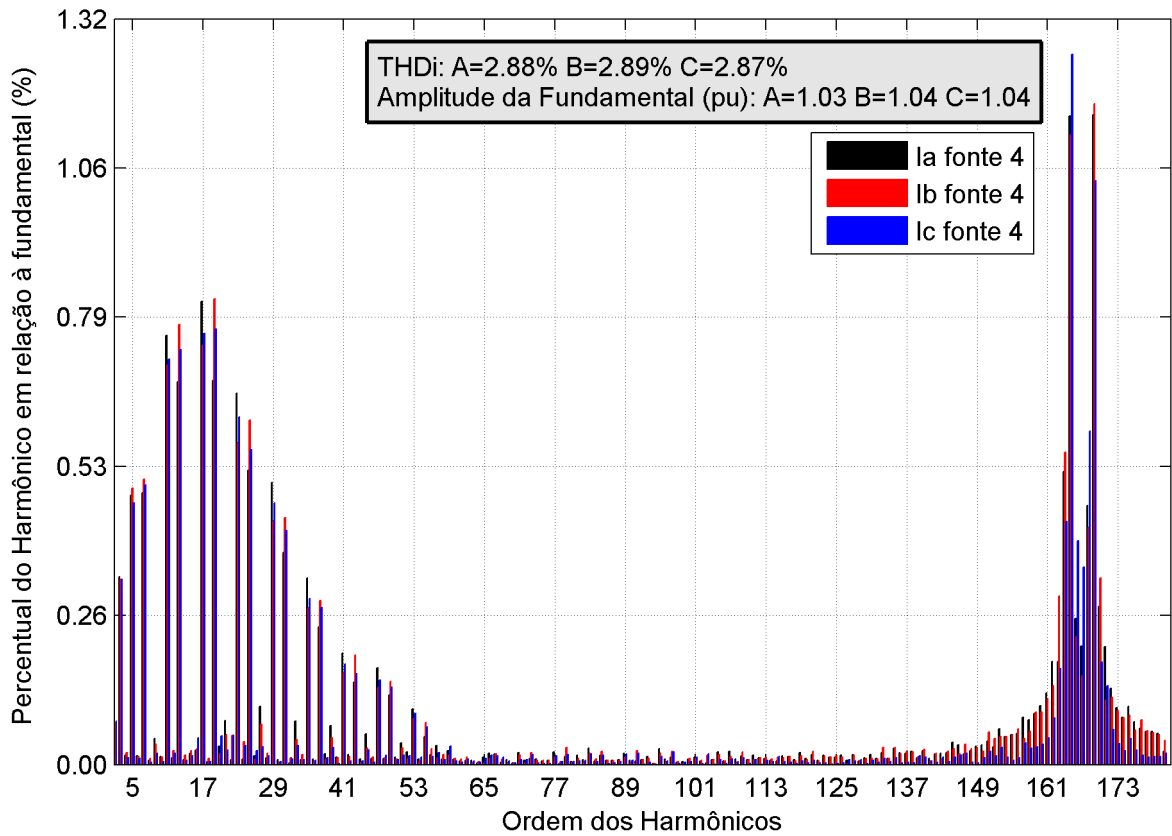


Figura 4.33: Componentes harmônicos mais relevantes das correntes trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.

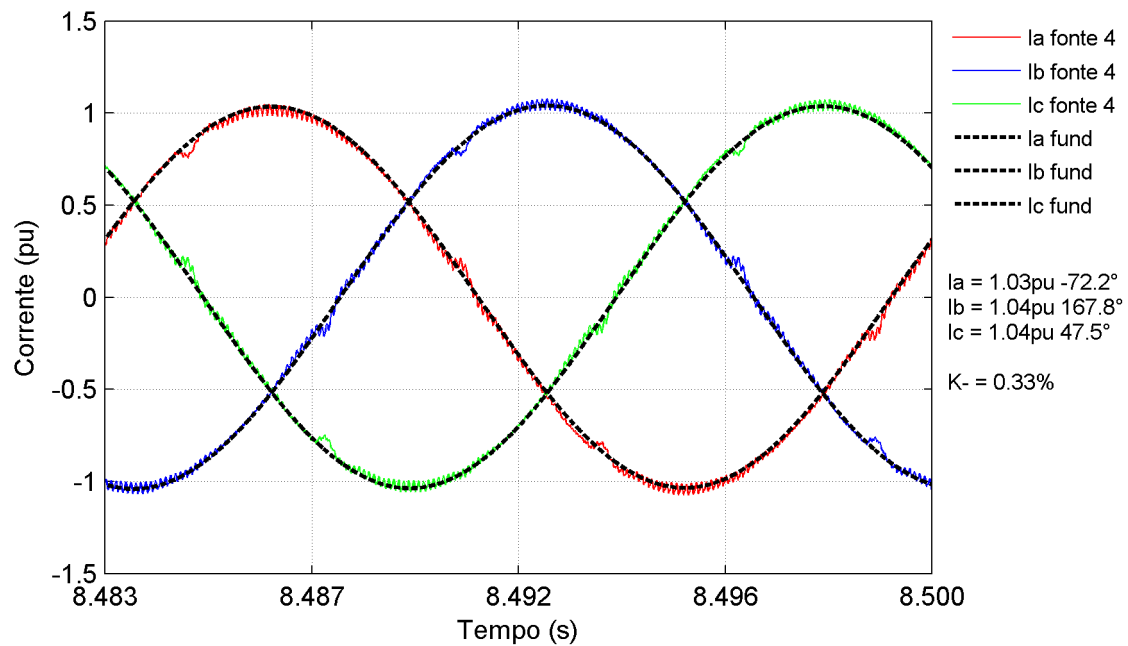


Figura 4.34: Componente fundamental das correntes trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.

O espectro harmônico das tensões da fonte é apresentado na Figura 4.35. Verifica-se a presença dos componentes de chaveamento e aqueles referentes aos componentes harmônicos de corrente que não foram totalmente eliminados e provocam quedas de tensão na impedância da fonte de tensão. Os THDs são praticamente nulos.

De acordo com os gráficos da Figura 4.36, o percentual de desequilíbrio de seqüência negativa dos componentes fundamentais é praticamente nulo, indicando a presença de tensões equilibradas na fonte.

De forma semelhante, os gráficos das Figuras 4.37 e 4.38 apresentam o espectro harmônico e os componentes fundamentais das tensões nas cargas, respectivamente. Os THDs situam-se próximos de 4,5% e o percentual de desbalanço de seqüência negativa (K_-) é de 0,57%.

A Tabela 4.1 apresenta o fator de potência de deslocamento (FPD), para a operação em regime permanente da Carga 4, com base nas informações das amplitudes e ângulos fornecidas pelas Figuras 4.32, 4.34, 4.36 e 4.38. Os resultados demonstram a capacidade do UPQC-i em realizar a correção do fator de potência, mesmo sob a presença das correntes das cargas, não-senoidais e desequilibradas.

Tabela 4.1: Fator de Potência de Deslocamento para o caso real1

Fase	Fonte			Carga		
	$\phi_{V_1}(\text{°})$	$\delta_{I_1}(\text{°})$	FPD	$\phi_{V_1}(\text{°})$	$\delta_{I_1}(\text{°})$	FPD
A	-71,9	-72,2	1,00	-72,8	-116,4	0,72
B	168,1	167,8	1,00	166,8	155,5	0,98
C	48,1	47,5	1,00	46,7	30,9	0,96

Após a análise de todos os gráficos apresentados nesta simulação, denominada real1, conclui-se que o modelo real do UPQC-i evita que os componentes indesejados das correntes das cargas sejam propagados para a fonte.

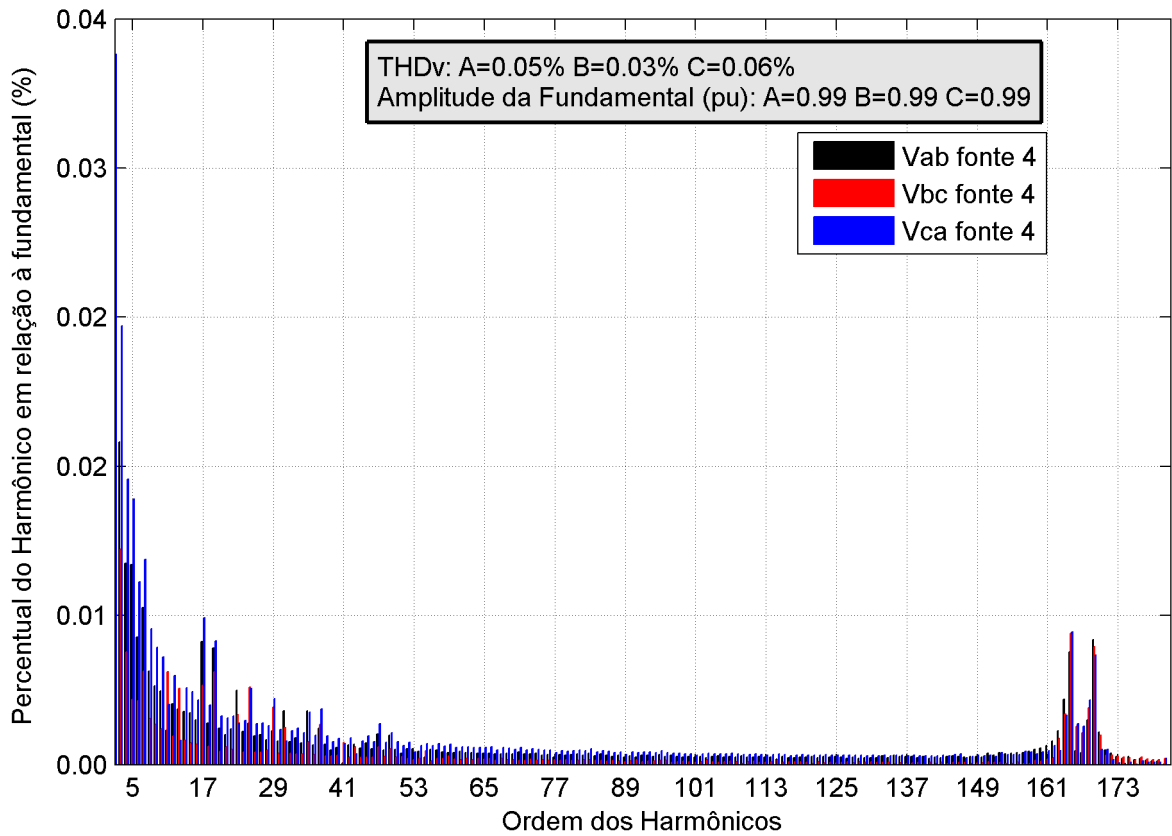


Figura 4.35: Componentes harmônicos mais relevantes das tensões de linha trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.

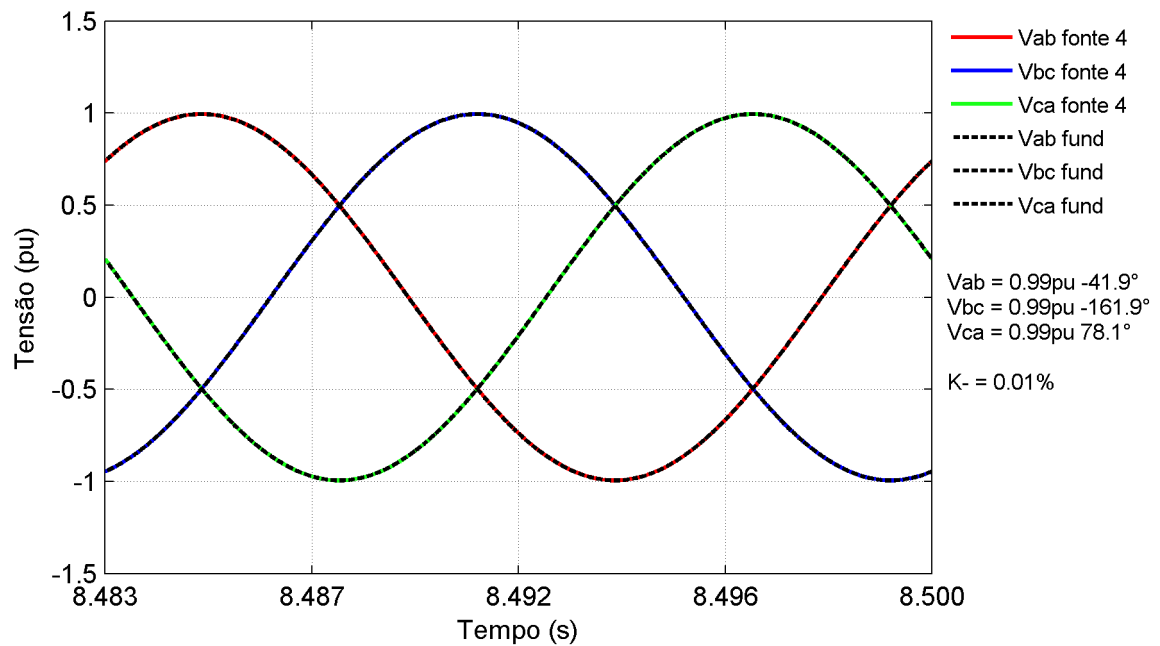


Figura 4.36: Componente fundamental das tensões de linha trifásicas da fonte durante a operação da carga 4 em regime permanente.

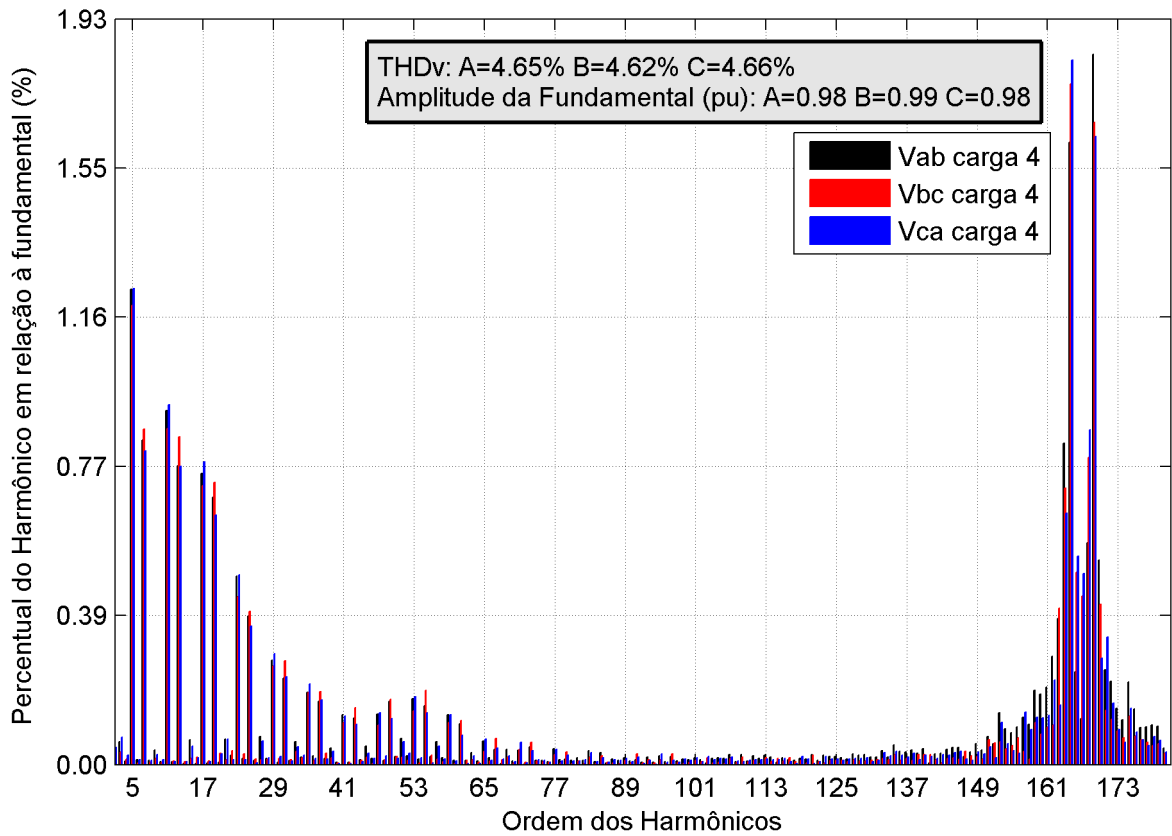


Figura 4.37: Componentes harmônicos mais relevantes das tensões de linha trifásicas da carga durante a operação da carga 4 em regime permanente.

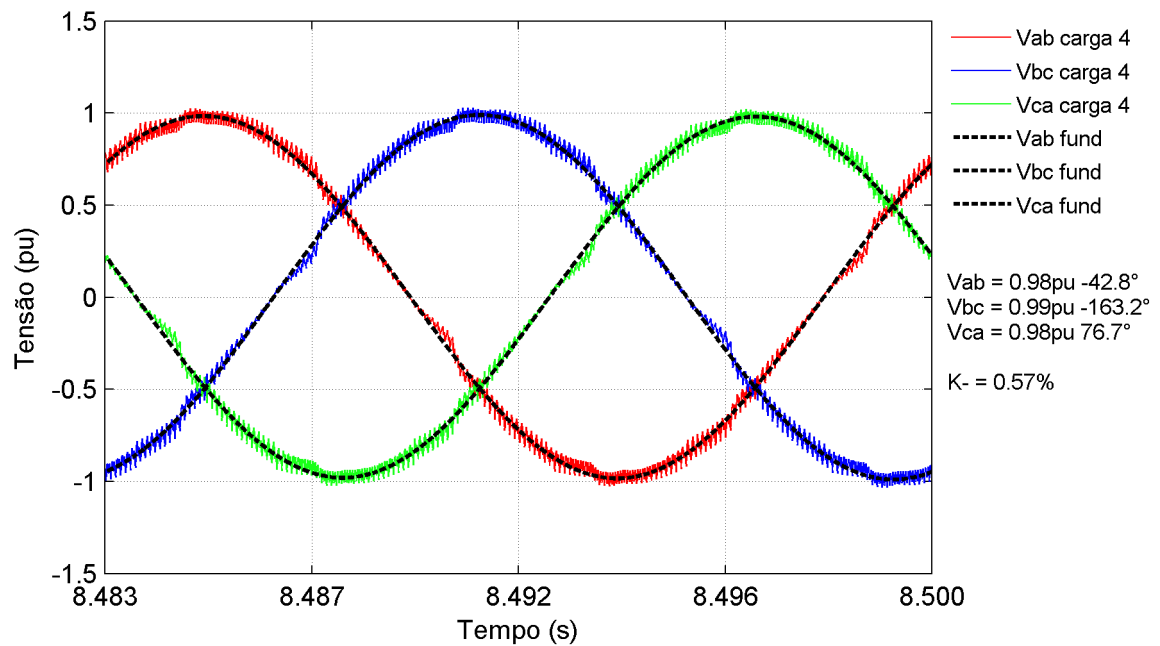


Figura 4.38: Componente fundamental das tensões de linha trifásicas da carga durante a operação da carga 4 em regime permanente.

4.5.2 Resultados da simulação computacional real2

A simulação que será apresentada nesta seção visa avaliar a operação do UPQC-i na presença de distúrbios na tensão da fonte. Neste caso, escolheu-se a carga 4 para ser mantida constante ao longo de toda a simulação, sendo que a sua conexão ocorre no instante igual a 1,0s. Quatro tipos distintos de distúrbios, caracterizados na Tabela 3.3, ocorrem nos instantes 1,5s, 3,5s, 5,5s e 7,5s. Eles são sustentados durante um segundo e em seguida a tensão da fonte volta para o seu valor nominal sem a presença de distúrbios, permanecendo neste estado por mais outro período de um segundo.

A Figura 4.39 apresenta o valor coletivo médio das tensões trifásicas da fonte (entrada) e da carga (saída). No momento de conexão da carga ($t = 1,0s$) ocorre um pequeno transitório. O gráfico identifica os instantes de ocorrência e extinção dos distúrbios.

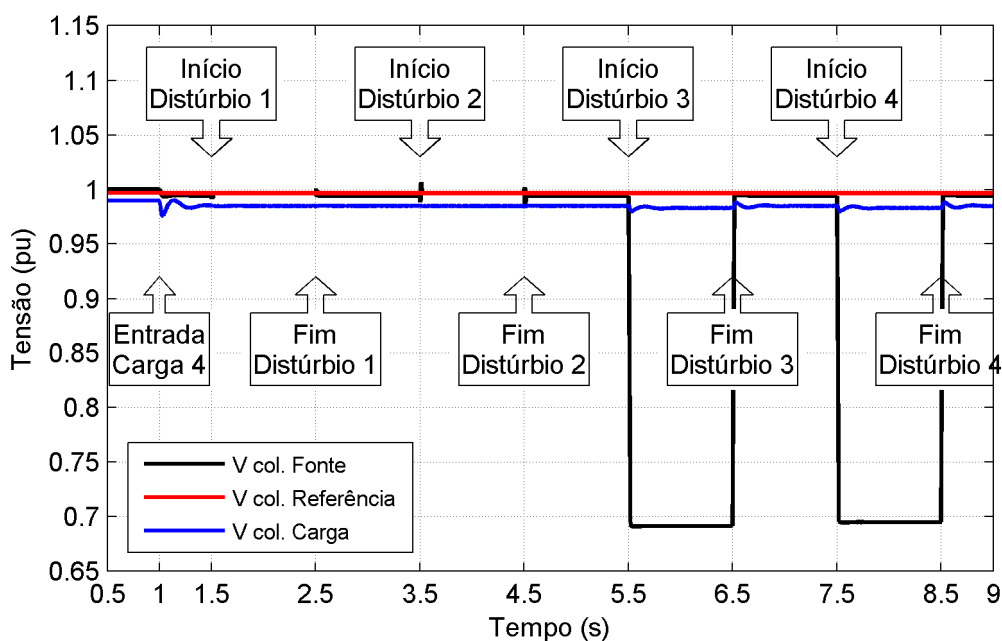


Figura 4.39: Valor coletivo das Tensões de Entrada, Referência e da Carga.

A variação de tensão presente na composição dos distúrbios 3 e 4, é percebida pela queda no valor coletivo médio das tensões da fonte para $0,7pu$. O algoritmo de controle implementado nesta simulação foi o simplificado modificado apresentado na Seção 3.2.3 com as alterações propostas na Seção 3.5. Ele compensa os afundamentos e elevações fixando as amplitudes das tensões na carga no valor nominal $1,0pu$.

As Figuras 4.40 e 4.41 apresentam os perfis de corrente da carga e da fonte, respectivamente.

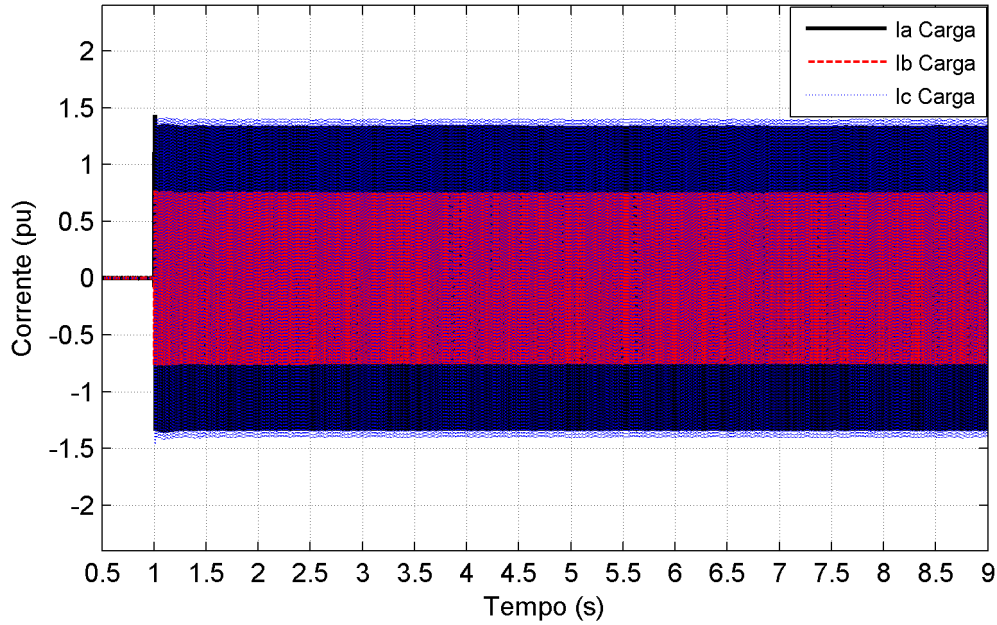


Figura 4.40: Perfil das correntes da carga durante a presença dos distúrbios de tensão.

As variações presentes nos perfis das correntes da carga e da fonte são observadas de forma mais clara no gráfico do valor coletivo destas correntes apresentado na Figura 4.42. O valor coletivo das correntes na carga é mantido constante mesmo na ocorrência do afundamento de tensão, diferente do comportamento apresentado nas simulações da Seção 3.4.2, onde o valor coletivo das correntes da carga diminui durante a compensação. Isto se deve à diferença de abordagem na compensação de VTCD. Para a fonte suprir a potência ativa da carga, com uma tensão menor do que a desta última, o valor coletivo das correntes da fonte deverá aumentar, conforme observa-se na figura.

O gráfico da tensão no capacitor do elo CC é apresentado na Figura 4.43. O controle de tensão mostra-se eficiente na presença simultânea de distúrbios na fonte e na carga. Após pequenos transitórios a tensão do elo CC estabiliza-se no valor da referência.

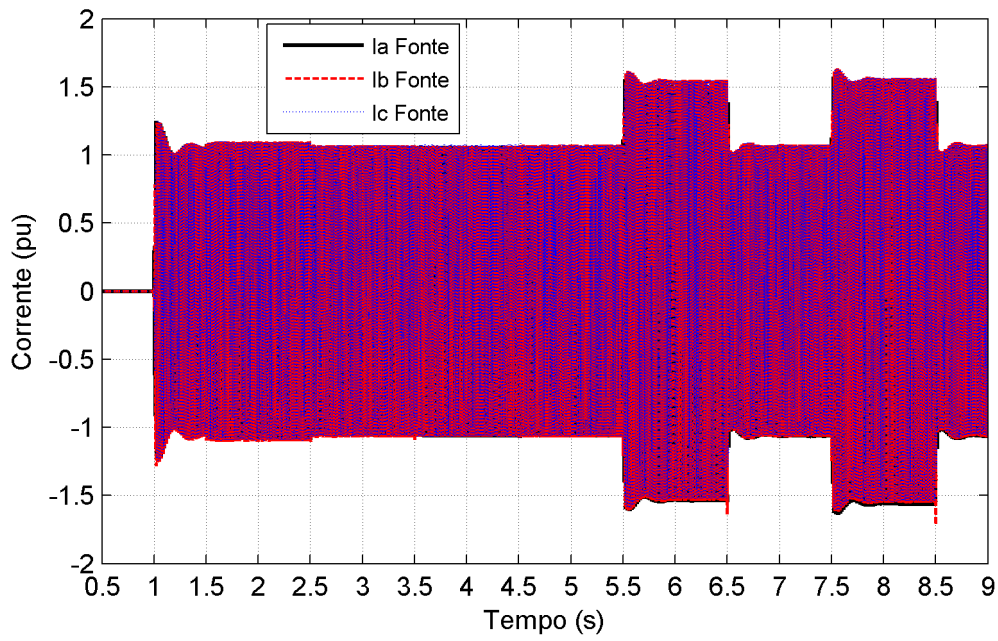


Figura 4.41: Perfil das correntes da fonte durante a presença de distúrbios de tensão.

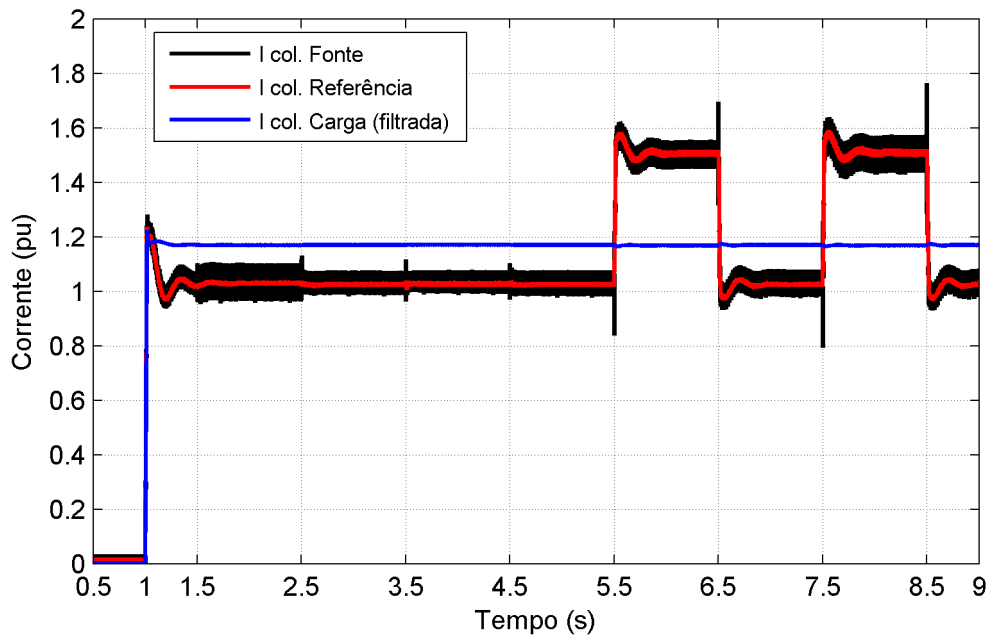


Figura 4.42: Valor coletivo das correntes da fonte, de referência e da carga (filtrada).

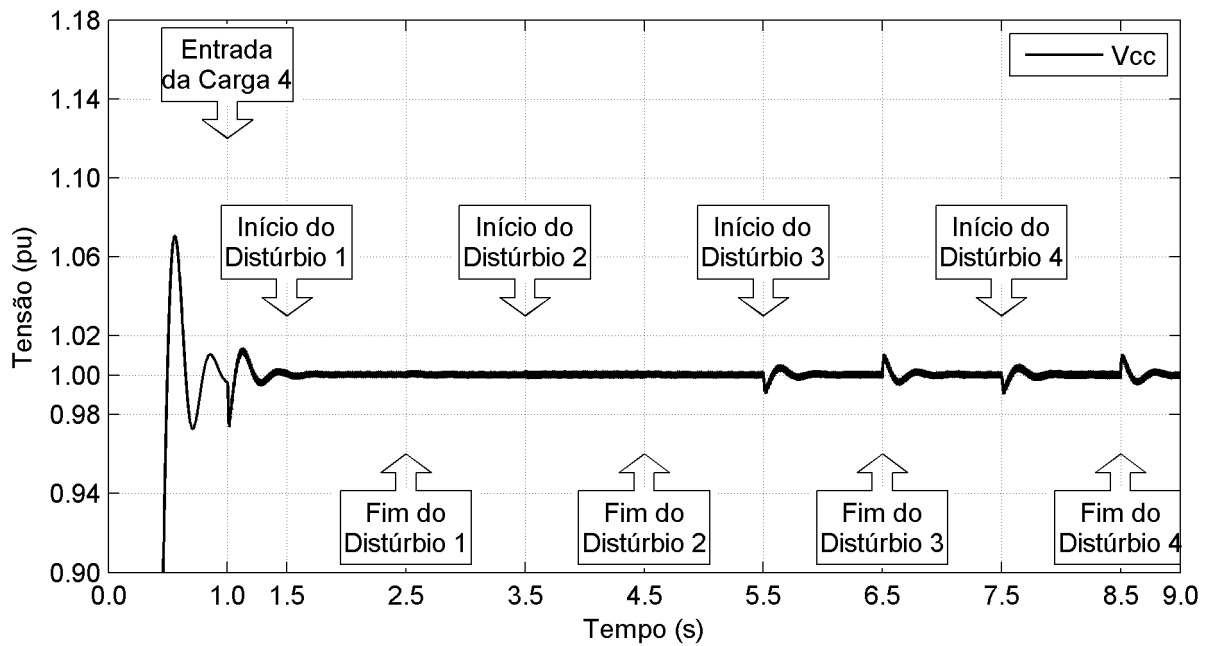


Figura 4.43: Tensão no capacitor do elo CC.

Os gráficos em seqüência apresentam o comportamento dinâmico das correntes e tensões trifásicas das cargas e da fonte. São destacados os instantes de ocorrência e extinção dos distúrbios de tensão na fonte, cobrindo um período fundamental de dois ciclos, anteriores e posteriores a estes.

As Figuras 4.44, 4.45, 4.46 e 4.47 apresentam os gráficos das tensões de linha da fonte referentes aos distúrbios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Analisando-se o formato destas tensões verifica-se qualitativamente a presença dos distúrbios.

