UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MÁRCIO DILERMANO BEZERRA GOMES

TOPOLOGIAS DO CONVERSOR NOVE CHAVES APLICADAS A REDES ELÉTRICAS DESBALANCEADAS A QUATRO FIOS

Recife
2019

MÁRCIO DILERMANO BEZERRA GOMES

TOPOLOGIAS DO CONVERSOR NOVE CHAVES APLICADAS A REDES ELÉTRICAS DESBALANCEADAS A QUATRO FIOS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Processamento de Energia.

Orientador: Profº. Dr. Marcelo Cabral Cavalcanti.

Coorientador: Profº. Dr. Leonardo Rodrigues Limongi.

Recife

2019

Catalogação na fonte
Bibliotecária Maria Luiza de Moura Ferreira, CRB-4 / 1469

G633t Gomes, Márcio Dilermano Bezerra.
Topologias do conversor nove chaves aplicadas a redes elétricas desbalanceadas a quatro fios / Márcio Dilermano Bezerra Gomes. - 2019.
160 folhas, il., tabs., abr., sigl. e símb.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Cabral Cavalcanti.
Coorientador: Profº. Dr. Leonardo Rodrigues Limongi.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2019.
Inclui Referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Conversores. 3. Eletrônica de potência. 4. Qualidade de energia. I. Cavalcanti, Marcelo Cabral (Orientador). II. Limongi, Leonardo Rodrigues (Coorientador). III. Título.

UFPE

621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2019-441

MÁRCIO DILERMANO BEZERRA GOMES

"TOPOLOGIAS DO CONVERSOR NOVE CHAVES APLICADAS A REDES ELÉTRICAS DESBALANCEADAS A QUATRO FIOS"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 26/08/2019.

BANCA EXAMINADORA

_____

Profº. Dr. Marcelo Cabral Cavalcanti (Orientador e Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº. Dr. Leonardo Rodrigues Limongi (Coorientador e Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº. Dr. Gustavo Medeiros de Souza Azevedo (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº. Dr. Fabricio Bradaschia (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

_____

Profº. Dr. Ricardo Lúcio de Araújo Ribeiro (Examinador Externo)
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

_____

Profº. Dr. José Renes Pinheiro (Examinador Externo)
Universidade Federal da Bahia

À minha família.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à minha família, especialmente meus pais Avani e Lucas, minhas irmãs Zoraide e Lílian e a minha noiva Candice que sempre me apoiaram ao longo desta jornada; a Deus; aos meus orientadores Dr. Marcelo Cavalcanti e Dr. Leonardo Limongi sem os quais este trabalho não teria sido realizado; aos membros da banca Dr. Ricardo Lúcio, Dr. Gustavo Azevedo, Dr. Fabrício Bradaschia e Dr. José Renes pela análise e preciosas sugestões para a melhoria deste trabalho; aos membros do GEPAE pela sua ajuda valiosa, especialmente aos meus amigos Anderson Lopes, Luiz Genu e Ezequiel Reis; à UFPE pela infraestrutura; aos meus colegas de trabalho do IFPE e IFRN por me apoiarem e compreenderem meus objetivos, e a todos que de alguma forma me apoiaram e compreenderam minhas ausências. A todos meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta duas topologias alternativas de condicionadores de energia baseadas no conversor de nove chaves. As topologias desenvolvidas aliam a característica de baixa tensão do barramento de corrente contínua de um filtro híbrido com uma quantidade reduzida de chaves semicondutoras, neste caso, doze e onze chaves. Ao longo do desenvolvimento deste trabalho também será mostrada uma estrutura com doze chaves com um filtro híbrido nos terminais paralelos do conversor. Ambas as topologias propostas não fazem uso de baterias, alimentando o barramento CC do conversor pela própria rede. A lógica de controle é simples e de fácil implementação, fazendo uso de controladores proporcional-ressonantes e filtros passivos implementados em software. Ambas as topologias foram simuladas digitalmente por meio do *software MATLAB*, para avaliação de desempenho das topologias propostas. Foi ainda realizada a implementação tanto da topologia de doze como a de onze chaves possibilitando o estudo das duas, além de evidenciar a aplicabilidade prática das propostas. A topologia de onze chaves pode ser interessante em aplicações onde o fator de custo é determinante.

Palavras-chave: Conversores. Eletrônica de potência. Qualidade de energia.

ABSTRACT

This work presents two alternative nine-switch converter based topology for a low cost power conditioner. The developed topology ally low voltage characteristic of direct current link of a hybrid filter with a reduced number of semiconductor switches, in this case, twelve and eleven switches. Throughout the development of this work also will be shown a structure witch twelve and eleven switches with a hybrid filter on the shunt terminals of converter. Both topologies use the grid for feeding the direct current link. The control is simple and easy to implement, using proportional- resonant controllers and passive filters implemented in software. Both topologies were modeled by using software MATLAB for performances evaluation of the proposed topologies. The implementation was made for twelve and eleven switch topologies enabling the study of both, in addition to evidence the practical applicability of proposals. The eleven switch topology may be interesting in applications where the cost factor is crucial.

Keywords: Converter. Power electronics. Power quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Curva de tolerância CBEMA. 28
Figura 2 – Curva de tolerância ITIC. 29
Figura 3 – Tipos de afundamentos de tensão. 30
Figura 4 – Esquema geral de um UPQC. 34
Figura 5 – Classificação UPQCs. 36
Figura 6 – Representação unifilar de um UPQC baseado em CSI. 37
Figura 7 – Representação unifilar de um UPQC baseado em VSI. 37
Figura 8 – UPQC 1P2W: configuração com duas pontes H (oito chaves). 38
Figura 9 – UPQC 1P2W: configuração de três braços (seis chaves). 39
Figura 10 – UPQC 1P2W: configuração de meia ponte (quatro chaves). 39
Figura 11 – UPQC para redes a três fios. 40
Figura 12 – UPQC 3P4W baseado em 2 capacitores divididos (12 chaves). 40
Figura 13 – UPQC 3P4W baseado na topologia do conversor paralelo com quatro braços (14 chaves). 41
Figura 14 – UPQC 3P4W baseado na topologia do conversor paralelo 3HB (18 chaves). 41
Figura 15 – UPQC 3P3W baseado na topologia nove chaves (9 chaves). 42
Figura 16 – Filtro híbrido com conexão ao neutro da rede elétrica. 46
Figura 17 – Modelo do filtro híbrido paralelo conectado a um sistema a quatro fios. . . . 47
Figura 18 – Circuito equivalente monofásico para o filtro híbrido. 47
Figura 19 – Circuitos para o caso em que não há harmônicos de tensão. 49
Figura 20 – Circuitos para o caso em que não há harmônicos de corrente. 50
Figura 21 – Filtro ativo paralelo: modelo de circuito equivalente. 53
Figura 22 – Circuitos equivalentes em eixo $\alpha\beta 0$ com e sem L_{cn}. 53
Figura 23 – Modelo Filtro Híbrido. 54
Figura 24 – Condicionador série a três fios. 57
Figura 25 – DVR com quarto braço. 59
Figura 26 – Representação unifilar do filtro série. 61
Figura 27 – Conversor nove chaves. 64
Figura 28 – Exemplo do compartilhamento da portadora. 64
Figura 29 – Exemplo dos sinais de gatilho para as chaves IGBT. (a) mesma frequência; (b) frequências distintas. 66
Figura 30 – UPQC com doze chaves. 67
Figura 31 – UPQC onze chaves. 68
Figura 32 – Diagrama do controle do filtro híbrido paralelo. 73
Figura 33 – Controle do filtro híbrido - UPQC onze chaves com braço adicional. 74
Figura 34 – Diagrama do controle para o lado série do conversor. 74

Figura 35 – Circuito para carregamento do barramento CC. 75
Figura 36 – Diagrama de blocos do PLL. 76
Figura 37 – Lógica de comando das intermediárias. 76
Figura 38 – Carga Utilizada nas simulações. 78
Figura 39 – Correntes da rede, carga e filtro com carga equilibrada - UPQC doze chaves. 79
Figura 40 – Correntes de neutro e carga equilibrada - UPQC doze chaves. 80
Figura 41 – Comportamento do barramento CC -UPQC doze chaves. 80
Figura 42 – Correntes de rede com carga desbalanceada - UPQC doze chaves. 81
Figura 43 – Correntes de neutro com carga desbalanceada - UPQC doze chaves. 82
Figura 44 – Comportamento das tensões da rede e da carga -UPQC doze chaves. 82
Figura 45 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 84
Figura 46 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 85
Figura 47 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 86
Figura 48 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 86
Figura 49 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 87
Figura 50 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC com doze chaves e filtro híbrido. 87
Figura 51 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC doze chaves 88
Figura 52 – Tensões na rede e na carga durante afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 88
Figura 53 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 89
Figura 54 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 89
Figura 55 – Tensão no barramento CC durante afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves 90
Figura 56 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão trifásico 40% de 30 ciclos - UPQC doze chaves. 91
Figura 57 – Tensão no barramento CC durante afundamento trifásico 40% de 30 ciclos - UPQC doze chaves. 91
Figura 58 – Tensões na rede e na carga durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves. 93

Figura 59 – Correntes da rede, carga e filtro durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves. 93
Figura 60 – Correntes de neutro rede, carga e filtro durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves. 94
Figura 61 – Tensão no barramento CC durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves. 94
Figura 62 – Tensões na rede e na carga durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves. 95
Figura 63 – Correntes da rede, carga e filtro durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves. 95
Figura 64 – Correntes de neutro rede, carga e filtro durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves. 96
Figura 65 – Tensão no barramento CC durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves. 96
Figura 66 – Correntes da rede, carga e filtro com carga equilibrada - UPQC onze chaves. 99
Figura 67 – Correntes de neutro com carga equilibrada - UPQC onze chaves. 99
Figura 68 – Comportamento do barramento CC em regime permanente -UPQC onze chaves. 100
Figura 69 – Comportamento das tensões da rede e da carga em regime permanente -UPQC onze chaves. 100
Figura 70 – Correntes de rede e carga desbalanceada - UPQC onze chaves. 101
Figura 71 – Correntes de rede e carga desbalanceada - UPQC onze chaves. 101
Figura 72 – Comportamento das tensões da rede e da carga -UPQC onze chaves. 102
Figura 73 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves. 103
Figura 74 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves. 104
Figura 75 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos -UPQC onze chaves. 105
Figura 76 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves. 105
Figura 77 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC onze chaves. 106
Figura 78 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC onze chaves. 107
Figura 79 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC com onze chaves. 108
Figura 80 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC onze chaves 108

Figura 81 – Tensões na rede e na carga durante afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves. 109
Figura 82 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves. 109
Figura 83 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves. 110
Figura 84 – Tensão no barramento CC durante afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves 110
Figura 85 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão trifásico 30% de 30 ciclos - UPQC onze chaves. 111
Figura 86 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 30 ciclos - UPQC onze chaves. 111
Figura 87 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 30 ciclos - UPQC onze chaves. 112
Figura 88 – Tensão no barramento CC durante afundamento trifásico 30% de 30 ciclos - UPQC onze chaves. 112
Figura 89 – Tensões na rede e na carga durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves. 113
Figura 90 – Correntes da rede, carga e filtro durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves. 113
Figura 91 – Correntes de neutro rede, carga e filtro durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves. 114
Figura 92 – Tensão no barramento CC durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves. 114
Figura 93 – Tensões na rede e na carga durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC onze chaves. 115
Figura 94 – Corrente de neutro rede, carga e filtro durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC onze chaves. 115
Figura 95 – Diagrama de blocos do condicionamento de sinais e PWM. 119
Figura 96 – Placa de condicionamento de sinais e PWM. 119
Figura 97 – Diagrama de conexões do conversor. 120
Figura 98 – Visão geral da montagem, conexões internas. 120
Figura 99 – Visão geral da montagem, conexões externas, transformadores e filtros. . . 121
Figura 100 – Visão geral da montagem, carga utilizada. 121
Figura 101 – Correntes da rede em regime permanente com carga equilibrada. 123
Figura 102 – Correntes de carga equilibradas. 123
Figura 103 – Correntes do filtro híbrido com carga equilibrada - UPQC doze chaves. . . 124
Figura 104 – Tensões na rede e na carga e no barramento CC - UPQC doze chaves. . . . 125

Figura 105 – Correntes da rede em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC doze chaves. 125
Figura 106 – Correntes da carga desequilibradas - UPQC doze chaves. 126
Figura 107 – Correntes do filtro em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC doze chaves. 126
Figura 108 – Tensões na rede e na carga na ocorrência de um afundamento de tensão monofásico de 30% por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 127
Figura 109 – Correntes da rede na ocorrência de um afundamento de tensão monofásico de 30% 4 ciclos - UPQC doze chaves. 128
Figura 110 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão monofásico de 50% por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 129
Figura 111 – Correntes da rede em um afundamento de tensão monofásico de 50% por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 129
Figura 112 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico de 30% 4 ciclos - UPQC doze chaves. 130
Figura 113 – Correntes da rede em um afundamento de tensão trifásico de 30% 4 ciclos - UPQC doze chaves. 130
Figura 114 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves. 131
Figura 115 – Correntes da rede em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves. 132
Figura 116 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão monofásica de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves. 133
Figura 117 – Correntes da rede em em uma elevação de tensão monofásica de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves. 133
Figura 118 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves. 134
Figura 119 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico desequilibrado de 10%, 20%, 30% por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 135
Figura 120 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão bifásica de 20% nas fases "A"e "B"4 ciclos - UPQC doze chaves. 136
Figura 121 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão monofásica de 30% na fase "A"por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 136
Figura 122 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão bifásico de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 137
Figura 123 – Correntes na rede em regime permanente com carga equilibrada UPQC onze chaves. 138
Figura 124 – Correntes de carga equilibradas. 139
Figura 125 – Correntes do filtro híbrido com carga equilibrada - UPQC onze chaves. . . 140

Figura 126 – Tensões na rede e na carga em regime permanente - UPQC onze chaves. . . 140
Figura 127 – Correntes na rede em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC onze chaves. 141
Figura 128 – Correntes na carga em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC onze chaves. 141
Figura 129 – Correntes no filtro em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC onze chaves. 142
Figura 130 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão monofásico de 30% - UPQC onze chaves. 143
Figura 131 – Correntes da rede em um afundamento de tensão monofásico de 30% - UPQC onze chaves. 143
Figura 132 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão monofásico de 50% 4 ciclos - UPQC onze chaves. 144
Figura 133 – Correntes da rede em um afundamento de tensão monofásico de 50% 4 ciclos - UPQC onze chaves. 145
Figura 134 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 145
Figura 135 – Correntes da rede em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 146
Figura 136 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves. 147
Figura 137 – Correntes da rede em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves. 147
Figura 138 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão monofásica de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves. 148
Figura 139 – Correntes da rede em em uma elevação de tensão monofásica de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves. 148
Figura 140 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão trifásica de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves. 149
Figura 141 – Correntes da rede em em uma elevação de tensão trifásica de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves. 150
Figura 142 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico desequilibrado de 10%, 20%, 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 151
Figura 143 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão bifásica de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 152
Figura 144 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão monofásica de 30% na fase "A"por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 152
Figura 145 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão bifásico de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – categorias e características dos fenômenos eletromagnéticos do sistema de potência. 25
Tabela 2 – Estados das chaves e das tensões de saída do UPQC nove chaves. 66
Tabela 3 – Parâmetros gerais de simulação dos UPQCs de doze e onze chaves. 79
Tabela 4 – Resultados de simulação correntes das fases em regime - carga equilibrada - UPQC doze chaves. 81
Tabela 5 – Resultados de simulação correntes das fases em regime permanente - carga desbalanceada - UPQC doze chaves. 83
Tabela 6 – Resultados de simulação afundamento de tensão monofásico 30% - UPQC doze chaves 83
Tabela 7 – Resultados de simulação afundamento de tensão monofásico 50% - UPQC doze chaves. 84
Tabela 8 – Resultados de simulação afundamento de tensão trifásico 30% - UPQC doze chaves 85
Tabela 9 – Resultados de simulação afundamento de tensão trifásico 40% - UPQC doze chaves 92
Tabela 10 – Resultados de simulação sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves 92
Tabela 11 – Resultados de simulação sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves 94
Tabela 12 – Resultados de simulação correntes em regime permanente - UPQC onze chaves. 98
Tabela 13 – Resultados de simulação correntes das fases em regime permanente - carga desequilibrada - UPQC onze chaves. 102
Tabela 14 – Resultados de simulação afundamento de tensão monofásico 30% - UPQC onze chaves 103
Tabela 15 – Resultados de simulação afundamento de tensão monofásico 50% - UPQC onze chaves. 104
Tabela 16 – Resultados de simulação afundamento de tensão trifásico 30% - UPQC onze chaves 106
Tabela 17 – Resultados de simulação afundamento de tensão trifásico 30% - UPQC onze chaves 107
Tabela 18 – Resultados de simulação sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves 110
Tabela 19 – Resultados de simulação sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC onze chaves 112
Tabela 20 – Comparativo de desempenho entre as topologias. 116

Tabela 21 – Parâmetros gerais para ensaios dos UPQCs de Doze e Onze chaves. 122
Tabela 22 – Resultados experimentais correntes das fases em regime com carga equilibrada - UPQC doze chaves. 124
Tabela 23 – Resultados experimentais correntes das fases em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC doze chaves. 127
Tabela 24 – Resultados experimentais de um afundamento de tensão monofásico de 30% por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 128
Tabela 25 – Resultados experimentais de um afundamento de tensão monofásico de 50% por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 128
Tabela 26 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico 30% 4 ciclos - UPQC doze chaves 131
Tabela 27 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves 132
Tabela 28 – Resultados experimentais sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves. 132
Tabela 29 – Resultados experimentais sobretensão trifásica de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves. 134
Tabela 30 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico desequilibrado de 10%, 20%, 30% por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 135
Tabela 31 – Resultados experimentais elevação de tensão bifásica de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 135
Tabela 32 – Resultados experimentais elevação de tensão monofásica de 30% na fase "A"por 4 ciclos - UPQC doze chaves. 137
Tabela 33 – Resultados experimentais afundamento de tensão bifásico de 20% nas fases "A"e "B- UPQC doze chaves 137
Tabela 34 – Resultados experimentais correntes das fases em regime com carga equilibrada - UPQC onze chaves. 139
Tabela 35 – Resultados experimentais com correntes das fases em regime com carga desequilibrada - UPQC onze chaves. 142
Tabela 36 – Resultados experimentais - afundamento de tensão monofásico 30% - UPQC onze chaves 144
Tabela 37 – Resultados experimentais - afundamento de tensão monofásico 50% 4 ciclos - UPQC onze chaves. 144
Tabela 38 – Resultados experimentais - afundamento de tensão trifásico 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 146
Tabela 39 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves. 146
Tabela 40 – Resultados experimentais sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves 149

Tabela 41 – Resultados experimentais sobretensão trifásica de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves. 149
Tabela 42 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico desequilibrado de 10%, 20%, 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 150
Tabela 43 – Resultados experimentais elevação de tensão bifásica de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 151
Tabela 44 – Resultados experimentais elevação de tensão monofásica de 30% na fase "A"por 4 ciclos - UPQC onze chaves. 151
Tabela 45 – Resultados experimentais afundamento de tensão bifásico de 20% nas fases "A"e "B- UPQC onze chaves. 153
Tabela 46 – Comparativo de desempenho entre as topologias - Correntes. 154
Tabela 47 – Comparativo de desempenho entre as topologias - Tensões. 155

LISTA DE ABRIATURAS E SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
PWM	Modulação por largura de pulsos - *pulse width modulation*
PI	Proporcional-Integral
PR	Proporcional-Ressonante
ANSI	*American National Standards Institute*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
APF	*Active Power Filter* - Filtro Ativo de Potência
DVR	*Dynamic Voltage Restorer* - Restaurador Dinâmico de Tensão
UPQC	*Unified Power Quality Conditioner* - Condicionador Unificado de Qualidade de Energia

LISTA DE SÍMBOLOS

V_{CC}	Tensão no barramento CC do conversor
v_{Sa}	Tensão na fase "A"da rede
v_{Sb}	Tensão na fase "B"da rede
v_{Sc}	Tensão na fase "C"da rede
v_{La}	Tensão na fase "A"da carga
v_{Lb}	Tensão na fase "B"da carga
v_{Lc}	Tensão na fase "C"da carga
v_{inv1a}	Tensão sintetizada na unidade *top* do conversor no braço da fase "A"
v_{inv1b}	Tensão sintetizada na unidade *top* do conversor no braço da fase "B"
v_{inv1c}	Tensão sintetizada na unidade *top* do conversor no braço da fase "C"
v_{inv1n}	Tensão sintetizada na unidade *top* do conversor no braço de neutro
v_{inv2a}	Tensão sintetizada na unidade *bottom* do conversor no braço da fase "A"
v_{inv2b}	Tensão sintetizada na unidade *bottom* do conversor no braço da fase "B"
v_{inv2c}	Tensão sintetizada na unidade *bottom* do conversor no braço da fase "C"
v_{inv2n}	Tensão sintetizada na unidade *bottom* do conversor no braço de neutro
v_{inja}	Tensão injetada pela unidade *bottom* do conversor através do transformador série na fase "A"
v_{injb}	Tensão injetada pela unidade *bottom* do conversor através do transformador série na fase "B"
v_{injc}	Tensão injetada pela unidade *bottom* do conversor através do transformador série na fase "C"
L_{C1}	Indutância do filtro passivo da unidade *top* do conversor
C_{C1}	Capacitância do filtro passivo da unidade *top* do conversor
r_{C1}	Resistência equivalente enrolamento do indutor do filtro passivo da unidade *top* do conversor

i_{Sa}	Corrente na fase "A"da rede
i_{Sb}	Corrente na fase "B"da rede
i_{Sc}	Corrente na fase "C"da rede
i_{Sn}	Corrente de neutro da rede
i_{La}	Corrente na fase "A"da carga
i_{Lb}	Corrente na fase "B"da carga
i_{Lc}	Corrente na fase "C"da carga
i_{Ln}	Corrente de neutro da carga
i_{C1a}	Corrente injetada pela unidade *top* do conversor na fase "A"
i_{C1b}	Corrente injetada pela unidade *top* do conversor na fase "B"
i_{C1c}	Corrente injetada pela unidade *top* do conversor na fase "C"
i_{C1n}	Corrente injetada pela unidade *top* do conversor no neutro
i_{C2a}	Corrente injetada pela unidade *bottom* do conversor na fase "A"
i_{C2b}	Corrente injetada pela unidade *bottom* do conversor na fase "B"
i_{C2c}	Corrente injetada pela unidade *bottom* do conversor na fase "C"
i_{C2n}	Corrente injetada pela unidade *bottom* do conversor no neutro
i_{fa}	Corrente no ramo do capacitor de filtragem da unidade *bottom* do conversor fase "A"
i_{fb}	Corrente no ramo do capacitor de filtragem da unidade *bottom* do conversor fase "B"
i_{fc}	Corrente no ramo do capacitor de filtragem da unidade *bottom* do conversor fase "C"
L_{C2}	Indutância do filtro passivo da unidade *bottom* do conversor
C_{C2}	Capacitância do filtro passivo da unidade *bottom* do conversor
r_{C2}	Resistência equivalente enrolamento do indutor do filtro passivo da unidade *bottom* do conversor
C_{CC}	Capacitância do barramento CC do conversor

L_S	Indutância da rede
r_S	Resistência da rede
Z_S	Impedância da rede
L_L	Indutância da carga
C_L	Capacitância da carga
r_L	Resistência da carga
Z_L	Impedância da carga
n	Relação de espiras dos transformadores
s	Frequência de Laplace
ω	Frequência em radianos por segundo
K_i	Ganho integral do controle do barramento CC
K_p	Ganho proporcional do controle do barramento CC
M_b	Índice de modulação da unidade *bottom*
M_t	Índice de modulação da unidade *top*
V_{capmin}	Tensão mínima nos terminais do barramento CC
E_{cap}	Energia armazenada no barramento CC do conversor

SUMÁRIO

1	**INTRODUÇÃO**	**23**
1.1	**Terminologia em Qualidade de Energia**	**24**
1.1.1	Variações de Tensão de Longa Duração	25
1.1.2	Variações de Tensão de Curta Duração	26
1.1.3	Curvas de Suportabilidade CBEMA e ITIC	28
1.2	**Consequências dos Problemas de Qualidade de Energia**	**29**
1.3	**Definição de UPQC**	**32**
1.4	**Estado da Arte em UPQC**	**35**
1.5	**Objetivos**	**42**
1.6	**Organização dos Capítulos**	**43**
2	**MODELAGEM MATEMÁTICA DOS CONDICIONADORES PARALELO E SÉRIE**	**44**
2.1	**Compensador Paralelo Baseado no Filtro Híbrido com Quatro Braços**	**45**
2.1.1	Princípio de Funcionamento	45
2.1.2	Modelagem Matemática	50
2.1.3	Modelo do Compensador Paralelo no Domínio da Frequência	54
2.2	**Princípio de Funcionamento e Modelagem Matemática**	**56**
2.3	**Modelo do Filtro Ativo Série**	**60**
2.4	**Conclusão**	**61**
3	**NOVAS ESTRUTURAS DE UPQC A QUATRO FIOS BASEADAS NO CONVERSOR NOVE CHAVES**	**63**
3.1	**Princípio de Funcionamento do Conversor Nove Chaves**	**63**
3.2	**Adaptações do Conversor Nove Chaves Aplicadas a UPQC a Quatro Fios**	**66**
3.2.1	Projeto dos Componentes	68
3.2.2	Projeto dos Controladores	70
3.2.3	Técnicas de PWM	75
3.3	**Resultados de Simulação do UPQC Doze Chaves**	**77**
3.4	**Resultados de Simulação do UPQC Onze Chaves**	**97**
3.5	**Conclusões**	**116**
4	**RESULTADOS EXPERIMENTAIS**	**118**
4.1	**Descrição do Protótipo**	**118**
4.2	**Resultados Experimentais do UPQC Doze Chaves**	**122**
4.3	**Resultados Experimentais do UPQC Onze Chaves**	**138**

4.4 Conclusões 154

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS 156
5.1 Trabalhos Futuros 157

REFERÊNCIAS 158

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, os processos industriais dependem fortemente da qualidade com que a energia elétrica é fornecida para que possam ser executados de modo satisfatório. Isso se deve ao elevado nível de automação alcançado com o uso de microcontroladores, que normalmente são cargas sensíveis a perturbações elétricas. Por outro lado, o aumento expressivo de cargas não lineares, como retificadores a diodos e tiristores, ligadas ao sistema elétrico contribui para o aumento da poluição por conteúdos harmônicos na rede, afetando as cargas sensíveis (FRANCO, 2016).

A qualidade da energia elétrica tem se tornado cada vez mais importante para os clientes da rede elétrica, fazendo que este tema se tornasse um dos mais relevantes da indústria de energia. neste contexto, identificam-se quatro razões para o incremento da preocupação com esta questão, são elas (DUGAN et al., 2003):

1. As cargas elétricas, com controles baseados em microprocessadores e dispositivos eletrônicos de potência, são mais sensíveis a variações de qualidade de energia do que os equipamentos usados no passado;
2. A crescente ênfase no controle de velocidade e torque no acionamento dos motores tem levado ao uso cada vez maior de dispositivos de eletrônica de potência, resultando no aumento dos níveis de harmônicos nos sistemas de energia;
3. Os usuários da rede têm uma maior conscientização sobre problemas de qualidade de energia;
4. Processos integrados significam que a falha de qualquer componente acarreta consequências maiores.

O aumento da produtividade e eficiência dos clientes do sistema elétrico por meio da automatização de processos é ponto de convergência dos quatro tópicos anteriores. Por outro lado, as concessionárias de energia incentivam esse esforço, porque o uso de cargas mais eficientes ajuda a adiar grandes investimentos em subestações e geração, reduzindo custos tanto de clientes como das concessionárias (DUGAN et al., 2003). A ênfase no aumento da eficiência energética conduziu ao uso intensivo da eletrônica de potência e isso aumentou a quantidade de harmônicos injetados na rede elétrica. Por exemplo, o uso as fontes chaveadas em substituição às antigas fontes lineares melhorou o rendimento dos equipamentos, mas introduziu a injeção de harmônicos no sistema elétrico.

Segundo Dugan, um problema de qualidade de energia pode ser definido como sendo um problema qualquer manifestado nas tensões, correntes ou frequência que resultem em falha de operação do equipamento do usuário da rede elétrica (DUGAN et al., 2003).

Diante dos diversos problemas de qualidade de energia, diversas soluções, passiva e ativas, começaram a ser desenvolvidas, acompanhado disso, a evolução da eletrônica de potência e dos microprocessadores tornaram possível a utilização da eletrônica de potência para mitigar alguns dos principais problemas de qualidade de energia de forma mais eficaz. Esta tese irá focar nos condicionadores de qualidade de energia unificados (*Unified Power Quality Conditioner* - UPQC). O UPQC é um condicionador onde de funcionalidades integradas para alcançar um controle superior sobre vários problemas de qualidade de energia simultaneamente.

1.1 Terminologia em Qualidade de Energia

As agências reguladoras de energia elétrica são as responsáveis por definir os indicadores que determinam se o sistema elétrico está funcionando dentro do que é considerado satisfatório em termos de qualidade da energia. Logo surgiu a necessidade de desenvolver uma terminologia específica para este tema, de modo a descrever adequadamente os fenômenos da rede elétrica, por outro lado (DUGAN et al., 2003).

Diante desta necessidade o IEC estudou e montou uma terminologia específica para o setor. Por outro lado, a indústria de energia dos EUA também desenvolveu práticas recomendadas para monitorar a qualidade da energia elétrica e acrescentaram alguns termos à terminologia da IEC. *Sag* é usado como sinônimo para o *Dip* do termo IEC. A categoria de variações de curta duração é usada para se referir a quedas de tensão e interrupções curtas. O termo *Swell* é introduzido como um inverso ao *Sag (Dip)*. A categoria de variação de longa duração foi adicionada para lidar com os limites estabelecidos pelo *American National Standards Institute* (ANSI) (DUGAN et al., 2003).

No Brasil, existe o documento da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) intitulado de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) que, entre outras coisas, estabelece nacionalmente a terminologia relativa à qualidade de energia elétrica. Este documento foi publicado inicialmente no ano de 2008 e depois revisado no ano de 2010.

A Tabela 1 fornece informações relativas ao conteúdo espectral típico, duração e magnitude, quando apropriado, para cada categoria de fenômenos eletromagnéticos. As categorias da tabela, quando usadas com os termos mencionados anteriormente, fornecem um meio de descrever claramente uma perturbação eletromagnética. As categorias e suas descrições são importantes para poder classificar os resultados das medições e descrever os fenômenos eletromagnéticos que podem causar problemas de qualidade de energia (DUGAN et al., 2003).

Tabela 1 – categorias e características dos fenômenos eletromagnéticos do sistema de potência.

Categoria	Espectro típico Conteúdo	Duração Típica	Magnitude típica da tensão
1.0 Transientes			
1.1 Impulsivo			
1.1.1 Nanossegundo	5-ns	<50ns	
1.1.2 Microssegundo	1-μs	50 ns-1ms	
1.1.3 Milissegundo	0,1-ms	> 1 ms	
1.2 Oscilatório			
1.2.1 Baixa frequência	<5 kHZ	0,3-50 ms	
1.2.2 Média frequência	5-500 kHZ	20μs	
1.2.3 Alta frequência	0,5-5 MHz	5μs	
2.0 Variações de curta duração			
2.1 Instantâneos			
2.1.1 Interrupção		0,5-30 ciclos	<0,1 pu
2.1.2 *Sag* (afundamento)		0,5-30 ciclos	0,1-0,9 pu
2.1.3 *Swell* (sobretensão)		0,5-30 ciclos	1,1-1,8 pu
2.2 Momentâneos			
2.2.1 Interrupção		30 ciclos-3s	<0,1 pu
2.2.2 *Sag* (afundamento)		30 ciclos-3s	0,1-0,9 pu
2.2.3 *Swell* (sobretensão)		30 ciclos-3s	1,1-1,4 pu
2.3 Temporários			
2.3.1 Interrupção		3s-1min	<0,1 pu
2.3.2 *Sag* (afundamento)		3s-1min	0,1-0,9 pu
2.3.3 *Swell* (sobretensão)		3s-1min	1,1-1,2 pu
3.0 Variações de longa duração			
3.1 Interrupção, continuada		>1min	0,0 pu
3.2 Subtensão		>1min	0,8-0,9 pu
3.3 Sobretensão		>1min	1,1-1,2 pu
4.0 Desequilíbrio de tensão		Regime permanente	0,5-2%
5.0 Distorção da forma de onda			
5.1 *Offset* CC		Regime permanente	0-0,1%
5.2 Harmônicos	0-100º harmônico	Regime permanente	0-20%
5.3 Inter-harmônicos	0-6 kHz	Regime permanente	0-2%
5.4 Notching		Regime permanente	
5.5 Noise (ruído)	Banda completa	Regime permanente	0-1%
6.0 Flutuações de tensão	<25 Hz	Intermitente	0,1-7%
			0,2-2 Pst
7.0 Variações de frequência de energia		<10s	

Nota: s = segundo, ns = nanossegundo, μs = microssegundo, ms = milissegundos, kHz = kilohertz, MHz = megahetz, min = minuto, pu = por unidade.

Fonte:Dugan et al. (2003).

1.1.1 Variações de Tensão de Longa Duração

Variações de longa duração abrangem variações em valores eficazes na frequência fundamental por mais de 1 minuto. A norma do *American National Standards Institute* (ANSI) C84.1 especifica as tolerâncias de tensão em regime permanente esperadas em um sistema de energia. Uma variação de tensão é considerada de longa duração quando os limites ANSI são excedidos por mais de 1 minuto, estas podem ser sobretensões ou subtensões. Sobretensões e subtensões geralmente não são o resultado de falhas do sistema, mas são causadas por variações

de carga no sistema e operações de comutação e manobra do sistema (DUGAN et al., 2003).

1.1.2 Variações de Tensão de Curta Duração

As variações de tensão de curta duração (VTCD) são as principais causas de parada de processos industriais, devido à grande quantidade de causas que podem originá-los. Esta categoria engloba a categoria IEC de quedas de tensão (*Dips*) e interrupções curtas. Cada tipo de variação pode ser designada como instantânea, momentânea ou temporária, dependendo de sua duração, conforme definido na Tabela 1. No módulo de qualidade de energia do PRODIST da ANEEL as variação de tensão são classificadas como na definição dada pelo IEC.

As VTCD (variações de tensão de curta duração) são desvios significativos no valor eficaz da tensão em curtos intervalos de tempo. Os dois tipos de VTCD são o afundamento de tensão e a elevação de tensão. Variações de tensão de curta duração são causadas devido à ocorrência de faltas, energização de cargas que requerem grandes correntes de partida ou pontos com conexões mal feitas. Dependendo da localização da falta e das condições do sistema, a falha pode causar quedas de tensão temporárias (*sags*), aumentos de tensão (*swells*) ou uma perda total de tensão (interrupções) (DUGAN et al., 2003).

Sags (dips) - Um afundamento é uma diminuição entre 0,1 e 0,9 p.u. na tensão eficaz na frequência fundamental para durações de 0,5 ciclo a 1 minuto. Neste trabalho, quando não especificado de outra forma, um afundamento de 20% será considerado um evento durante qual a tensão eficaz diminuiu 20 por cento, para 0,8 p.u. O nível de tensão nominal ou de base também deve ser especificado. As subtensões que duram menos de meio ciclo não podem ser caracterizadas efetivamente por uma mudança no valor eficaz do valor da frequência fundamental. Portanto, esses eventos são considerados transitórios. As subtensões que duram mais de 1 min normalmente podem ser controladas por um equipamento de regulação de tensão e podem estar associadas a outras causas que não as falhas do sistema. Portanto, são classificadas como variações de longa duração (DUGAN et al., 2003).

Swells - Uma elevação de tensão é definida como um aumento entre 1,1 e 1,8 p.u. na tensão eficaz ou corrente na frequência fundamental para durações de 0,5 ciclo a 1 min.