A estratégia de controle adotada para o modelo real do UPQC-i é capaz de compensar os distúrbios de tensão na fonte, fornecendo tensões senoidais e equilibradas para as cargas, conforme verifica-se visualmente nos gráficos das Figuras 4.48, 4.49, 4.50 e 4.51, referentes aos distúrbios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Observando-se estes dois últimos gráficos, verifica-se que o controle de correção de VTCD fixa as tensões na carga nos seus valores nominais ($1,0pu$).

As Figuras 4.52, 4.53, 4.54 e 4.55 apresentam as formas de onda para as correntes das cargas durante a ocorrência dos distúrbios 1, 2, 3 e 4, respectivamente. Verifica-se que estas correntes não sofrem variações devido ao fato do UPQC-i manter as tensões na carga constantes, independente do comportamento das tensões da fonte.

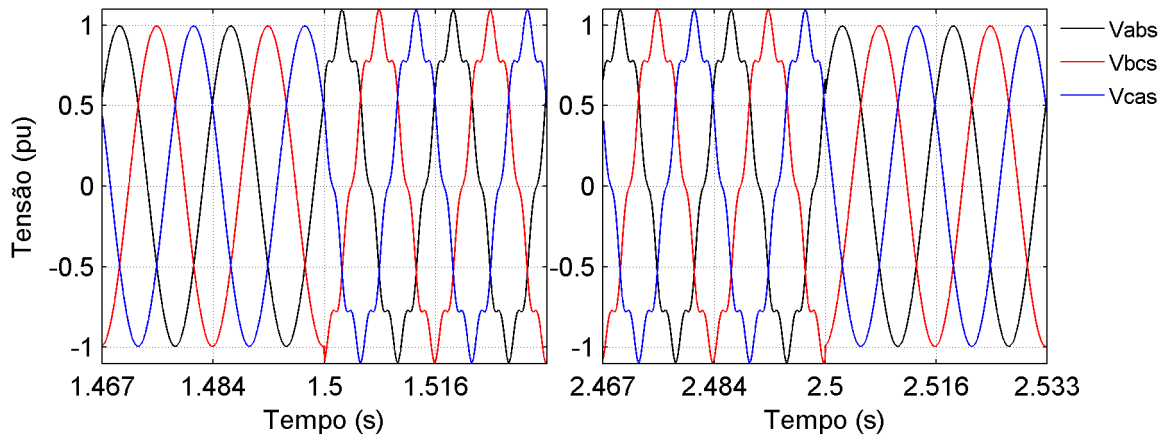


Figura 4.44: Tensões de linha na fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio1.

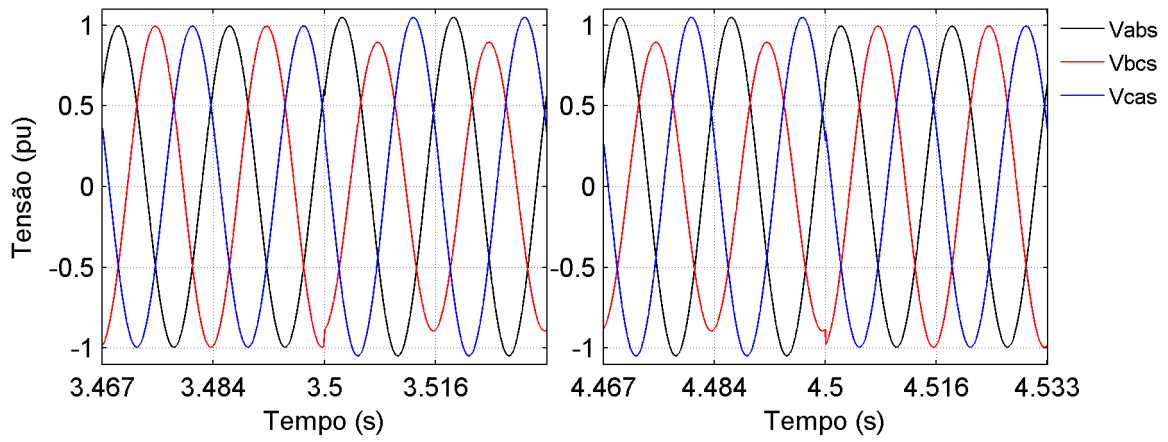


Figura 4.45: Tensões de linha na fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio2.

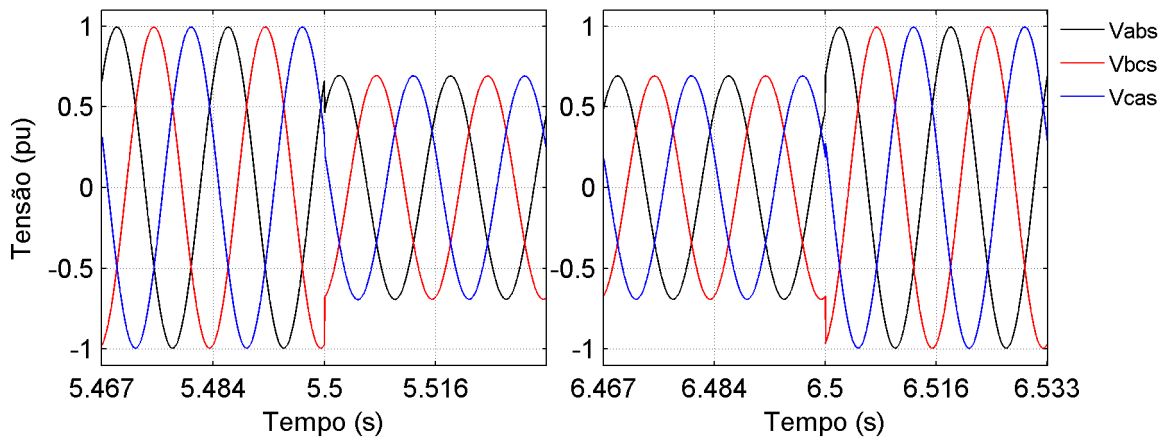


Figura 4.46: Tensões de linha na fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio3.

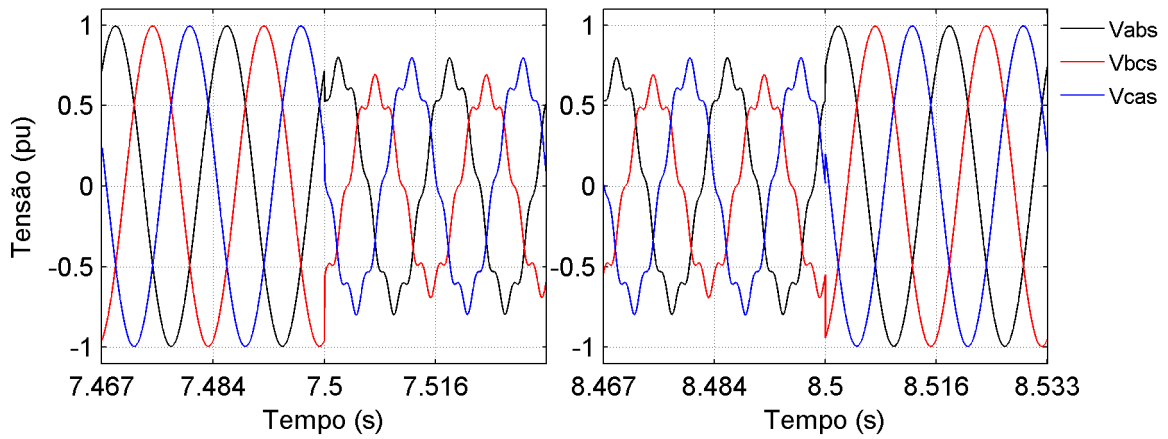


Figura 4.47: Tensões de linha na fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio4.

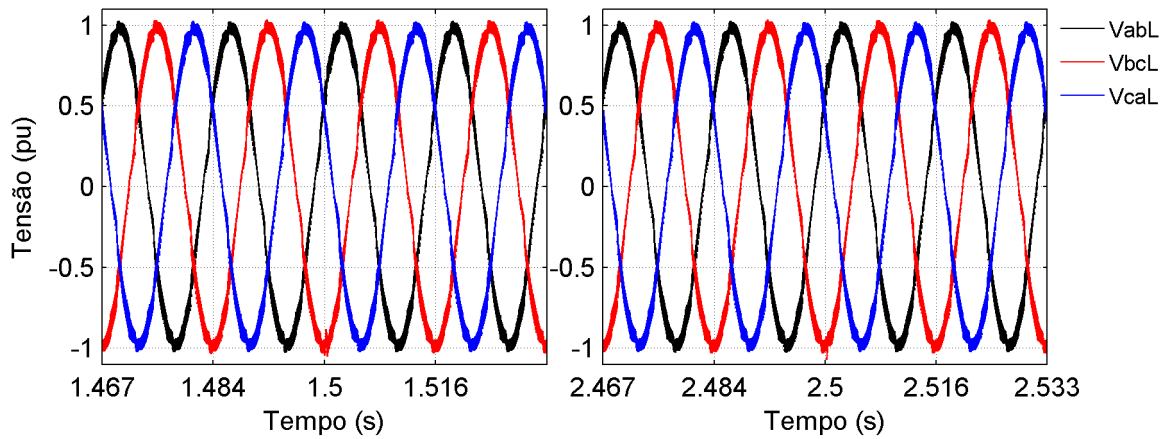


Figura 4.48: Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio1.

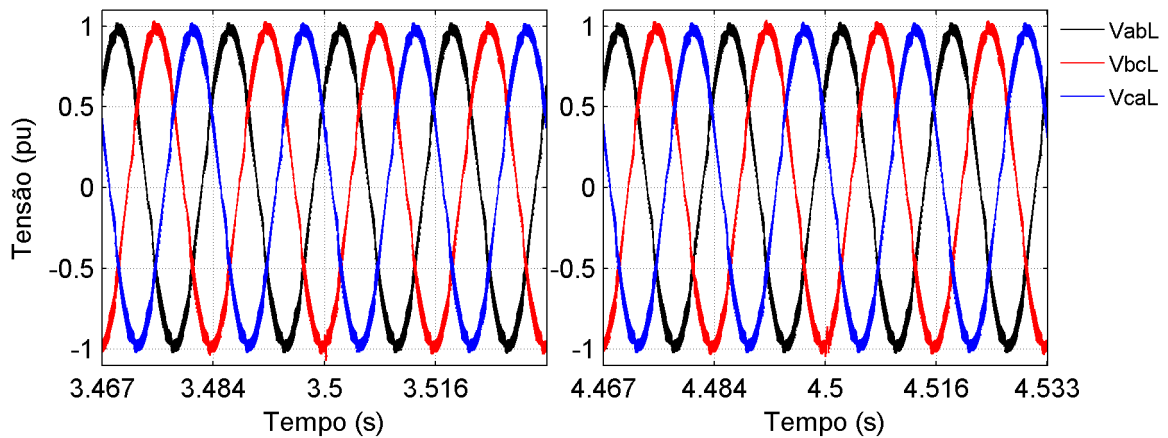


Figura 4.49: Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio2.

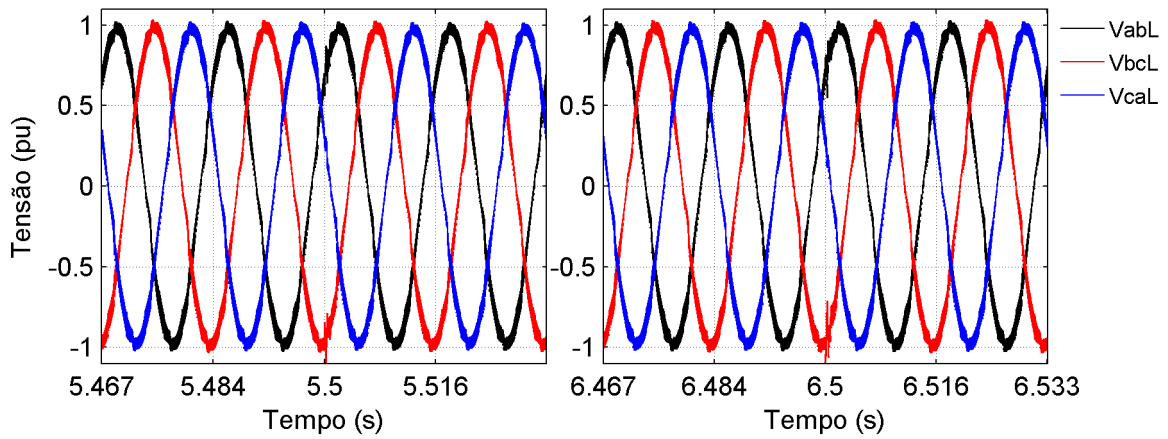


Figura 4.50: Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio3.

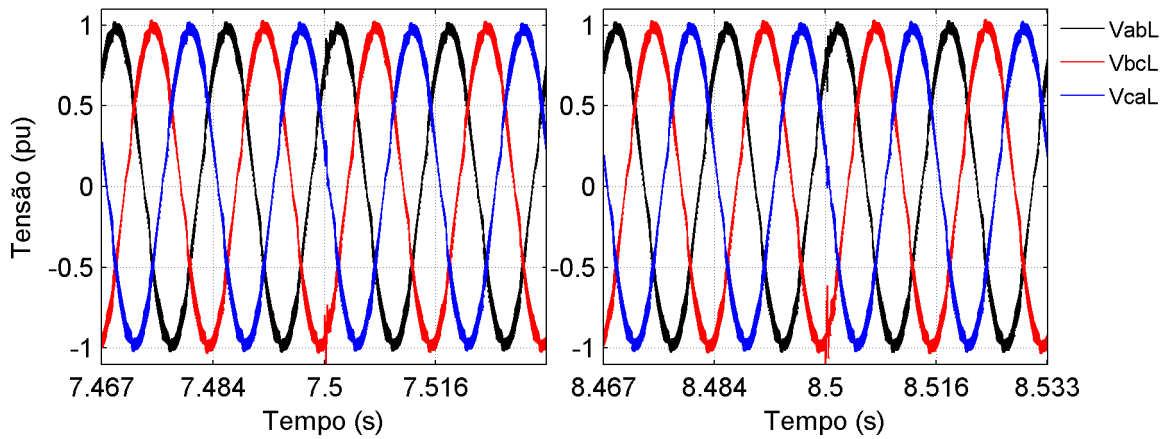


Figura 4.51: Tensões de linha da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio4.

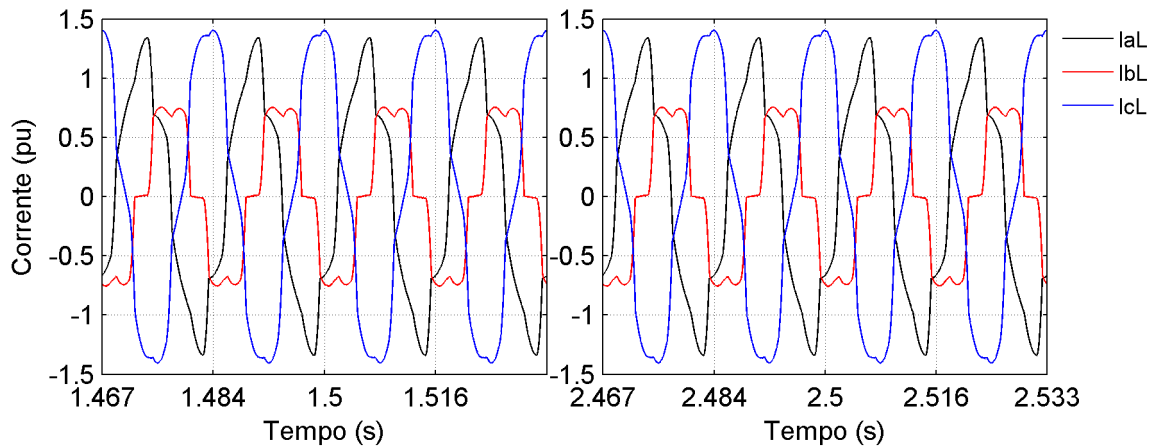


Figura 4.52: Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 1

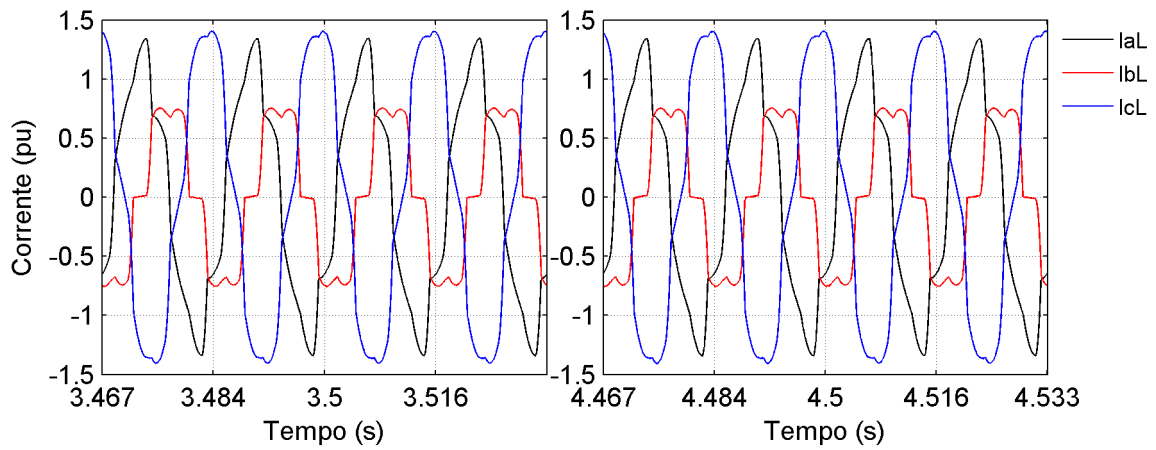


Figura 4.53: Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 2

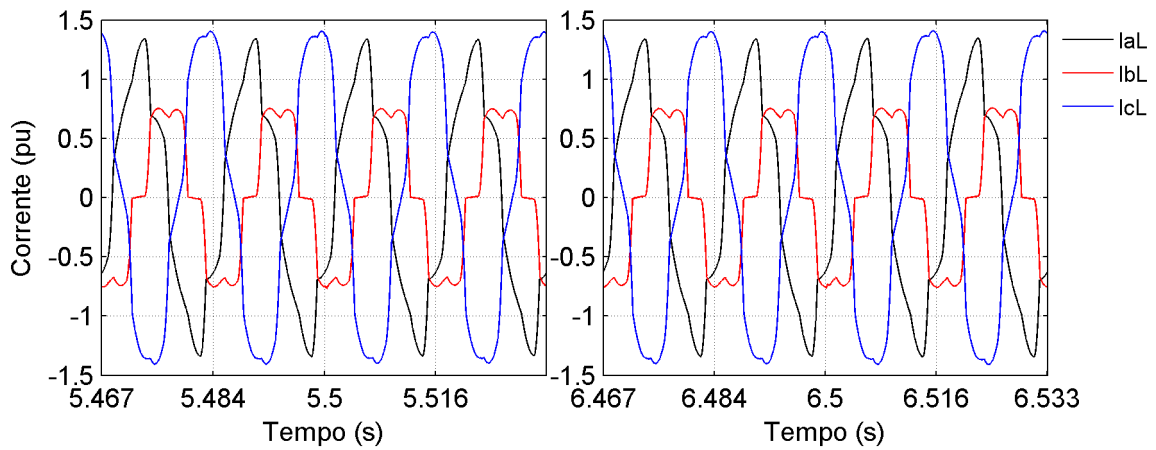


Figura 4.54: Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3

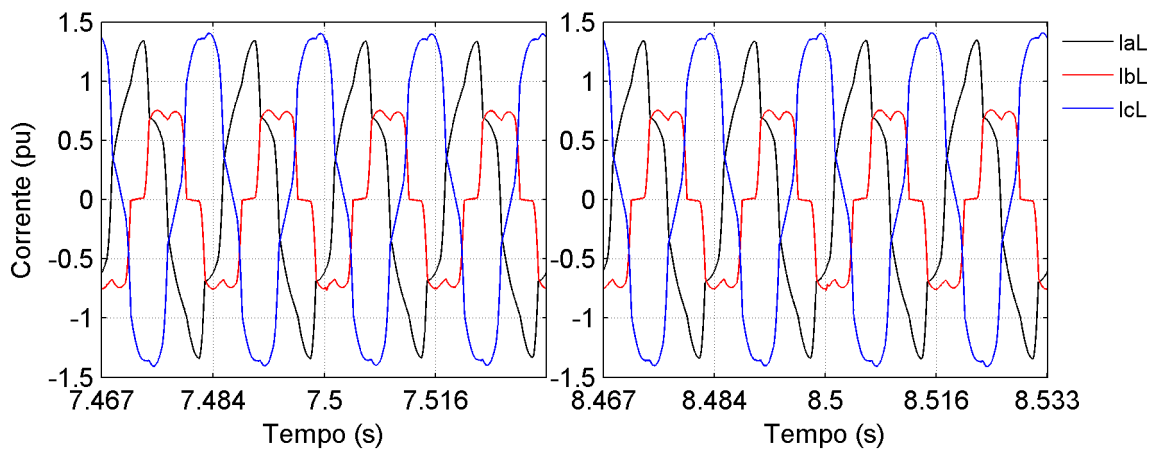


Figura 4.55: Correntes da carga durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4

As Figuras 4.56, 4.57, 4.58 e 4.59 apresentam os gráficos das correntes da fonte. Antes da ocorrência dos distúrbios de tensão, o UPQC-i já realiza a compensação das correntes da carga e impõe correntes senoidais na fonte. No instante em que o distúrbio da fonte contém o componente harmônico de sétima ordem, a compensação continua a ser realizada, porém percebe-se uma pequena alteração no formato das correntes. Esta limitação está relacionada ao fato do ganho proporcional do controle de chaveamento do filtro paralelo não poder ser aumentado de forma excessiva devido a problemas de instabilidade durante a correção dos distúrbios de afundamento. Os efeitos desta limitação são quantificados nas análises subseqüentes do espectro harmônico das tensões e correntes.

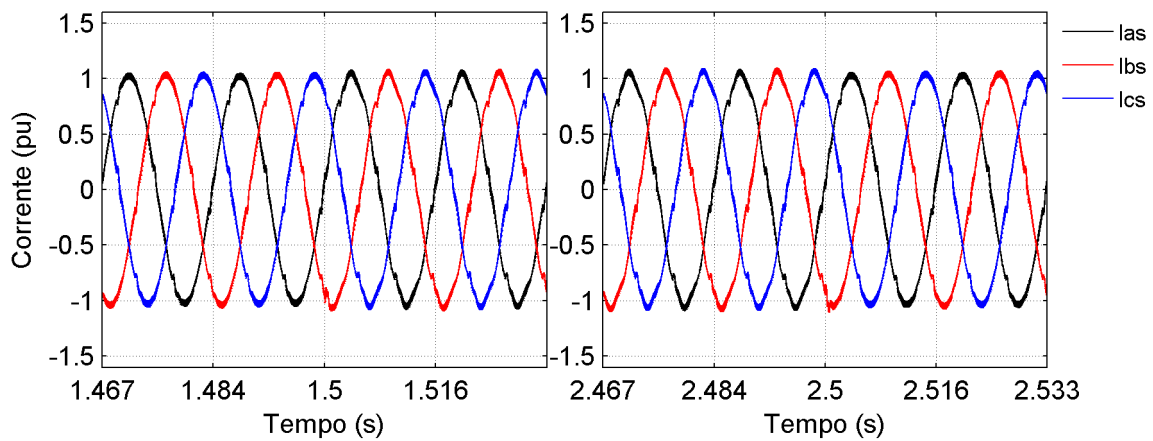


Figura 4.56: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 1.

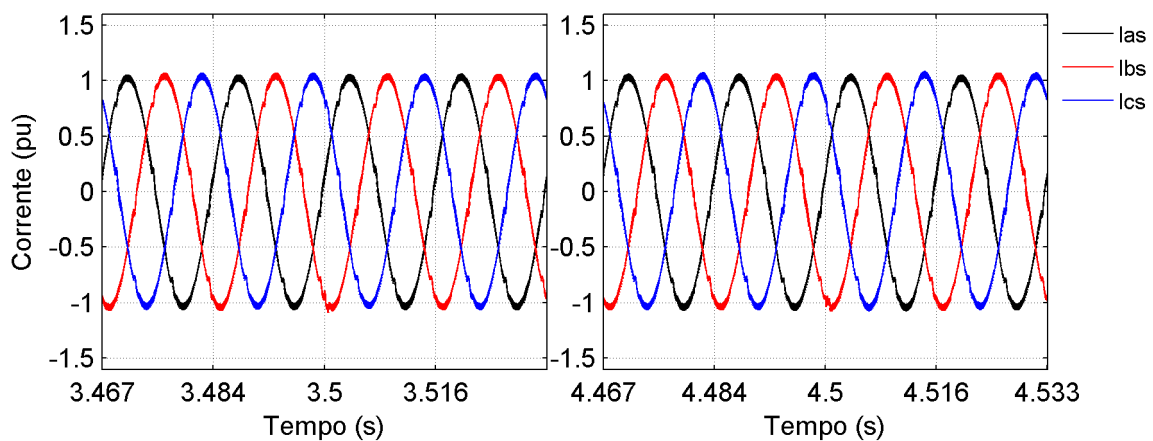


Figura 4.57: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 2.

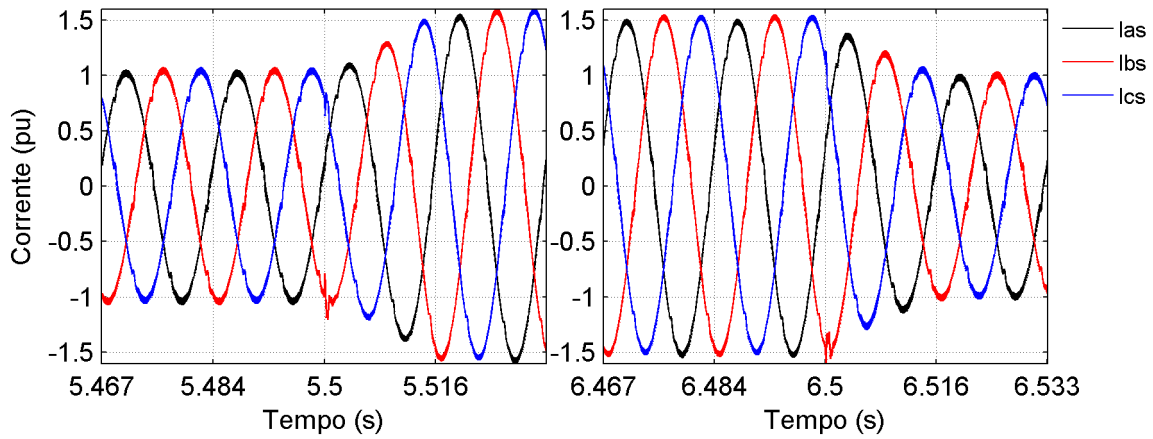


Figura 4.58: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 3.

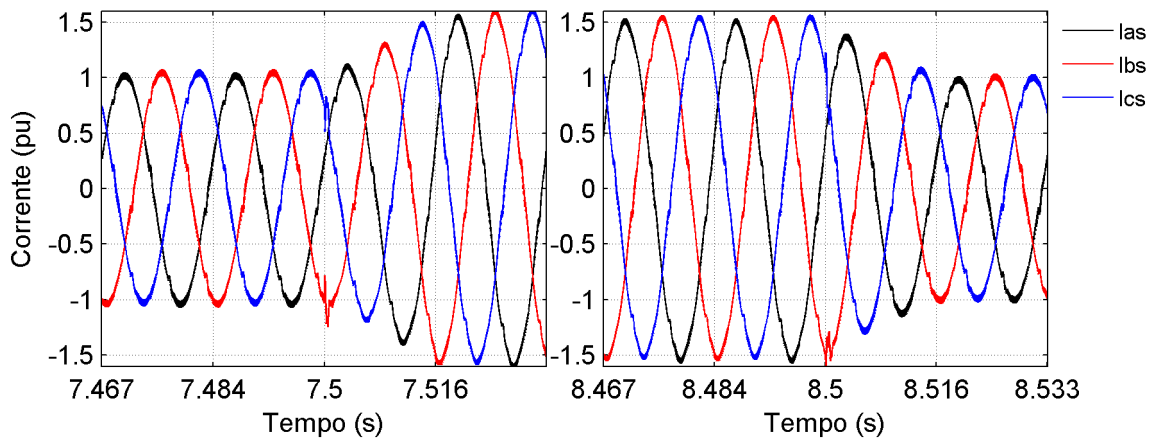


Figura 4.59: Correntes da fonte durante a ocorrência e extinção do distúrbio 4.

As Figuras 4.60 e 4.61 apresentam os sinais de referência de tensão e de corrente e as suas respectivas medições, durante a operação em regime permanente sob a presença do distúrbio 4. Em ambos os casos, o detalhe do gráfico na ampliação demonstra que as tensões na carga e as correntes na fonte acompanham os sinais de referência de forma adequada.

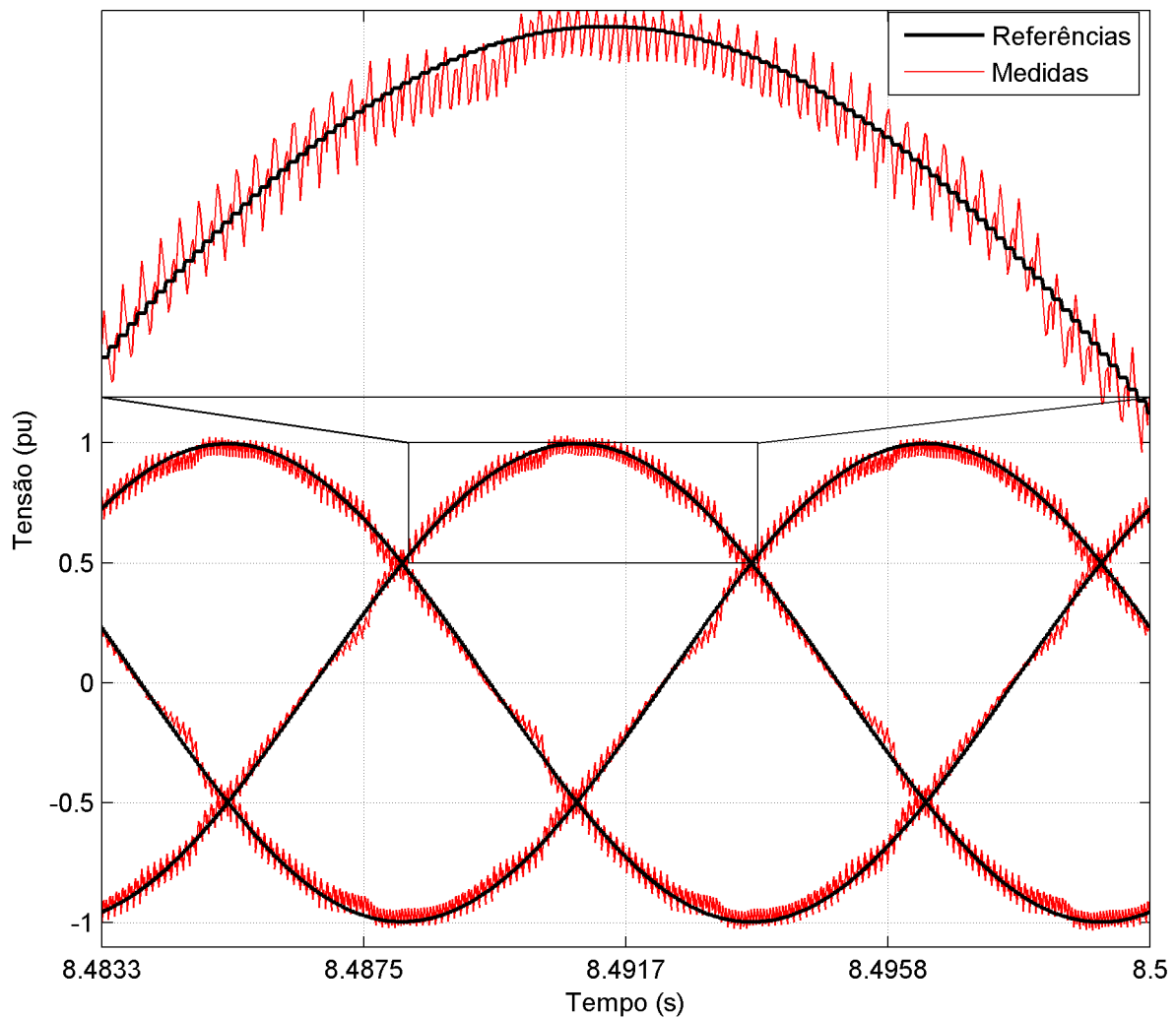


Figura 4.60: Tensões de linha, de referência e medidas, em regime permanente na presença do distúrbio 4

As próximas análises quantificam o desempenho do UPQC-i na forma do índice de distorção harmônica total (THD) e de desbalanços de seqüência negativa (K_-), este último calculado por (A.3).

Os espectros harmônicos das correntes da carga e da fonte são apresentados nas Figuras 4.62 e 4.64. Os índices de distorções harmônicas totais são reduzidos de percentuais entre 12% e 23%, nas correntes da carga, para percentuais em torno de 2,5% nas correntes da fonte. Com relação ao desequilíbrio fundamental de seqüência negativa, os gráficos das figuras 4.63 e 4.65 indicam a existência de um percentual de 35% nas correntes da carga, sendo praticamente anulado (0,14%) nas correntes da fonte.

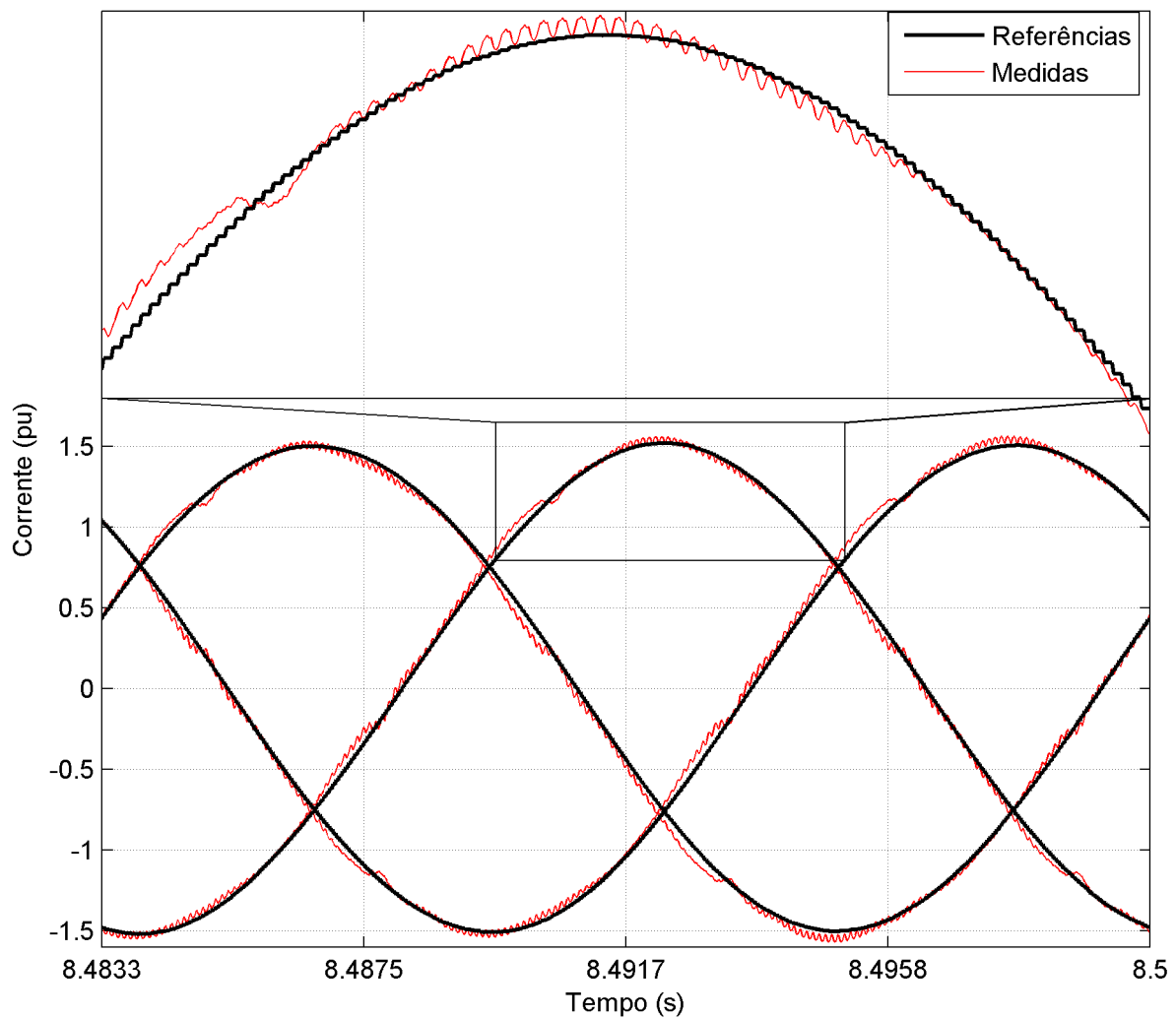


Figura 4.61: Correntes da fonte, de referência e medidas, em regime permanente na presença do distúrbio 4

O espectro harmônico das tensões de linha da fonte e da carga é apresentado nas Figuras 4.66 e 4.68. O THD para cada uma das fases é reduzido de percentuais da ordem de 10%, nas tensões da fonte, para percentuais em torno de 4,5% na carga. Observa-se que o sétimo harmônico da ordem de 10% presente na fonte é reduzido para valores abaixo de 1% na carga. Com relação ao desequilíbrio fundamental de seqüência negativa, os gráficos das figuras 4.67 e 4.69 indicam a existência de um percentual de 10% nas tensões da fonte, sendo reduzido para 0,50% na carga.

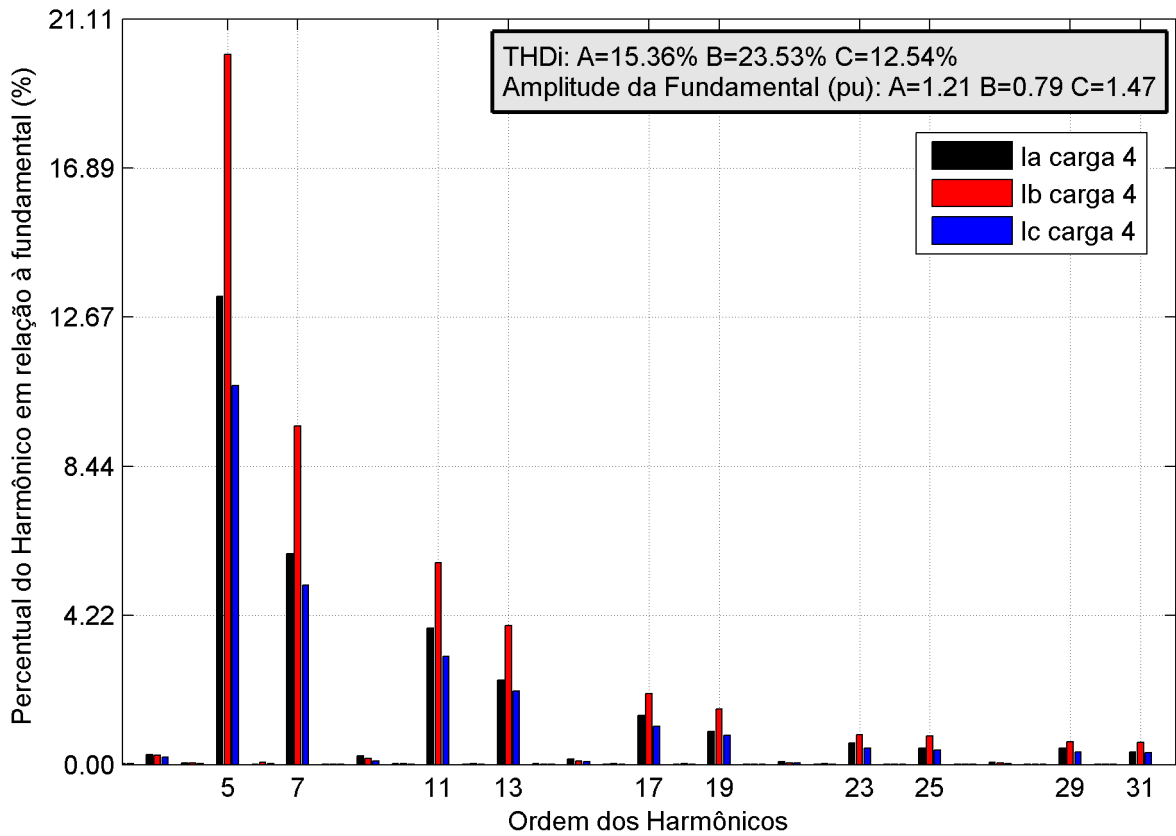


Figura 4.62: Espectro harmônico das correntes da carga em regime permanente na presença do distúrbio 4.

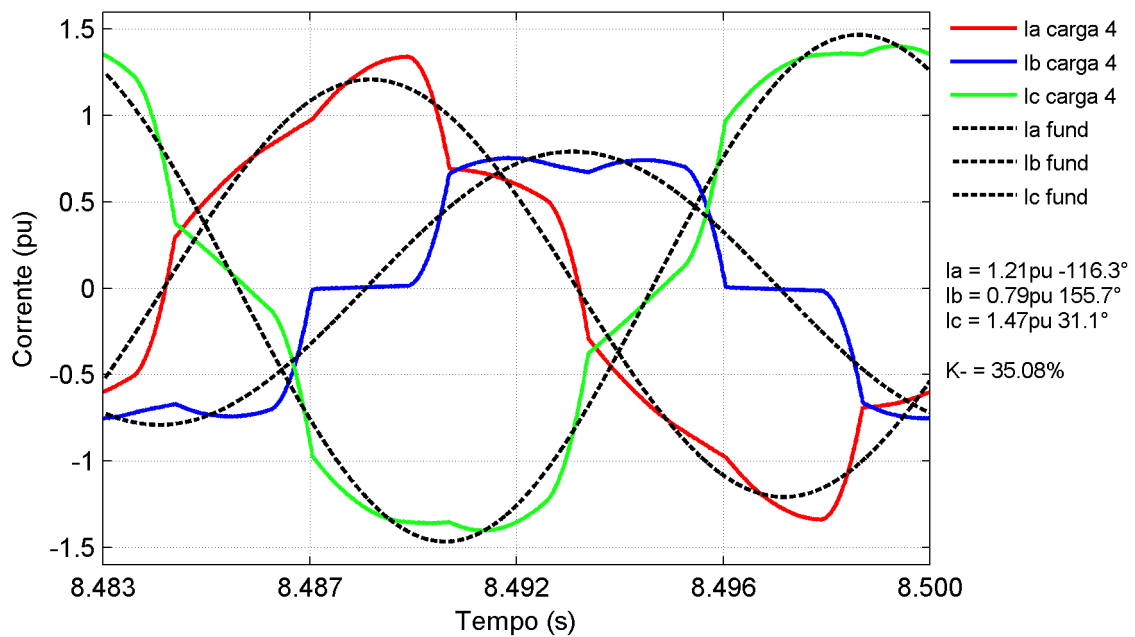


Figura 4.63: Componente fundamental das correntes da carga em regime permanente na presença do distúrbio 4.

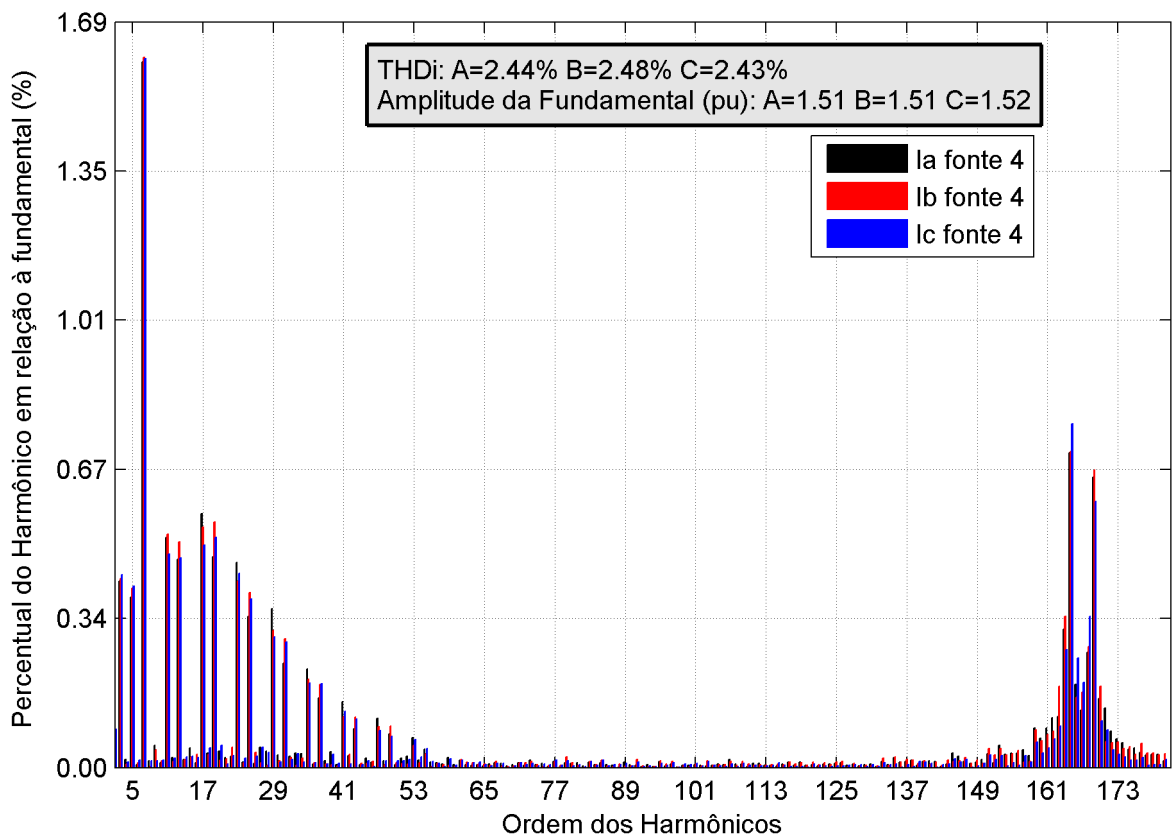


Figura 4.64: Espectro harmônico das correntes da fonte em regime permanente na presença do distúrbio 4.

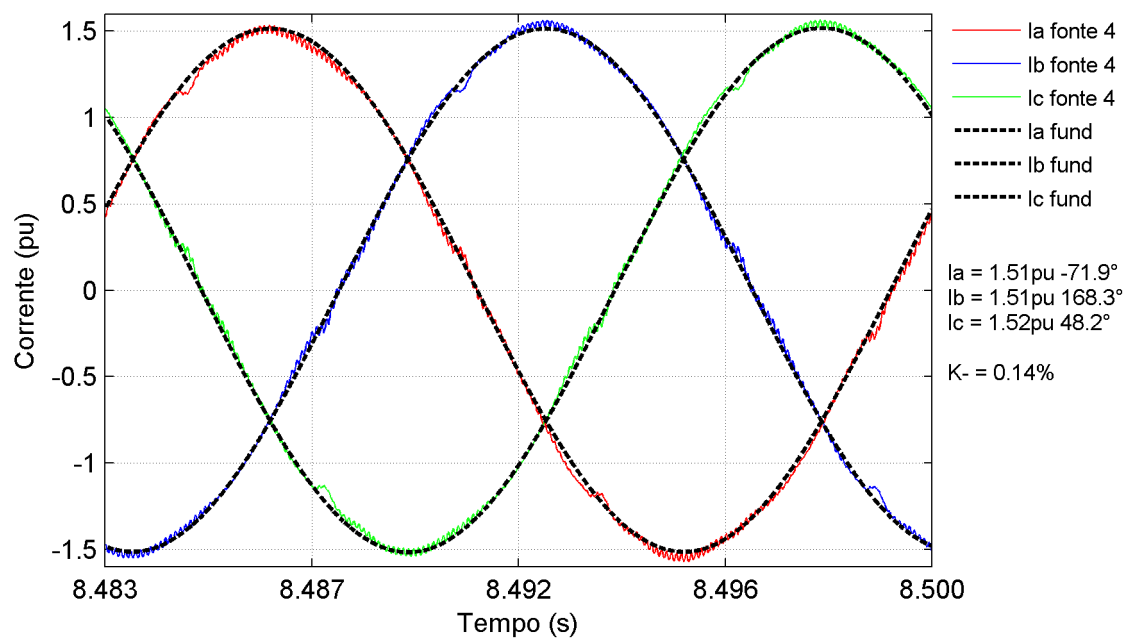


Figura 4.65: Componente fundamental das correntes da fonte em regime permanente na presença do distúrbio 4.

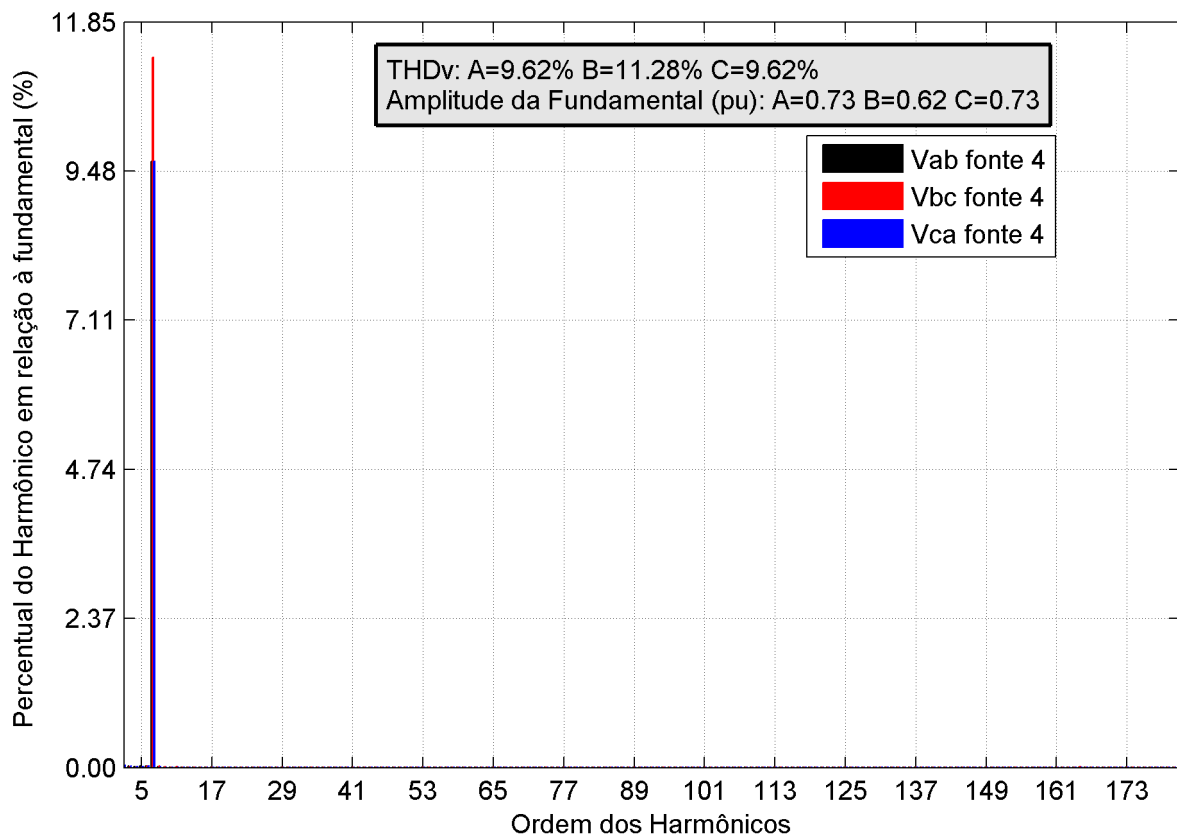


Figura 4.66: Espectro harmônico das tensões de linha da fonte em regime permanente na presença do distúrbio 4.

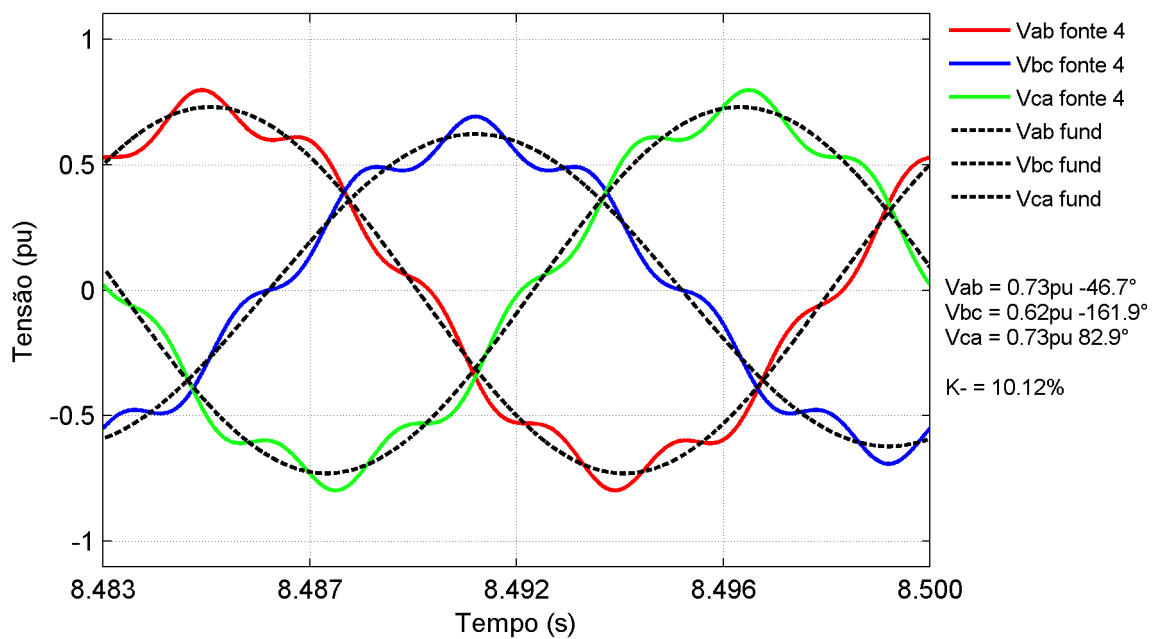


Figura 4.67: Componente fundamental das tensões de linha da fonte em regime permanente na presença do distúrbio 4.

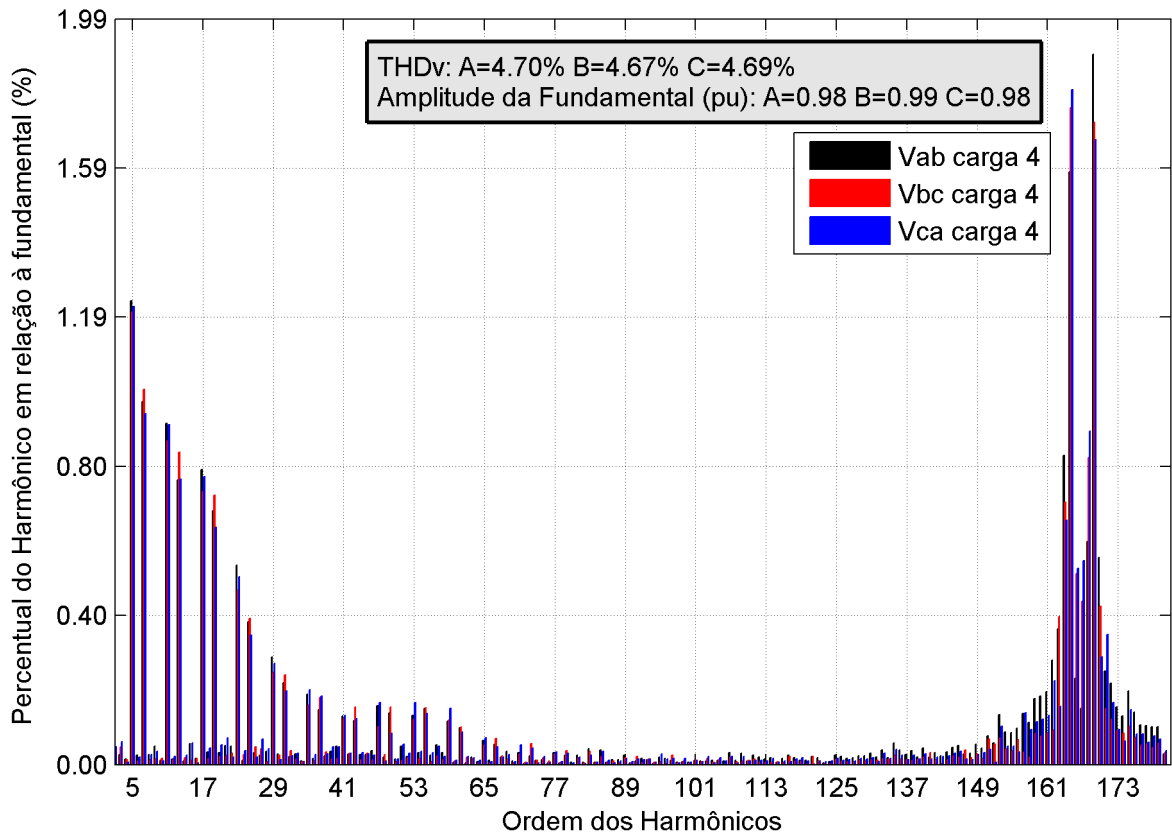


Figura 4.68: Espectro harmônico das tensões de linha da carga em regime permanente na presença do distúrbio 4.

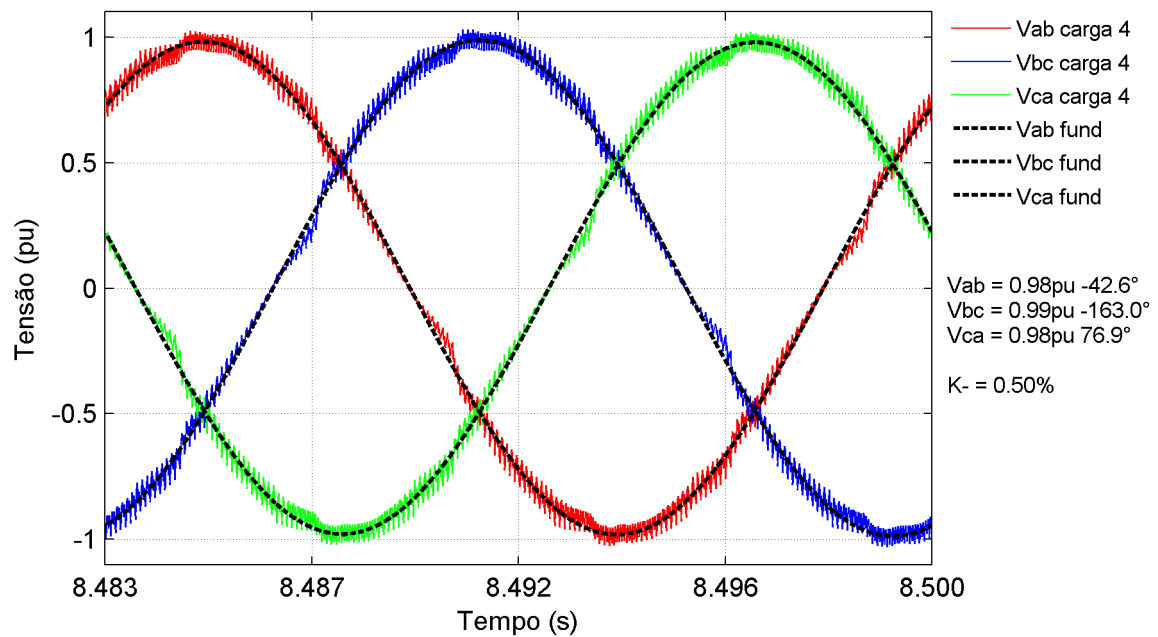


Figura 4.69: Componente fundamental das tensões de linha da carga em regime permanente na presença do distúrbio 4.

A Tabela 4.2 apresenta a caracterização do fator de potência de deslocamento (FPD), com base nas informações das amplitudes e ângulos fornecidas pelas Figuras 4.63, 4.65, 4.67 e 4.69. Os resultados demonstram a capacidade do UPQC-i em realizar a correção do fator de potência, mesmo sob a presença de problemas de QEE na fonte e na carga.

Tabela 4.2: Fator de Potência de Deslocamento para o caso real2

Fase	Fonte			Carga		
	$\phi_{V_1}(\circ)$	$\delta_{I_1}(\circ)$	FPD	$\phi_{V_1}(\circ)$	$\delta_{I_1}(\circ)$	FPD
A	-71,9	-71,9	1,000	-72,6	-116,3	0,72
B	162,7	168,3	0,995	167	155,7	0,98
C	53,4	48,2	0,996	46,9	31,1	0,96

Após a análise de todos os gráficos apresentados nesta simulação, denominada real2, conclui-se que o modelo real do UPQC-i isola os distúrbios presentes na fonte e na carga, de modo que as correntes distorcidas da carga não se propaguem para a fonte e nem as tensões com distúrbios da fonte afetem as cargas.

4.6 Sumário do Capítulo

Este capítulo apresentou uma breve descrição do programa de simulação PSCAD, utilizado para avaliar a modelagem proposta para o condicionador UPQC-i.

Atualmente, a tecnologia dos DSPs é a mais utilizada para o controle de inversores. Implementar uma lógica de controle, utilizando-se esta tecnologia, consiste em desenvolver um código de programação na linguagem do compilador fornecido pelo fabricante. Neste capítulo, foi apresentada a biblioteca PSCAD/DSPSIM desenvolvida, que permite o desenvolvimento deste código de programação no ambiente gráfico do PSCAD. Desta forma, o código utilizado no protótipo experimental será o mesmo implementado e testado no ambiente de simulação.

O modelo real do UPQC-i foi implementado no PSCAD utilizando-se a biblioteca PSCAD/DSPSIM e os resultados das simulações reafirmaram as propriedades do UPQC-i de realizar a compensação de distúrbios de qualidade da energia.

Capítulo 5

Protótipo do UPQC-i e Resultados Experimentais

Este capítulo apresenta o protótipo experimental construído para a validação da estratégia de controle desenvolvida com base na modelagem invertida do condicionador UPQC-i. Por fim os resultados experimentais são apresentados e discutidos.

5.1 Introdução

Podemos dividir a construção do protótipo entre os seus circuitos de potência e de controle. Este último é formado pelo controlador DSP e pelos circuitos de: medição, condicionamento, disparo e comando/sinalização. O diagrama de blocos da Figura 5.1 apresenta como estão interligadas cada uma dessas partes, que serão detalhadas nas próximas seções.

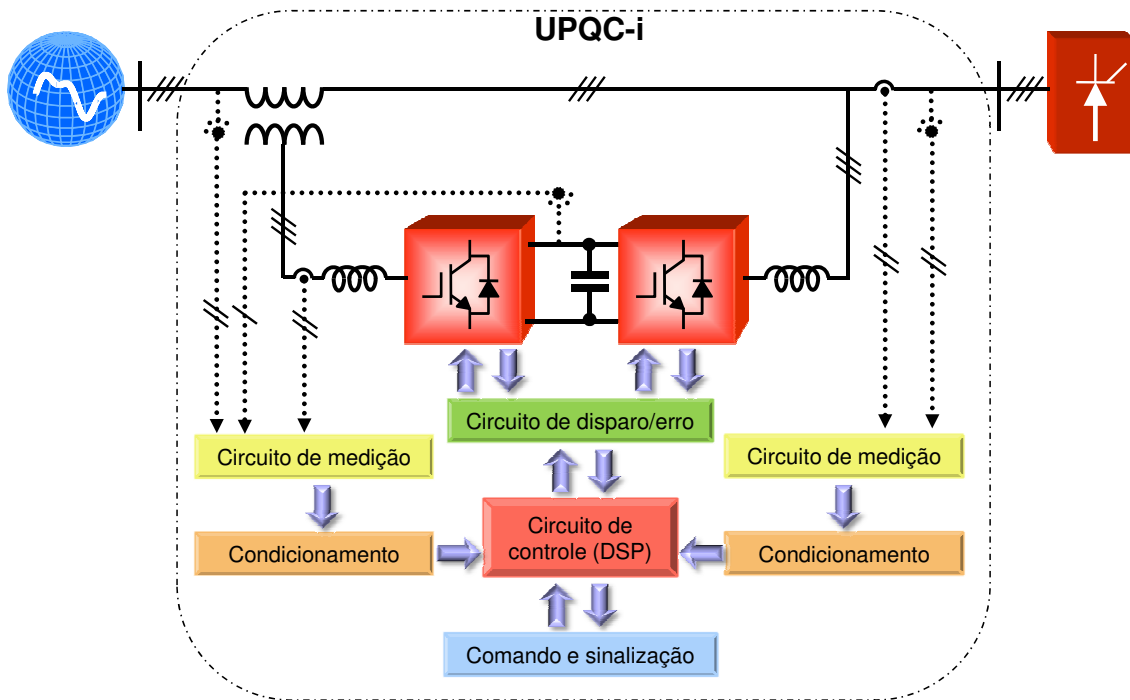


Figura 5.1: Diagrama de blocos do protótipo experimental

5.2 O circuito de potência

O diagrama unifilar do circuito de potência do UPQC-i é apresentado na Figura 5.2. Ele é dividido em duas partes: filtro ativo paralelo e série. Os filtros ativos são constituídos por dois inversores VSI na configuração *back-to-back*, interligados pelo elo de corrente contínua comum.