Assim como os afundamento, as elevações de tensão geralmente estão associadas a condições de falha da rede, entretanto elas não são tão comuns quanto os afundamentos de tensão. Uma maneira de ocorrer Uma elevação de tensão é a subida temporária da tensão nas fases não avariadas durante uma falta fase-terra. Os aumentos também podem ser causados pelo desligamento de uma carga grande ou pela energização de um grande banco de capacitores (DUGAN et al., 2003).

As elevações de tensão são caracterizadas por sua magnitude (valor efetivo) e duração. A gravidade de um aumento de tensão durante uma condição de falha é uma função da localização da falta, impedância do sistema e aterramento. Em um sistema não aterrado, com uma impedância

infinita de sequência-zero, as tensões linha-terra nas fases não aterradas serão de 1,73 p.u. durante uma condição de falta fase-neutro. Perto da subestação em um sistema aterrado, haverá pouca ou nenhuma elevação de tensão nas fases que não sofreram a falta, pois o transformador da subestação é usualmente conectado em delta-estrela, fornecendo um caminho de sequência-zero de baixa impedância para a corrente de falta. Falhas em diferentes pontos ao longo de alimentadores a quatro fios têm graus variados de aumento de tensão nas fases sem falha (DUGAN et al., 2003).

Desequilíbrio de tensão O desequilíbrio de tensão (também chamado de desbalanço de tensão) pode ser definido como o desvio máximo da média das tensões trifásicas, dividido pela média das tensões trifásicas, expressas em porcentagem. A fonte principal de desequilíbrios de tensão são cargas monofásicas em um circuito trifásico. O desequilíbrio de tensão também pode ser o resultado de fusíveis queimados em uma fase de um banco de capacitores trifásico (DUGAN et al., 2003).

Distorção de forma de onda A distorção de forma de onda é definida como uma deformação de regime permanente de uma onda senoidal ideal na frequência fundamental, caracterizada principalmente pelo conteúdo espectral (DUGAN et al., 2003).

Existem cinco principais tipos de distorção de forma de onda :

1. ***Offset* CC** - A presença de uma tensão ou corrente CC em um sistema de energia CA é denominada *offset* CC. A corrente CC em redes CA pode ter um efeito prejudicial, polarizando os núcleos do transformadores fazendo que saturem em operação normal. Isso causa aquecimento adicional e diminuição da vida útil dos equipamentos (DUGAN et al., 2003).

2. **Harmônicos** - Harmônicos são tensões ou correntes senoidais que possuem frequências múltiplas inteiras da frequência na qual o sistema de alimentação é projetado para operar (denominado frequência fundamental; geralmente 50 ou 60 Hz). Formas de onda periodicamente distorcidas podem ser decompostas em uma soma da frequência fundamental e os harmônicos.

   A distorção harmônica se origina das características não-lineares de dispositivos e cargas no sistema de potência. Os níveis de distorção harmônica são descritos pelo espectro harmônico completo com magnitudes e ângulos de fase de cada componente harmônico individual. Também é comum usar uma única quantidade, a distorção harmônica total (*total harmonic distortion* - THD), como uma medida do valor efetivo da distorção harmônica.

3. **Inter-harmônicos** - Tensões ou correntes com componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência na qual a rede elétrica é projetada para operar (50 ou 60 Hz) são chamados de inter-harmônicas.

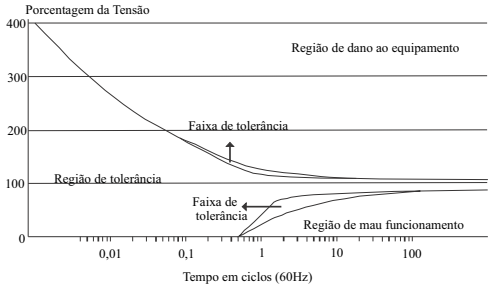
4. ***Notching*** - É um distúrbio de tensão periódico causado pela operação de dispositivos eletrônicos quando a corrente é comutada de uma fase para outra.

5. **Ruído** - É definido como sendo sinais elétricos indesejados com conteúdo espectral de banda larga inferior a 200 kHz sobrepostos à tensão ou corrente do sistema de potência.

1.1.3 Curvas de Suportabilidade CBEMA e ITIC

Uma das exibições de dados mais utilizadas para representar a qualidade da energia é a curva CBEMA (*Computer Business Equipment Manufacturers Association* - Associação de Fabricantes de Equipamentos para Negócios em Computadores). Uma parte da curva adaptada da Norma IEEE 4469 que normalmente se usa na análise dos resultados do monitoramento da qualidade de energia é mostrada na Figura 1. Essa curva foi originalmente desenvolvida pela CBEMA para descrever a tolerância de equipamentos de computadores de grande porte à magnitude e duração das variações de tensão no sistema de potência. Embora muitos computadores modernos tenham maior tolerância do que esta, a curva se tornou um alvo de projeto padrão para equipamentos sensíveis a serem aplicados no sistema de energia e um formato comum para relatar dados de variação de qualidade de energia.

Figura 1 – Curva de tolerância CBEMA.

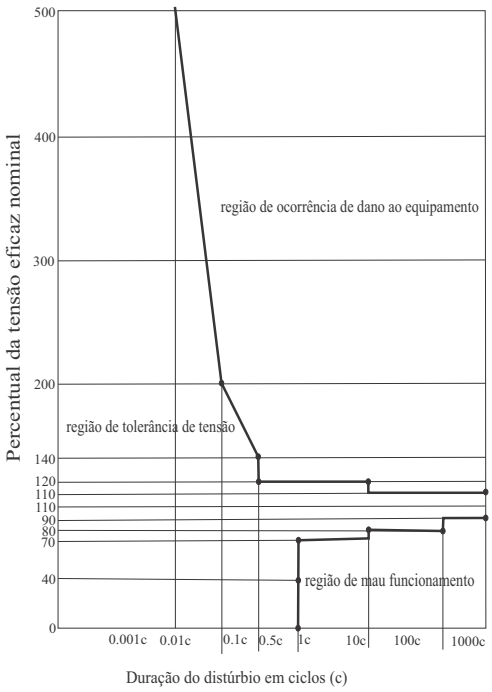


Fonte:ITI (2000).

Os eixos representam a magnitude e a duração do evento. Pontos abaixo da envoltória podem para causar a paralisação do equipamento devido à falta de energia. Presume-se que os pontos acima do envelope causem outros defeitos, como falha de isolação, desarme de sobretensão e superexcitação. A curva superior é definida até o ciclo de 0,001, onde ela tem um valor de cerca de 375% de tensão. Normalmente, empregamos a curva apenas a partir do ciclo 0,1 e superior devido a limitações nos instrumentos de monitoramento da qualidade de energia e diferenças de opinião sobre a definição dos valores de magnitude no período de tempo do subciclo. A organização CBEMA foi substituída pelo ITIC (*Information Technology Industry Council* - Conselho da Indústria de Tecnologia da Informação) e foi desenvolvida uma curva modificada que se aplica especificamente a equipamentos de computador comuns de 120 V (ver Figura 2). O conceito é semelhante à curva CBEMA. Embora desenvolvida para equipamentos de informática de 120V, a curva foi aplicada à avaliação geral da qualidade de energia, como

sua curva antecessora. Ambas as curvas são usadas como referência neste trabalho para definir a capacidade de atenuação de pertubações de tensão da topologia desenvolvida (GOMES, 2014,) (DUGAN et al., 2003).

Figura 2 – Curva de tolerância ITIC.



Fonte:ITI (2000).

1.2 Consequências dos Problemas de Qualidade de Energia

Embora as aplicações com dispositivos de eletrônica de potência permitam o controle e o ajuste de todos os circuitos de energia para desempenho máximo, custo-benefício e eficiência energética aprimorada, elas aumentam a distorção e os distúrbios nos sinais de corrente e tensão na rede elétrica. Isso ocorre porque os dispositivos baseados em eletrônica de potência absorvem correntes harmônicas da rede elétrica, gerando, por consequência, tensão harmônica, pois as correntes harmônicas causam quedas de tensão não-lineares através da impedância da rede elétrica. A presença de componentes de corrente e tensão em frequências diferentes da fundamental, e também as sequências negativa e zero em sistemas trifásicos são prejudiciais aos equipamentos das concessionárias de energia e dos consumidores. A distorção harmônica causa vários problemas na rede de energia e nos produtos de consumo, como sobreaquecimento do equipamento, queima de fusíveis , superaquecimento de transformadores, mau funcionamento dos dispositivos de controle, corrente excessiva de neutro, degradação dos medidores de energia, etc (LAM; WONG, 2014).

Uma pertubação na rede pode resultar em uma perda de US$10.000 para uma indústria de tamanho médio, encerrando uma linha de produção que requer várias horas para reiniciar sua

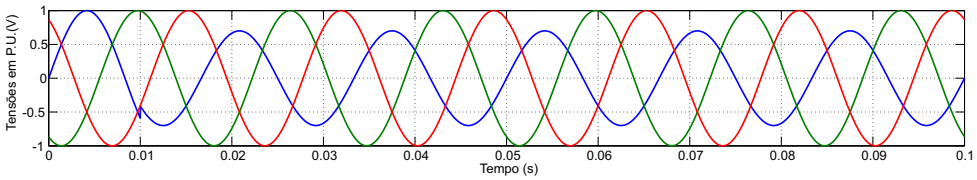
operação (DUGAN et al., 2003).

Um dos problemas mais corriqueiros são os afundamentos de tensão que possuem causas diversas e dentre elas pode-se citar aumentos bruscos nas correntes da rede, em virtude da partida de grandes motores, entrada de grandes cargas ou saída de grandes blocos geradores e faltas (curto-circuitos) em pontos remotos da rede elétrica. Mesmo sendo comuns, provocam grandes prejuízos à industria. Dependendo da magnitude do distúrbio o tempo gasto para a retomada da produção após a ocorrência de um afundamento de tensão pode variar de uma a três horas para afundamentos com duração inferior a 300 ms. Em alguns ramos de atividade, como as indústrias têxtil, siderúrgica e petroquímica, os impactos econômicos do problema de qualidade de energia são enormes. Nestes setores, uma interrupção elétrica de até um minuto já ocasionou prejuízos de até 500 mil dólares (FRANCO, 2016).

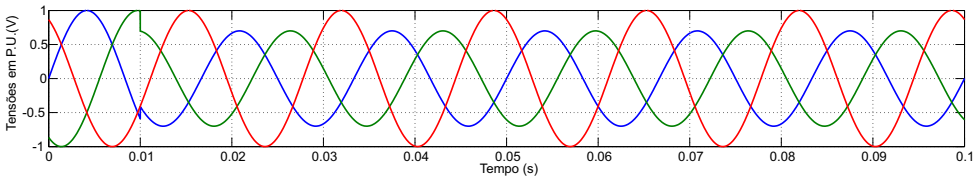
Os afundamentos de tensão ou (*sags*) podem ser ainda classificados em monofásicos, bifásicos ou trifásicos, como mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Tipos de afundamentos de tensão.

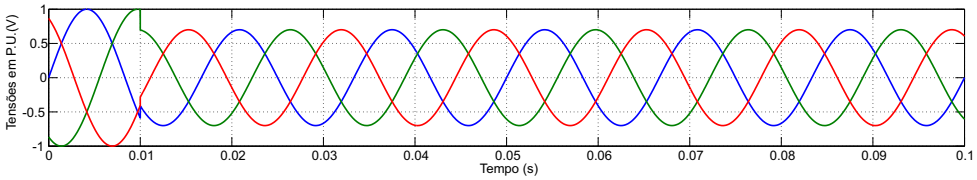
(a) Afundamento monofásico



(b) Afundamento bifásico



(c) Afundamento trifásico



Fonte: o autor (2019).

Afundamentos de tensão monofásicos são os mais corriqueiros devido à grande diversidade de causas, tais como galhos de árvores encostando na rede elétrica, curto-circuitos fase-terra, cargas monofásicas ligadas de forma desequilibrada e impedâncias diferentes na rede. Os afundamentos de tensão bifásicos são causados pela degradação da isolação entre duas fases, curto-circuito entre fases, animais e galhos de árvores. Sua ocorrência já é menor em relação

ao monofásico. Já os trifásicos são os mais severos, porém mais raros que os outros dois e são provocados principalmente por curto-circuito entre as três fases da rede elétrica.

Outro distúrbio muito comum na rede elétrica são as distorções harmônicas de corrente. Esta deformação periódica se deve à conexão de cargas não-lineares à rede elétrica, cujas correntes absorvidas possuem componentes de frequência diferente da fundamental, ou seja, a relação tensão-corrente não é linear. Estas deformidades podem causar aumento das perdas em transformadores da rede de distribuição, atuação de proteções e mau funcionamento de equipamentos sensíveis. Portanto, faz-se necessário estabelecer limites à presença de "poluição"no sistema elétrico e, para tanto, existem algumas recomendações, como a IEEE 519, que estabelecem limites à injeção de harmônicos na rede elétrica. O índice mais utilizado para medir o conteúdo harmônico de uma onda qualquer é a THD. A THD é uma razão entre o valor eficaz das componentes harmônicas e o valor eficaz da componente fundamental. Este índice é calculado pela seguinte expressão:

$$\%THD = 100 \times \frac{(\sum_{h \neq 1} M_h^2)^{\frac{1}{2}}}{M_1}, \tag{1}$$

onde M é o valor eficaz da h-ésima componente harmônica de tensão ou corrente.

Quando há degradação substancial das tensões e correntes na rede elétrica, podem ocorrer erros de interpretação de comandos e/ou atuação de proteções, que podem prejudicar ou até mesmo paralisar um processo fabril, causando prejuízos financeiros. Portanto, o desenvolvimento de equipamentos capazes de mitigar os efeitos das perturbações de tensão e correntes na rede elétrica é de suma importância para a indústria. Na literatura, há um grande enfoque na correção de problemas em sistemas a três fios, porém os sistemas a quatro fios, ou seja, aqueles que possuem três fases e neutro que são os mais comuns em redes de distribuição, não há tanto enfoque.

Os sistemas a quatro fios possuem características bastante peculiares como a circulação de correntes de neutro, seja por afundamentos de tensão desequilibrados ou devido à conexão de cargas desequilibradas ao sistema. Outra característica é a possibilidade da existência de afundamentos de tensão monofásicos independentes. Portanto, as topologias desenvolvidas devem ser capazes de injetar sinais independentes em cada uma das fases. Assim as perturbações trazem como principais efeitos:

1. Comprometimento da qualidade do produto;
2. Atrasos em entregas gerando multas, perdas de clientes e de competitividade;
3. Danos a equipamentos elevando os custos com manutenção;
4. Perda de matéria-prima;
5. Necessidade de uso de geração auxiliar.

Além das distorções harmônicas e dos afundamentos de tensão, outros problemas de qualidade de energia são citados na literatura como desbalanceamento de tensões, *flickers* e variações de frequência (FRANCO, 2016). Portanto, um problema de qualidade de energia é qualquer perturbação na tensão, na frequência ou na corrente, que prejudique o funcionamento de um equipamento (NADA, a).

O condicionador de qualidade de energia unificado (UPQC - *unified power quality conditioner*) é resultado da junção entre um filtro ativo de potência paralelo (ShAPF - *Shunt Active Power Filter*) com um filtro ativo de potência série (SrAPF - *Series Active Power Filter*), sua configuração mais tradicional é chamada de *back-to-back* em que os conversores compartilham o mesmo barramento CC. O UPQC surgiu com o objetivo de ser uma solução unificada de qualidade de energia, que concentrasse todas a funcionalidades de um ShAPF e um SrAPF em um só equipamento, reduzindo custos e tornando a solução mais atrativa.

Normalmente em um UPQC o SrAPF é responsável pelo controle das tensões fornecidas às cargas, fazendo sua regulação, balanceamento e controle de harmônicos de tensão. Sua forma de conexão mais comum é por meio de transformadores de acoplamento ligados em série entre a fonte e a carga. Sua atuação se dá por meio do complemento ou subtração da tensão em relação ao valor nominal, de modo que nas cargas as tensões sejam sempre equilibradas, sem distorções ou fora dos valores nominais.

Por outro lado, o ShAPF desempenha o papel de controle das correntes da carga de modo que a fonte forneça apenas correntes senoidais, equilibradas e em fase com a tensão. Sua atuação se dá por meio da injeção de correntes iguais em módulo e opostas em fase às componentes que se deseja compensar. Normalmente são conectados em paralelo à rede elétrica fazendo uso de filtros indutivos para filtrar a ondulação provocada pelo chaveamento ou ainda por meio de um filtro passivo LC como será discutido ao longo deste trabalho.

1.3 Definição de UPQC

Existem dois tipos importantes de APF, paralelo ou *shunt* e série. O APF paralelo é mais empregado para resolver problemas relacionados à corrente, enquanto que o APF série é mais adequado para mitigar os problemas relacionados à tensão. Como o sistema de distribuição moderno exige uma melhor qualidade da tensão fornecida e corrente drenada, a instalação desses APFs tem grande alcance na implementação prática. No entanto, a instalação de dois dispositivos separados para compensar problemas de qualidade de energia relacionados a tensão e corrente, de forma independente, pode não ser uma solução econômica. Moran (MORAN, 1989) descreveu uma configuração de sistema na qual ambos APFs série e paralelo são conectados na configuração *back-to-back* com um barramento CC comum. A topologia foi nomeada como regulador/condicionador de tensão de linha. A configuração do sistema conversor *back-to-back* realmente chamou a atenção quando Fujita e Akagi provaram a aplicação prática desta topologia com resultados experimentais de 20 kVA (FUJITA; AKAGI, 1998). Eles nomearam este

dispositivo como UPQC e, desde então, o nome UPQC tem sido popularmente usado pela maioria dos pesquisadores (KHADKIKAR, 2012). A topologia com conversor *back-to-back* também foi abordada como conversor série-paralelo (KAMRAN; HABETLER, 1995), APF unificado (MUTHU; KIM, 1997), condicionador ativo universal, sistema de condicionamento de qualidade de energia universal (*universal power quality conditioning system* - UPQS), condicionador ativo de compensação de carga, filtro ativo universal e assim por diante (KHADKIKAR, 2012).