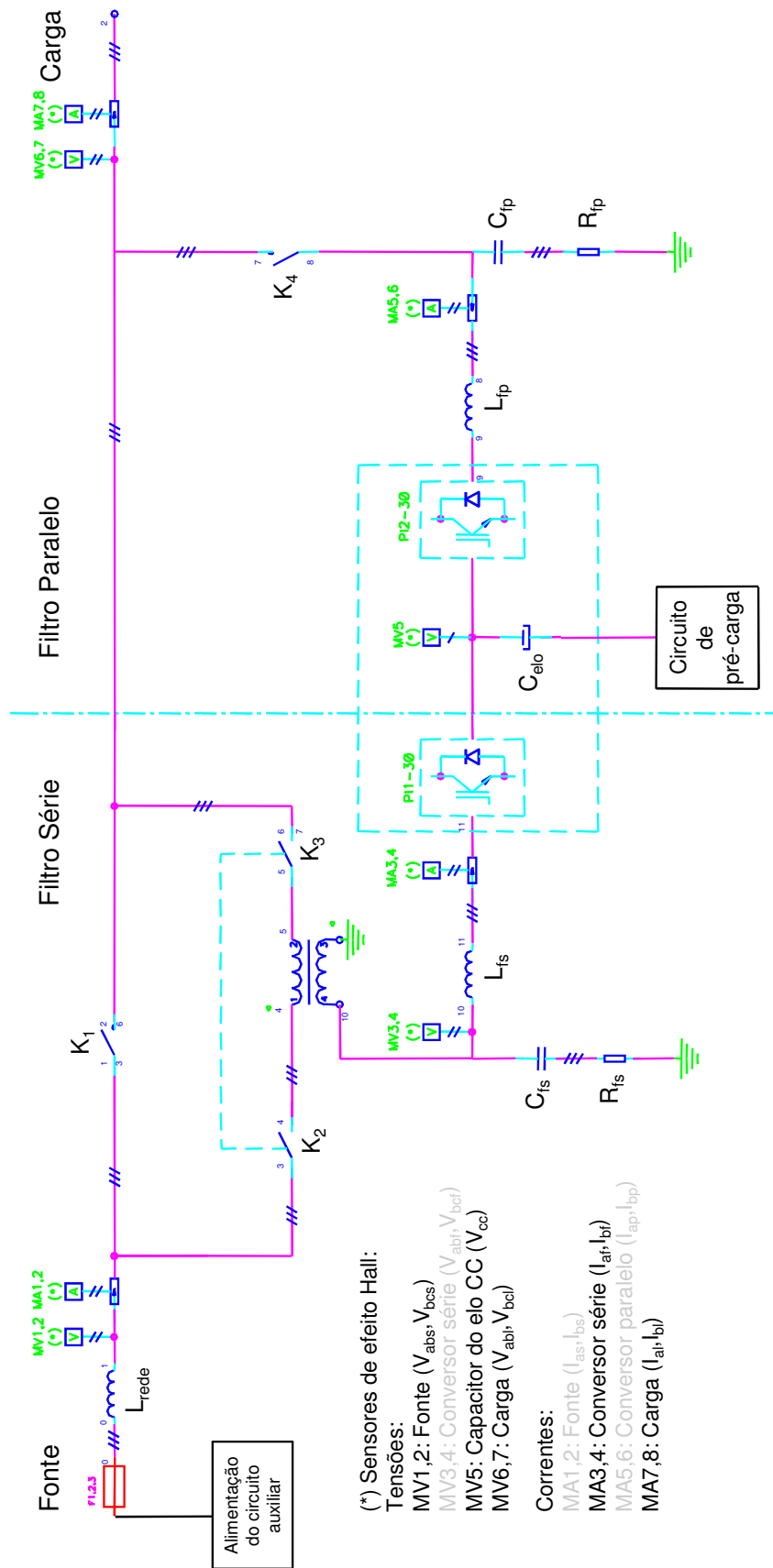


Figura 5.2: Diagrama unifilar do circuito de potência do protótipo

O filtro ativo série é conectado em série com a rede elétrica, entre a fonte e a carga, através do secundário de três transformadores monofásicos. O primário é conectado à saída trifásica do inversor VSI por meio dos indutores (L_{fs}), que juntamente com os capacitores (C_{fs}) e resistores (R_{fs}) constituem um filtro passivo de potência (ver Apêndice B.2) para a eliminação dos componentes harmônicos de tensão produzidos pelo chaveamento do inversor em alta frequência.

A saída do filtro ativo paralelo é conectada ao barramento da carga através do seu filtro passivo de potência (ver Apêndice B.2) formado pelos indutores (L_{fp}), pelos capacitores (C_{fp}) e pelos resistores (R_{fp}).

A seguinte configuração foi utilizada nos experimentos com o protótipo:

- Tensão de alimentação: trifásica em 220V;
- Inversores série e paralelo:
 - Módulo de seis pares de IGBTs (Anexo I) com elo CC em comum;
 - Capacidade de corrente dos IGBTs: 200A ;
 - Tensão coletor-emissor dos IGBTs: 1200V ;
 - Frequência de chaveamento dos IGBTs (F_s) = 9720Hz
 - Capacitor do elo CC (C_{elo}) = 9400 μ F
 - Tensão regulada no capacitor do elo CC = 450V
- Transformadores monofásicos série:
 - Tensão nominal: 127V;
 - Relação de transformação: 1 : 1;
 - Potência aparente: 5kVA
- Filtro passivo paralelo:
 - Indutores ($L_{fp}^{a,b,c}$) = 750 μ H;
 - Capacitores ($C_{fp}^{a,b,c}$) = 20 μ F;
 - Resistores ($R_{fp}^{a,b,c}$) = 3,9 Ω ;

- Filtro passivo série:
 - Indutores ($L_{fs}^{a,b,c} = 1000\mu H$;
 - Capacitors ($C_{fs}^{a,b,c} = 4\mu F$;
 - Resistores ($R_{fs}^{a,b,c} = 5\Omega$;
- Carga: Retificador trifásico de onda completa a diodo
 - Indutores de comutação do lado CA ($L_l^{a,b,c} = 500\mu H$;
 - Indutor do lado CC ($L_{cc} = 10mH$;
 - Resistor do lado CC ($R_{cc} = 20\Omega$;

A Figura 5.3 ilustra a vista frontal do armário de montagem do protótipo UPQC-i onde todos os componentes dos circuitos de potência e controle são montados.



Figura 5.3: Foto do protótipo - Vista frontal.

A Figura 5.4 apresenta uma fotografia que ilustra a disposição dos indutores e transformadores série no protótipo experimental do UPQC-i. A fotografia da Figura 5.5 mostra os inversores série e paralelo numa base de montagem compacta com seis pares de IGBTs e um mesmo elo CC, cujos capacitores não são visualizados pois estão atrás das chapas metálicas.

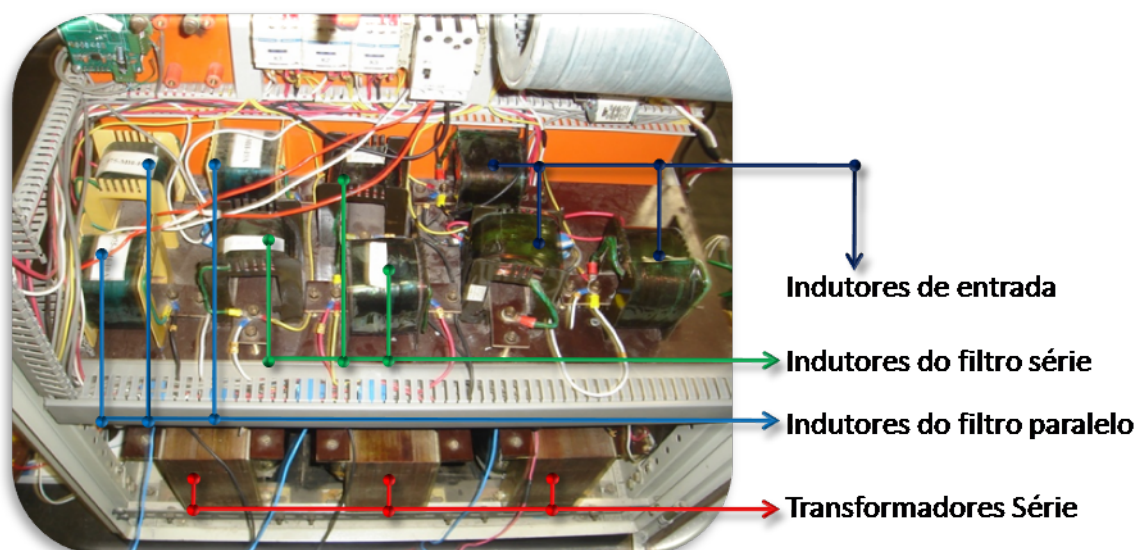


Figura 5.4: Foto do protótipo - indutores e transformadores.

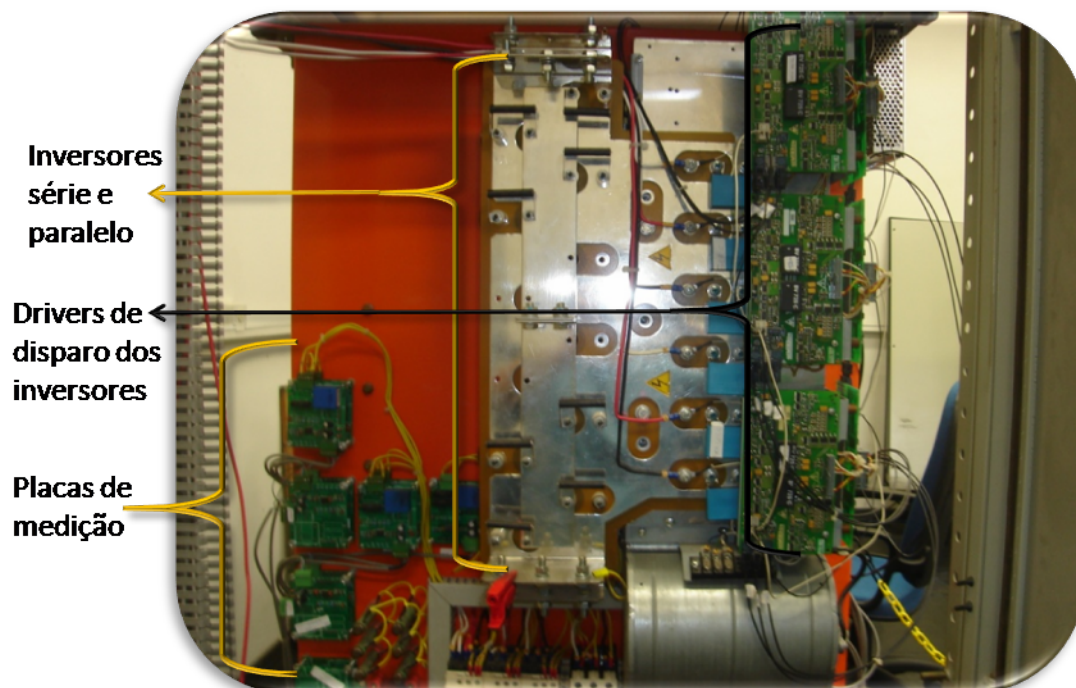


Figura 5.5: Foto do protótipo - Inversores e placas de medição.

5.3 O circuito de controle

Na Figura 5.6 estão identificados todos os componentes do circuito de controle. A placa mãe é responsável pela comunicação de sinais entre a placa do DSP e as placas: de condicionamento, entrada e saída digital e disparo ótico.

As medições das tensões e correntes são realizadas por placas individuais com sensores de efeito *Hall*, denominadas MV e MA, respectivamente, conforme o diagrama unifilar da Figura 5.2. Elas são responsáveis por converter as grandezas elétricas em sinais de tensão com variações entre $\pm 10V$. As placas de medição são colocadas fisicamente próximas dos pontos de medição e conduzem os sinais convertidos até a placa de condicionamento por meio de cabos do tipo par trançado com blindagem conectados à placa mãe. As seguintes grandezas são medidas:

- v_{abs} : Tensão de linha AB da fonte;
- v_{bcs} : Tensão de linha BC da fonte;
- v_{abl} : Tensão de linha AB da carga;
- v_{bcl} : Tensão de linha BC da carga;
- v_{cc} : Tensão do capacitor do elo CC;
- i_{al} : Corrente da fase A da fonte;
- i_{bl} : Corrente da fase B da fonte;
- i_{af} : Corrente da fase A do conversor série;
- i_{bf} : Corrente da fase B do conversor série.

O circuito de condicionamento é responsável por filtrar ruídos e converter os sinais para os níveis de tensão mínimo ($0V$) e máximo ($3V$) suportados pelo circuito de conversão analógica para digital (AD) do DSP.

O núcleo do sistema de controle do protótipo está baseado no DSP do kit de desenvolvimento eZdsp TMS320F2812 da Texas Instruments, que foi configurado para operar com um relógio de interrupção que executa a rotina de interrupção

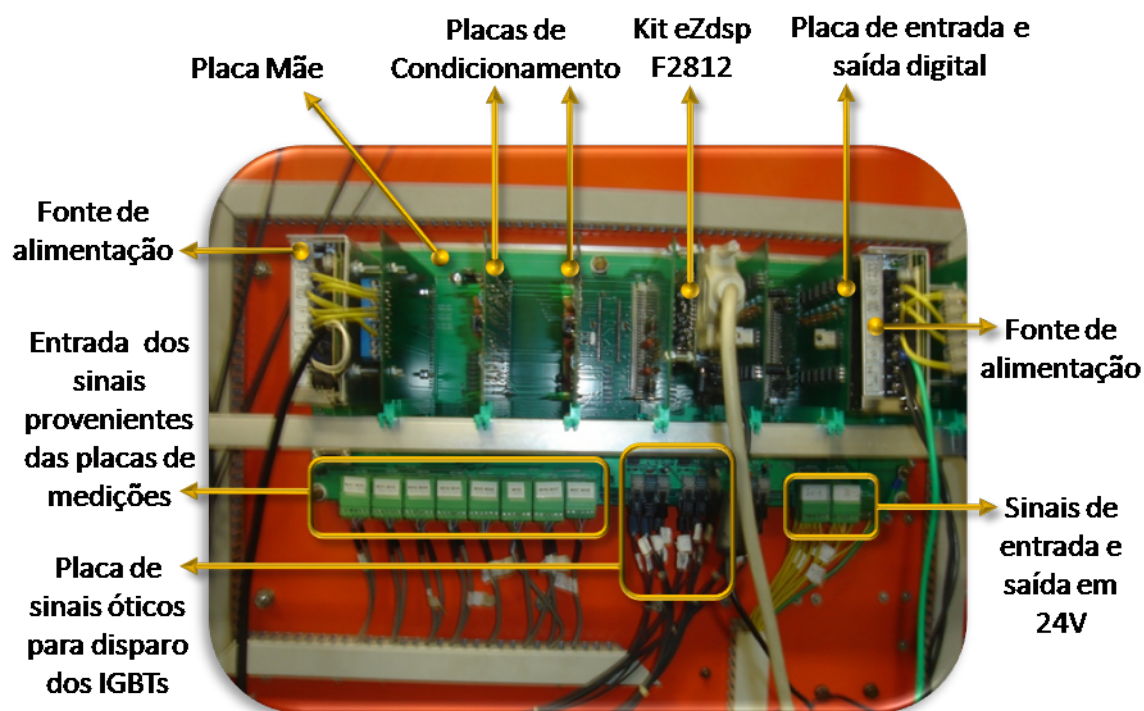


Figura 5.6: Foto do protótipo - Circuito de controle.

numa frequência de 19.440Hz . O relógio consiste num contador configurado para operar no modo progressivo e regressivo alternadamente. Este mesmo contador é utilizado para o comparador do circuito triangular PWM do DSP, de tal forma que a frequência da portadora triangular é de 9.720Hz , que é a metade da frequência da rotina de interrupção.

Um fato muito importante a ser ressaltado neste momento é que a rotina de interrupção embarcada no DSP consiste exatamente no mesmo código de programação escrito em linguagem C da rotina de interrupção desenvolvida no ambiente PSCAD/DSPSIM, conforme apresentado no Capítulo 4.

A conversão AD é realizada no início da rotina de interrupção e em seguida os sinais são transformados para as coordenadas $\alpha\beta$. O próximo passo consiste na rotina de verificação de erros, proteção, sinalização e comando.

A interface homem-máquina do protótipo (Figura 5.3) é realizada por um sinótico de lâmpadas que sinaliza a operação do equipamento e a presença ou não de erros; e por um conjunto de botoeiras que comandam ações dentro do código de controle. Esta comunicação é realizada por meio das entradas e saídas digitais do DSP e são

eletricamente isoladas por meio de acopladores óticos.

Ao comando do operador, e não existindo nenhuma condição de erro, o algoritmo de controle passa a ser executado de forma a gerar os sinais de disparo que controlam os IGBTs dos inversores. Os sinais elétricos gerados pelas saídas PWM do DSP entram na placa de disparo que os converte para sinais óticos que são conduzidos até os *drivers* de disparo dos IGBTs. Além disso, estes drivers sinalizam para o DSP a eventual existência de erros que impeçam o chaveamento.

A seguir serão apresentados os resultados experimentais do UPQC-i.

5.4 Resultados Experimentais

Os resultados experimentais foram obtidos para uma operação do UPQC-i alimentando o retificador trifásico discriminado na seção 5.2. Serão analisadas duas condições de operação do UPQC-i: com desbalanço de tensão na fonte e com afundamento de tensão na fonte.

Os valores de tensão e corrente que serão apresentados nos gráficos estão em pu nas bases $V_{Base} = 127\sqrt{2}V$ e $I_{Base} = 15A$. Eles foram adquiridos com um osciloscópio digital de 4 canais.

A Figura 5.7 apresenta o comportamento do UPQC-i durante o transitório de partida da carga sem a presença de distúrbios na tensão da fonte. São apresentadas a tensão de linha AB da carga e as correntes da fase B da carga, fonte e do filtro ativo paralelo.

Verifica-se que desde o instante inicial ($t = 0$) de entrada da carga, o filtro série impõe à fonte uma corrente com um formato próximo a uma senóide. Como o filtro paralelo, mantém uma tensão aproximadamente senoidal no barramento da carga, os componentes indesejáveis da corrente da carga só possuem um único caminho natural que é em direção ao filtro paralelo.

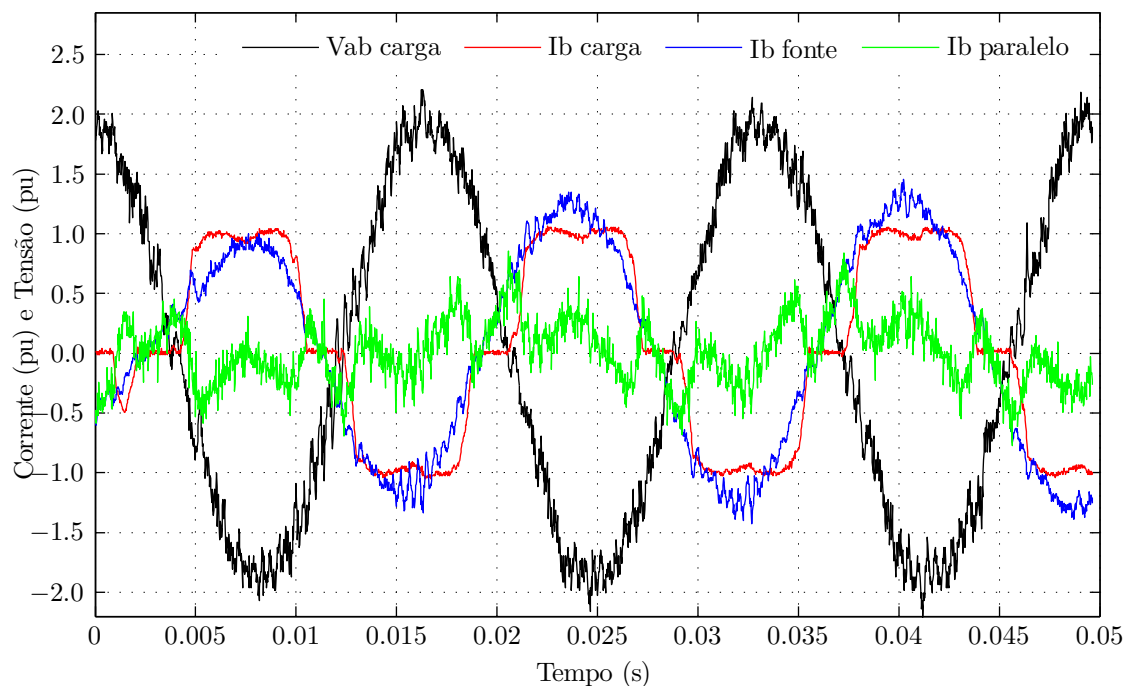


Figura 5.7: Tensão de linha AB da fonte e correntes da fase B da fonte, carga e filtro paralelo, durante o instante de entrada da carga.

5.4.1 Operação com tensão da fonte com desbalanço

A Figura 5.8 apresenta as tensões das fases A, B e C da fonte e seus respectivos componentes fundamentais. Verifica-se que existe um desbalanço de seqüência negativa (K_-) de 16,5%. A Figura 5.9 apresenta o espectro harmônico destas tensões. Existem componentes harmônicos entre o 29^o e o 41^o harmônico que é devido a uma ressonância produzida pela operação do protótipo. Existe um componente de quinto harmônico da ordem de 2% oriundo do próprio sistema elétrico, provavelmente devido ao efeito das inúmeras cargas com fontes chaveadas existentes na rede elétrica ao qual o protótipo encontra-se ligado.

A operação do UPQC-i eleva um pouco o percentual de distorção total harmônica (THD) das tensões da rede. Entretanto, os valores encontram-se em níveis aceitáveis.

Estes mesmos gráficos são mostrados nas Figuras 5.10 e 5.11 para as tensões da carga. O desbalanço destas tensões encontra-se abaixo de 3%, demonstrando a capacidade de compensação do UPQC-i frente aos desbalanços de tensão na fonte

Os níveis de THD destas tensões também são aceitáveis. O componente de

quinto harmônico presente nas tensões da carga foi atenuado em aproximadamente 50% em relação ao da fonte, passando de valores próximos a 2% para 1%. Este fato demonstra também a capacidade do controle do UPQC-i em compensar harmônicos de tensão.

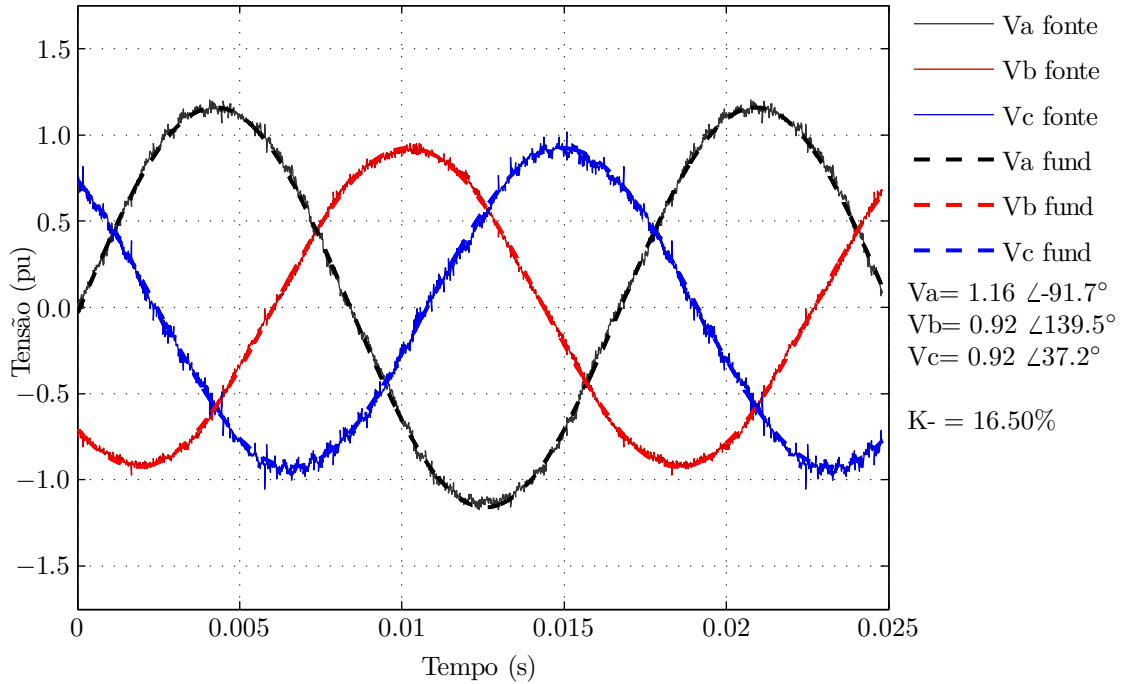


Figura 5.8: Tensões trifásicas da fonte e seus componentes fundamentais.

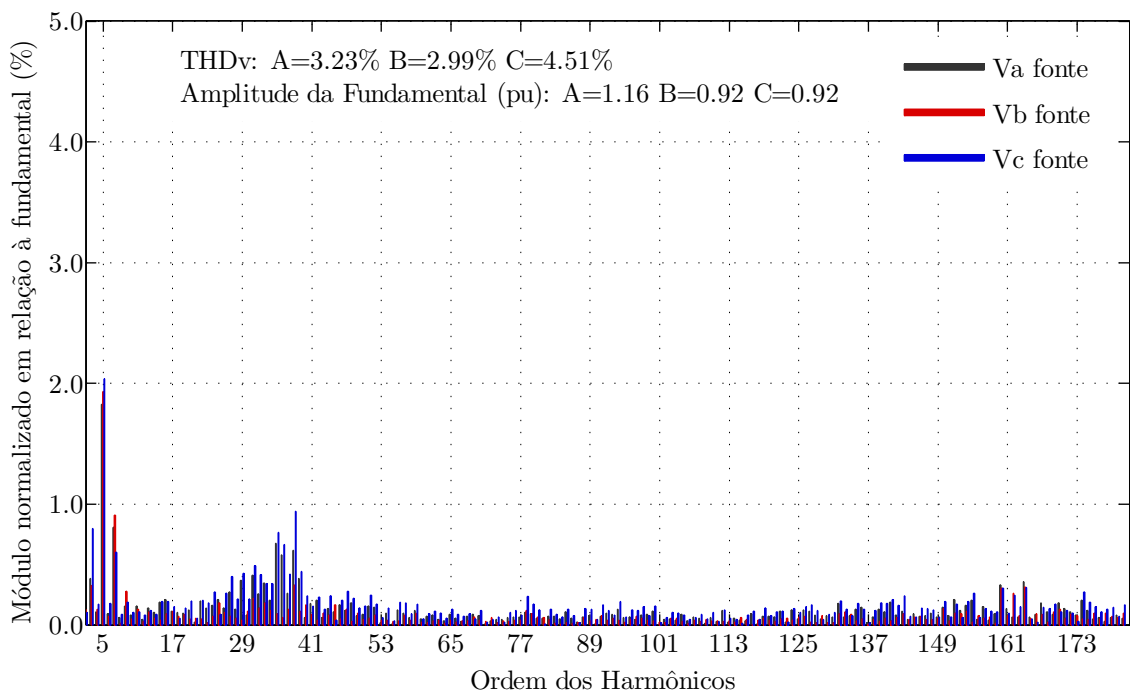


Figura 5.9: Espectros harmônicos das tensões das fases A, B e C da fonte.

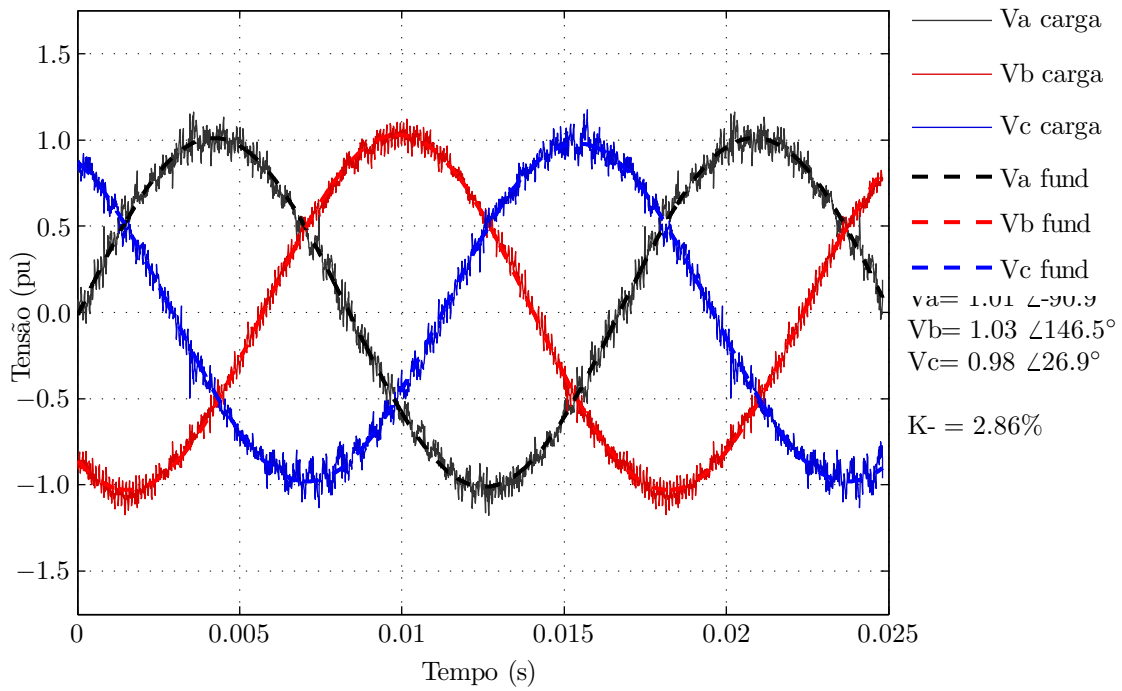


Figura 5.10: Tensões trifásicas da carga e seus componentes fundamentais.

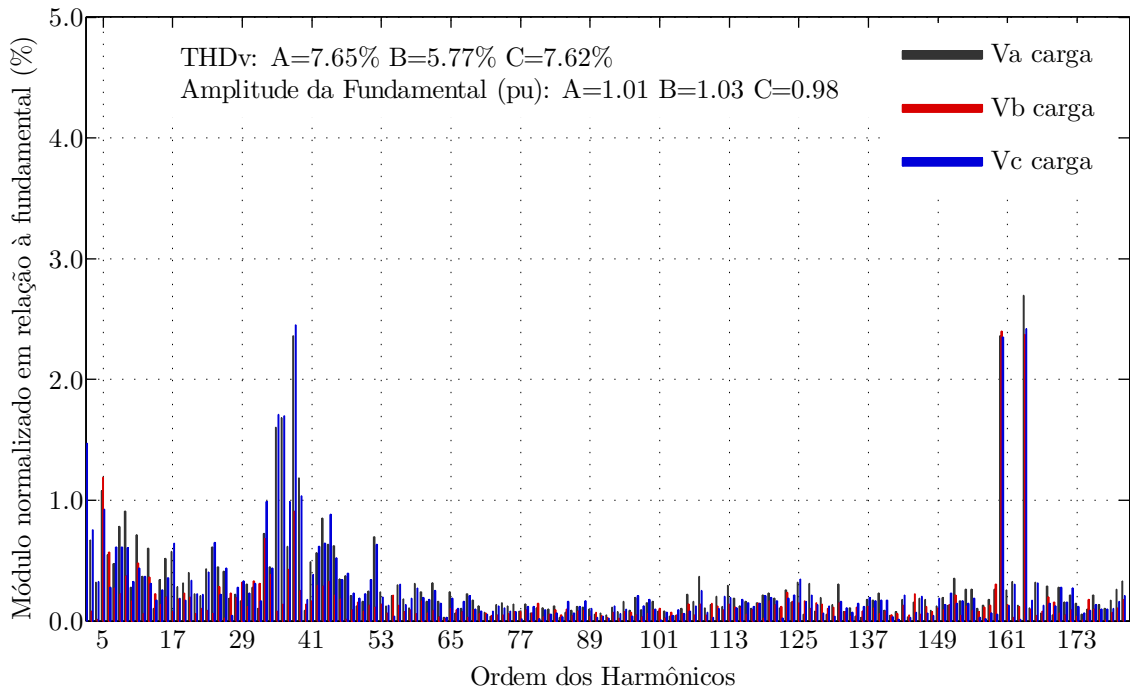


Figura 5.11: Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da carga.

As Figuras 5.12 e 5.13 apresentam os mesmos gráficos para as tensões nos transformadores série. Como o filtro ativo série é uma fonte de corrente controlada, estas são as tensões que aparecem nos terminais dos transformadores pela diferença entre a tensão imposta pelo UPQC-i no barramento da carga e a tensão da fonte.

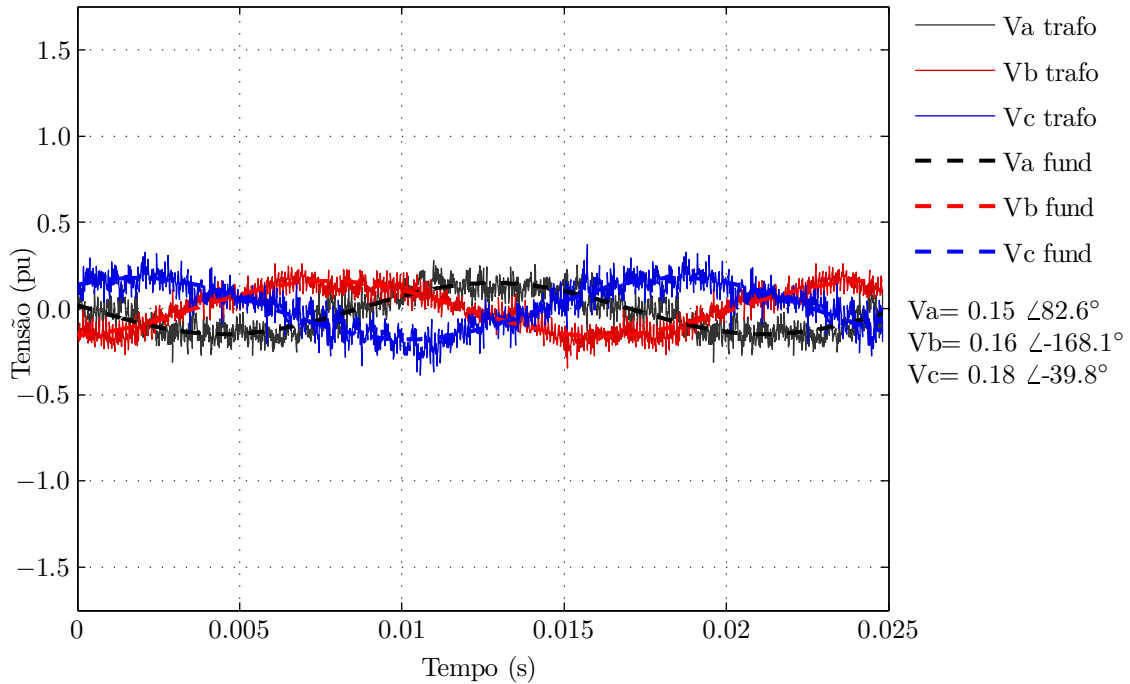


Figura 5.12: Tensões dos trafos série e seus componentes fundamentais.

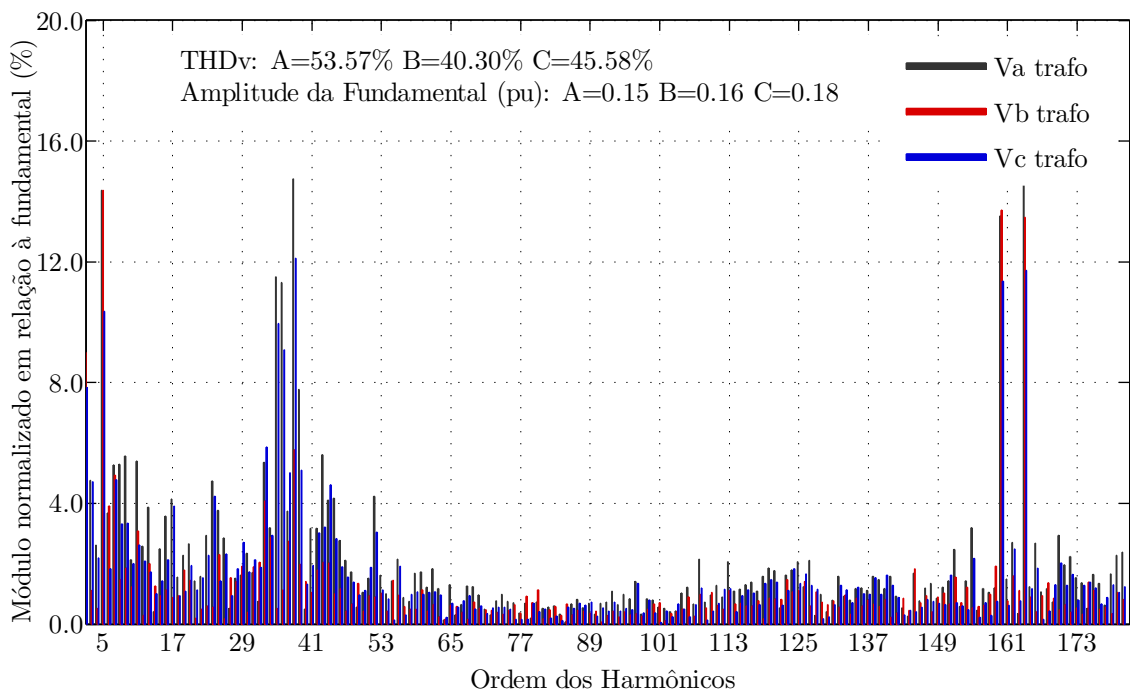


Figura 5.13: Espectros harmônicos das tensões dos trafos série.

As correntes das fases A, B e C da carga são apresentadas na Figura 5.14 juntamente com seus respectivos componentes fundamentais. O desbalanço de corrente (K_-) encontra-se abaixo de 3%. Conforme observa-se na Figura 5.15, os componentes harmônicos destas correntes produzem THDs da ordem de 23%.

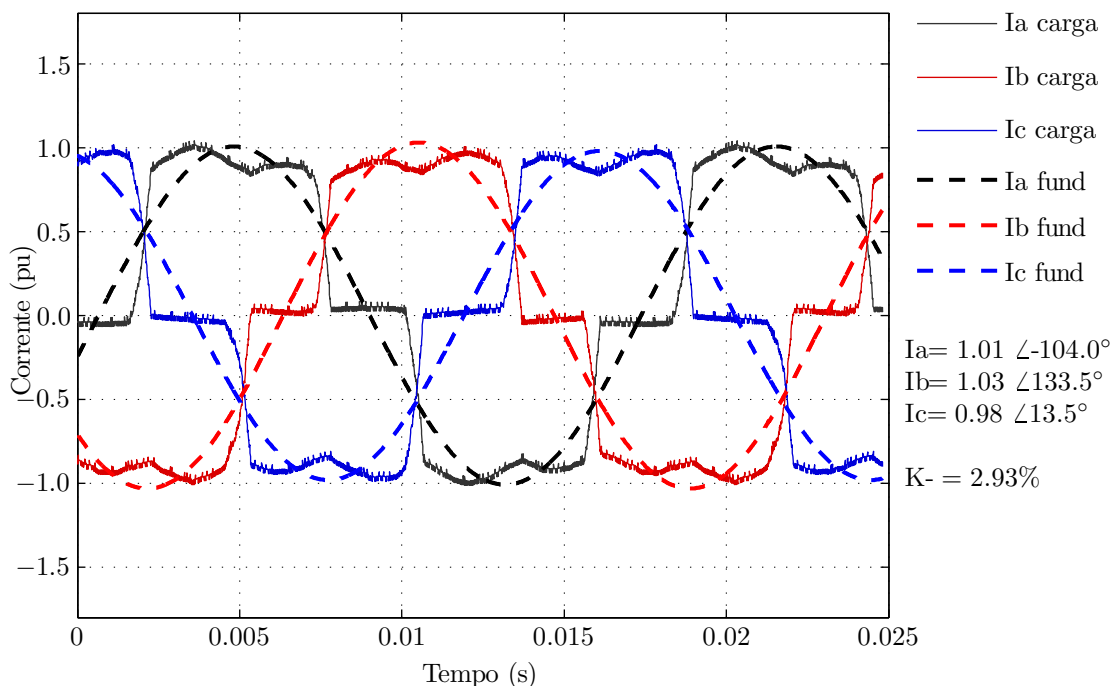


Figura 5.14: Correntes trifásicas da carga e seus componentes fundamentais.

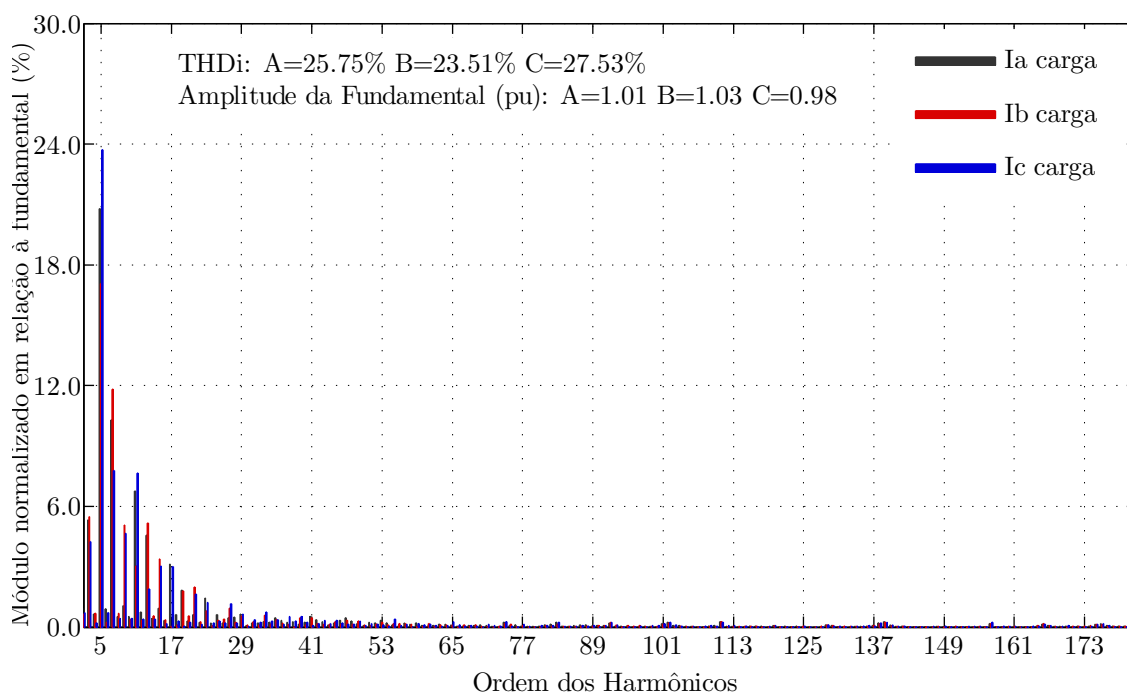


Figura 5.15: Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da carga.

As correntes das fases A, B e C da fonte são apresentadas na Figura 5.16 juntamente com seus respectivos componentes fundamentais. O desbalanço de corrente (K_-) encontra-se abaixo de 3%. Os níveis harmônicos destas correntes são verificados na Figura 5.17.

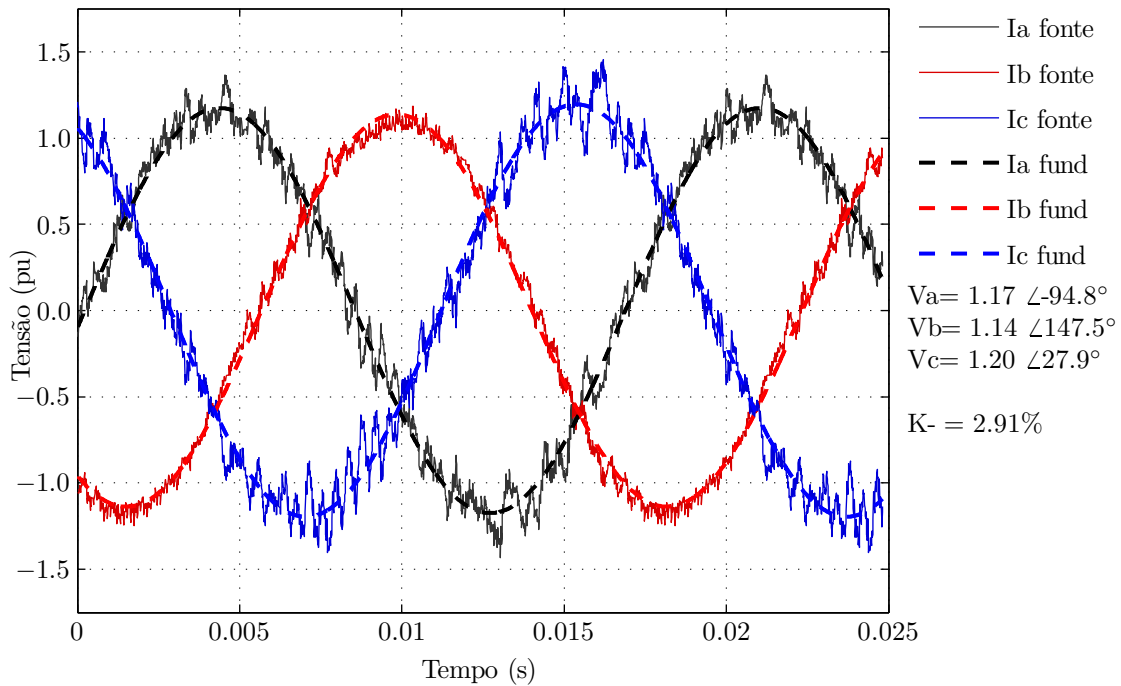


Figura 5.16: Correntes trifásicas da fonte e seus componentes fundamentais.

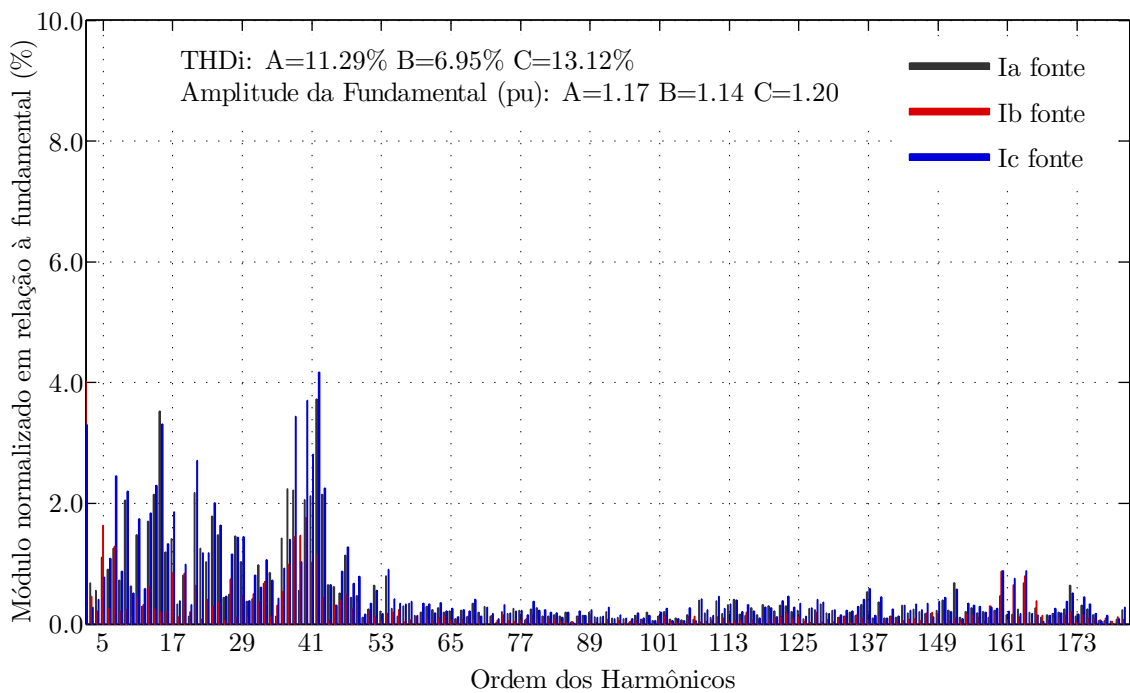


Figura 5.17: Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da fonte.

5.4.2 Operação com tensão da fonte com afundamento

O gráfico das correntes da fase B da carga, fonte e do filtro ativo paralelo juntamente com a tensão na fase B da fonte é apresentado na Figura 5.18. Verifica-se que a tensão da Fase B sofre um afundamento de tensão para 80%. O mesmo ocorre para as fases A e C, conforme será mostrado nos gráficos seguintes.

Analisando-se as correntes da Figura 5.18, verifica-se que o filtro ativo série do UPQC-i impõe uma corrente ($I_{b \text{ carga}}$) com um formato próximo a uma senóide que contém apenas a parcela ativa dos componentes de seqüência positiva das correntes da carga, fazendo com que o único caminho para os componentes indesejáveis de corrente seja através do filtro ativo paralelo ($I_{b \text{ paralelo}}$).

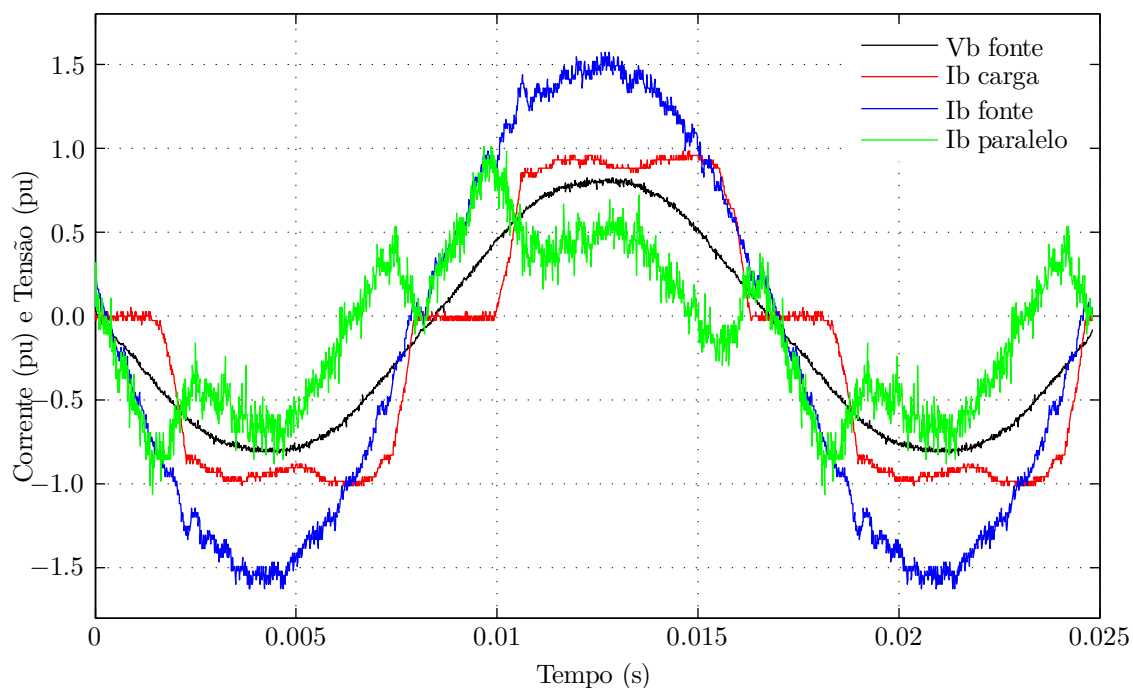


Figura 5.18: Tensão da fase B da fonte e correntes da fase B da fonte, carga e filtro paralelo.

A Figura 5.19 apresenta as tensões das fases A, B e C da fonte e seus respectivos componentes fundamentais. Verifica-se a presença de um afundamento trifásico para 80%. Assim como na operação sob desbalanço de tensão existe a presença de um componente de quinto harmônico ($\simeq 1,5\%$), oriundo da própria rede elétrica, conforme observa-se na Figura 5.20.

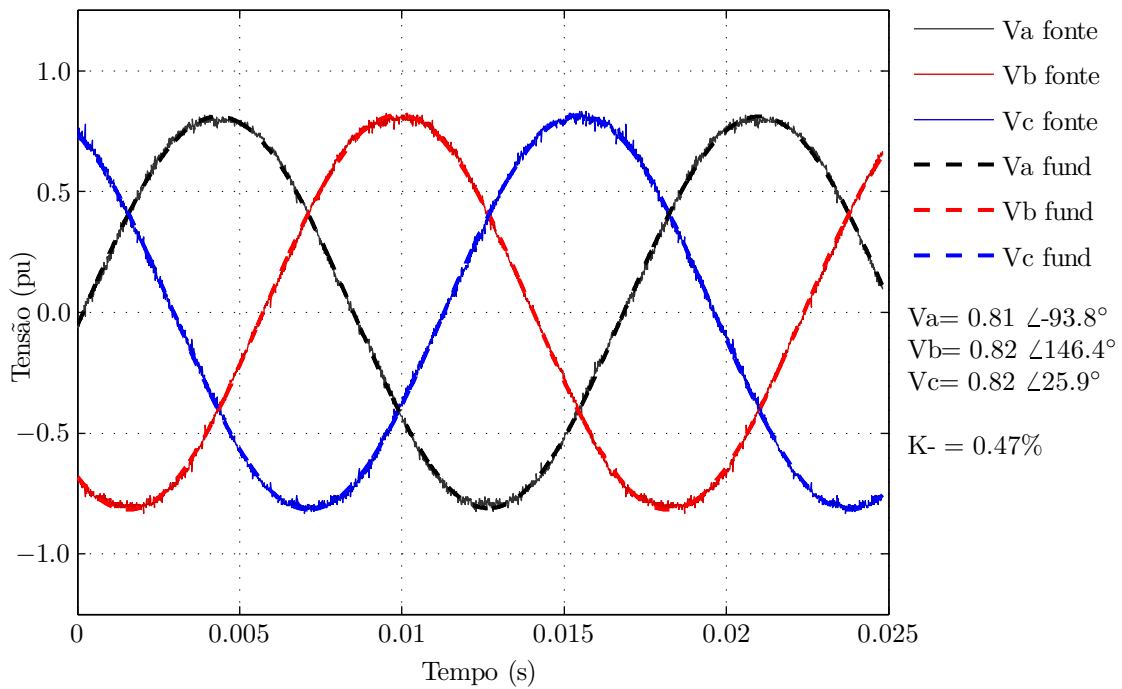


Figura 5.19: Tensões trifásicas da fonte e seus componentes fundamentais.

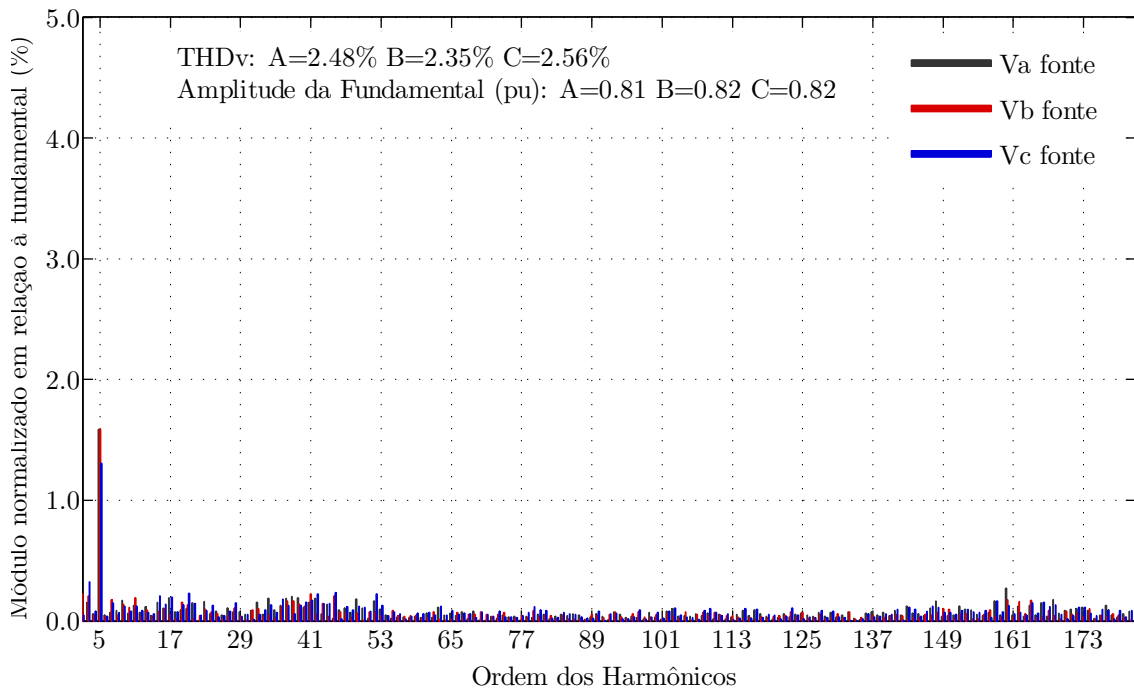


Figura 5.20: Espectros harmônicos das tensões das fases A, B e C da fonte.

A capacidade de compensação de afundamento de tensão é verificada observando-se que no gráfico da Figura 5.21 as tensões da carga são mantidas nos valores nominais do barramento durante a ocorrência do afundamento nas tensões da fonte.

No gráfico da Figura 5.22 verifica-se que o componente de quinto harmônico

existente nas tensões da fonte é compensado para valores abaixo de 1%. Existem ainda outros componentes harmônicos em torno do 41º harmônico, oriundos da operação do UPQC-i, e de ordem mais elevada em torno do 161º harmônico devido ao chaveamento do inversor.

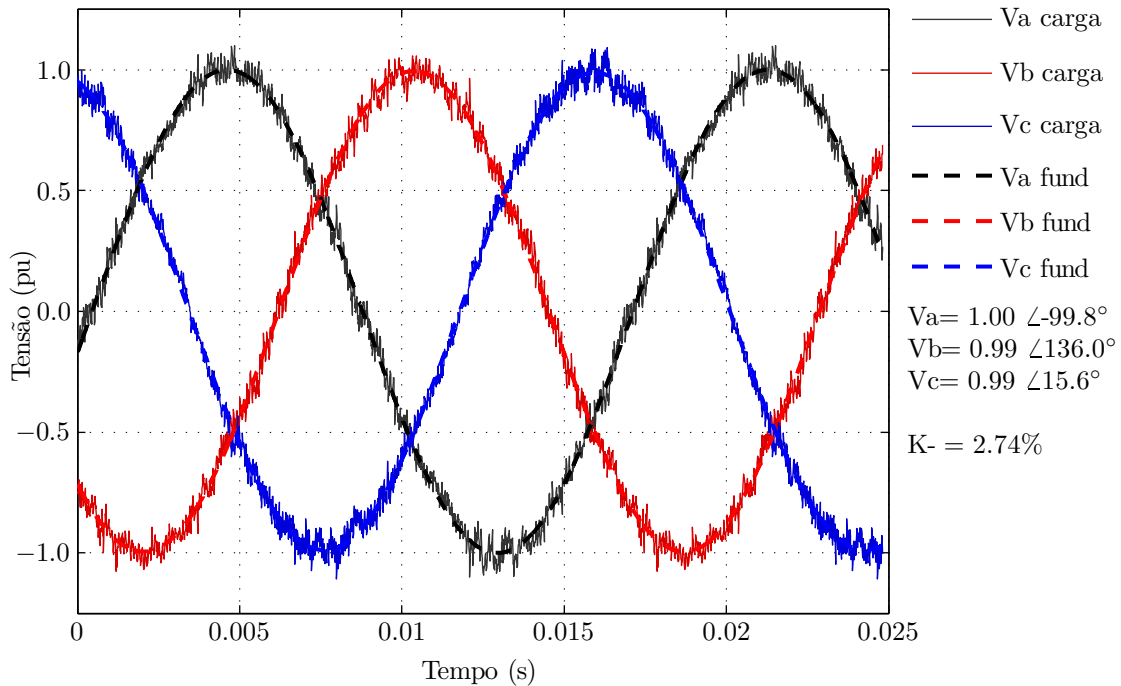


Figura 5.21: Tensões trifásicas da carga e seus componentes fundamentais.

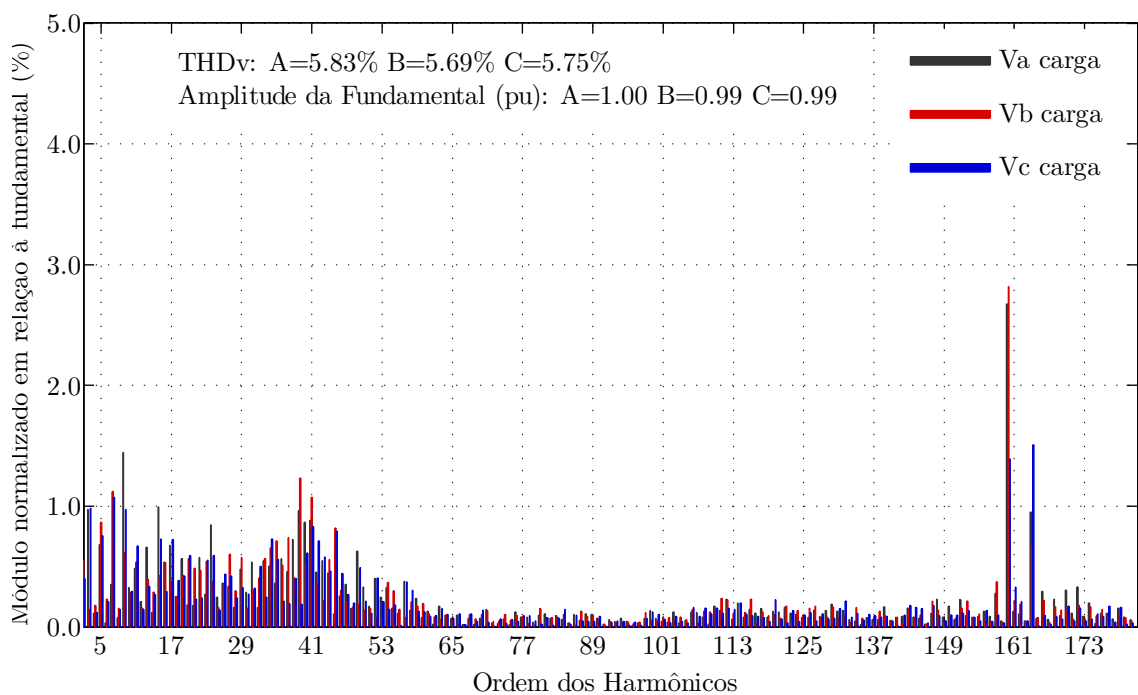


Figura 5.22: Espectros harmônicos das tensões das fases A, B e C da carga.

A Figura 5.23 apresenta o gráfico das correntes da carga e seus respectivas componentes fundamentais durante a compensação do afundamento de tensão. O desbalanço de corrente (K_-) é 2,51%. As correntes da carga possuem THDs próximos a 25%, de acordo com o espectro harmônico da Figura 5.24.

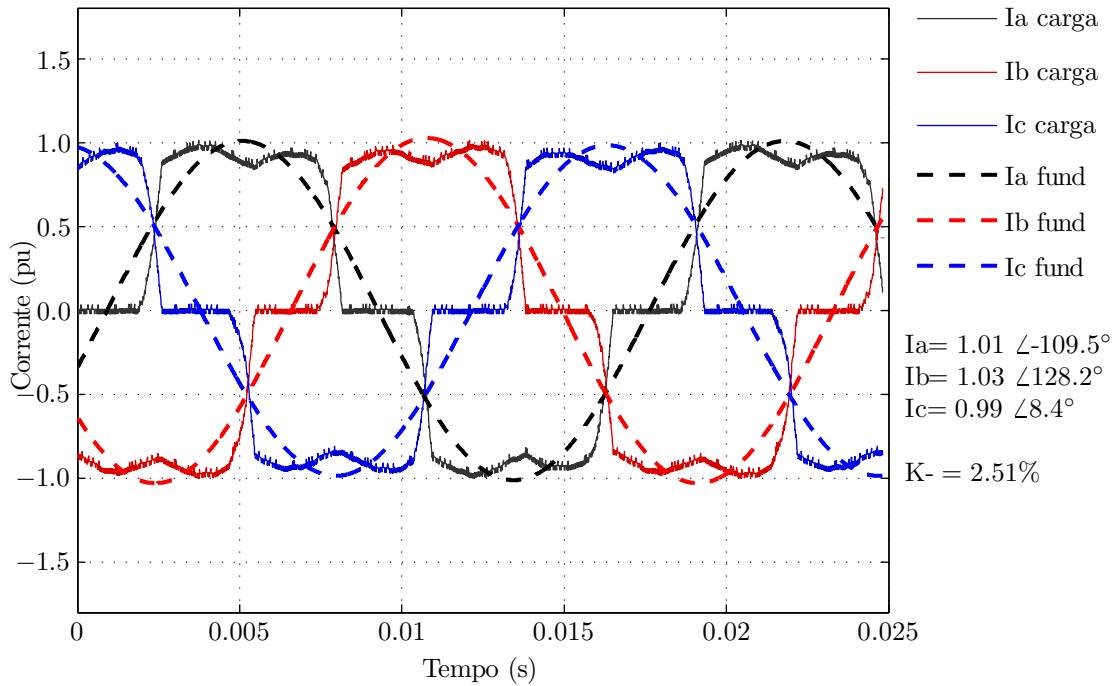


Figura 5.23: Correntes trifásicas da carga e seus componentes fundamentais.