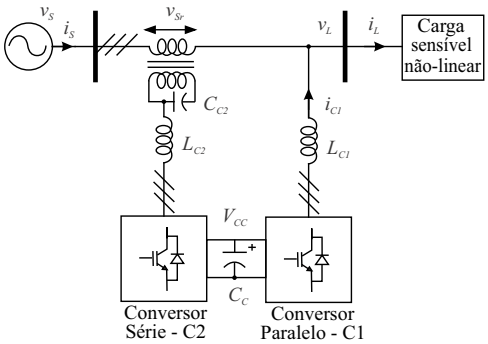
Os UPQCs são empregados em sistemas de distribuição de energia, para realizar a compensação paralela e série simultaneamente. Enquanto, um UPFC só precisa fornecer compensação série, uma vez que um sistema de transmissão de energia geralmente opera sob um ambiente equilibrado e sem distorção. Por outro lado, um sistema de distribuição de energia pode conter componentes de CC, distorção e desequilíbrio, tanto em tensões quanto em correntes. Portanto, um UPQC deve operar sob este ambiente durante a execução da compensação paralela e/ou série.

O principal objetivo de um UPQC é mitigar problemas de qualidade de energia de tensão de alimentação como quedas, oscilações, desequilíbrio, e harmônicos; problemas de qualidade de energia de corrente de carga, como harmônicos, desequilíbrio, corrente reativa e corrente de neutro. A Figura 4 mostra uma representação unifilar da configuração do sistema UPQC. Os principais componentes deste sistema são os seguintes:

1. Dois conversores - um conectado à carga que atua como um APF paralelo e outro conectado em série com a rede, APF série;
2. O indutor de acoplamento paralelo L_{C1} é usado para conectar o conversor paralelo à rede. Tendo por função filtrar a ondulação de chaveamento, atuando como um filtro passa baixas. Às vezes, um transformador de isolamento é utilizado para isolar eletricamente o conversor da rede;
3. Um barramento CC comum que pode ser formado usando um capacitor ou um indutor. Na Figura 4, o barramento CC é implementado usando um capacitor que conecta os dois conversores e também mantém uma tensão de barramento CC constante através dele;
4. Um filtro LC que serve como um filtro passa-baixas passivo (LPF) e ajuda a eliminar ondulações de comutação de alta frequência na tensão gerada de saída do conversor;
5. Transformador de injeção série que é usado para conectar o conversor série à rede. Uma relação de transformação é frequentemente considerada para reduzir a corrente ou tensão nominal do conversor em série.

A princípio, o UPQC é a integração de APFs paralelo e série com um barramento CC comum. O conversor paralelo do UPQC é usado geralmente para gerar uma de corrente, de modo que seu valor seja igual ao valor calculado da corrente de referência, conforme determinado

Figura 4 – Esquema geral de um UPQC.



Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

pelo algoritmo de controle do UPQC. Além disso, o conversor paralelo desempenha outro papel importante no UPQC, mantendo a tensão do barramento CC em um valor de referência definido. Para cancelar os harmônicos gerados por uma carga não-linear, o conversor paralelo deve injetar uma corrente conforme a seguinte equação:

$$i_{Sh} = i_S^* - i_L, \tag{2}$$

onde i_{Sh},i_{Sh}^* e i_L representam a corrente do conversor paralelo, a corrente de referência da rede elétrica e a corrente de carga, respectivamente.

Da mesma forma, o conversor de série do UPQC é usado no modo de controle de tensão de tal forma que gera uma tensão e a injeta em série com a tensão da rede para obter uma tensão senoidal, livre de distorção e de magnitude desejada no terminal de carga. A operação básica de um conversor em série do UPQC pode ser representada pela seguinte equação:

$$v_{Sr} = v_L^* - v_S, \tag{3}$$

onde v_{Sr}, v_L^* e v_S representam a tensão injetada pelo conversor série, a tensão de carga de referência e a tensão real da rede, respectivamente. No caso de uma condição de afundamento de tensão, v_{Sr} representará a diferença entre a tensão de carga de referência e a tensão de alimentação reduzida, ou seja, a tensão injetada pelo conversor em série para manter a tensão no terminal de carga no valor de referência.

O controle da tensão do barramento CC desempenha um papel importante na obtenção do desempenho desejado do UPQC. Durante as condições dinâmicas do sistema, como por exemplo, mudança repentina de carga ou afundamento de tensão, o controlador de *feedback* do barramento CC deve responder o mais rápido possível para restaurar a tensão do *link* ao valor de referência definido, com atraso mínimo e menor *overshoot*. O controle de tensão do barramento CC baseado em um controlador Proporcional Integrativo (PI) é simples de implementar e, portanto, amplamente utilizado nas pesquisas (KHADKIKAR, 2012). Para superar o tempo de

resposta lento da abordagem baseada no controlador PI, pesquisadores desenvolveram várias formas alternativas, como por exemplo, um controlador PI baseado em lógica fuzzy (SINGH et al., 1998), (LAXMI et al., 2006), controlador PID difuso (LIU; XIA; WANG, 2009), controlador baseado em rede neural artificial (LAXMI et al., 2006), (KINHAL; AGARWAL; GUPTA, 2011), regulador quadrático linear com um controlador de ação integral (LANDAETA et al., 2006), controlador otimizado (ZHANG et al., 2007), controlador PIλDμ (ZUQUAN; HONGCHUN, 2007) e dentre outros.

1.4 Estado da Arte em UPQC

Uma das primeiras propostas de um sistema capaz de realizar o condicionamento simultâneo da tensão e da corrente foi proposto por Moran 1989 (MORAN, 1989). Essa topologia foi denominada na época de *Line Voltage Regulator/conditioner* aplicado em sistemas monofásicos, onde foram empregados dois conversores fonte de corrente (CSI - *Current Source Inverter*) conectados a um mesmo barramento CC.

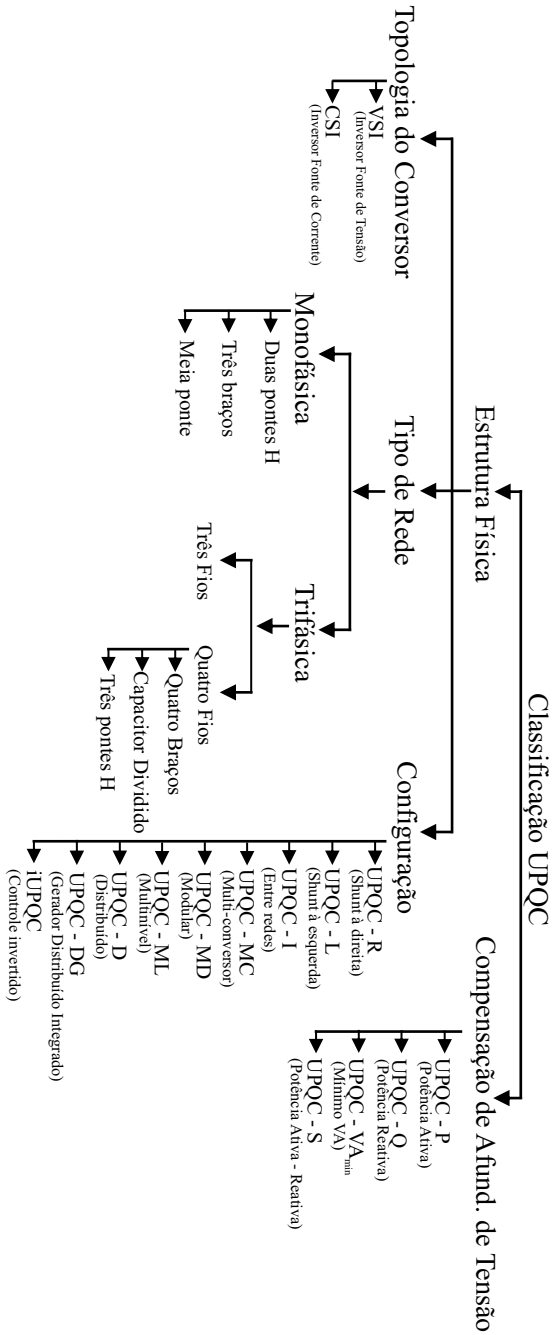
Este tipo de solução de qualidade de energia ganhou maior notoriedade quando Fujita e Akagi (FUJITA; AKAGI, 1991) conseguiram resultados práticos em um protótipo. Após este feito, diversas pesquisas foram dedicadas ao aprimoramento dessa estrutura e diversas estratégias de controle foram desenvolvidas.

Nesta seção, é feita uma classificação dos UPQC. A Figura 5 mostra uma a classificação dos UPQC. Os UPQC são classificados em dois grupos principais: 1) com base na estrutura física e 2) na abordagem de compensação de queda de tensão usada. A compensação de queda de tensão é uma das funcionalidades mais importantes do UPQC.

Um UPQC pode ser classificado com base na estrutura física usada para mitigar os problemas de qualidade de energia de um sistema em consideração. Os principais parâmetros que se atribuem a essas classificações são: 1) tipo de dispositivo de armazenamento de energia usado; 2) número de fases; e 3) localização física dos conversores paralelo e série.

1)**Classificação baseada na topologia do conversor**: em um UPQC, os conversores paralelo e série compartilham um barramento CC comum. O conversor paralelo é responsável por regular este barramento CC em um valor de referência definido. O UPQC pode ser desenvolvido usando um inversor de fonte de corrente (CSI) modulada por largura de pulso (*pulse-width modulation* - PWM) (KHADKIKAR, 2012) que compartilha um indutor de armazenamento de energia comum L_{CC} para formar o barramento CC. Um diodo de bloqueio de tensão conectado em série com o transistor bipolar de porta isolada é necessário para tornar possível esta topologia. A Figura 6 mostra uma representação unifilar de uma configuração de UPQC baseada em um conversor fonte de corrente. A corrente CC no indutor é regulada de tal forma que a potência de entrada média é igual à potência de saída média mais as perdas de potência no UPQC. A topologia UPQC baseada em CSI não é popular devido a maiores perdas e custos (KHADKIKAR,

Figura 5 – Classificação UPQCs.

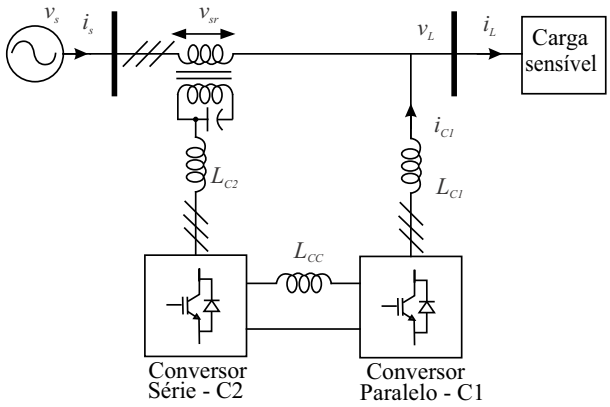


Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

2012).

A segunda topologia, mais comum e popular para UPQC, consiste em um conversor fonte de tensão (VSI) que compartilha um capacitor comum de armazenamento de energia C_{cc}. Na Figura 7, é representado o diagrama unifilar de uma configuração de UPQC baseada em VSI. Quase todo o trabalho relativo a UPQC usa predominantemente a topologia baseada em VSI (KHADKIKAR, 2012). As vantagens oferecidas pela topologia VSI em relação ao CSI incluem menor peso, menor custo, capacidade de operação multinível e controle mais flexível.

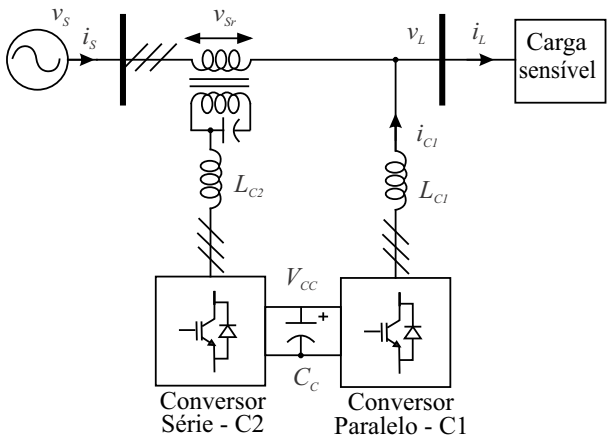
Figura 6 – Representação unifilar de um UPQC baseado em CSI.



Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

2) **Classificação baseada no sistema de suprimento**: as cargas CA ou equipamentos no sistema de potência podem ser divididos em monofásicos e trifásicos, alimentados por sistemas monofásicos (a dois fios, em inglês *two-wire*) ou trifásicos (a três fios ou quatro fios, em inglês *three-wire* ou *four-wire*). Para mitigar os problemas de qualidade de energia nesses sistemas, diferentes configurações de UPQC são possíveis e são classificadas com base no tipo do sistema de fornecimento de energia no qual estão conectados. Os problemas de qualidade de energia relacionados à tensão são semelhantes para sistemas monofásicos e trifásicos, exceto uma compensação de desequilíbrio de tensão necessária no caso de um sistema trifásico. Para um sistema monofásico, a corrente reativa de carga e as harmônicas de corrente são os principais problemas. No caso do sistema trifásico de três fios (*three phases three wires* - 3P3W), é necessário considerar o desequilíbrio atual além dos harmônicos e reativos. Além disso, o sistema trifásico de quatro fios (*three phases four wires* - 3P4W) requer uma malha de controle extra para compensação da corrente de neutro.

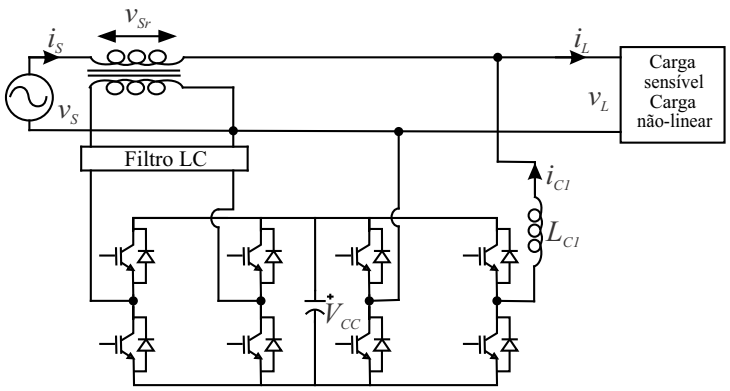
Figura 7 – Representação unifilar de um UPQC baseado em VSI.



Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

Na Figura 8, é mostrada a configuração mais popular de topologia de UPQC para compensar os problemas de qualidade de energia no sistema de alimentação monofásica (*one phase two wires* - 1P2W) que consiste em dois conversores em ponte H (total de oito chaves semicondutoras) (KHADKIKAR, 2012). Uma topologia baseada em CSI também pode ser utilizada para 1P2W UPQC (MORAN, 1989). Nasiri e Emadi introduziram duas configurações adicionais para UPQC monofásico (NASIRI; EMADI, 2003), UPQC monofásico de três braços (total de seis chaves semicondutoras) mostradas na Figura 9 e UPQC monofásico de meia ponte (total de quatro chaves semicondutoras) mostrado na Figura 10. Essas topologias podem ser consideradas para aplicações de baixo custo com cargas de baixa potência. Em uma topologia de três braços, o conversor série consiste das chaves S_1 e S_2, enquanto as chaves S_3 e S_4 são para o conversor paralelo. O terceiro braço, chaves S_5 e S_6, é comum para os conversores série e paralelo. A topologia de meia ponte consiste em um braço para cada para conversor, paralelo e série. Zhang et al. (ZHANG; ZHANG; CHEN, 2008) consideraram uma topologia bidirecional de dois conversores ponte-H para isolar os conversores série e paralelo um do outro, como mostrado na Figura 8. Os dois conversores podem ser conectados uns com os outros usando um transformador de alta frequência. Como o conversor CC/CC isolado é bidirecional, a transferência de potência entre dois conversores pode ser controlada ajustando a fase da tensão entre eles.

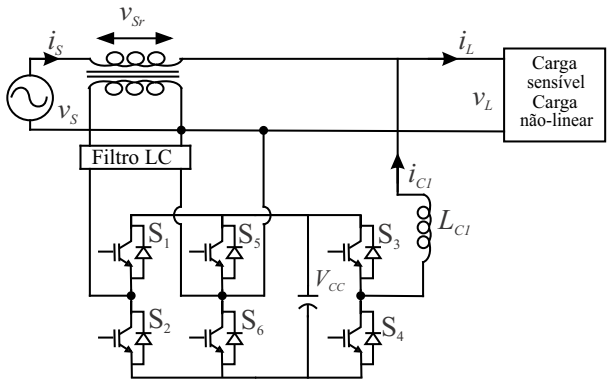
Figura 8 – UPQC 1P2W: configuração com duas pontes H (oito chaves).



Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

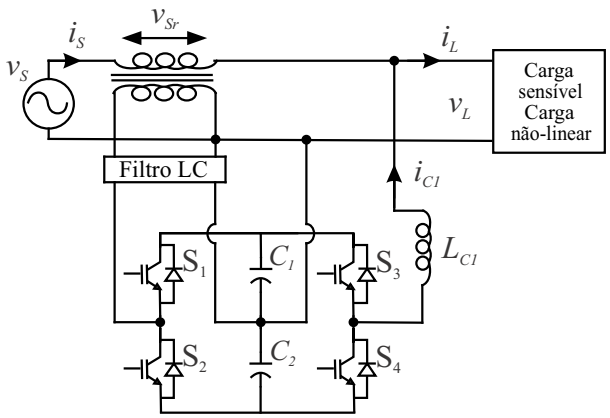
Um UPQC para sistemas a três fios baseado em conversor VSI é mostrado na Figura 11. É a configuração de UPQC mais estudada. Além das cargas trifásicas, muitas plantas industriais geralmente consistem de cargas combinadas, como uma variedade de cargas monofásicas e cargas trifásicas, alimentadas por uma fonte única trifásica a quatro fios. A presença do quarto fio, o condutor neutro, causa um fluxo de corrente de neutro excessivo e, portanto, exige um sistema de compensação adicional. Para mitigar a corrente no condutor de neutro no sistema trifásico a quatro fios, várias configurações de conversores paralelo foram desenvolvidas: dois capacitores divididos (2C), quatro braços (4L) e três ponte H (3HB)(KHADKIKAR, 2012).