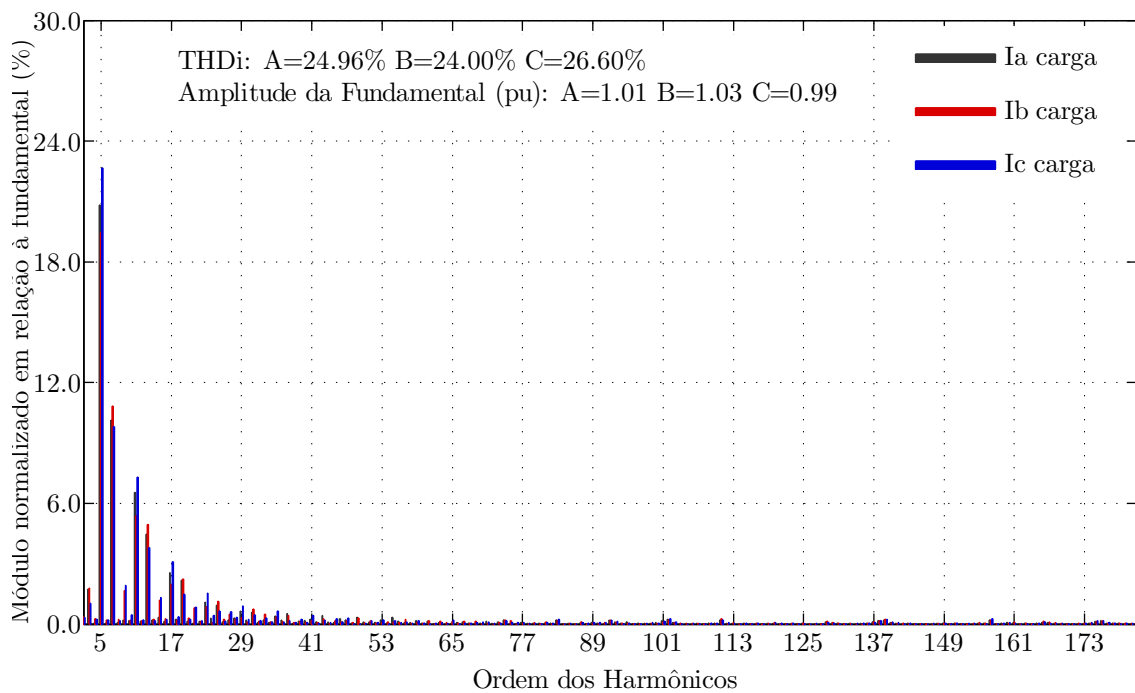


Figura 5.24: Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da carga.

A Figura 5.25 apresenta as correntes das fases A, B e C da fonte e seus respectivos componentes fundamentais. O desbalanço de corrente encontra-se abaixo de 4%. Para se manter a tensão na carga no seu valor nominal é necessário manter a mesma potência consumida da fonte antes e durante a ocorrência do afundamento. Como a tensão da fonte diminui por causa do afundamento, para manter o consumo de energia o filtro ativo série impõe uma corrente com maior amplitude. Este efeito pode ser observado comparando-se este gráfico com o da Figura 5.16 (operação sem afundamento).

O espectro harmônico das correntes da fonte é apresentado na Figura 5.26. Comparado com as correntes da carga, os valores de THD da corrente da fonte são reduzidos para valores aceitáveis.

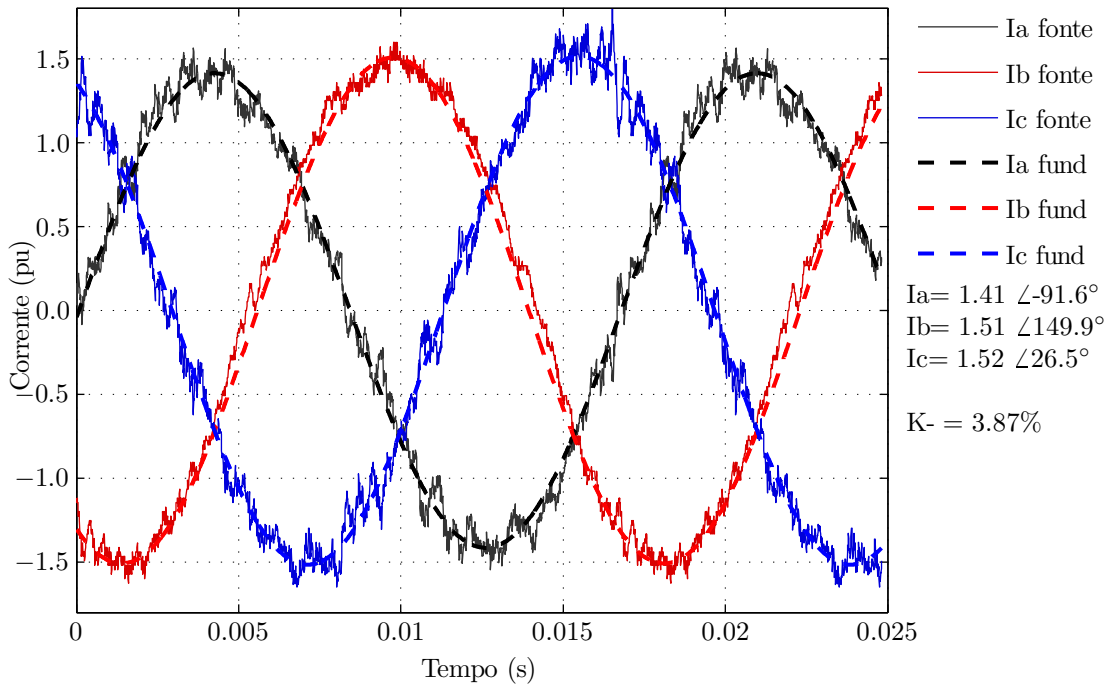


Figura 5.25: Correntes trifásicas da fonte e seus componentes fundamentais.

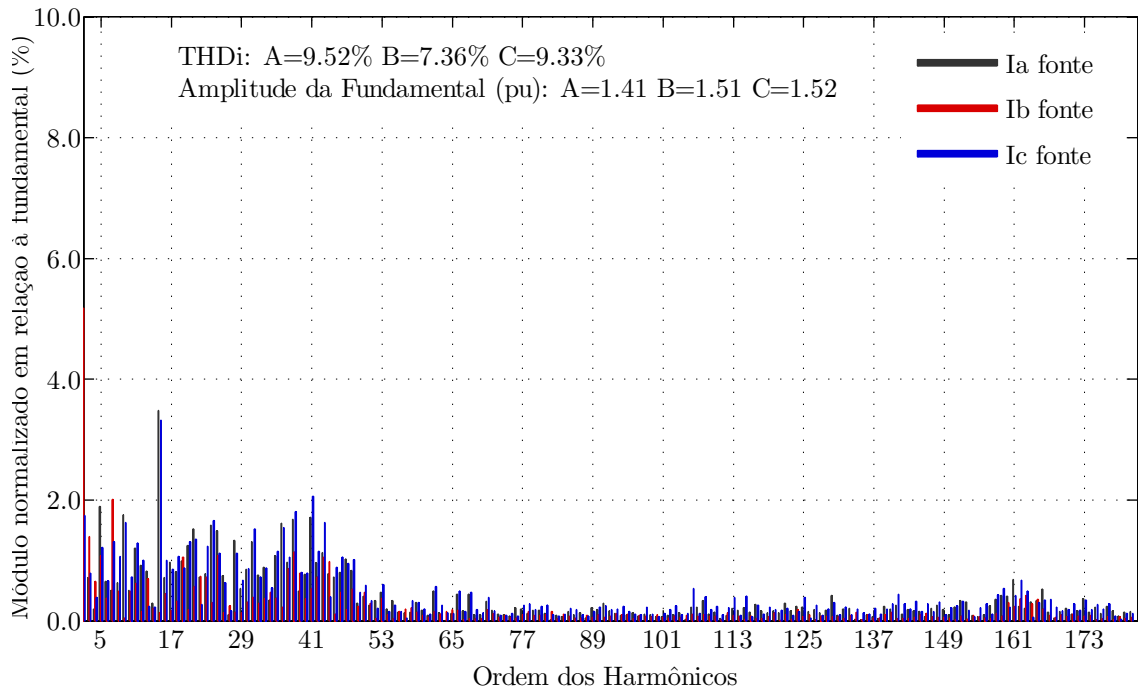


Figura 5.26: Espectros harmônicos das correntes das fases A, B e C da fonte.

5.5 Sumário do Capítulo

Os circuitos de potência e controle do protótipo experimental do UPQC-i foram apresentados neste capítulo.

O circuito de potência é composto por dois inversores trifásicos VSI conectados numa configuração *back-to-back* e por filtros passivos de potência.

A estratégia de controle embarcada no DSP consiste em uma rotina de interrupção que possui o mesmo código de programação escrito em linguagem C que foi implementado no ambiente PSCAD/DSPSIM dentro do simulador PSCAD, apresentado no Capítulo 4.

Os resultados experimentais comprovam o correto funcionamento da estratégia de controle desenvolvida para a modelagem invertida do condicionador UPQC e validam os resultados das simulações computacionais.

Capítulo 6

Conclusão

Esta tese apresentou a atual relevância e importância da qualidade da energia fornecida pelos sistemas elétricos, principalmente com relação aos aspectos econômicos envolvidos. Embora diversos trabalhos já tenham sido apresentados ao longo das últimas décadas, pôde-se observar que este é um assunto ainda em desenvolvimento.

No Brasil, a preocupação com a regulamentação dos problemas relacionados com a qualidade da energia elétrica é recente, no entanto, vem ganhando visibilidade no contexto nacional através de uma série de documentos regulatórios, denominados procedimentos de distribuição, elaborados pela agência reguladora ANEEL.

Uma das formas de se minimizar ou eliminar estes problemas, já existentes, é através da utilização de equipamentos condicionadores de energia. Entre estes equipamentos, destacam-se os condicionadores universais de energia, que visam eliminar, de forma única e simultânea, a maioria dos principais distúrbios, atualmente presentes nos sistemas elétricos de potência.

O condicionador UPQC-i, apresentado neste trabalho, se enquadra nesta linha de condicionadores universais. O modelo ideal e a estratégia de controle propostas para este equipamento, visam gozar dos benefícios obtidos com uma abordagem mais simples para a operação em conjunto dos seus filtros ativos série e paralelo, que foram modelados como duas fontes senoidais ideais de corrente e tensão, respectivamente.

As simulações do modelo ideal proposto para o UPQC-i demonstraram a capa-

cidade deste condicionador de energia em realizar a compensação de harmônicos e desequilíbrios de corrente e tensão, a correção de fator de potência, a regulação de tensão e a compensação de VTCDs. Desta forma, mostrou-se que o UPQC-i, conforme modelado, atua isolando os problemas de qualidade da energia existentes na fonte e na carga.

As simulações computacionais constituem uma importante ferramenta no processo de concepção e desenvolvimento de um novo equipamento condicionador de energia. Entretanto, a tarefa de portar o controle desenvolvido no programa de simulação para a plataforma real do protótipo é tratada, na maioria das vezes, de forma isolada.

Este trabalho desenvolveu, de forma pioneira e satisfatória, um ambiente de trabalho implementado na forma de uma biblioteca para o programa de simulação PSCAD, denominada PSCAD/DSPSIM. Este ambiente, permite que a tarefa acima mencionada seja realizada de forma integrada. Desta forma, é possível utilizar-se dos blocos de interfaces desenvolvidos para o PSCAD para modelar todo o sistema de potência e seus conversores de potência já disponíveis na biblioteca original do programa e simular/desenvolver conjuntamente o próprio código do controlador em linguagem C e aritmética de ponto fixo, que será posteriormente embarcado no controlador digital (DSP) do protótipo laboratorial. Esta possibilidade torna o processo de implementação experimental mais rápido, mais seguro e com menor custo.

O modelo real do UPQC-i foi implementado no PSCAD utilizando-se a biblioteca PSCAD/DSPSIM. Os resultados das simulações realizadas neste contexto reafirmaram as características e funcionalidades do mesmo.

Concluindo-se as simulações no PSCAD/DSPSIM, o código de controle está pronto para ser embarcado no microprocessador DSP, a menos das funções de bibliotecas específicas. Este é considerado um benefício direto da utilização da biblioteca PSCAD/DSPSIM no processo de desenvolvimento de um equipamento. Esta é uma importante ferramenta, fruto deste trabalho, que pode ser utilizada para outros desenvolvimentos, entretanto especial atenção deve-se dar às limitações e características desta biblioteca que foram explicadas na Seção 4.3.2, entre elas: portabilidade de funções de biblioteca, utilização de forma correta das variáveis de tipo inteiro de 16/32 bits, erros de truncamento, erros de transbordamento (*overflow*), variáveis

de aritmética saturada, ausência de ferramenta para análise do escalonamento das variáveis no formato-Q, ausência de um cálculo estimativo para o tempo de execução do algoritmo na implementação real e a necessidade de escolha de um tempo de passo de simulação adequado e em conformidade com a frequência real de amostragem e chaveamento que o DSP irá impor para o funcionamento do protótipo experimental.

Para validar experimentalmente os resultados das simulações, um protótipo laboratorial do condicionador UPQC-i foi construído. O mesmo código de controle escrito na linguagem C desenvolvido no ambiente de simulação PSCAD/DSPSIM, foi embarcado diretamente no microprocessador DSP.

Os resultados experimentais do UPQC-i validaram a sua capacidade de compensação frente a distúrbios nas tensões da fonte e correntes da carga. Ajustes no projeto do protótipo podem ser realizados para melhorar o seu desempenho e eliminar as ressonâncias verificadas nos resultados experimentais.

Algumas sugestões de trabalhos futuros são propostas como forma de dar continuidade ao presente trabalho:

- desenvolvimento de uma plataforma de comunicação entre o PSCAD e o DSP e permitir a realização de simulações do tipo *hardware in the loop*, onde o código de controle é executado diretamente no DSP e todo o circuito de potência é simulado no PSCAD;
- análise comparativa entre a modelagem convencional do UPQC e a modelagem invertida proposta neste trabalho, incluindo os resultados experimentais obtidos no mesmo protótipo laboratorial, visto que a topologia é a mesma e somente é necessária uma alteração no código de controle e nas grandezas elétricas a serem medidas;
- estudos de estratégias de controle alternativas para o modelo invertido do UPQC.

Referências Bibliográficas

- [1] DOUGLAS, J., “Power Quality Solutions”, *IEEE Power Engineering Review*, v. 14, n. 3, pp. 3-7, March 1994.
- [2] AKAGI, H., “New Trends in Active Filters”. In: *Proceedings of EPE'95 - European Power Electronics Conference*, v. 0, pp. 0.017-0.026, Sevilla, Spain, Sep. 1995.
- [3] MORAN, S., “A line voltage regulator/conditioner for harmonic-sensitive load isolation”. In: *Conference Record of the Industry Applications Society Annual Meeting*, v. 1, pp. 947-951, San Diego, California, USA, Oct. 1989.
- [4] EPRI. Electric Power Research Institute, Inc. (Palo Alto, CA). MORAN, S. A. e BRENNEN, M. B., *Active power line conditioner with fundamental negative sequence compensation*, U.S. Patent 5384696, 30 Oct. 1992, 24 Jan. 1995.
- [5] KAMRAN, F. and HABETLER, T. G., “Combined deadbeat control of a series-parallel converter combination used as a universal power filter”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 13, pp. 160-168, Jan. 1998.
- [6] SU CHEN and JOOS, G., “A unified series-parallel deadbeat control technique for an active power quality conditioner with full digital implementation”. In: *Conference Record of the 2001 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*, v. 1, pp. 172-178, 30 Sep.-4 Oct. 2001.
- [7] SABIN, D. D. and SANNINO, A., “A summary of the draft IEEE P1409 custom power application guide”. In: *Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition*, v. 3, pp. 931-936, Sep. 2003.

- [8] HINGORANI, N. G., “Introducing Custom Power”, *IEEE Spectrum*, v. 32, n. 6, pp. 41-48, June 1995.
- [9] *GUIDE for Application of Power Electronics for Power Quality Improvement on Distribution Systems Rated 1 kV through 38 kV*, IEEE P1409 Distribution Custom Power Task Force, 2004.
- [10] AKAGI, H., “New Trends in Active Filters for Power Conditioning”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 32, n. 6, Nov/Dec 1996.
- [11] CHATURVEDI, P.K., SHAILENDRA JAIN, PRADHAN, K.C., VESHALI GOYAL, “Multi-pulse converters as a viable solution for power quality improvement”. In: *2006 IEEE Power India Conference*, Apr. 2006.
- [12] PETERSON, M., SINGH, B.N., RASTGOUFARD, P., “Active and Passive Filtering for Harmonic Compensation”. In: *40th Southeastern Symposium on System Theory*, pp. 188-192, 16-18 March 2008.
- [13] GYUGYI, L., STRYCUDA, E. C., *Active ac Power Filters*. In: *Proceedings of IEEE Ind. Appl. Ann. Meeting*, v. 19-C, pp. 529-535, 1976.
- [14] TAKEDA, M., ARITSUKA, T., “Practical applications of active filters for power conditioning in distribution networks”. In: *Proceedings of 8th International Conference on Harmonics And Quality of Power*, v. 1, pp. 304-309, Oct. 1998.
- [15] SINGH, B., HADDAD, K. AL., CHANDRA, A., “A review of active filters for power quality improvement”, *IEEE Transactions on Ind. Electron.*, v. 46, pp. 960-971, Oct. 1999.
- [16] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., “Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits”. In: *IPEC'83 - Int. Power Electronics Conf.*, pp. 1375-1386, Tokyo, Japan, 1983.
- [17] AKAGI, H., KANAZAWA, Y., NABAE, A., “Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components”, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, v. IA-20, n. 3, pp. 625-630, 1984.

- [18] BHATTACHARYA, S., DIVAN, D., *Synchronous frame based controller implementation for a hybrid series active filter system*. In: *Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting*, pp. 2531-2540, 1995.
- [19] AREDES, M., *Active Power Line Conditioners*, Dr.-Ing. Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, March 1996.
- [20] FORTESCUE, C. L., "Method of Symmetrical Coordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks", *Trans. AIEE*, pt. II, v. 37, pp. 1027-1140, 1918.
- [21] HEYDT, G. T., TAN, W., LAROSE, T., NEGLEY, M., "Simulation and analysis of series boost technology for power quality enhancement", *IEEE Trans. Power Deliv.*, v. 13, n. 4, pp. 1335-1341, Oct. 1998.
- [22] SUMI, Y., HARUMOTO, Y., HASEGAWA, T., YANO, M., IKEDA, K., MATSURA, T., "New Static var Control Using Force-Commutated Inverters", *IEEE Trans. On Power Apparatus and Systems*, v. PAS-100, n. 9, pp. 4216-4224, September 1981.
- [23] CAVALIERE, C. A. C., *Análise do STATCOM operando em sistemas desbalanceados*, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2001.
- [24] GYUGYI, L., "Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real Time Control AC Transmission Lines", *Emerging Practices in Technology, IEEE-Transmission Lines*, IEEE Standards Press, Piscataway, USA, 1993.
- [25] GYUGYI, L., "Solid-State Control of Electric Power in AC Transmission Systems", *E.E.C.P.S., Invited Paper*, n. T-IP.4, Capri, Italy, May 1989.
- [26] AKAGI, H., "New trends in active filters for improving power quality", In: *Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, v. 1, pp. 417-425, January 1996.
- [27] AREDES, M., Häfner, J., Heumann, K., "A Combined Series and Shunt Active Power Filter", *IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conf., SPT PE07-05-0643*, v. Power Electr., pp. 237-242, Sweden, June 1995.

- [28] AKAGI, H., FUJITA, H., “A New Power Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power Systems”, *IEEE Trans. Power Delivery*, v. 10, n. 3, pp. 1570-1575, July 1995.
- [29] WATANABE, E.H., STEPHAN, R.M., AREDES, M., “New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads”, *IEEE Trans. Power Delivery*, v.8, n.2, pp. 697-703, 1993.
- [30] SASSO, E. M., SOTELO, G. G., FERREIRA, A. A., WATANABE, E. H., AREDES, M., Barbosa, P. G., “Investigação dos Modelos de Circuitos de Sincronismo Trifásicos Baseados na Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas (p-PLL e q-PLL)”, In: *Proc. (CDROM) of the CBA 2002 - XIV Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 480-485, Natal RN, Brasil, 1-4, Sep. 2002.
- [31] BARBOSA, P. G., *Compensador Série Síncrono Estático Baseado em Conversores VSI Multipulso*, D.Sc. Tese, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2000.
- [32] PRITSKER, AAB, *Compilation of definitions of simulation*, *Simulation*, v. 33, n. 2, pp. 61-63.
- [33] ITÔ, K, *Simulation in Encyclopedic Dictionary of Mathematics*, The MIT Press, 2nd Ed., pp. 1432, 1987.
- [34] DOMMEL, H. W., “Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, v. PAS-88, n. 4, pp. 388-399, April 1969.
- [35] ÅSTRÖM, K.J., *Introduction to Stochastic Control Theory*, New York: Academic Press, 1970.
- [36] BODDIE, J., DARYANANI, G., ELDUMIATI, I., GADENZ, R., THOMPSON, J., WALTERS, S., PEDERSEN, R., “A digital signal processor for telecommunications applications”. In: *Digest of Technical Papers of 1980 IEEE International Solid-State Circuits Conference*, v. XXIII, pp. 44-45, Feb 1980.
- [37] SILVA NETO, J. L., FERNANDES, R. M., COSTA JUNIOR, D. R., ROLIM, L. G. B., AREDES, M., “Implementation of a Low Cost Serie Compensator

- for Voltage Sags”. In: *Anais da VI Conferência Internacional de Aplicações Industriais*, pp. 1-5, Joinville-RS, 2004.
- [38] FERREIRA, J. C., SILVA NETO, J. L., COSTA JUNIOR, D. R., FERNANDES, R. M., ROLIM, L. G. B., RAPOSO, I., AREDES, M., “Implementation of two Topologies of a low cost series compensator for Voltage Sags”, In: *36th IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE*, Recife, Brasil, 2005.
- [39] AREDES, M., MOOR NETO, J. A., FERREIRA, J. C. C., MONTEIRO, L. F. C., FERNANDES, R. M., SIQUEIRA, M. J. V., “A Simplified Control Strategy for a Unified Power Quality Conditioner Prototype”. In: *36th IEEE POWER ELECTRONICS SPECIALISTS CONFERENCE*, Recife, Brasil, 2005.
- [40] MIRANDA, U. A., SILVA NETO, J. L., BELLAR, M. D., AREDES, M., FERNANDES, R. M., “Implementação em DSP de um Conversor Monofásico-Trifásico para Eletrificação Rural”. In: *CDROM of the CBA 2004 - XV Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 1-6, Gramado, 2004.
- [41] COSTA JUNIOR, D. R., ROLIM, L. G. B., AREDES, M., “Analysis and Software Implementation of a Robust Synchronizing Circuit - PLL Circuit”. In: *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, v. 1, pp. 1-6, Rio de Janeiro, Brasil, 2003.
- [42] KUFFEL, R., GIESBRECHT, J., MAGUIRE, T., WIERKX, R. P., MCLAREN, P., “RTDS-A Fully Digital Power System Simulator Operating in Real-Time”. In: *Proceedings of ICDS95 Conference*, pp. 19-24, College Station, TEXAS, USA, Apr. 1995.
- [43] MOHAN, N., UNDELAN, T. M., ROBBINS, W. P., *Power Electronics: converters, applications and design*. 2 ed., New York, John Wiley & Sons, 1995.
- [44] KEY, T.S., “Diagnosing Power Quality-Related Computer Problems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. IA-15, n. 4, pp. 381-393, 1979.
- [45] MARTZLOFF, F. D., “A New IEC Standard on the Measurement of Power Quality Parameters”. In: *Proc. EMC Europe 2000 Symposium*, Brugge, Belgium, Sep. 2000.

- [46] BOLLEN, M. H. J., *Understanding Power Quality Problems*, New York, IEEE Press Marketing, 2000.
- [47] KUECK, J. D., KIRBY, B. J., OVERHOLT, P. N., MARKEL, L. C., *Measurement practices for reliability and power quality - a toolkit of reliability measurement practices*, Oak Ridge National Laboratory Report, ORNL/TM-2004/91, June 2004.
- [48] SILVEIRA, M., *Qualidade de Energia Elétrica em Estabelecimentos Assistenciais de Saúde*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Salvador, Salvador, 2002.
- [49] McGRANAGHAN, M., “Roadmap for Power Quality Standards Development”, In: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, June 2005.
- [50] IEEE, *A Standard Glossary of Power Quality Terminology*, Draft 5 (1999), working document for IEEE P1433, Available at <http://grouper.ieee.org/groups/1433/>
- [51] *MÓDULO 8 - Qualidade da Energia Elétrica*, Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST - ANEEL, 19/02/2008.
- [52] *SUBMÓDULO 2.2: Padrões de Desempenho da Rede Básica*, ANEEL, 2000-10.
- [53] *IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants (Red Book) (ANSI)*, IEEE Std 141-1993.

Apêndice A

Qualidade da Energia Elétrica

A qualidade da energia elétrica é um assunto discutido mundialmente. Manter atualizados os padrões internacionais relacionados a este tema é uma tarefa importante, realizada de forma contínua por grupos de trabalho onde participam representantes da comunidade científica, indústria, fabricantes de equipamentos, entre outros.

Ao longo das últimas décadas, os trabalhos realizados por grupos ligados ao IEEE e ao IEC têm definido e classificado os principais problemas de qualidade da energia elétrica (QEE).

No Brasil, destacam-se as ações realizadas pelos órgãos reguladores em conjunto com os agentes do setor elétrico e a comunidade científica objetivando a regulamentação das questões de QEE no sistema elétrico brasileiro.

Neste apêndice serão apresentadas algumas definições e termos técnicos utilizados para caracterizar os problemas de qualidade da energia, de modo a auxiliar o entendimento das questões que serão discutidas neste trabalho. Em seqüência, far-se-á menção às principais normas internacionais sobre o tema em questão, finalizando-se com uma abordagem mais detalhada das questões normativas para a QEE do sistema de distribuição de energia brasileiro.

A.1 Introdução

A busca incessante da humanidade por tecnologia sempre influenciou o comportamento da sociedade, seja nos aspectos políticos, econômicos, culturais, ambientais etc. A globalização da economia tornou-se possível, em grande parte, devido ao avanço da tecnologia da informação que mudou radicalmente a maneira e a velocidade da comunicação entre as pessoas. Num mundo onde a economia é globalizada, a competitividade tende a ser cada vez maior. Neste ambiente, a qualidade torna-se um fator primordial e determinante para o sucesso. A qualidade agrega valor a um produto ou serviço e pode ser o diferencial deste no mercado. Fechando o ciclo, a busca pela qualidade demanda o desenvolvimento de novas tecnologias a serem aplicadas nos processos de fabricação ou na prestação de serviços.

Para se alcançar o nível desejado de qualidade em um produto, todas as etapas do processo de fabricação devem seguir as normas rígidas definidas pelos programas de controle de qualidade. Quando a eletricidade é uma das principais fontes de energia dentro dos processos industriais, é importante que ela também seja incluída nos programas de controle de qualidade, ainda mais quando constata-se que a tecnologia empregada nos processos de fabricação para torná-los mais precisos e acelerados, também os torna mais sensíveis a eventuais distúrbios ocorridos no fornecimento de energia elétrica. De forma contraditória, muitos destes processos acabam contribuindo para a degradação da qualidade da energia elétrica dos sistemas elétricos.

Em última análise, conclui-se que o interesse e o aumento da demanda por estudos sobre a QEE estão relacionados com fatores econômicos. Parte destes estudos são voltados para a definição de normas técnicas sobre o assunto, conforme veremos neste apêndice. Entretanto, estabelecer padrões de QEE mais adequados significa identificar a real expectativa dos consumidores e o quanto a sociedade está disposta a pagar pelos custos dos mesmos.

A.2 O Conceito

Embora diversos artigos técnicos, livros, normas técnicas e outros documentos, relacionados ao tema “QEE”, já tenham sido publicados, é um fato curioso que ainda não exista um consenso a nível mundial sobre o seu conceito.

O termo “qualidade da energia elétrica (QEE)” é uma tradução do termo em inglês “*power quality*”. A primeira publicação do termo *power quality* ocorreu no final da década de 70 [44]. Desde então, inúmeras definições têm sido formuladas pelas diversas entidades internacionais que tratam da padronização para o tema em questão, caracterizando um processo de evolução do conceito *power quality*, conforme apresentado em [45].

A definição do termo *power quality*, segundo o IEEE, consiste no conceito de “alimentação e aterramento de um equipamento sensível de forma que a operação do mesmo seja adequada”. Já para a *International Electrotechnical Commission* (IEC), o conceito *power quality* é estudado dentro do escopo do comitê técnico para Compatibilidade Eletromagnética. O termo *Electromagnetic Compatibility* (EMC) é utilizado para descrever a “habilidade de dado equipamento ou sistema em funcionar de forma satisfatória no meio eletromagnético sem introduzir distúrbios eletromagnéticos intoleráveis a qualquer outro equipamento ou sistema que esteja no mesmo meio” [46]. Entretanto, outros termos como: *quality of consumption*, *current quality*, *voltage quality* também são encontrados na literatura.

De acordo com [45], o termo “*power quality*” deve ser contextualizado verticalmente, analisando-se a QEE não somente no seu contexto técnico, mas também sob o ponto de vista de áreas de interesse distintas, sejam elas dos atores envolvidos, das questões políticas, dos aspectos corretivos dos problemas de QEE etc; e horizontalmente, analisando-se as forças individuais de cada contexto no plano vertical.

Um outro conceito mais moderno para “*power quality*” é definido simplesmente como a interação elétrica entre o sistema elétrico (rede) e os seus “clientes” [46]. Nesta visão, tanto o consumidor final quanto os fornecedores de energia são considerados “clientes” da rede elétrica e a análise da QEE considera tanto a qualidade da tensão, quanto a qualidade da corrente.

O que se percebe em todas as discussões sobre o conceito QEE são as divergências com relação ao domínio da sua definição. Em outras palavras, não existe um consenso em relação à abrangência do conceito QEE.

Analisando-se o conceito tradicional para a palavra “qualidade” apresentada pelos dicionários: “aquilo que caracteriza uma pessoa ou coisa e que a distingue das outras”; o conceito de “qualidade da energia elétrica” seria relativo as características da energia elétrica. Como a energia elétrica pode ser definida pela tensão e corrente em um determinado ponto ao longo do tempo, a QEE de um sistema elétrico de potência definiria as características da tensão e corrente em um determinado ponto deste sistema que as distinguem de outros pontos deste mesmo sistema. Esta definição mais abrangente se aproxima do conceito apresentado em [46], mencionado anteriormente nesta seção.

Entretanto, analisando-se a definição da Norma ISO 8402: “Qualidade é a totalidade das propriedades e características de um produto ou serviço que lhe conferem habilidade para satisfazer necessidades explícitas do cliente”; percebe-se que o termo “qualidade” evoluiu para uma visão de “satisfação”. Obviamente, o sentimento de satisfação não é resultado apenas das características de tal coisa ou pessoa. A satisfação relaciona-se com sentimentos de prazer, contentamento, realização, agrado, tornando a Qualidade um conceito subjetivo.

Assim, percebe-se o tamanho das dificuldades em se alcançar um consenso na definição do conceito QEE, sendo, portanto, um tema para muitas discussões.

Neste trabalho a qualidade da energia elétrica será utilizada para representar as alterações nas formas de onda ideais de corrente e tensão (forma de onda senoidal não distorcida com amplitude e frequência constantes, com a corrente em fase com a tensão).

A.3 Normas, termos técnicos e definições

A normalização técnica baseia-se em resultados da ciência, da tecnologia e da experiência prática. Ela tem como preceito básico a obtenção do consenso entre as diversas partes envolvidas: o fabricante, o fornecedor e o usuário.

Existem duas principais entidades internacionais realizando atividades para a normatização de assuntos relativos a “qualidade da energia elétrica”: o IEEE e o IEC. As normas publicadas por estas entidades objetivam fixar padrões internacionais para tecnologias relacionadas ao setor elétrico/eletrônico. Embora as duas entidades tenham representatividade internacional, uma diferença básica entre elas diz respeito as suas origens, pois, enquanto o IEEE foi constituído nos Estados Unidos, o IEC têm as suas origens no continente europeu.