Figura 9 – UPQC 1P2W: configuração de três braços (seis chaves).



Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

Figura 10 – UPQC 1P2W: configuração de meia ponte (quatro chaves).

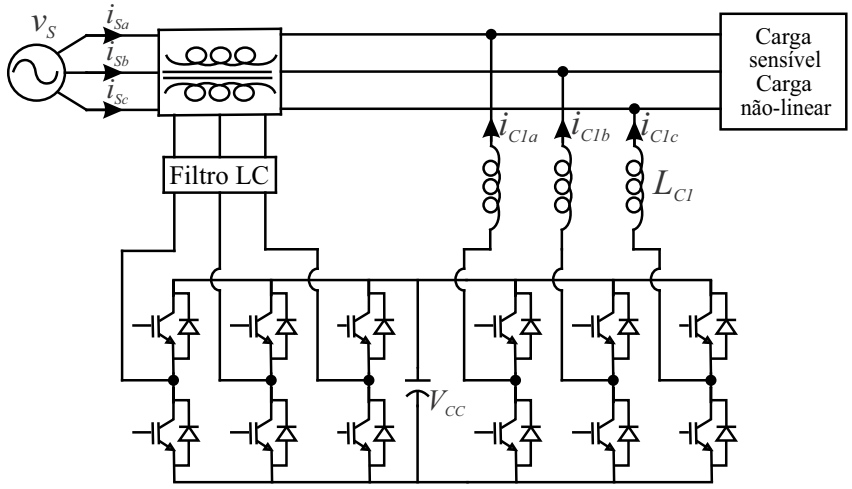


Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

As Figuras 12 13 14 mostram as configurações de UPQC 3P4W com base nas topologias 2C, 4L e 3HB. A topologia 2C consiste em dois capacitores no lado CC. O ponto comum da conexão entre os capacitores, é usado como ponto de conexão para o quarto fio. Na topologia 2C, é importante manter tensões iguais em ambos os capacitores para evitar o fluxo de corrente circulante. Isso requer uma malha de controle adicional para a regulação da tensão do capacitor de barramento CC na topologia 2C. Este tipo de topologia apesar de não acrescentar chaves semicondutoras apresenta problemas de acoplamento entre o lado CC e CA, trazendo como consequência uma menor capacidade de compensação em relação a uma topologia com um braço dedicado a esta função.

Na topologia 4L, como mostrado na Figura 13, um braço adicional (duas chaves semicondutoras) é usado para compensar a corrente de neutro da carga. A topologia 4L pode oferecer melhor controle sobre a corrente de neutro devido ao braço adicional. A topologia 3HB usa três conversores monofásicos ou ponte-H conectados ao mesmo barramento CC do UPQC. A Figura 14 mostra uma configuração do sistema UPQC onde o conversor paralelo

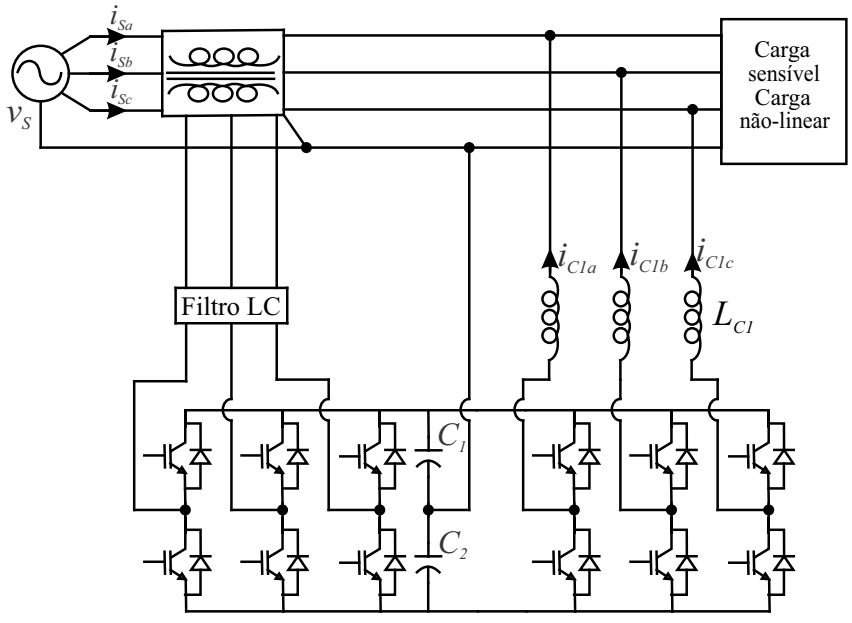
Figura 11 – UPQC para redes a três fios.



Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

consiste de pontes 3H. O conversor paralelo é configurado como 3HB enquanto o conversor série é implementado como 2C para compensar a corrente de neutro em (MOGHADASI; TORABI; SALEHIFAR, 2010).

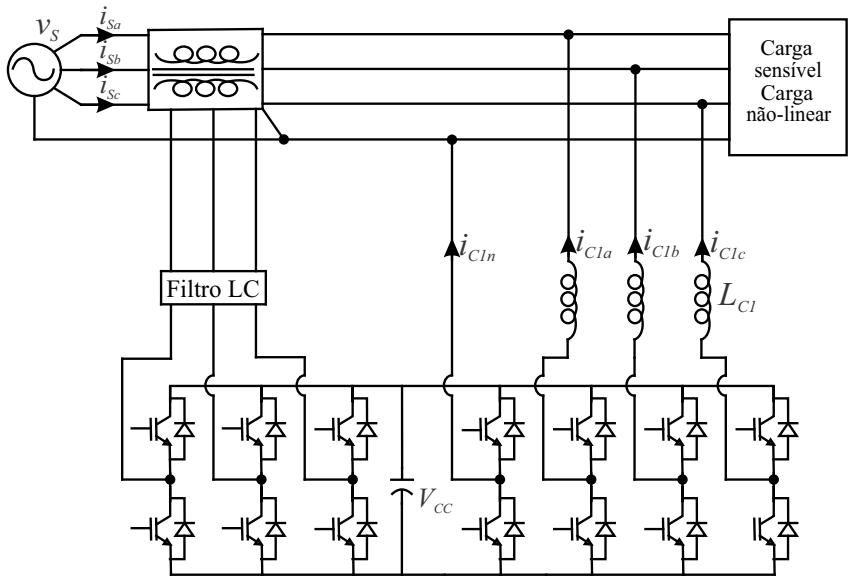
Figura 12 – UPQC 3P4W baseado em 2 capacitores divididos (12 chaves).



Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

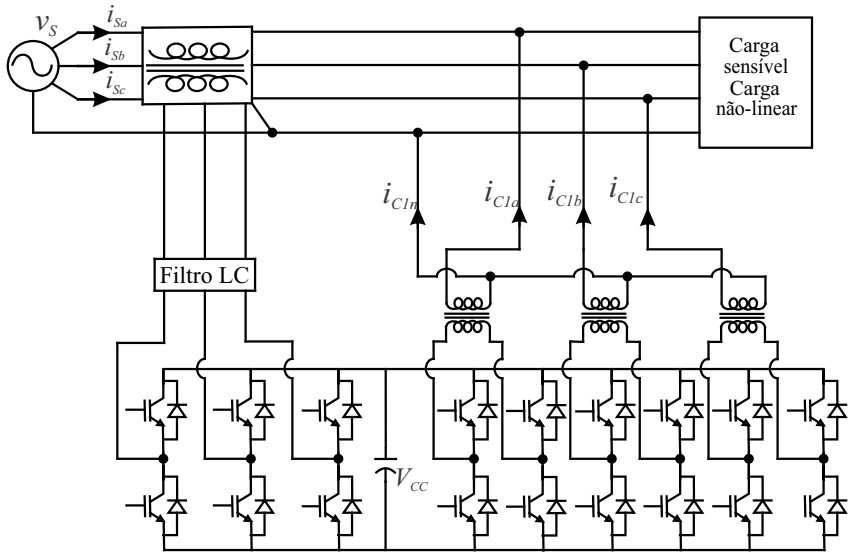
A grande maioria das topologias faz uso de dois ou mais conversores distintos que compartilham um barramento CC e fazem uso de uma quantidade elevada de chaves semicondutoras, que por consequência encarecem os projetos. Uma solução para reduzir custos pode ser a apresentada em (ZHANG; LOH; GAO, 2012), onde há três braços com saída dupla e

Figura 13 – UPQC 3P4W baseado na topologia do conversor paralelo com quatro braços (14 chaves).



Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

Figura 14 – UPQC 3P4W baseado na topologia do conversor paralelo 3HB (18 chaves).

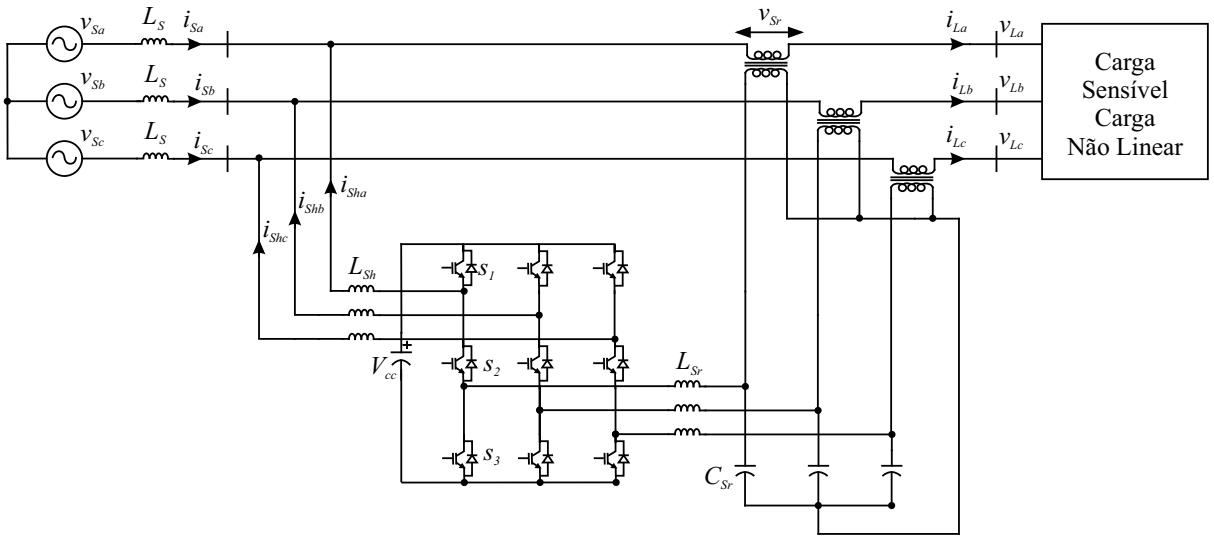


Fonte: Adaptado de (Khadkikar, 2012).

faz uso de apenas nove chaves. Na Figura 15 a estrutura deste conversor é apresentada.

A topologia apresentada em (ZHANG; LOH; GAO, 2012) foi inicialmente apresentada para o controle de cargas distintas, como apresentado (KOMINAMI; FUJIMOTO, 2007) (LIU et al., 2009), mas devido às restrições que o uso compartilhado de caves para os dois conjuntos de saída traz, seu uso era bastante restrito. Entretanto, sua aplicação em UPQC é mais adequada, pois é possível manipular os índices de modulação de modulação de um mesmo braço de tal forma que uma saída seja priorizada, ou seja, uma compensação seja priorizada frente à outra.

Figura 15 – UPQC 3P3W baseado na topologia nove chaves (9 chaves).



Fonte: Adaptado de (Zang, 2012).

Perturbações de tensão não são constantes e, assim, pode-se priorizar o lado do APF e priorizando o SrAPF apenas quando houver real necessidade, por exemplo, em afundamento de tensão.

Na Figura 15, conversor de nove chaves é usado como um UPQC, mas apresenta limitações na sua aplicação em sistemas desbalanceados. Essa limitação pode ser superada por meio de algumas mudanças na topologia que são o foco deste trabalho.

1.5 Objetivos

Como pode ser lido ao longo do texto deste primeiro capítulo, as redes elétricas a quatro fios apresentam potenciais problemas de qualidade de energia e que o desenvolvimento de soluções que consigam reduzir os efeitos dessas pertubações é importante para garantir o funcionamento de equipamentos e evitar danos tanto à rede elétrica como às cargas. O uso da eletrônica de potência, através de conversores é uma possível solução para mitigar tais problemas. Pode-se traçar como meta deste trabalho o estudo, o projeto e a implementação de duas topologias com capacidade de trabalhar em sistemas a quatro fios baseadas na topologia com nove chaves proposta em (ZHANG; LOH; GAO, 2012). A topologia nove chaves em sua forma original não possui a capacidade de trabalhar em sistemas a quatro fios, porém neste trabalho esta limitação foi superada por meio de uma modificação estrutural. Em todas as estruturas deste trabalho o lado paralelo compensa as correntes e o lado série as tensões.

Além das topologias serem baseadas no conversor nove chaves, foi utilizado filtro híbrido na saída paralela do conversor, cujo o objetivo é a redução dos níveis de tensão do barramento CC, de forma similar ao conversor de seis chaves e dois braços trifásico, proposto em (LIMONGI et al., 2015).

1.6 Organização dos Capítulos

O Capítulo 2 deste trabalho é dedicado ao estudo dos modelos matemáticos dos filtros ativos série e paralelo. Neste ponto do trabalho, são discutidos os aspectos físicos e são desenvolvidos os modelos que servem como base para o desenvolvimento dos controladores e componentes. Ao longo do capítulo, são apresentados os princípios de funcionamento do filtro série e do paralelo, além das limitações das ligações a três braços em sistemas desequilibrados a quatro fios e mostradas as soluções para se contornar essas limitações.

O Capítulo 3 é dedicado ao projeto físico dos componentes das soluções propostas e são apresentadas simulações. Os compensadores série que foram estudados separadamente, são aplicados à estrutura de nove chaves apresentada em (ZHANG; LOH; GAO, 2012). A topologia de nove chaves é modificada para trabalhar com sistemas desbalanceados a 4 fios e duas topologias variantes são propostas, simuladas e depois comparadas entre si.

O Capítulo 4 é dedicado a apresentação dos resultados experimentais, a comparação com as simulações e entre das topologias propostas. Ainda neste capítulo, é apresentado o protótipo com seus principais componentes, diagramas e operação.

O Capítulo 5 é dedicado a conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

2 MODELAGEM MATEMÁTICA DOS CONDICIONADORES PARALELO E SÉRIE

Em sistema elétricos, a potência é distribuída por meio de alimentadores radiais e uma grande quantidade de cargas das mais diversas potências e configurações é conectada à rede, fazendo com que as correntes nas fases da rede elétrica não sejam balanceadas. Cargas desbalanceadas causam efeitos indesejáveis, como perdas adicionais em motores e geradores com redução da vida útil desses equipamentos, atuação de proteções contra sobrecarga provocada pela circulação de correntes de sequência negativa em motores de indução, aumento da ondulação na tensão de saída dos retificadores e saturação de transformadores (MARQUES, 1998).

Com o objetivo de mitigar os efeitos provocados pela conexão de cargas desbalanceadas, é preciso que o conversor seja capaz de injetar tensões de amplitudes diferentes em qualquer uma das fases. Entretanto, as topologias tradicionais com três braços e sem acesso ao ponto comum do barramento CC não são capazes de injetar tais tensões na sua saída. Para tanto, há duas modificações possíveis a serem feitas em um conversor para se conseguir tal objetivo: a primeira é acessar o ponto central do barramento e conectá-lo ao condutor de neutro da rede, já a segunda possibilidade é adicionar mais um braço ao conversor (LAM; WONG, 2014) (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007).

A topologia com um braço adicional possui uma maior quantidade de componentes semicondutores, porém permite o controle da corrente de neutro da carga e desacopla o barramento CC da rede, evitando que as tensão em seus capacitores se tornem assimétricas.

Como mencionado, o objetivo deste trabalho é o estudo e implementação de estruturas de UPQC a quatro fios com número reduzido de chaves tendo por base a solução apresentada em (ZHANG; LOH; GAO, 2012), onde o lado paralelo e o série são integrados em um só conversor, compartilhando a mesma portadora e as mesmas chaves intermediárias. No entanto, para melhor compreender como as duas compensações funcionam, é importante que ambas sejam estudadas separadamente.

Tendo por objetivo o entendimento do funcionamento da compensação série e paralela do conversor, neste capítulo são apresentados os modelos matemáticos dads topologias com série e paralelo com um braço adicional. Além disso, pode-se fazer uso dos modelos para obtenção das funções de transferência, para projeto de componentes e cálculo dos ganhos dos controladores.

Neste capítulo, é detalhado o princípio da compensação paralela e em seguida da compensação série. O filtro paralelo é comumente utilizado na compensação de correntes harmônicas de carga, realizando a mitigação de harmônicos, fazendo com que a rede elétrica, de um modo geral, forneça apenas corrente na frequência fundamental. Já a compensação série tem por objetivo eliminar perturbações de tensão nos terminais da carga, mitigando os efeitos de oscilações de tensão de um modo geral. Além da demonstração do funcionamento das duas

compensações também são desenvolvidas as funções de transferência e discutidas as limitações das soluções. As funções de transferência são desenvolvidas para um sistema a quatro fios, que constitui a principal aplicação das topologias a serem propostas.

2.1 Compensador Paralelo Baseado no Filtro Híbrido com Quatro Braços

Seu funcionamento se dá por meio da injeção no sistema elétrico da corrente necessária para o cancelamento das componentes harmônicas. Este tipo de filtro é implementado normalmente por meio de conversores do tipo VSI conectados com um indutor em série com um capacitor, constituindo um filtro passivo LC, para filtragem harmônica tanto de componentes da rede elétrica quanto da ondulação de chaveamento (SRIANTHUMRONG; AKAGI, 2003) (AKAGI, 1996) (ZHANG; LOH; GAO, 2012) conforme mostra a Figura 16.

2.1.1 Princípio de Funcionamento

Os filtros híbridos são uma solução que tem por objetivo a união das vantagens tanto dos filtros ativos, quanto dos filtros passivos, buscando assim redução de custos e filtragem ativa das componentes harmônicas de corrente da rede elétrica, ou seja, injetar sinais de acordo com as características das correntes na carga. O filtro híbrido em estudo é constituído por um filtro LC passivo formado por um indutor e um capacitor ligados em série, sintonizado em uma determinada frequência, conectado a um conversor conforme mostrado na Figura 16. Nessa configuração, os componentes do conversor possuem tensões nominais consideravelmente inferiores aos de um filtro ativo paralelo convencional. A configuração de filtro híbrido estudada não introduz ondulação adicional na rede elétrica (SRIANTHUMRONG; AKAGI, 2003) (LAM; WONG, 2014).

A configuração do filtro híbrido paralelo (SHPF - *Shunt Hybrid Power Filter*) estudada nesta seção é apresentada na Figura 16. Nesta configuração, esta topologia apresenta um braço adicional responsável pela compensação das correntes de neutro, constituindo um caminho que permite tanto o controle independente de cada uma das fases, como o controle das correntes de neutro (LAM; WONG, 2014).

Em um sistema trifásico com conexão de neutro, a soma das correntes nas três fases é igual a corrente do condutor de neutro:

$$i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc} = i_{Ln}. \tag{1}$$

Fazendo uso da lei de Kirchhoff dos nós, a corrente em uma das fases no ponto de acoplamento pode ser escrita como sendo:

$$i_{Sa} + i_{C1a} = i_{La}. \tag{2}$$

Sendo i_{Sn} a corrente de neutro da fonte, pode-se escrever que:

$$i_{Sa} + i_{Sb} + i_{Sc} = i_{Sn}. \tag{3}$$

Portanto, fazendo-se uso de (2) pode-se escrever que:

$$i_{Sa} + i_{Sb} + i_{Sc} + i_{C1a} + i_{C1b} + i_{C1c} = i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc}. \tag{4}$$

Finalmente, como descrito em (5), a corrente de neutro do conversor é nula, pois não há um condutor de neutro, e assim conclui-se que a corrente de neutro da fonte é igual à corrente de neutro da carga

$$i_{Sn} = i_{Ln}, \tag{5}$$

provando-se que a topologia com três braços não é adequada para compensar desbalanços de carga (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007).

A necessidade de criação de braço adicional no conversor é justificada por meio da dedução matemática a seguir, que tem como base a topologia mostrada na Figura 17, com conexão entre o neutro da rede e o conversor.

Por outro lado, ao se fazer a conexão do neutro da rede com o braço adicional, o conversor se torna capaz de controlar a corrente de neutro (Figura 16), pois, com esta nova ligação, o conversor passa a ter um caminho para corrente de neutro e se pode escrever:

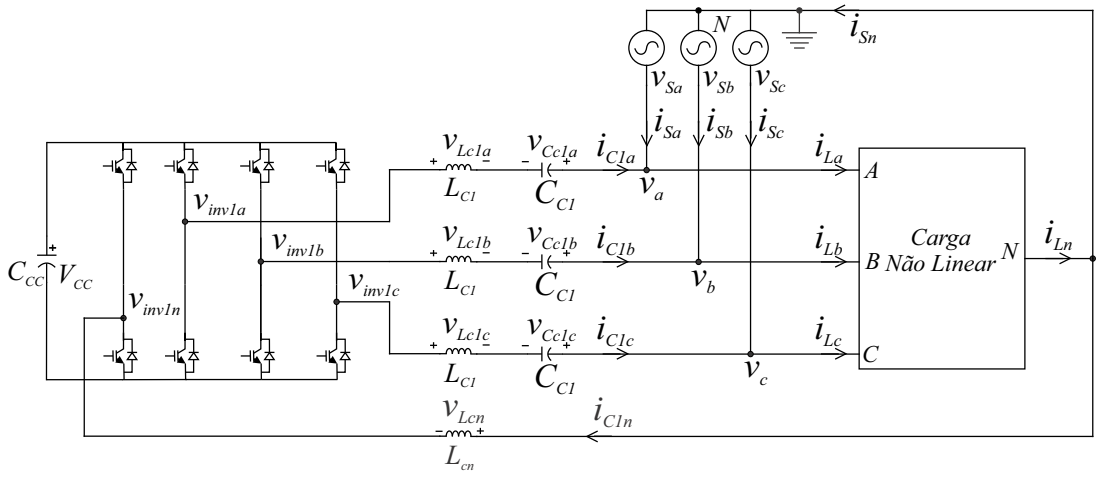
$$i_{Ca} + i_{Cb} + i_{Cc} = i_{Cn}. \tag{6}$$

Portanto (5) é reescrita como sendo:

$$i_{Sn} + i_{Cn} = i_{Ln}. \tag{7}$$

Nota-se por (7) que o conversor é capaz de injetar sinais para controle das correntes de neutro.

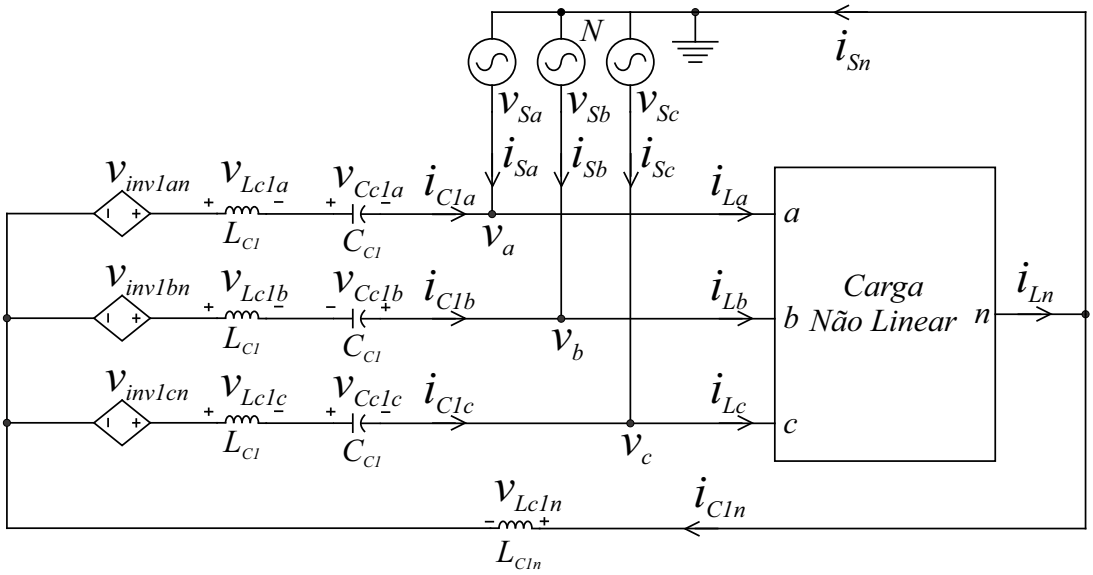
Figura 16 – Filtro híbrido com conexão ao neutro da rede elétrica.



Fonte: Adaptado de (Lam e Wong 2014).

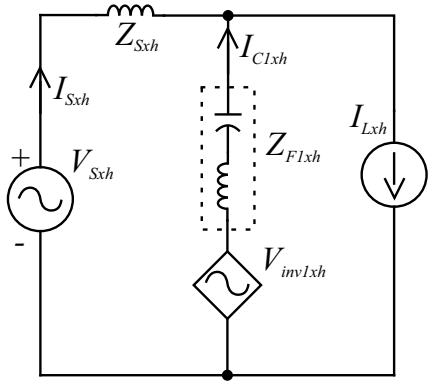
Segundo (LAM; WONG, 2014) circuito mostrado na Figura 18 é uma representação unifilar do conversor da Figura 17, em que o conversor é representado por meio de uma fonte de tensão controlada, V_{invxh}, a carga como sendo uma fonte de corrente, I_{Lxh} e a rede é representada como uma fonte de tensão alternada, V_{Sxh}. Os subscritos x e h representam uma das três fases da rede elétrica e a ordem do harmônico, respectivamente.

Figura 17 – Modelo do filtro híbrido paralelo conectado a um sistema a quatro fios.



Fonte: o autor (2019).

Figura 18 – Circuito equivalente monofásico para o filtro híbrido.



Fonte: adaptado de (Lam e Wong, 2014).

Como representado no circuito da Figura 18, o conversor injeta sinais de modo que a corrente da rede (I_{Sxh}) seja senoidal. Aplicando-se a lei de Kirchhoff das correntes obtém-se:

$$I_{C1xh} = I_{Lxh} - I_{Sxh}, \tag{8}$$

em que o subscrito x representa a fase e h a ordem do harmônico.

Na Figura 18, V_{Sxh} representa o conteúdo harmônico de tensão e I_{Sxh} representa o conteúdo harmônico de corrente. Desse modo, por meio do teorema da superposição, é possível determinar o comportamento do circuito. Portanto, fazendo V_{Sxh} nulo, como representado na Figura 19(a) pode-se desenvolver a seguinte equação

$$V_{inv1xh} - I_{C1xh}Z_{F1xh} + I_{Sxh}Z_{Sxh} = 0 \tag{9}$$

substituindo (8) em (9), resulta

$$V_{inv1xh} - (I_{Lxh} - I_{Sxh})Z_{F1xh} + I_{Sxh}Z_{Sxh} = 0 \tag{10}$$

$$V_{inv1xh} + (Z_{F1xh} + Z_{Sxh})I_{Sxh} = Z_{F1xh}I_{Lxh}. \tag{11}$$

Se a tensão do conversor for controlada de forma que $V_{inv1xh} = KI_{Sxh}$, com $K \geq 0$ resulta em

$$KI_{Sxh} + (Z_{F1xh} + Z_{Sxh})I_{Sxh} = Z_{F1xh}I_{Lxh} \tag{12}$$

$$(K + Z_{F1xh} + Z_{Sxh})I_{Sxh} = Z_{F1xh}I_{Lxh} \tag{13}$$

$$I_{Sxh} = \frac{I_{Lxh}Z_{F1xh}}{(K + Z_{F1xh} + Z_{Sxh})}. \tag{14}$$

Portanto, quanto maior for o valor de K escolhido, menor é a parcela da corrente harmônica de carga na corrente da fonte (LAM; WONG, 2014).

Também considerando $V_{inv1xh} = KI_{Sxh}$, em (9), tem-se

$$KI_{Sxh} - I_{C1xh}Z_{F1xh} + I_{Sxh}Z_{Sxh} = 0 \tag{15}$$

$$-I_{C1xh}Z_{F1xh} + I_{Sxh}(K + Z_{Sxh}) = 0, \tag{16}$$

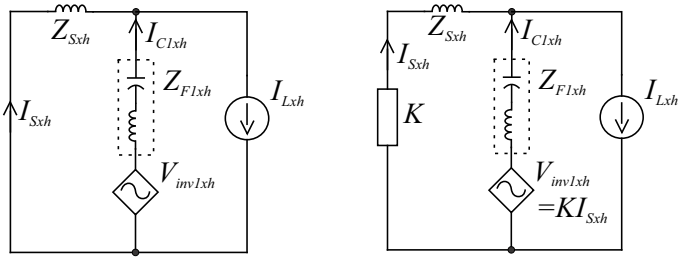
Sugerindo que esta forma de controlar o conversor equivale a sintetizar uma impedância K, para as correntes harmônicas da rede, em série com a impedância da rede, conforme mostrado na Figura 19(b).

Segundo (LAM; WONG, 2014) do ponto de vista da corrente harmônica da carga I_{Lxh}, a rede se comporta como uma grande impedância *K* em série com sua própria impedância Z_{Sxh}. Dessa forma, seu caminho mais natural de circulação se torna o ramo de Z_{F1xh}, por sua impedância ser consideravelmente mais baixa que a do ramo de $Z_{Sxh} + K$, como pode ser visto na Figura 19(b).

Figura 19 – Circuitos para o caso em que não há harmônicos de tensão.

(a) Circuito equivalente para $V_{Sxh} = 0$ e apenas I_{Lxh} é considerado

(b) Modelo de circuito equivalente para harmônicos devido apenas a I_{Lxh}



Fonte: adaptado de Lam e Wong (2014).

O outro caso a ser considerado para se obter I_{Sxh} é supor um sistema sem harmônicos de corrente na carga, ou seja, $I_{Lxh} = 0$ mas com harmônicos de tensão na rede, $V_{Sxh} \neq 0$. O circuito equivalente é mostrado na Figura 20(a), onde:

$$I_{Sxh} = -I_{C1xh} \tag{17}$$

$$K \cdot I_{Sxh} = I_{C1xh} \cdot (Z_{F1xh} + Z_{Sxh}) + V_{Sxh} \tag{18}$$

Substituindo (17) em (18) obtém-se:

$$I_{Sxh} = \frac{1}{(K + Z_{F1xh} + Z_{Sxh})} V_{Sxh}. \tag{19}$$

Na Figura 20(b), observa-se que do ponto de vista da tensão harmônica do sistema, o conversor se comporta como uma grande impedância K que mitiga os efeitos de V_{Sxh}.

Somando (14) e (19) obtém-se a equação do comportamento da corrente I_{Sxh}:

$$I_{Sxh} = \frac{I_{Lxh} \cdot Z_{F1xh}}{(K + Z_{F1xh} + Z_{Sxh})} + \frac{V_{Sxh}}{(K + Z_{F1xh} + Z_{Sxh})} \tag{20}$$

Por meio de raciocínio análogo ao que foi utilizado para a obtenção de I_{Sxh} pode-se obter a equação do comportamento de I_{Cxh}:

$$I_{C1xh} = \frac{I_{Lxh} \cdot (K + Z_{Sxh})}{(K + Z_{F1xh} + Z_{Sxh})} - \frac{V_{Sxh}}{(K + Z_{F1xh} + Z_{Sxh})}. \tag{21}$$

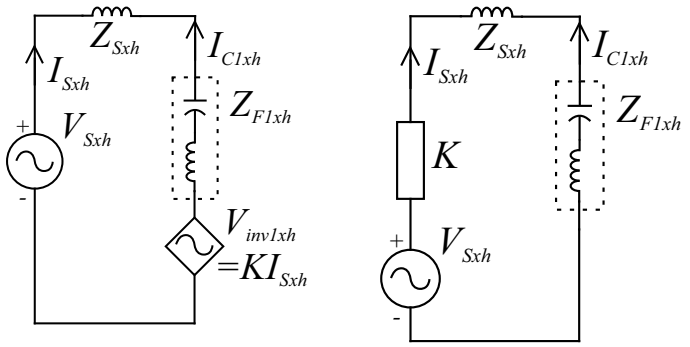
Se em (20) e (21) K for nulo obtém-se o comportamento de um filtro passivo paralelo:

$$I_{Sxh} = \frac{I_{Lxh} \cdot Z_{F1xh}}{(Z_{F1xh} + Z_{Sh})} + \frac{V_{Sxh}}{(Z_{F1xh} + Z_{Sh})}, \tag{22}$$

Figura 20 – Circuitos para o caso em que não há harmônicos de corrente.

(a) Circuito para $I_{Lxh} = 0$ e apenas V_{Sxh} é considerado

(b) Modelo de circuito equivalente para harmônicos devido apenas a V_{Sxh}



Fonte: adaptado de Lam e Wong (2014).

$$I_{C1xh} = \frac{I_{Lxh} \cdot (Z_{Sxh})}{(Z_{F1xh} + Z_{Sxh})} - \frac{V_{Sxh}}{(Z_{F1xh} + Z_{Sxh})}. \tag{23}$$

Da análise de (20) e (21) observa-se que por meio do controle do valor de K é possível atenuar harmônicos de várias ordens. Por outro lado, fazendo a observação das equações 22 e 23 percebe-se que a única maneira de controlar os harmônicos de corrente é por meio do ajuste da impedância Z_{F1xh}. É neste ponto que os filtros ativos ou híbridos se sobressaem aos passivos, apesar de seus custos mais elevados. Outra vantagem que se pode observar dos filtros com componentes ativos é a sua capacidade de eliminar ressonâncias paralelas entre a parte passiva do filtro e a rede elétrica, tornando o sistema mais confiável.

2.1.2 Modelagem Matemática

O desenvolvimento do modelo matemático para o filtro híbrido permitirá o aprofundamento do conhecimento a respeito do comportamento do filtro em diversas situações que se deseje estudar, o filtro considerado é o mostrado na Figura 17. Para efeito deste modelo, cada braço do conversor é considerado como sendo uma fonte de tensão controlada, pois cada um deles pode sintetizar tensões de forma independente dos outros, a rede é representada como sendo um sistema composto por três fases e neutro, já a carga é genérica e depois particularizada para efeito de estudos. Também é utilizado um indutor de acoplamento de neutro L_{Cn}. Os efeitos da presença desta nova indutância são discutidos ao longo do desenvolvimento das equações deste modelo. Novamente, o subscrito *x* denota a fase, i_{Sx}, i_{Lx} e i_{cx} representam, respectivamente, as correntes da rede, carga e do conversor, C_{c1} e L_{c1} representam a capacitância e a indutância do filtro passivo da saída do conversor, v_{Lc1n} denota a tensão no indutor de neutro. As variáveis estão representadas na Figura 17 (LAM; WONG, 2014). A partir da Figura 17, as equações

diferenciais do indutor de acoplamento L_{c1} e do capacitor C_{c1} podem ser expressas como:

$$L_{C1} \cdot \frac{di_{C1x}(t)}{dt} = v_{inv1x}(t) - L_{C1n} \cdot \frac{di_{C1n}(t)}{dt} - v_{Sx}(t) - v_{Cc1x}(t) \tag{24}$$

$$C_{C1} \cdot \frac{dv_{Cc1x}(t)}{dt} = i_{C1x}(t) \tag{25}$$

As equações (24) e (25) é válida para cada uma das três fases do sistema em questão. Realizando a expansão para a forma matricial obtém-se:

$$L_{C1}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{C1a} \\ i_{C1b} \\ i_{C1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{inv1a} \\ v_{inv1b} \\ v_{inv1c} \end{bmatrix} - L_{C1n}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} i_{C1n} \\ i_{C1n} \\ i_{C1n} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Sa} \\ v_{Sb} \\ v_{Sc} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Cc1a} \\ v_{Cc1b} \\ v_{Cc1c} \end{bmatrix} \tag{26}$$

$$C_{C1}\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} v_{Cc1a} \\ v_{Cc1b} \\ v_{Cc1c} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{C1a} \\ i_{C1b} \\ i_{C1c} \end{bmatrix} \tag{27}$$

Considerando-se $i_{C1a} + i_{C1b} + i_{C1c} - i_{C1n} = 0$ e a transformada do referencial abc para o $\alpha\beta0$ dada por:

$$T_{\alpha\beta0} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}. \tag{28}$$

A transformação inversa, $\alpha\beta0$ para abc é dada pela inversa de $T^{-1}_{\alpha\beta0}$

$$X_{ABC} = T^{-1}_{\alpha\beta0} X_{\alpha\beta0}, \tag{29}$$

em que $T^{-1}_{\alpha\beta0}$ é dada por:

$$T^{-1}_{\alpha\beta0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{bmatrix}. \tag{30}$$

A aplicação da matriz de transformação em um termo com derivada implica em:

$$T_{\alpha\beta0}\frac{dX_{ABC}}{dt} = T_{\alpha\beta0}\frac{d(T^{-1}_{\alpha\beta0}X_{\alpha\beta0})}{dt}. \tag{31}$$

Aplicando a regra da derivada de um produto de funções chega-se a:

$$T_{\alpha\beta0}\frac{dX_{ABC}}{dt} = T_{\alpha\beta0}\frac{d(T^{-1}_{\alpha\beta0})}{dt}X_{ABC} + T^{-1}_{\alpha\beta0}\frac{d(X_{ABC})}{dt}. \tag{32}$$

Todos os termos da derivada de $T^{-1}_{\alpha\beta0}$ são nulos.