De certa forma, a influência política destas duas grandes economias mundiais explica a coexistência de normas internacionais distintas para o mesmo tema. Na maioria das vezes esta influência é preponderante na adoção de uma ou outra norma internacional por determinado país. Em outras palavras, um país que possui relações mais estreitas com a comunidade européia, em geral, adota as normas publicadas pelo IEC, de maneira recíproca o mesmo acontece com a adoção das normas do IEEE. Entretanto, também é comum a combinação de normas destas duas entidades como base para a definição das normas individuais de cada país.

Entretanto, com a globalização da economia, as necessidades de mercado demandam ações efetivas para que sejam evitados esforços duplicados na publicação de padrões internacionais. Em resposta a esta necessidade, o IEEE e o IEC firmaram um acordo de cooperação para o desenvolvimento de normas internacionais, sendo a primeira publicada nos termos deste acordo no ano de 2004.

O importante não é a criação de um selo ou uma marca única, mas a necessidade da harmonização das distintas normas internacionais que tratam da mesma tecnologia.

Conforme veremos na Seção A.3.3, o Sub-comitê 22 do IEEE vem realizando ações, embora limitadas, com intenções claras de compatibilização dessas normas internacionais. Todavia, são ainda ações isoladas e, portanto, as questões de QEE são tratadas distintamente pelas principais normas IEEE/IEC, conforme veremos nas seções A.3.1 e A.3.2.

O *European Committee for Electrotechnical Standardization* (CENELEC) é uma outra entidade de expressão continental, responsável pela padronização do setor elétrico europeu. Como consequência do acordo de cooperação firmado na década

de 90 entre o IEC e o CENELEC, existe uma grande interação entre as atividades desenvolvidas no âmbito destas entidades, visando evitar esforços duplicados na elaboração de normas técnicas. Com isto, atualmente, o CENELEC inicia novos trabalhos para a definição de novas normas somente em certos casos específicos, dando prioridade para a realização destes trabalhos no âmbito do IEC.

A norma EN 50160 é de autoria do CENELEC. Embora esta norma seja europeia, ela é bastante difundida internacionalmente, servindo de referência para outros países além do continente europeu. Ela define a qualidade da energia elétrica em termos das características da tensão, que podem ser esperadas sob condições normais de fornecimento de energia.

Para manter-se a forma sintética deste apêndice apresentaremos apenas algumas das principais normas internacionais sobre o assunto e uma sucinta descrição sobre cada uma delas. Existem diversos trabalhos já publicados que tratam especificamente sobre o tema da “qualidade da energia elétrica”, onde são realizados levantamentos mais completos e aprofundados sobre as suas normas, podendo ser utilizados como referência [47, 48].

Em [49] são apresentados o estado atual das principais normas internacionais e um roteiro para o desenvolvimento contínuo destas normas, verificando-se progressos significantes.

A.3.1 Normas internacionais IEEE

A seguir, serão listadas algumas das principais normas técnicas publicadas pelo IEEE.

- IEEE 1159: Monitoração de qualidade da energia elétrica
 - IEEE 1159.1: Guia de requisitos para aquisição de dados e armazenamento;
 - IEEE 1159.2: Caracterização de eventos de qualidade da energia elétrica;
 - IEEE 1159.3: Formato de arquivo de dados para o intercâmbio de dados de qualidade da energia elétrica;

- IEEE P1564: Índices de Afundamento de Tensão;
- IEEE 1346: Compatibilidade do sistema de potência com equipamentos de processos;
- IEEE P1100: Alimentação e aterramento de equipamentos eletrônicos (Emerald Book);
- IEEE 1433: Definições de qualidade da energia elétrica;
- IEEE P1453: Flutuação de Tensão;
- IEEE 519: Controle de harmônicos nos sistemas elétricos de potência;
- IEEE P519A: Guia para a aplicação de limites harmônicos nos sistemas de potência;
- IEEE P446: Energia de reserva e emergência;
- IEEE P1409: “Custom Power” para distribuição;
- IEEE P1547: Recursos distribuídos e interconexões de sistemas elétricos de potência.

A.3.2 Normas internacionais IEC

Em seqüência, estão listadas as principais normas publicadas pelo IEC.

- IEC Normas de qualidade de energia - sistema de numeração;
 - 61000-1-X : Definições e Metodologias;
 - 61000-2-X : Ambientes (ex. 61000-2-4 trata dos níveis de compatibilidade nas plantas industriais);
 - 61000-3-X : Limites (ex. 61000-3-4 trata dos limites de emissões harmônicas);
 - 61000-4-X : Testes e Medições (ex. 61000-4-30 trata das medições de qualidade de energia);

- 61000-5-X : Instalação e Mitigação;
- 61000-6-X : Normas genéricas de imunidade e emissões
- IEC SC77A: Fenômenos de Compatibilidade Eletromagnética de baixa frequência – essencialmente equivalente à “qualidade da energia elétrica” na terminologia americana;
 - SC 77A/WG 1: Harmônicos e outros distúrbios de baixa frequência;
 - SC 77A/WG 6: Testes de imunidade a baixa frequência;
 - SC 77A/WG 2: Flutuações de tensão e outros distúrbios de baixa frequência;
 - SC 77A/WG 8: Interferências eletromagnéticas relacionadas com a frequência da rede;
 - SC 77A/WG 9: Métodos de medições de qualidade da energia elétrica;
 - SC 77A/PT 61000-3-1: compatibilidade eletromagnética - Parte 3-1: Limites - Visão Geral dos guias e normas sobre emissões. Relatório Técnico.

A.3.3 Termos técnicos e definições

Embora as normas IEEE/IEC tratem do mesmo assunto, quando comparadas, elas apresentam alguns termos conflitantes ou confusos. Com o objetivo de identificar termos e definições oficiais, uma força tarefa organizada pelo comitê internacional do IEEE denominado *Standards Coordinating Committee on Power Quality (SCC-22)* elaborou um documento contendo uma lista de termos técnicos e definições baseada em diversas normas do IEEE e do IEC [50].

Não é intenção deste trabalho discutir todo o glossário sobre o tema, e nem mencioná-lo como verdade absoluta. Mas, é importante apresentar os principais termos técnicos e as suas respectivas definições, baseados no documento produzido pelo comitê SCC-22, que são utilizados atualmente para descrever os principais distúrbios de qualidade de energia e que estão correlacionados ao tema do presente trabalho, como se segue:

- Afundamento¹ (*Sag* ou *Dip*): É definido como uma redução do valor eficaz da tensão ou corrente na frequência fundamental em uma ou mais fases, com duração variando de 0,5 ciclo a um minuto. Um afundamento de tensão (voltage sag) para 20% significa uma redução para 20% do valor nominal da tensão. A utilização da expressão “afundamento de 20%” para indicar que a tensão foi reduzida de 20% do valor nominal, ou seja para 80% do valor nominal, está em desuso. Os valores típicos são 0,1 a 0,9 pu.
- Interrupção¹ (*Interruption*): É a completa perda da tensão (abaixo de 0,1 pu) em uma ou mais fases durante um determinado período de tempo. Interrupções momentâneas são definidas como interrupções de duração entre 0,5 ciclo e 3 segundos, interrupções temporárias duram entre 3 e 60 segundos, e interrupções sustentadas são as que apresentam uma duração maior que 60 segundos.
- Elevação¹ (*Swell*): É uma elevação do valor eficaz da tensão ou corrente do sistema de potência na frequência fundamental, com duração variando de 0,5 ciclo a um minuto. Os valores eficazes típicos estão entre 1,1 e 1,8 pu.
- Transitórios (*Transients*): Este termo designa um fenômeno de variação entre dois estados permanentes durante um curto intervalo de tempo quando comparado com a escala de tempo de interesse. Um transitório pode ser um impulso unidirecional de qualquer polaridade, ou uma onda oscilatória amortecida com o primeiro pico ocorrendo em qualquer polaridade.
- Sobre-tensão (*Over-voltage*): É usado para descrever um tipo de variação específico, de longa duração, no qual a tensão do sistema apresenta valor maior que o nominal por um período maior que um minuto. Valores típicos estão entre 1,1 e 1,2 pu.
- Sub-tensão (*Under-voltage*): Refere-se a uma diminuição da tensão do sistema para um valor menor que o nominal por um período maior que um minuto. Valores típicos se situam entre 0,8 e 0,9 pu.
- Harmônicos (*Harmonics*): São tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas da frequência fundamental do sistema. Formas de onda distorcidas

¹Ver a classificação em função da duração na Tabela A.1

podem ser decompostas em uma soma da onda de frequência fundamental e os harmônicos. São causados por características não lineares de equipamentos e cargas ligados ao sistema de potência.

- Inter-harmônicos (*Interharmonics*): São tensões ou correntes senoidais com frequências múltiplas, não inteiras, da frequência fundamental do sistema. São causados principalmente por conversores de frequência estáticos, cicloconversores, motores de indução e dispositivos a arco, e podem causar o efeito “flicker”. Sinais de comunicação do tipo “*power line carrier*” presentes na rede elétrica são também considerados inter-harmônicos.
- Cortes (*Notches*): São distúrbios periódicos na tensão com duração menor que 0,5 ciclo. O “*Notching*” é causado principalmente por dispositivos de eletrônica de potência quando a corrente é comutada de uma fase para outra, neste momento ocorre curto-circuito de pequena duração entre duas fases do circuito.
- Desequilíbrio de tensão (*voltage imbalance or voltage unbalance*): É o máximo desvio dentre os valores eficazes das tensões das três fases em relação à média dos valores eficazes das tensões trifásica dividido pela média dos valores eficazes das tensões trifásicas. O desequilíbrio ou desbalanço também pode ser definido pela teoria dos componentes simétricos, como sendo o percentual da razão entre o componente de seqüência negativa ou zero e o componente de seqüência positiva. O desequilíbrio de tensão é considerado um distúrbio em regime permanente cujos valores típicos situam-se entre 0,5 e 2,0%.
- Flutuações nas tensões (*voltage fluctuations*): Flutuações nas tensões são variações sistemáticas no “envelope” ou uma série de mudanças aleatórias com uma determinada magnitude, as quais normalmente não excedem a faixa de 0,9pu a 1,1pu. Tais variações na tensão são freqüentemente referidas como “flicker”. O termo “flicker” é derivado do impacto visível (ao olho humano) das flutuações nas tensões em lâmpadas incandescentes. Entre as mais comuns causas do “flicker” tanto em transmissão quanto em distribuição estão os fornos a arco.
- Desvios na Frequência (*frequency deviations*): São aumentos ou diminuições na frequência fundamental do sistema de potência. Desvios na frequência podem durar de alguns ciclos a algumas horas.

A Tabela A.1 resume a classificação dos tipos de variações de tensão com relação à duração dos eventos (interrupção, afundamento ou elevação) e a magnitude típica da tensão durante a ocorrência destes, segundo a norma “IEEE Std 1159-1995”.

Tabela A.1: Classificação da duração das variações de tensão segundo a norma IEEE Std 1159-1995

Categorias		Fenômeno	Duração	Magnitude
Curta Duração	Instantânea	Afundamento	0,5 - 30 ciclos	0,1-0,9 pu
		Elevação		1,1-1,8 pu
	Momentânea	Interrupção	0,5 ciclos - 3s	<0,1 pu
		Afundamento	30 ciclos - 3s	0,1-0,9 pu
		Elevação		1,1-1,4 pu
	Temporária	Interrupção	3s - 1min	<0,1 pu
		Afundamento		0,1-0,9 pu
		Elevação		1,1-1,4 pu
	Longa Duração		Interrupção Sustentada	> 1 min
Sub-Tensão			0,8-0,9 pu	
Sobre-Tensão			1,1-1,2 pu	

A.4 Qualidade de Energia no Sistema Elétrico Brasileiro

Em geral, as normas técnicas internacionais são utilizadas como base para a definição das regulamentações da operação dos sistemas elétricos de cada país, levando-se em consideração os aspectos peculiares, sejam eles das mais diversas naturezas (técnica, econômica, jurídica, cultural etc).

No Brasil, a ANEEL é responsável por regular e fiscalizar a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica, de acordo com a legislação e em conformidade com as diretrizes e as políticas do governo federal brasileiro. Dentro deste contexto, a ANEEL vem elaborando uma série de documentos denominados

Procedimentos de Distribuição (PRODIST) [51].

De acordo com a ANEEL, “Os Procedimentos de Distribuição são documentos regulatórios na forma de regulamentações, normatizações e padronizações que têm como objetivo possibilitar a conexão elétrica aos sistemas de distribuição por usuários, garantindo que os indicadores de desempenho ou de qualidade de serviço sejam atingidos de forma clara e transparente, preservando, dentre outros aspectos, a segurança, a eficiência e a confiabilidade dos sistemas elétricos”.

Com relação ao tema QEE, destaca-se o módulo 8 do PRODIST. Este módulo define os conceitos e as terminologias, caracteriza os fenômenos, estabelece os parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão.

Os aspectos da QEE, em regime permanente ou transitório, considerados pelo PRODIST são: tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e VTCD.

A.4.1 Tensão em regime permanente

A tensão em regime permanente deve ser avaliada através dos indicadores individuais e coletivos que são calculados a partir de um conjunto de leituras, de acordo com a metodologia descrita na norma [51]. As leituras quando comparadas aos valores de referência classificam-se em três categorias: adequadas, precárias e críticas, conforme ilustra a Figura A.1, onde:

- a. Tensão de referência: (T_R);
- b. Faixa adequada de tensão: ($T_R - \Delta_{ADINF}$, $T_R + \Delta_{ADSUP}$);
- c. Faixa precária de tensão: ($T_R + \Delta_{ADSUP}$, $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$) ou ($T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$, $T_R - \Delta_{ADINF}$);
- d. Faixa crítica de tensão: ($>T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$) ou ($<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$).

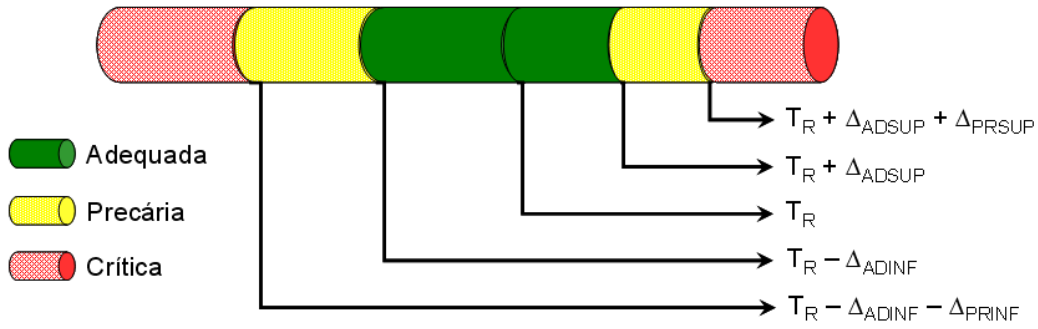


Figura A.1: Classificação da tensão em regime permanente em relação ao valor de referência

Os valores de referência que caracterizam estas faixas (adequadas, precárias e críticas) são definidas nos Procedimentos de Distribuição para as classes de tensão abaixo de 1kV, entre 1kV e 69kV e entre 69kV e 230kV [51]. Já as unidades consumidoras cujo ponto de conexão tem tensão nominal igual ou superior a 230kV deverão ter as faixas de tensão de acordo com os Procedimentos de Rede [52]. Para os pontos de conexão em tensão nominal igual a 127V (T_R) os valores de referência para os limites Δ_{PRINF} , Δ_{ADINF} , Δ_{ADSUP} e Δ_{PRSUP} são, respectivamente, 7V, 11V, 6V e 7V.

A avaliação da QEE é realizada em função dos indicadores individuais e coletivos definidos pela norma, que são:

a. Individuais:

1. duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP);
2. duração relativa da transgressão para tensão crítica (DRC);

b. Coletivos:

1. índice de unidades consumidoras com tensão crítica (ICC);
2. duração relativa de transgressão de tensão precária equivalente (DRP_E);
3. duração relativa de transgressão de tensão crítica equivalente (DRC_E).

Os índices DRP e DRC indicam o percentual do tempo em que a tensão fornecida a determinado consumidor ficou dentro das faixas precária e crítica, respectivamente.

Os indicadores coletivos são obtidos a partir de um tratamento estatístico por amostragem. O tamanho da amostra é definido a partir do número de unidades consumidoras da concessionária. Já a definição das unidades consumidoras pertencentes a esta amostra são definidos pela ANEEL por meio de critério estatístico aleatório. Desta forma, o índice ICC é definido pela razão entre o número de unidades consumidoras com tensões críticas e o número de unidades consumidoras da amostra.

Os índices DRP_E e DRC_E representam, para determinada amostra, o percentual médio (equivalente) do tempo em que a tensão fornecida ficou dentro das faixas precária e crítica. Eles são calculados a partir da razão entre somatório dos índices individuais de cada unidade consumidora DRP e DRC , respectivamente, e o número total de unidades consumidoras da amostra.

Informações mais detalhadas sobre a metodologia para a realização das medições necessárias para a determinação destes índices podem ser obtidas consultando-se diretamente o documento do PRODIST [51].

A.4.2 Fator de potência

O fator de potência (FP) é um dos primeiros indicadores de QEE cujo monitoramento e a penalidade são classicamente previstos em norma. Isto não significa que os atuais problemas não existiam, o que ocorre é que nas últimas décadas as características das cargas vêm sofrendo sensíveis modificações, tornando relevantes problemas que antes não tinham tanta influência na operação segura e confiável dos sistemas elétricos. Por outro lado, os problemas de QEE relacionados ao fator de potência sempre estiveram em evidência como um dos principais parâmetros a serem gerenciados num sistema de potência.

O cálculo do fator de potência é baseado na teoria clássica das potências como sendo a razão entre a potência ativa e a potência aparente.

De acordo com as normas brasileiras, as unidades consumidoras conectadas em BT ou MT devem garantir que o FP no ponto de conexão esteja compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo. Já para as unidades conectadas em

alta tensão (AT) o FP deve estar compreendido entre 0,95 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo.

A operação fora dos limites fixados pelos valores de referência permite que, a título de multa, a distribuidora de energia cobre de seus consumidores infratores o excedente de energia reativa.

A.4.3 Harmônicos

As distorções harmônicas são fenômenos associados com deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental.

A avaliação dos níveis de distorção da forma de onda da tensão causados pela presença de harmônicos é realizada através dos indicadores:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (\text{A.1})$$

e

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (\text{A.2})$$

onde,

- Distorção harmônica individual de tensão de ordem h (DIT_h);
- Distorção harmônica total de tensão (DTT);
- Tensão harmônica de ordem h (V_h);
- Tensão fundamental medida (V_1).

O cálculo da DTT deve ser realizado considerando-se o espectro harmônico compreendido entre a frequência fundamental e no mínimo até o 25^o harmônico, ou seja

$hmáx \geq 25$.

Os valores máximos para o indicador DTT são definidos através dos valores de referência fixados para os diversos níveis de tensão de barramento, conforme a Tabela A.2.

Tabela A.2: Valores de referência das distorções harmônicas totais de tensão

Tensão Nominal no Barramento	DTT(%)
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N \leq 138kV$	3

Os valores de cada harmônico individual também estão definidos pela norma e não devem ultrapassar os limites estabelecidos na Tabela A.3.

Tabela A.3: Valores de referência das distorções harmônicas individuais de tensão

Ordem Harmonica	DIT (%)				
	V_N^a	V_N^b	V_N^c	V_N^d	
ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6,0	4,5	2,5
	7	6,5	5,0	4,0	2,0
	11	4,5	3,5	3,0	1,5
	13	4,0	3,0	2,5	1,5
	17	2,5	2,0	1,5	1,0
	19	2,0	1,5	1,5	1,0
	23	2,0	1,5	1,5	1,0
	25	2,0	1,5	1,5	1,0
> 25	1,5	1,0	1,0	0,5	
ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5,0	4,0	2,0
	9	2,0	1,5	1,5	1,0
	≥ 15	1,0	0,5	0,5	0,5
pares	2	2,5	2,0	1,5	1,0
	4	1,5	1,0	1,0	0,5
	≥ 6	1,0	0,5	0,5	0,5

^a $V_N \leq 1kV$

^b $1kV < V_N \leq 13,8kV$

^c $13,8kV < V_N \leq 69kV$

^d $69kV < V_N \leq 230kV$

A.4.4 Desequilíbrio de tensão

A existência de desequilíbrio de tensão num sistema elétrico está principalmente relacionada com a má distribuição das cargas monofásicas conectadas nos sistemas de distribuição. As cargas monofásicas e bifásicas estão predominantemente presentes nos setores residencial e comercial, sendo utilizadas em grande escala na iluminação, alimentação de pequenos motores e eletrodomésticos.

O desequilíbrio de tensão é caracterizado pelo surgimento de tensões de seqüência negativa e/ou zero no circuito elétrico, sendo manifestado nas tensões de fornecimento sob a forma de amplitudes diferentes, assimetria entre os ângulos das fases, ou uma combinação destes dois primeiros.

A presença de pequenos desequilíbrios nas tensões de fornecimento pode induzir efeitos de aquecimento nos equipamentos presentes nos sistemas de distribuição, transmissão e geração. Embora o consumo de energia do setor industrial seja em grande parte através de cargas trifásicas, existem algumas cargas típicas monofásicas que causam diversos problemas de QEE, como por exemplo as máquinas de solda monofásicas. Neste caso a influência na operação de motores e transformadores é percebida pelo sobre-aquecimento destes. No caso dos motores de indução trifásicos o desequilíbrio de seqüência negativa de corrente varia aproximadamente com o cubo do desequilíbrio de seqüência negativa das tensões de alimentação. Portanto, um desequilíbrio de seqüência negativa de 3,5% acarreta um aquecimento adicional de 25% em alguns tipos de motores [53]. Assim, percebe-se a importância da necessidade em se manter níveis relativamente baixos de desequilíbrio de tensão.

No Brasil, a ANEEL definiu que as seguintes expressões podem ser utilizadas para o cálculo do desequilíbrio de tensão:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (\text{A.3})$$

ou

$$FD\% = 100 \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}}, \quad (\text{A.4})$$

sendo,

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2}, \quad (\text{A.5})$$

onde,

- FD = fator de desequilíbrio;
- (V_-) = valor eficaz da tensão de seqüência negativa;
- (V_+) = valor eficaz da tensão de seqüência positiva;
- (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) = valores eficazes das tensões de linha trifásicas.

O módulo 8 do PRODIST estabelece que o valor de referência para o desequilíbrio de tensão nos barramentos do sistema de distribuição, com exceção da BT, deve ser igual ou inferior a 2%.

A.4.5 Flutuação de tensão

A norma brasileira define a flutuação de tensão como uma variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz da tensão [51].

O fenômeno da flutuação de tensão é comum em sistemas onde as correntes impostas pelas cargas apresentam variações significativas. Em geral, o termo em inglês “flicker” é bastante utilizado, de forma equivocada, como referência para este tipo de variação na tensão. Na verdade o termo “flicker” está associado ao impacto do fenômeno elétrico “flutuação de tensão” na intensidade luminosa dos sistemas de iluminação. A cintilação luminosa é a tradução do termo “flicker” para a língua portuguesa. Assim como a flutuação de tensão é a resposta do sistema de potência à variação de corrente de uma carga, a cintilação luminosa é a resposta do sistema de iluminação observada pelo olho humano.

A caracterização da flutuação de tensão como um parâmetro importante na avaliação da QEE de um barramento do sistema de distribuição tem como objetivo

avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa nos pontos de iluminação do consumidor final.

A ANEEL utiliza a seguinte terminologia aplicável às formulações de cálculo da sensação de cintilação:

- Severidade de Curta Duração - Pst;
- Severidade de Longa Duração - Plt;
- Valor diário do indicador Pst que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 24 horas - PstD95%;
- Valor semanal do indicador Plt que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de sete dias completos e consecutivos - PltS95%;
- Fator de Transferência - FT.

Os níveis de severidade de cintilação, associados à flutuação de tensão, são avaliados através dos indicadores Pst e Plt. O cálculo destes indicadores é realizado em conformidade com os procedimentos estabelecidos nas normas do IEC. Estes valores são derivados da medição e processamento das tensões dos barramentos, traduzidas em níveis de sensação de cintilação luminosa, com posterior classificação em faixas de probabilidade de ocorrência [51].

Os indicadores Pst e Plt representam a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 (dez) minutos e 2 (duas) horas, respectivamente. O indicador Plt é composto de 12 valores consecutivos de Pst.

Os indicadores PstD95% e PltS95% são obtidos a partir do tratamento estatístico do conjunto de valores representativos de Pst e Plt, respectivamente. Os valores obtidos são classificados como: adequado, precário ou crítico, conforme apresentado na Tabela A.4.

O FT deve ser calculado pela relação entre o valor do PltS95% do barramento do sistema de distribuição e o valor do PltS95% do barramento da tensão secundária de baixa tensão de distribuição eletricamente mais próximo. Para os casos em que o

valor do FT não é conhecido deve ser adotado o valor de 1,0 (um) para barramentos com tensão inferior a 69kV, ou 0,8 (oito décimos) para barramentos com tensão superior ou igual a 69kV e inferior ou igual a 230kV.

Tabela A.4: Faixas de classificação para as flutuações de tensão

Classificação	PstD95%	PltS95%
Adequado	$< 1pu / FT$	$< 0,8pu / FT$
Precário	$1pu - 2pu / FT$	$0,8pu - 1,6pu / FT$
Crítico	$> 2pu / FT$	$> 1,6pu / FT$

A.4.6 Variação de Tensão de Curta Duração

De acordo com a definição apresentada em [51] e [52], entende-se por VTCD um desvio significativo do valor eficaz da tensão em um intervalo de tempo compreendido entre 16,67ms (1 ciclo) e 60s (1 minuto).

A amplitude da VTCD é definida pelo valor extremo do valor eficaz (média quadrática) da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado, enquanto perdurar o evento.

A duração da VTCD é definida pelo intervalo de tempo decorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado ultrapassa determinado limite e o instante em que a mesma variável volta a cruzar este limite.

A Tabela A.5 apresenta a classificação das VTCDs para o sistema elétrico brasileiro definida pela ANEEL [51]. Esta classificação foi realizada segundo os mesmos critérios adotados nas normas internacionais: a severidade (amplitude) e a duração da VTCD.

É importante observar que existem algumas diferenças entre a classificação nacional (Tabela A.5) e a classificação segundo a norma IEEE Std 1159-1995 (Tabela A.1).

Tabela A.5: Classificação das VTCDs para o sistema elétrico brasileiro

Classificação	Denominação	Duração	Magnitude
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	< 3s	< 0,1 pu
	Afundamento Momentâneo de Tensão	1 ciclo - 3s	0,1-0,9 pu
	Elevação Momentânea de Tensão		1,1-1,4 pu
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	3s - 1min	< 0,1 pu
	Afundamento Temporário de Tensão		0,1-0,9 pu
	Elevação Temporária de Tensão		1,1-1,4 pu

A.5 Sumário

A qualidade da energia elétrica (QEE) é um assunto em evidência no cenário mundial, sendo que a sua análise esbarra inicialmente na dificuldade de se conceituar o termo qualidade, favorecendo diferentes interpretações, dependendo dos interesses em questão.

Neste trabalho, a qualidade da energia elétrica é analisada sob o ponto de vista das alterações nas formas de onda ideais de corrente e tensão do sistema elétrico de potência.

Algumas entidades, como o IEEE e o IEC, vêm trabalhando na definição de normas internacionais sobre a QEE. Embora estes esforços sejam distintos, existe um consenso da necessidade de uma harmonização das diferentes normas internacionais sobre o tema, ainda mais quando percebe-se que estas normas são utilizadas como base para as regulamentações nacionais de cada país.

Alinhado com esta tendência, a ANEEL vem realizando ações para a regulamentação dos problemas relacionados a QEE no Brasil. Num primeiro momento, estas ações foram realizadas no contexto da rede básica do sistema elétrico brasileiro. No nível da distribuição de energia estão sendo redigidos os Procedimentos

de Distribuição (PRODIST), visando regulamentar os seguintes aspectos: tensão em regime permanente, fator de potência, distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão, flutuação de tensão e VTCD.

Apêndice B

Resposta em frequência dos filtros

B.1 Filtro Média Móvel

Os filtros passa-baixa utilizados nas estratégias de controle do Condicionador Universal de Potência para Compensação de VTCD, Harmônicos e Desbalanços de Corrente e Tensão (UPQC-i) para a determinação dos componentes médios de potência são do tipo média móvel.

Devido à sua simplicidade de entendimento e de implementação digital em microprocessadores, o filtro média móvel é considerado um dos principais filtros digitais para processamento no domínio do tempo. Entretanto, é importante ressaltar que o seu desempenho para sinais no domínio da frequência é precário.

Considerando-se que a aplicação em questão trata-se de processamento de sinais no domínio do tempo a escolha do filtro média móvel é oportuna.

O filtro digital média móvel é do tipo *Finite Impulse Response* (FIR). A função de transferência deste filtro digital pode ser representada por:

$$H(z) = b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_Mz^{-M} , \quad (\text{B.1})$$

onde,

- b_0, b_1, \dots, b_M são os coeficientes do filtro.

No caso específico do média móvel os coeficientes possuem os seguintes valores:

$$b_i = \frac{1}{M+1}, i = 0, 1, \dots, M . \quad (\text{B.2})$$

Este é um filtro média móvel de ordem M que possui (M+1) termos.

Para as simulações realizadas no Capítulo 4, onde a frequência de amostragem é de 20kHz, um filtro média móvel de 332ª ordem foi projetado, de forma a colocar zeros de transmissão nas frequências de 60Hz e seus múltiplos até 10kHz. A resposta em frequência deste filtro é apresentada na Figura B.1. São mostradas apenas as frequências mais relevantes até 1kHz. A frequência de corte para esta resposta situa-se em torno de 26Hz.

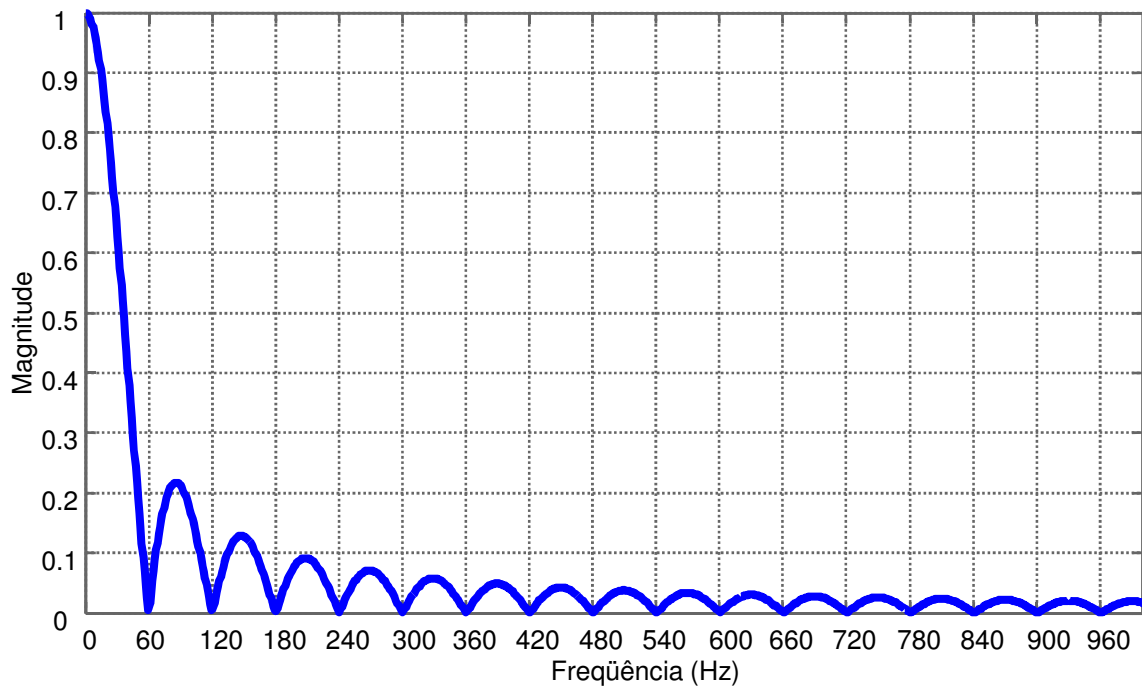


Figura B.1: Resposta em frequência do filtro média móvel dos controles do UPQC-i.

B.2 Filtros passivos de potência

Os filtros passivos utilizados nas simulações do modelo do UPQC-i foram os mesmos utilizados na construção do protótipo. A principal função destes filtros, que são conectados nas saídas dos inversores série e paralelo, é minimizar os componentes harmônicos de tensão de alta frequência produzidos pelo chaveamento dos inversores de tensão série e paralelo. Adotou-se a topologia do filtro passa-baixa de segunda ordem da Figura B.2).