Aplicando esta transformação a (26) e (27) e considerando que $i_{C1n} = 3i_{C0}$

$$\begin{bmatrix} L_{C1} & 0 & 0 \\ 0 & L_{C1} & 0 \\ 0 & 0 & (L_{C1} + 3L_{Cn}) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{C1\alpha} \\ i_{C1\beta} \\ i_{C10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{inv1\alpha} \\ v_{inv1\beta} \\ v_{inv10} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{S\alpha} \\ v_{S\beta} \\ v_{S0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Cc1\alpha} \\ v_{Cc1\beta} \\ v_{Cc10} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$C_{C1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_{Cc1\alpha} \\ v_{Cc1\beta} \\ v_{Cc10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{C1\alpha} \\ i_{C1\beta} \\ i_{C10} \end{bmatrix}. \quad (34)$$

Quando não se faz uso da indutância de acoplamento na conexão de neutro do conversor (33) se torna igual a

$$L_{C1} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{C1\alpha} \\ i_{C1\beta} \\ i_{C10} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{inv1\alpha} \\ v_{inv1\beta} \\ v_{inv10} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{S\alpha} \\ v_{S\beta} \\ v_{S0} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{Cc1\alpha} \\ v_{Cc1\beta} \\ v_{Cc10} \end{bmatrix} \quad (35)$$

Por se tratarem de equações gerais pode-se obter o modelo de um filtro ativo paralelo pela eliminação dos termos referentes ao capacitor do filtro passivo nas equações (33) e (34) e seguindo o modelo de circuito equivalente mostrado na Figura 21 se obtém o seguinte modelo matemático em $\alpha\beta0$:

$$\begin{bmatrix} L_{C1} & 0 & 0 \\ 0 & L_{C1} & 0 \\ 0 & 0 & (L_{C1} + 3L_{Cn}) \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \\ i_{C0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{inv1\alpha} \\ v_{inv1\beta} \\ v_{inv10} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} v_{S\alpha} \\ v_{S\beta} \\ v_{S0} \end{bmatrix}. \quad (36)$$

Uma vez desenvolvidos os modelos matemáticos, pode-se desenhar os circuitos equivalentes no referencial $\alpha\beta0$ como mostrado na Figura 22.

Por meio da análise da Figura 22 chega-se a conclusão de que o uso de L_{cn} é opcional. Por outro lado, seu uso traz vantagens ao conversor em situações de cargas desbalanceadas com harmônicos diversos, inclusive os de terceira ordem. Esta vantagem se deve ao fato de que a inserção deste novo componente permite ao filtro híbrido ter duas frequências de ressonância, possibilitando a sintonia tanto em terceiro harmônico como em harmônicos de ordem distinta (LAM; WONG, 2014).

Como pode ser observado em (33), a indutância de acoplamento de neutro somente afeta a componente de sequência zero do conversor. Sendo assim, nos eixos α e β as frequências de ressonância, tanto em um conversor com ou sem L_{cn}, serão idênticas e dadas por

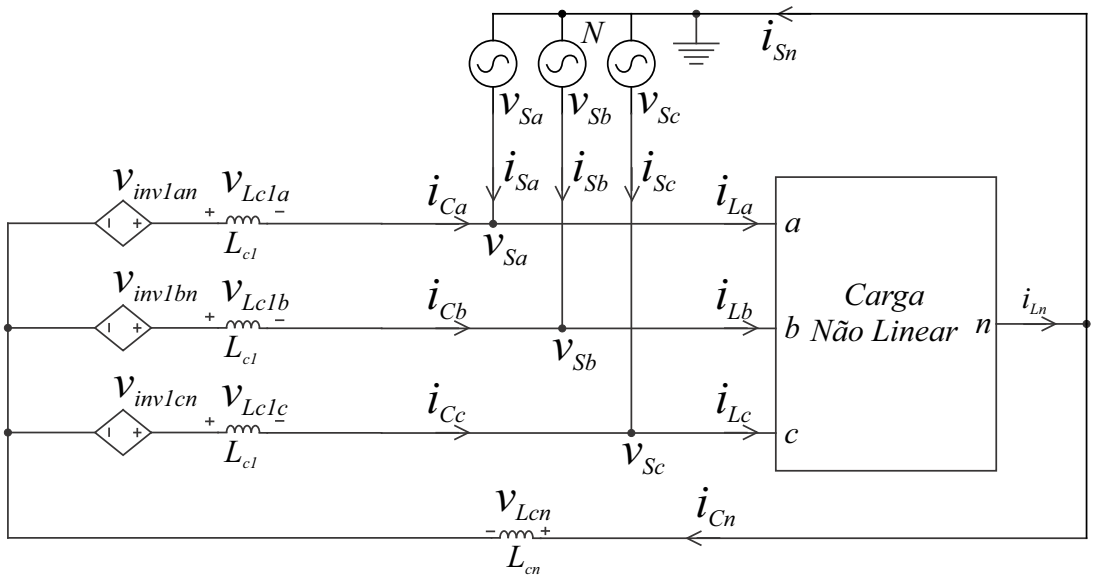
$$f_{\alpha\beta SL} = f_{0SL} = f_{\alpha\beta Ln} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_{C1}C_{C1}}}. \quad (37)$$

Já a frequência de ressonância de eixo zero é diferente das demais no caso com L_{cn}

$$f_{0Ln} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(3L_{Cn} + L_{C1})C_{C1}}}, \tag{38}$$

em que $f_{\alpha\beta SL}$ e $f_{\alpha\beta Ln}$ representam a frequência de ressonância dos circuitos de eixos $\alpha\beta$ sem e com indutância no neutro, f_{0SL} e f_{0Ln} representam a frequência de ressonância do circuito de sequência 0 sem e com indutor no neutro do conversor.

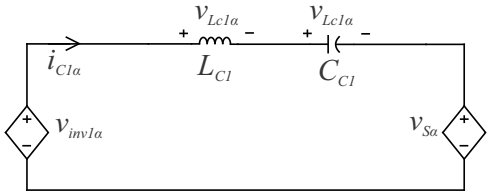
Figura 21 – Filtro ativo paralelo: modelo de circuito equivalente.



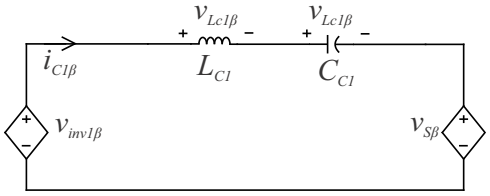
Fonte: o autor (2019).

Figura 22 – Circuitos equivalentes em eixo $\alpha\beta 0$ com e sem L_{cn}.

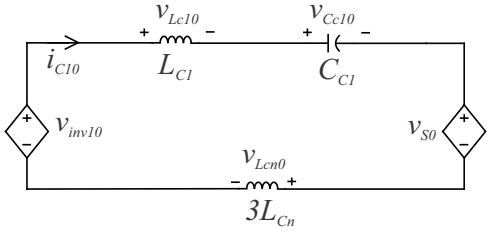
(a) Circuito de eixo α com e sem L_{cn}



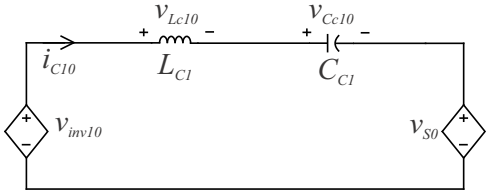
(b) Circuito de eixo β com e sem L_{cn}



(c) Circuito de eixo 0 com L_{cn}



(d) Circuito de eixo 0 sem L_{cn}

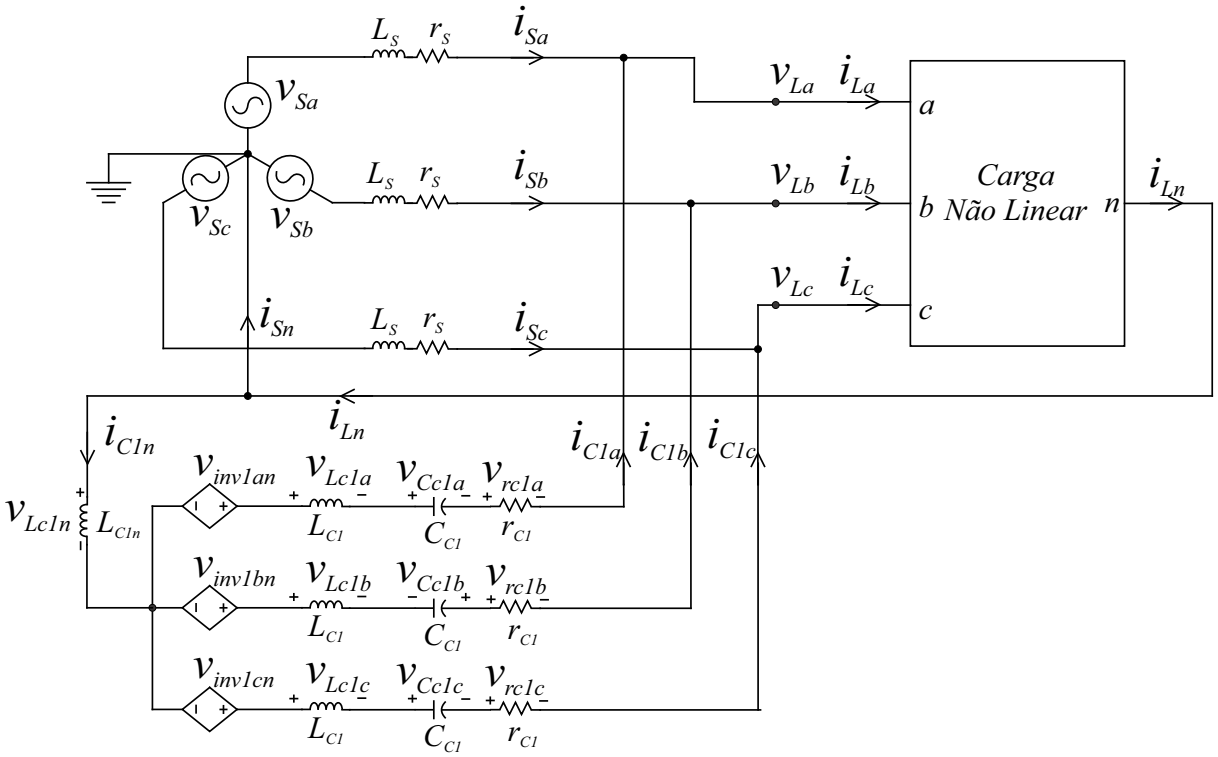


Fonte: adaptado de Lam e Wong (2014).

2.1.3 Modelo do Compensador Paralelo no Domínio da Frequência

Nesta seção, são desenvolvidos os modelos para obtenção da função de transferência do lado paralelo do conversor. A obtenção da função de transferência tem o objetivo de prever o comportamento do conversor a determinadas entradas e também fazer o projeto adequado dos controladores e seus respectivos ganhos (ROCHA, 2014). Para o desenvolvimento das equações, é usada como base o circuito equivalente mostrado na Figura 23.

Figura 23 – Modelo Filtro Híbrido.



Fonte: o autor (2019).

Considerando que o filtro híbrido mostrado na Figura 23 injeta as correntes harmônicas, e a fonte as correntes fundamentais pode-se escrever que as tensões produzidas pelo conversor entre os pontos a e n, b e n, c e n como:

$$[v_{inv1abcn}] = r_{C1}[i_{C1abc}] + L_{C1}\frac{d}{dt}[i_{C1abc}] + \frac{1}{C_{c1}}\int i_{C1abc} - r_S[i_{Sabc}] - L_S\frac{d}{dt}[i_{Sabc}] + [v_{Sabc}] \quad (39)$$

Sabendo que cada braço do conversor é representado como sendo uma fonte de tensão controlada, o objetivo é encontrar uma função de transferência tal que associe a corrente de saída do filtro com a tensão que o mesmo produz. Portanto é necessário encontrar:

$$F(s) = \frac{[i_{C1\alpha\beta0}]}{[v_{inv1\alpha\beta0}]}. \quad (40)$$

No ponto de acoplamento comum, pode-se aplicar a Lei de kirchhoff das correntes

$$[i_{Sabc}] = [i_{Labc}] - [i_{C1abc}] \quad (41)$$

$$[v_{inv1abc}] = r_{C1}[i_{C1abc}] + L_{C1}\frac{d}{dt}[i_{C1abc}] + \frac{1}{C_{C1}}\int i_{C1abc} - r_S([i_{Labc}] - [i_{C1abc}]) \\ -L_S\frac{d}{dt}([i_{Labc}] - [i_{C1abc}]) + [v_{Sabc}] \tag{42}$$

Definindo a soma das resistências do filtro e da rede como sendo:

$$r_{C1} + r_S = r_t \tag{43}$$

e a soma das indutâncias do filtro e rede como:

$$L_{C1} + L_S = L_t \tag{44}$$

e substituindo em (42) se obtém:

$$[v_{inv1abc}] = r_t[i_{C1abc}] + L_t\frac{d}{dt}[i_{C1abc}] - r_S[i_{Labc}] + \frac{1}{C_{C1}}\int i_{C1abc} - L_S\frac{d}{dt}[i_{Labc}] + [v_{Sabc}]. \tag{45}$$

A equação (45) representa a tensão sintetizada pelos braços do conversor em função dos parâmetros da rede e da carga. Para a obtenção da função de transferência no referencial $\alpha\beta 0$ é aplicado:

$$[v_{inv1\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}][v_{inv1abc}], \tag{46}$$

$$[i_{C1\alpha\beta 0}] = [T_{\alpha\beta 0}][i_{C1abc}]. \tag{47}$$

Com a aplicação da transformada, é possível escrever:

$$[v_{inv1\alpha\beta 0}] = r_t[i_{C1\alpha\beta 0}] + L_t\frac{d}{dt}[i_{C1\alpha\beta 0}] + r_s[i_{L\alpha\beta 0}] + \frac{1}{C_{C1}}\int i_{C1\alpha\beta 0} - L_s\frac{d}{dt}[i_{S\alpha\beta 0}] + [v_{S\alpha\beta 0}] \tag{48}$$

Para o controle, as grandezas da rede e da carga são perturbações a serem compensadas (ROCHA, 2014). Portanto, (48), pode ser reescrita como:

$$[V'_{inv1\alpha\beta 0}] = r_t[i_{C1\alpha\beta 0}] + L_t\frac{d}{dt}[i_{C1\alpha\beta 0}] + \frac{1}{C_{C1}}\int i_{C1\alpha\beta 0} \tag{49}$$

Aplicando a transformada de Laplace em (49):

$$[V'_{inv1\alpha\beta 0}(s)] = r_t[i_{C1\alpha\beta 0}(s)] + l_t s[i_{C1\alpha\beta 0}(s)] + \frac{1}{sC_{C1}}[i_{C1\alpha\beta 0}](s). \tag{50}$$

Separando (50) nas suas componentes α, β e 0, obtém-se:

$$[V'_{inv1\alpha}(s)] = r_t[i_{C1\alpha}(s)] + L_t s[i_{C1\alpha}(s)] + \frac{1}{sC_{C1}}[i_{C1\alpha}](s), \tag{51}$$

$$[V'_{inv1\beta}(s)] = r_t[i_{C1\beta}(s)] + L_t s[i_{C1\beta}(s)] + \frac{1}{sC_{C1}}[i_{C1\beta}](s), \tag{52}$$

$$[V'_{inv10}(s)] = r_t[i_{C10}(s)] + L_t s[i_{C10}(s)] + \frac{1}{sC_{C1}}[i_{C10}](s). \tag{53}$$

Portanto, as funções de transferência nos eixos do sistema são representadas por:

$$G_{i\alpha}(s) = \frac{i_{C1\alpha}(s)}{V'_{inv1\alpha}(s)} = \frac{C_{C1}s}{L_t C_{C1}s^2 + r_t C_{C1}s + 1}, \tag{54}$$

$$G_{i\beta}(s) = \frac{i_{C1\beta}(s)}{V'_{inv1\beta}(s)} = \frac{C_{C1}s}{L_t C_{C1}s^2 + r_t C_{C1}s + 1}, \tag{55}$$

$$G_{i0}(s) = \frac{i_{C10}(s)}{V'_{inv10}(s)} = \frac{C_{C1}s}{L_t C_{C1}s^2 + r_t C_{C1}s + 1}. \tag{56}$$

As equações (54), (55) e (56) serão usadas, posteriormente, nos projetos dos ganhos dos controladores.

2.2 Princípio de Funcionamento e Modelagem Matemática

Neste trabalho, o conversor série é empregado para mitigar distúrbios de tensão da fonte de alimentação, e é conectado em série entre a fonte e carga por meio de transformadores (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007), funcionando como um restaurador dinâmico de tensão DVR.