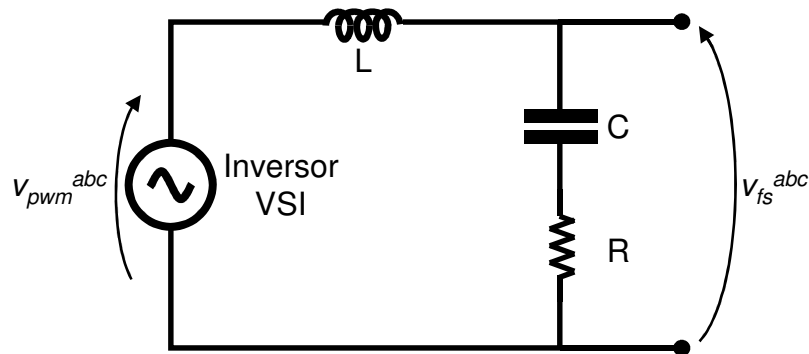


Figura B.2: Topologia do filtro passivo de potência de segunda ordem.

A função de transferência desta topologia é expressa por:

$$FT(s) = \frac{V_{fs}^{abc}(s)}{V_{pwm}^{abc}(s)} = \frac{2\zeta\omega_c s + \omega_c^2}{s^2 + 2\zeta\omega_c s + \omega_c^2}, \quad (\text{B.3})$$

onde,

$$\zeta = \frac{R}{2} \cdot \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (\text{B.4})$$

e

$$\omega_c = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (\text{B.5})$$

As respostas em frequência dos filtros passivos série e paralelo são apresentadas nas Figuras B.3 e B.4, respectivamente.

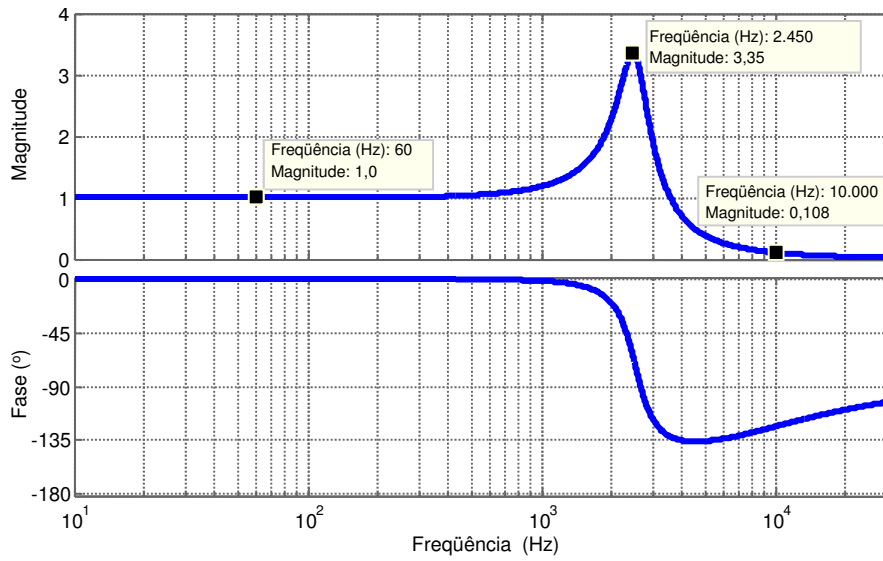


Figura B.3: Resposta em frequência do filtro de potência do conversor série.

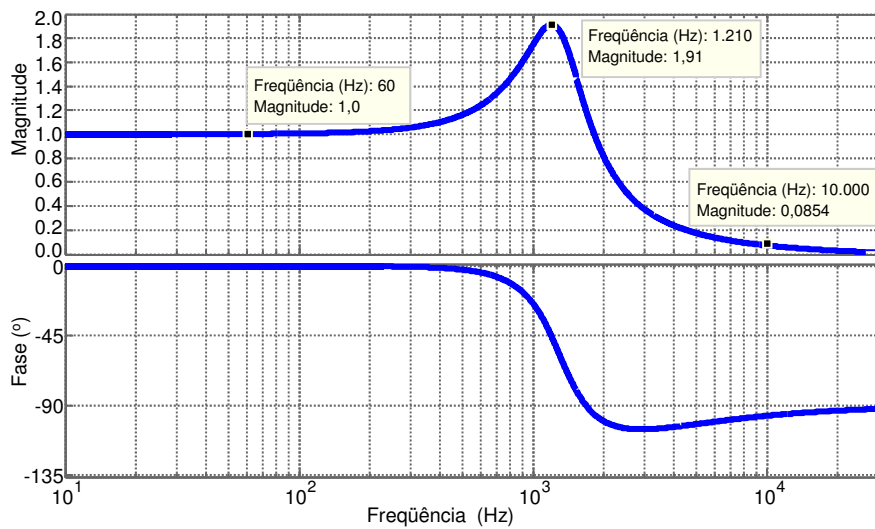


Figura B.4: Resposta em frequência do filtro de potência do conversor paralelo.

Anexo I

Folha de Dados do módulo IGBT modelo SKM 200 GB

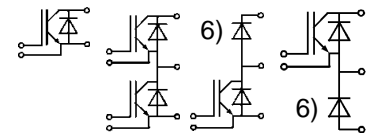
Absolute Maximum Ratings		Values		Units
Symbol	Conditions ¹⁾	... 123 D	... 123 D1	
V _{CES}		1200		V
V _{CGR}	R _{GE} = 20 kΩ	1200		V
I _C	T _{case} = 25/80 °C	200 / 180		A
I _{CM}	T _{case} = 25/80 °C; t _p = 1 ms	400 / 360		A
V _{GES}		± 20		V
P _{tot}	per IGBT, T _{case} = 25 °C	1380		W
T _j , (T _{stg})		- 40 ... +150 (125)		°C
V _{isol}	AC, 1 min.	2 500 ⁷⁾		V
humidity	DIN 40 040	Class F		
climate	DIN IEC 68 T.1	40/125/56		
Inverse Diode			FWD ⁶⁾	
I _F = - I _C	T _{case} = 25/80 °C	200 / 130	260 / 180	A
I _{FM} = - I _{CM}	T _{case} = 25/80 °C; t _p = 1 ms	400 / 360	400 / 360	A
I _{FSM}	t _p = 10 ms; sin.; T _j = 150 °C	1450	1800	A
I _t ²	t _p = 10 ms; T _j = 150 °C	10 500	24 200	A ² s

SEMİTRANS® M IGBT Modules

SKM 200 GA 123 D ^{*)}
 SKM 200 GB 123 D
 SKM 200 GB 123 D1 ⁶⁾
 SKM 200 GAL 123 D ⁶⁾
 SKM 200 GAR 123 D ⁶⁾



SEMİTRANS 3



GA GB GAL GAR

Features

- MOS input (voltage controlled)
- N channel, Homogeneous Si
- Low inductance case
- Very low tail current with low temperature dependence
- High short circuit capability, self limiting to 6 * I_{cnom}
- Latch-up free
- Fast & soft inverse CAL diodes ⁸⁾
- Isolated copper baseplate using DCB Direct Copper Bonding Technology
- Large clearance (13 mm) and creepage distances (20 mm).

Typical Applications: → B6 - 153

- Switching (not for linear use)

Characteristics		min.	typ.	max.	Units
Symbol	Conditions ¹⁾				
V _{(BR)CES}	V _{GE} = 0, I _C = 4 mA	≥ V _{CES}	–	–	V
V _{GE(th)}	V _{GE} = V _{CE} , I _C = 6 mA	4,5	5,5	6,5	V
I _{CES}	V _{GE} = 0 } T _j = 25 °C	–	0,2	3	mA
	V _{CE} = V _{CES} } T _j = 125 °C	–	12	–	mA
I _{GES}	V _{GE} = 20 V, V _{CE} = 0	–	–	1	μA
V _{CEsat}	I _C = 150 A } V _{GE} = 15 V;	–	2,5(3,1)	3(3,7)	V
V _{CEsat}	I _C = 200 A } T _j = 25 (125) °C	–	2,8(3,6)	–	V
g _{fs}	V _{CE} = 20 V, I _C = 150 A	95	–	–	S
C _{CHC}	per IGBT	–	–	700	pF
C _{ies}	V _{GE} = 0	–	10	13	nF
C _{oes}	V _{CE} = 25 V	–	1,5	2	nF
C _{res}	f = 1 MHz	–	0,8	1,2	nF
L _{CE}		–	–	20	nH
t _{d(on)}	V _{CC} = 600 V	–	220	400	ns
t _r	V _{GE} = -15 V / +15 V ³⁾	–	100	200	ns
t _{d(off)}	I _C = 150 A, ind. load	–	600	800	ns
t _f	R _{Gon} = R _{Goff} = 5,6 Ω	–	70	100	ns
E _{on} ⁵⁾	T _j = 125 °C	–	24	–	mWs
E _{off} ⁵⁾		–	17	–	mWs
Inverse Diode ⁸⁾					
V _F = V _{EC}	I _F = 150 A } V _{GE} = 0 V;	–	2,0(1,8)	2,5	V
V _F = V _{EC}	I _F = 200 A } T _j = 25 (125) °C	–	2,25(2,05)	–	V
V _{TO}	T _j = 125 °C	–	–	1,2	V
r _T	T _j = 125 °C	–	5	7	mΩ
I _{RRM}	I _F = 150 A; T _j = 25 (125) °C ²⁾	–	55(80)	–	A
Q _{rr}	I _F = 150 A; T _j = 25 (125) °C ²⁾	–	8(20)	–	μC
FWD of types "GAL", "GAR" "123D1" ^{8) 6)}					
V _F = V _{EC}	I _F = 150 A } V _{GE} = 0 V;	–	1,85(1,6)	2,2	V
V _F = V _{EC}	I _F = 200 A } T _j = 25 (125) °C	–	2,0(1,8)	–	V
V _{TO}	T _j = 125 °C	–	–	1,2	V
r _T	T _j = 125 °C	–	3	5,5	mΩ
I _{RRM}	I _F = 150 A; T _j = 25 (125) °C ²⁾	–	60(90)	–	A
Q _{rr}	I _F = 150 A; T _j = 25 (125) °C ²⁾	–	8(23)	–	μC
Thermal Characteristics					
R _{thjc}	per IGBT	–	–	0,09	°C/W
R _{thjc}	per diode / FWD "GAL; GAR"	–	–	0,25/0,18	°C/W
R _{thch}	per module	–	–	0,038	°C/W

1) T_{case} = 25 °C, unless otherwise specified

2) I_F = - I_C, V_R = 600 V, - di_F/dt = 1500 A/μs, V_{GE} = 0 V

3) Use V_{GEoff} = -5 ... -15 V

5) See fig. 2 + 3; R_{Goff} = 5,6 Ω

6) The free-wheeling diodes of the GAL and GAR types have the data of the inverse diodes of SKM 300 GA 123 D

7) V_{isol} = 4000 V_{rms} on request

8) CAL = Controlled Axial Lifetime Technology.

Cases and mech. data → B6-154

*) SEMİTRANS 4 → B6-168

SKM 200 GA 123 D...

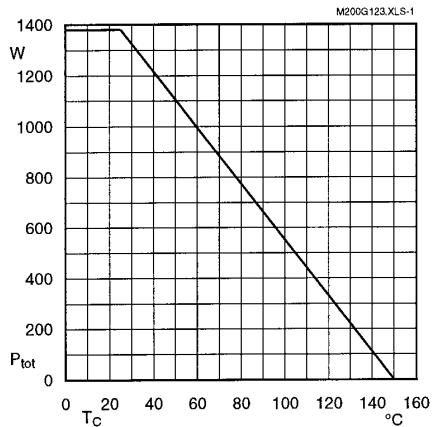


Fig. 1 Rated power dissipation $P_{tot} = f(T_C)$

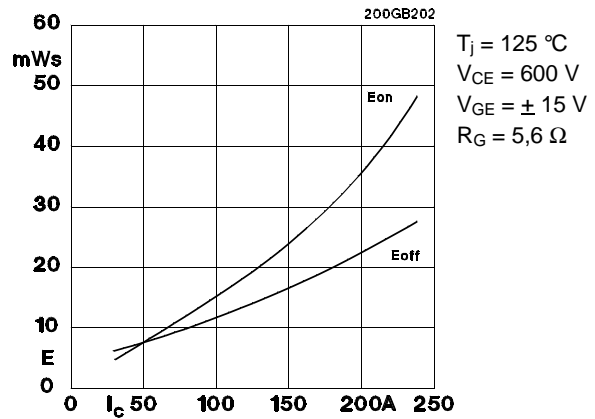


Fig. 2 Turn-on /-off energy $= f(I_C)$

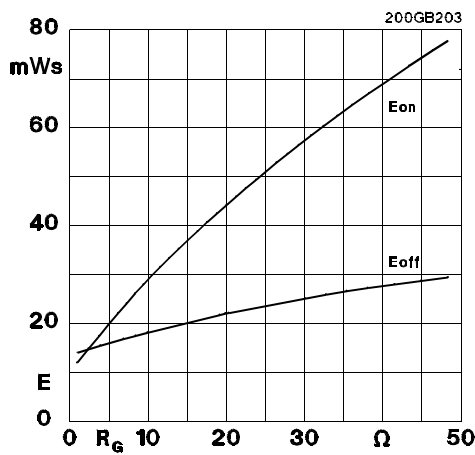


Fig. 3 Turn-on /-off energy $= f(R_G)$

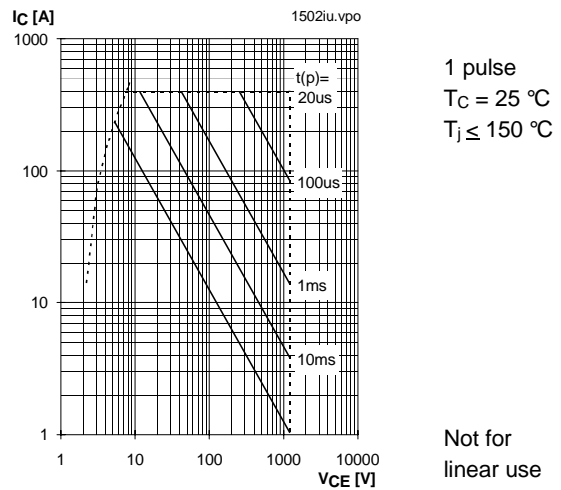


Fig. 4 Maximum safe operating area (SOA) $I_C = f(V_{CE})$

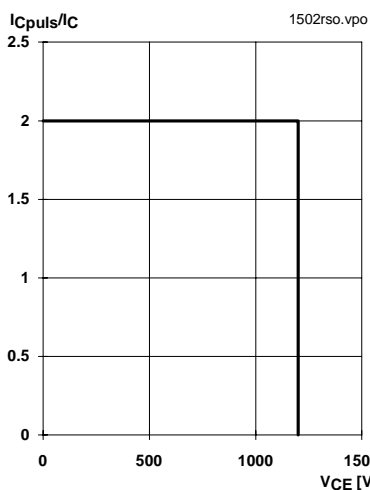


Fig. 5 Turn-off safe operating area (RBSOA)

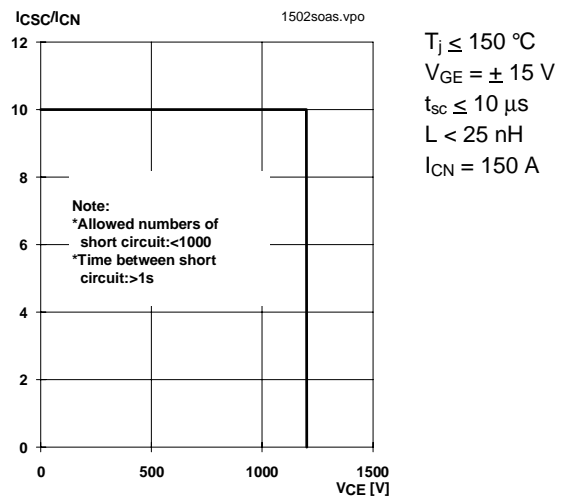


Fig. 6 Safe operating area at short circuit $I_C = f(V_{CE})$

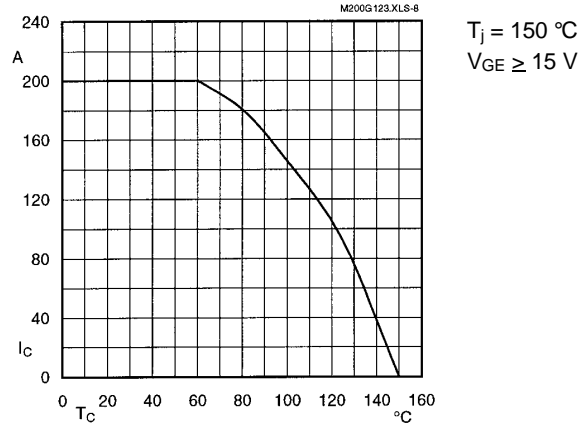


Fig. 8 Rated current vs. temperature $I_C = f(T_C)$

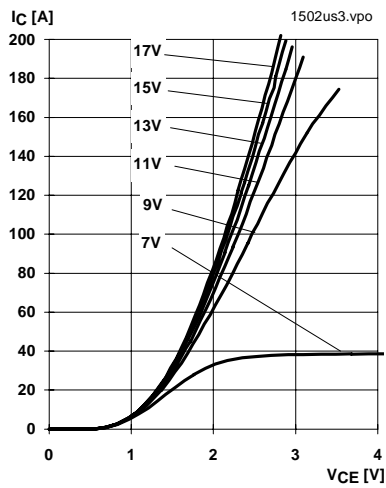


Fig. 9 Typ. output characteristic, $t_p = 80\text{ }\mu\text{s}$; $25\text{ }^\circ\text{C}$

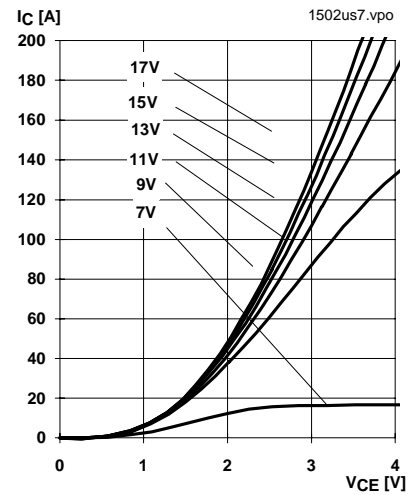


Fig. 10 Typ. output characteristic, $t_p = 80\text{ }\mu\text{s}$; $125\text{ }^\circ\text{C}$

$$P_{\text{cond}(t)} = V_{\text{CEsat}(t)} \cdot I_{\text{C}(t)}$$

$$V_{\text{CEsat}(t)} = V_{\text{CE(TO)(Tj)}} + r_{\text{CE(Tj)}} \cdot I_{\text{C}(t)}$$

$$V_{\text{CE(TO)(Tj)}} \leq 1,5 + 0,002 (T_j - 25) \text{ [V]}$$

$$\text{typ.: } r_{\text{CE(Tj)}} = 0,0066 + 0,000027 (T_j - 25) \text{ [\Omega]}$$

$$\text{max.: } r_{\text{CE(Tj)}} = 0,0100 + 0,000033 (T_j - 25) \text{ [\Omega]}$$

$$\text{valid for } V_{\text{GE}} = +15 \frac{+2}{-1} \text{ [V]; } I_{\text{C}} > 0,3 I_{\text{Cnom}}$$

Fig. 11 Saturation characteristic (IGBT)
Calculation elements and equations

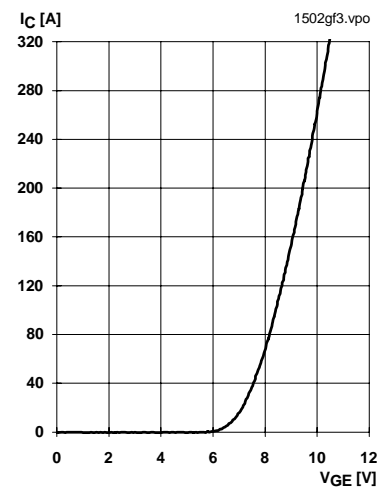


Fig. 12 Typ. transfer characteristic, $t_p = 80\text{ }\mu\text{s}$; $V_{\text{CE}} = 20\text{ V}$

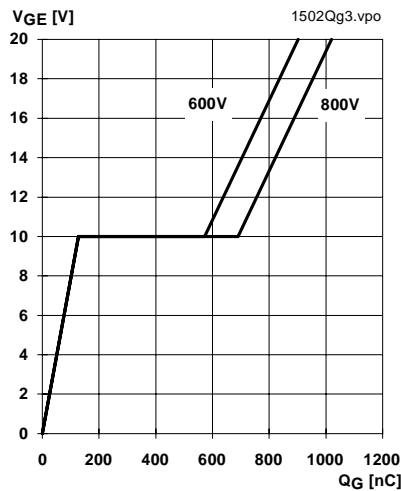
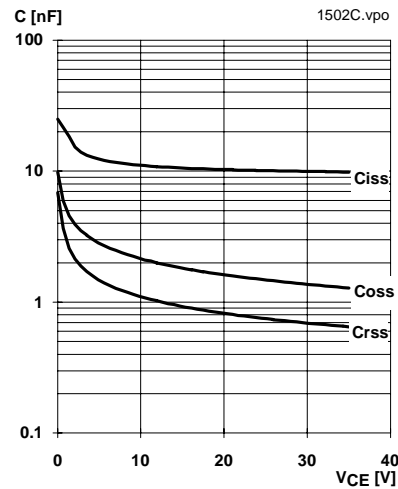


Fig. 13 Typ. gate charge characteristic

$I_{Cpuls} = 150 \text{ A}$



$V_{GE} = 0 \text{ V}$
 $f = 1 \text{ MHz}$

Fig. 14 Typ. capacitances vs. V_{CE}

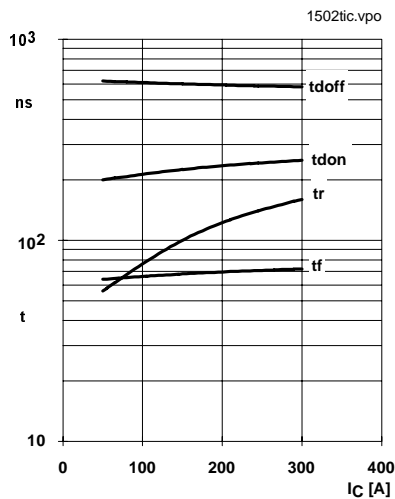
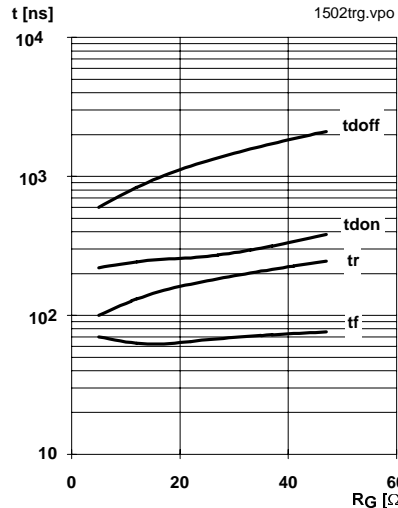


Fig. 15 Typ. switching times vs. I_C

$T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$
 $V_{CE} = 600 \text{ V}$
 $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$
 $R_{Gon} = 5,6 \text{ } \Omega$
 $R_{Goff} = 5,6 \text{ } \Omega$
induct. load



$T_j = 125 \text{ }^\circ\text{C}$
 $V_{CE} = 600 \text{ V}$
 $V_{GE} = \pm 15 \text{ V}$
 $I_C = 150 \text{ A}$
induct. load

Fig. 16 Typ. switching times vs. gate resistor R_G

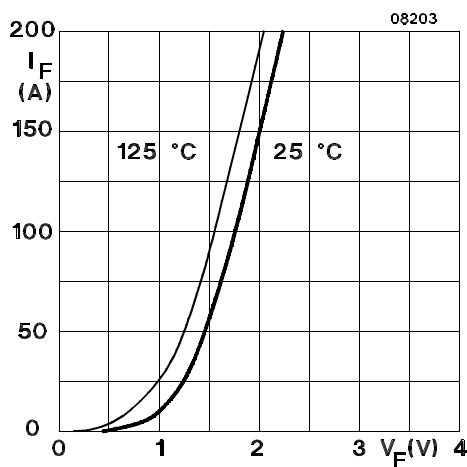


Fig. 17 Typ. CAL diode forward characteristic

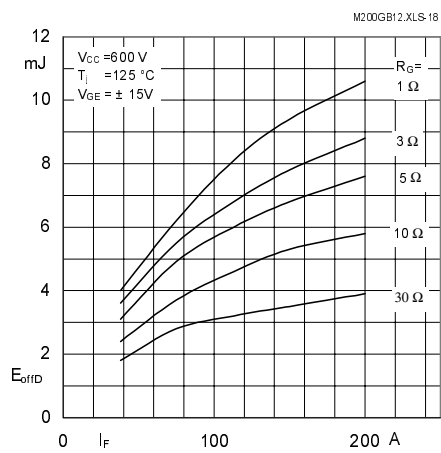


Fig. 18 Diode turn-off energy dissipation per pulse

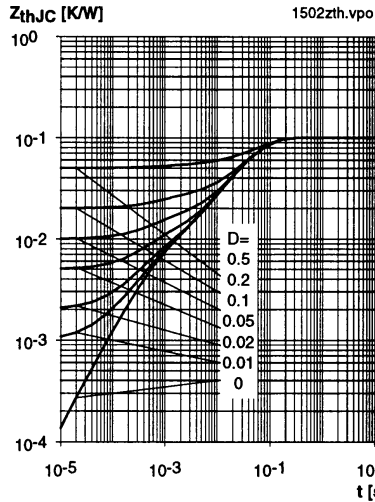


Fig. 19 Transient thermal impedance of IGBT
 $Z_{thJC} = f(t_p)$; $D = t_p / t_c = t_p \cdot f$

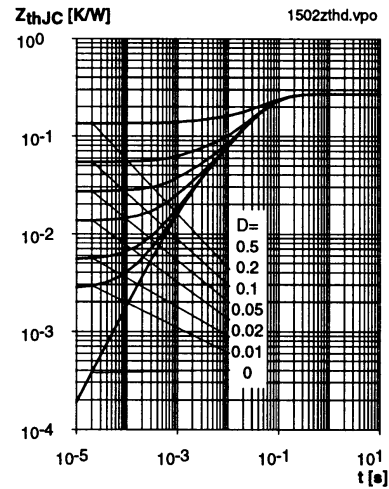


Fig. 20 Transient thermal impedance of inverse CAL diodes
 $Z_{thJC} = f(t_p)$; $D = t_p / t_c = t_p \cdot f$

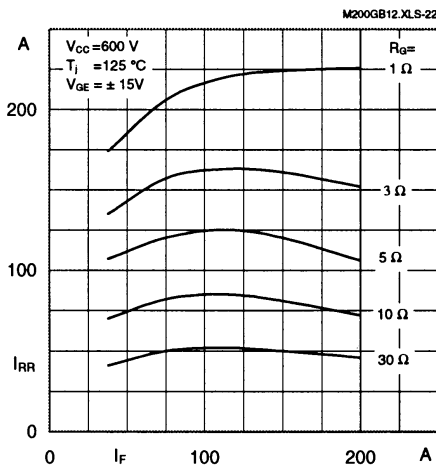


Fig. 22 Typ. CAL diode peak reverse recovery current $I_{RR} = f(I_F, R_G)$

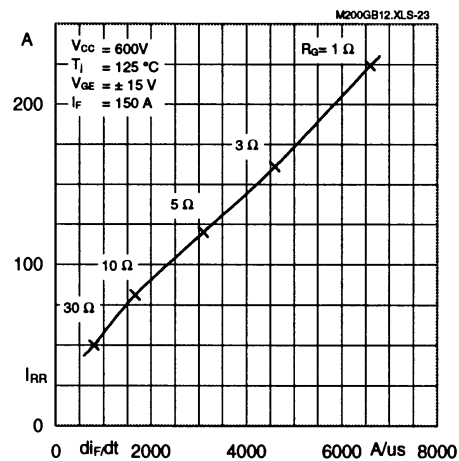


Fig. 23 Typ. CAL diode peak reverse recovery current $I_{RR} = f(di_F/dt)$

Typical Applications

include

- Switched mode power supplies
- DC servo and robot drives
- Inverters
- DC choppers (versions GAR; GAL)
- AC motor speed control
- Inductive heating
- UPS Uninterruptable power supplies
- General power switching applications

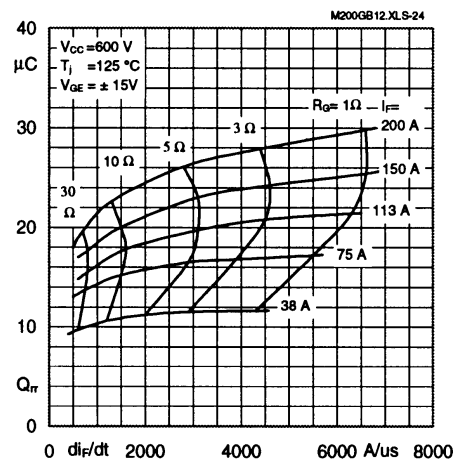


Fig. 24 Typ. CAL diode recovered charge $Q_{RR} = f(di/dt)$

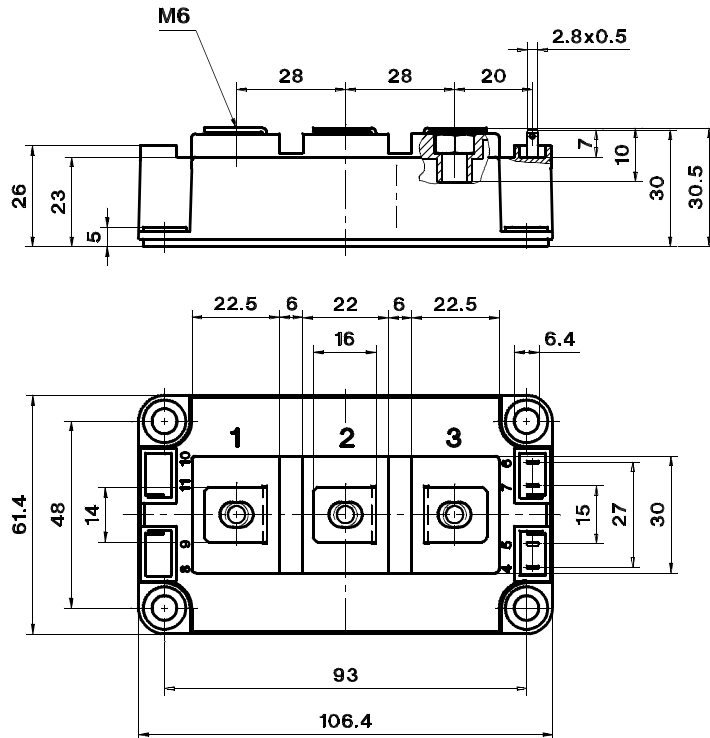
SKM 200 GA 123 D...

SEMITRANS 3

Case D 56
UL Recognized
File no. E 63 532

CASED56

SKM 150 GB 123 D
SKM 200 GB 123 D
SKM 200 GB 123 D1
SKM 200 GB 173 D
SKM 200 GB 173 D1

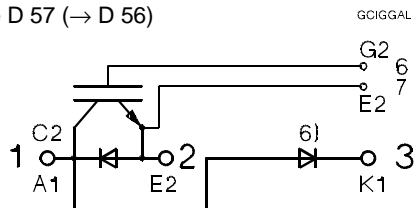


Dimensions in mm

SKM 150 GAL 123 D

SKM 200 GAL 123 D SKM 200 GAL 173 D

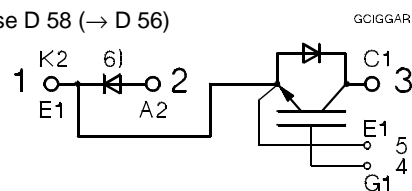
Case D 57 (→ D 56)



SKM 150 GAR 123 D

SKM 200 GAR 123 D

Case D 58 (→ D 56)



Case outline and circuit diagrams

For SKM 200 GA 123 D (SEMITRANS 4) → B 6 - 168

Mechanical Data		Values			Units
Symbol	Conditions	min.	typ.	max.	
M ₁	to heatsink, SI Units to heatsink, US Units	(M6) 3	—	5	Nm lb.in.
M ₂	for terminals, SI Units for terminals US Units	(M6) 2,5	—	5	Nm lb.in.
a		—	—	5x9,81	m/s ²
w		—	—	325	g

This is an electrostatic discharge sensitive device (ESDS). Please observe the international standard IEC 747-1, Chapter IX.

Three devices are supplied in one SEMIBOX A without mounting hardware, which can be ordered separately under Ident No. 33321100 (for 10 SEMITRANS 3). Larger packing units of 12 and 20 pieces are used if suitable
Accessories → B 6 - 4.
SEMIBOX → C - 1.

⁶⁾ Freewheeling diode → B 6 - 149, remark 6.