Nos sistemas elétricos de um modo geral, os afundamentos e sobretensões desequilibrados são os mais comuns (LINDEKE, 2003). Dessa forma o DVR precisa injetar sinais de amplitudes variadas em cada uma das fases. É demostrado o funcionamento e comportamento do SrAPF na situação de uma perturbação de tensão desequilibrada.

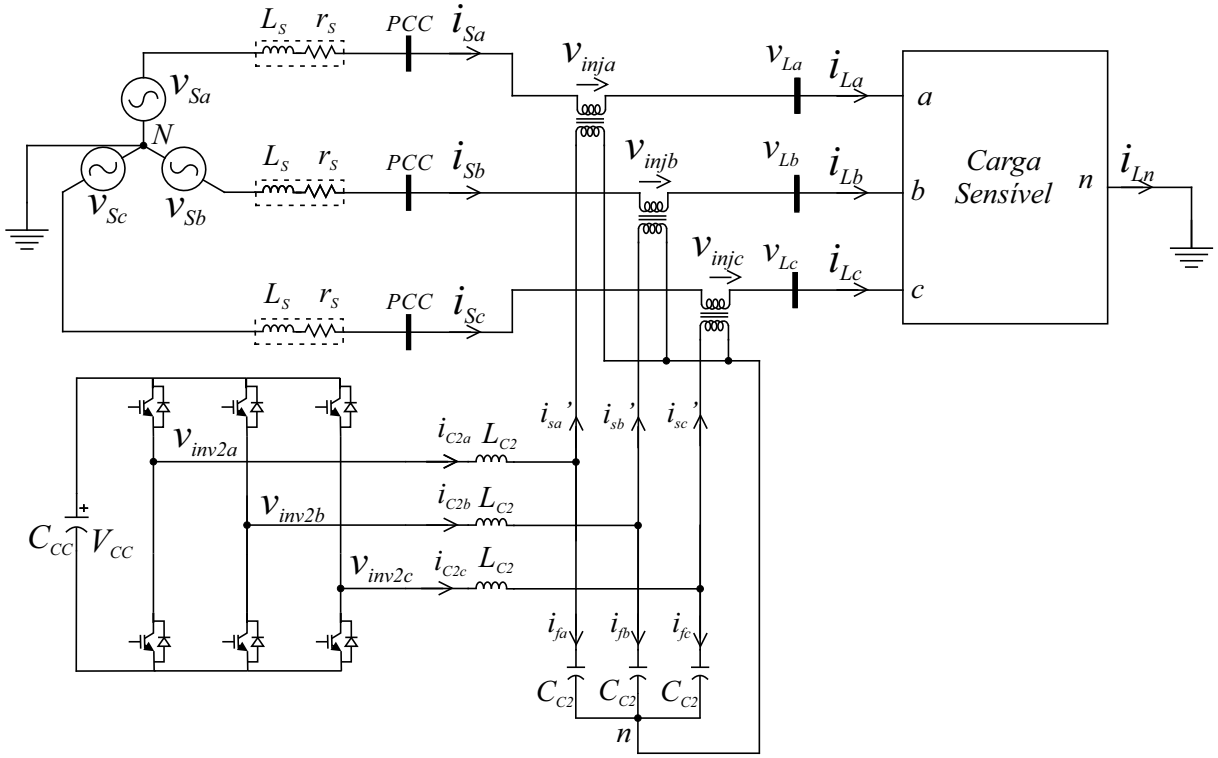
Assim como foi feito para o filtro híbrido paralelo, é demonstrado que a configuração padrão a três fios não possui a capacidade de compensar perturbações desequilibradas e, em seguida, demonstra-se como contornar esta limitação (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007).

Para compensar perturbações de tensão contendo componentes de sequência zero, o DVR necessita produzir uma componente de tensão de sequência zero que deve ser igual em magnitude e com polaridade oposta à produzida pela rede. A Figura 24 mostra a topologia tradicional de um DVR, com três fios e barramento CC simples. Como a componente de sequência zero de tensão ou corrente é igual ao somatório das tensões ou correntes de fase, a seguinte expressão pode obtida em condições de regime (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007):

$$3V_{L0} = 3V_{p0} + (V_{inja} + V_{injb} + V_{injc}), \tag{57}$$

em que, V_{p0} representa a tensão de sequência zero no ponto de acoplamento comum (PCC - *Point of Common Coupling*), V_{L0} representa a tensão de sequência zero na carga e V_{injx} é a tensão injetada em um dos transformadores série.

Figura 24 – Condicionador série a três fios.



Fonte: o autor (2019).

A soma das correntes absorvidas pelos capacitores do filtro (C_{c2}) é igual à corrente de sequência zero da carga (i_{L0}), multiplicada pela relação de transformação dos transformadores (n), visto que os terminais dos capacitores estão conectados ao ponto comum dos transformadores

$$(i_{fa} + i_{fb} + i_{fc}) = -3ni_{L0}. \tag{58}$$

A soma das tensões injetadas no PCC produzem no lado secundário do transformador série uma corrente de sequência zero que é função da corrente de sequência zero que seria produzida na carga caso não fosse compensada a perturbação de tensão desequilibrada (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007)

$$(V_{inja} + V_{injb} + V_{injc}) = -\frac{3n^2}{sC_{C2}} i_{L0} - n^2(r_t + sL_t)3i_{L0}. \tag{59}$$

Substituindo (59) em (57), obtém-se:

$$V_{L0} = V_{p0} - \frac{n^2}{sC_{C2}} i_{L0} - n^2(r_{\,t} + sL_t)i_{L0}, \tag{60}$$

onde i_{L0}, n, r_t, L_t, C_{c2}, L_L e r_L representam, respectivamente, corrente de sequência zero da carga, razão de espiras do transformador série, resistência do enrolamento do transformador série, indutância do enrolamento do transformador capacitância do filtro, indutância da carga e resistência da carga.

Sendo a corrente de sequência zero uma função da tensão de sequência zero e da impedância da carga (z_L), a seguinte expressão é válida:

$$i_{L0} = \frac{V_{L0}}{z_L}. \tag{61}$$

Substituindo (61) em (60), obtém-se

$$V_{L0} = V_{p0} - \frac{n^2}{sC_{C2}}\frac{V_{L0}}{z_L} - n^2(r_t + sL_t)\frac{V_{L0}}{z_L}, \tag{62}$$

sendo a impedância da carga dada por:

$$z_L = r_L + sL_L. \tag{63}$$

Reorganizando os termos de (62), pode-se escrever que

$$V_{L0}\left(\frac{sC_{C2}(r_L + sL_L) + n^2 + n^2 sC_{C2}(r_t + sL_t)}{sC_{C2}z_L}\right) = V_{p0}. \tag{64}$$

Rearranjando (64), finalmente pode-se escrever

$$V_{L0} = \frac{sC_{c2}z_L V_{p0}}{[sC_{c2}(r_L + n^2 r_t) + s^2 C_{c2}(L_L + n^2 L_t) - n^2]}. \tag{65}$$

Ao se fazer a análise de (65), percebe-se que a equação não possui qualquer termo que possa ser controlado pelo conversor. Assim, na ocasião de uma pertubação de tensão desequilibrada, as tensões nos terminais da carga se tornarão também desbalanceadas. Em outras palavras, o conversor da Figura 24 não possui a capacidade de injetar componentes de sequência zero. Outra consequência é a circulação de correntes de sequência zero nos transformadores série que faz as correntes da carga se tornarem desequilibradas.

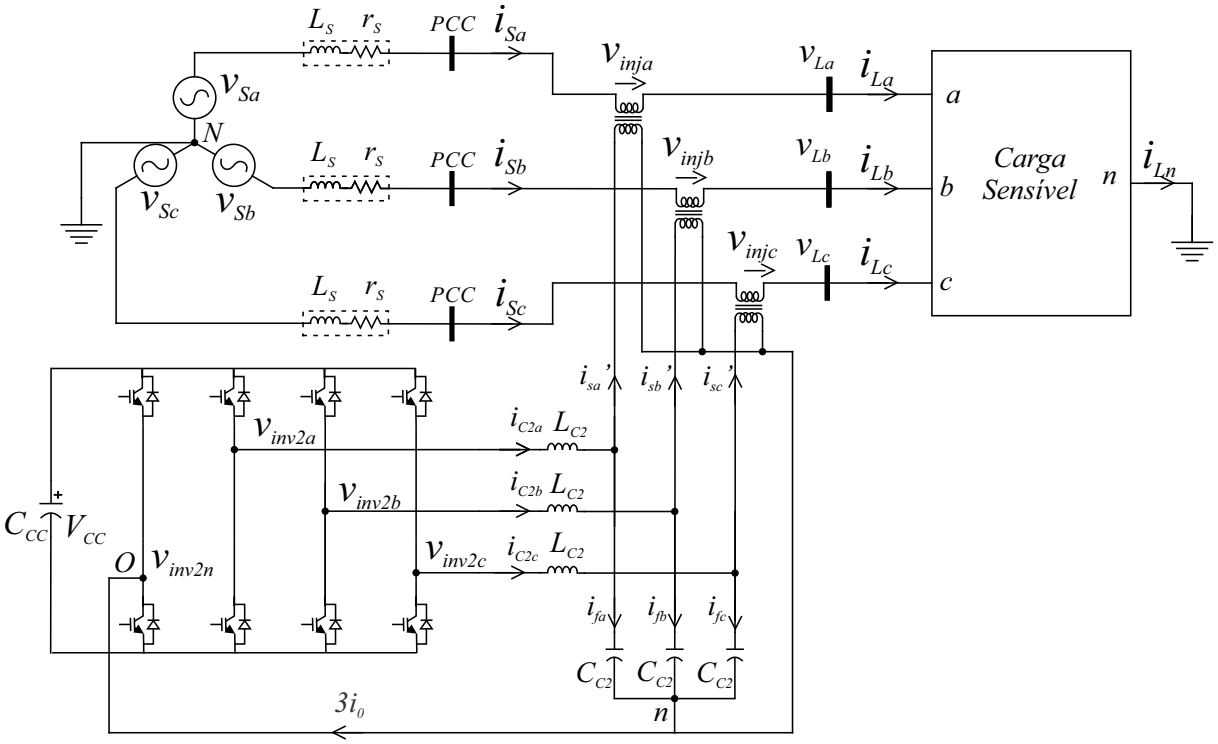
Como foi demonstrado para o caso do ShAPF, há necessidade de modificação física da topologia para dotá-la desta capacidade. Sendo assim, as duas possibilidades citadas por (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007) são a conexão do ponto central do barramento CC com o ponto comum de ligação dos transformadores ou o uso de braço adicional. Porém como a configuração com conexão ao ponto central do barramento cria um acoplamento entre o lado CC e o CA provocando problemas ressonância, ondulação adicional no barramento CC e controle mais complexo, optou-se por desenvolver a topologia com um braço adicional, como feito com ao filtro híbrido paralelo.

O acoplamento criado entre o lado CC e o lado CA através da conexão do ponto comum dos filtros capacitivos e dos transformadores de injeção com o ponto central do barramento CC produz alguns problemas como ressonância e ondulação adicional no barramento CC em componentes harmônicas de baixa frequência, próximas a frequência fundamental, podendo inviabilizar o controle do DVR, além de requerer capacitores significativamente maiores. Dessa

forma, para contornar estes problemas é possível usar um novo braço no conversor cuja função é basicamente a mesma da conexão no ponto central do barramento CC, porém com a vantagem de desacoplar o lado CC do CA, além de eliminar os problemas de ressonância. A Figura 25 mostra a configuração desta topologia.

Para o DVR mostrado na Figura 25, em condições de regime permanente, as seguintes equações são válidas:

Figura 25 – DVR com quarto braço.



Fonte: o autor (2019).

$$3V_{L0} = 3V_{p0} + n(v_{ca} + v_{cb} + v_{cc}) - n^2(r_t + sl_t)3i_{L0}, \tag{66}$$

$$3i_0 - 3ni_{l0} = jw_0C_f(V_{ca} + V_{cb} + V_{cc}), \tag{67}$$

onde i_0 representa a corrente de sequência zero no caminho $n0$ na Figura 25.

A partir de (66) e (67) e usando raciocínio análogo ao usado para obtenção de (65),(68) pode ser obtida

$$V_{L0} = \frac{(w_0C_{C2}v_{p0} - jni_0)z_l}{[w_0C_{C2}(r_l + n^2r_t) + jw_0^2C_{c_2}(L_l + n^2l_t) - n^2]} \tag{68}$$

Claramente, se $w_0C_{C2}V_{p0} = jni_0$ a tensão de sequência zero é nula ($V_{l0} = 0$). Na ocorrência de uma perturbação de tensão desequilibrada a corrente de sequência zero irá fluir através da nova conexão $n0$.

É necessário o emprego de uma técnica de PWM que leve em conta o braço adicional do conversor. Existem diversas técnicas que podem ser empregadas (PO-NGAM, 2014) (OJO; KSHIRSAGAR, 2004) (DEHNAVI et al., 2010) (ZHANG, 1998). No entanto, pela de facilidade de implementação é empregada a técnica de PWM comparação seno-triângulo.

2.3 Modelo do Filtro Ativo Série

Para desenvolver o modelo de controle em Laplace foi utilizada como base a Figura 25, onde são representadas as ligações elétricas do conversor com a rede elétrica e o sentido das correntes.

O condicionado série pode ser representado, também, como uma fonte de tensão em série com a rede e a carga. Dessa forma, pode-se escrever

$$v_{Sx} - Z_{Sx}I_{Lx} - Z_{C2x}i_{Lx} + v_{injx} - v_{Lx} = 0, \tag{69}$$

em que Z_{C2x} representa a impedância do filtro série, v_{injx} representa a tensão injetada pelos transformadores, v_{Lx} é a tensão nos terminais da carga, v_{Sx} representa a tensão da rede, Z_{Sx} representa a impedância da rede elétrica e i_{Lx} representa a corrente da carga.

Reorganizando os termos de (69), pode-se escrever

$$v_{Sx} - (Z_{Sx} + Z_{C2x})I_{Lx} + v_{injx} = v_{Lx}, \tag{70}$$

onde o subscrito x denota uma das três fases.

Sabendo que a corrente i_{Lx} é função da impedância da carga e da tensão em seus terminais, obtém-se

$$i_{Lx}(s) = \frac{v_{Lx}(s)}{Z_{Lx}}. \tag{71}$$

O objetivo é a obtenção de uma função de transferência que relacione a tensão injetada pelo filtro série com a tensão da carga que é a variável que se deseja controlar neste sistema. Assim a tensão da rede, v_{Sx}, é considerada uma perturbação em (70), que pode ser reescrita na forma

$$v_{injx}(s) = v_{Lx}(s)(1 + \frac{Z_{Sx} + Z_{C2x}}{Z_{Lx}}) \tag{72}$$

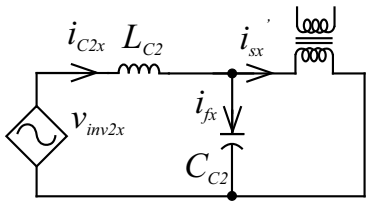
A impedância Z_{C2x} é uma função tanto da impedância do filtro de saída do lado série quanto da impedância dos transformadores série e pode ser calculada com base na Figura 26

$$Z_{C2x} = L_{C2} + (C_{C2}//Z_t). \tag{73}$$

Na equação 73, Z_t representa a impedância do transformador e é composta pela resistência dos enrolamentos e indutância de acoplamento $r_t + sL_t$. Assim, usando a transformada de Laplace pode-se calcular a impedância como sendo

$$Z_{C2x} = \frac{sL_{C2}(1 + sC_{C2}n^2(r_t + sL_t))}{1 + sC_{C2}n^2(r_t + sL_t)} \tag{74}$$

Figura 26 – Representação unifilar do filtro série.



Fonte: o autor (2019).

Como o filtro híbrido está após o ponto de acoplamento comum do lado série, então enxergará a impedância da carga como sendo linear, assim Z_L é representado apenas como $r_L + sL_l$.

$$\frac{Z_{Sx} + Z_{C2x}}{Z_{Lx}} = \frac{r_{Sx} + sL_{Sx} + \frac{sL_{S2}(1+sC_{C2}n^2(r_t+sL_t))}{1+sC_{C2}n^2(r_t+sL_t)}}{r_{Lx} + sL_{Lx}} \tag{75}$$

Substituindo (75) em (72) e desprezando a resistência do enrolamento do transformador e a indutância da carga, pode-se escrever que:

$$\frac{v_{Lx}(s)}{v_{injx}(s)} = \frac{r_{Lx} + sr_{Lx}C_{C2}n^2L_t}{(r_{Sx} + sL_{Sx})(1 + s^2C_{C2}L_tn^2) + sL_{C2} + s^3C_{C2}L_{C2}L_tn^2} \tag{76}$$

Finalmente, a função de transferência pode ser escrita como

$$\frac{v_{Lx}(s)}{v_{injx}(s)} = \frac{sr_{Lx}C_{C2}n^2L_t + r_{Lx}}{s^3(C_{C2}L_tn^2(L_{C2} + L_{Sx})) + s^2(r_{Sx}C_{C2}L_tn^2) + s(L_{C2} + L_{Sx}) + r_{Sx}} \tag{77}$$

A equação (77) possui três polos com ordens de grandeza diferentes e, assim, a dinâmica de dois polos poderá ser desconsiderada para o projeto de controle a ser desenvolvido nas próximas etapas deste trabalho.

2.4 Conclusão

Ao longo deste capítulo foram estudados os princípios de funcionamento individuais dos filtros série e paralelo, este último na configuração híbrida, apenas com um filtro indutivo de ondulação na saída. Este trabalho tem por objetivo o efetivo desenvolvimento do projeto de controle e também conhecimento de limitações das topologias.

Foi demonstrado que as configurações tradicionais, a três fios, não são efetivas no controle de perturbações desequilibradas em sistemas a quatro fios e que é possível contornar essa limitação por meio da modificação da estrutura da topologia. Também foram desenvolvidas as funções de transferência para tanto para o lado paralelo quanto para o lado série do conversor de forma individual.

No próximo capítulo, é discutida a topologia de nove chaves apresentada em (ZHANG; LOH; GAO, 2012) (LIU et al., 2009) (KOMINAMI; FUJIMOTO, 2007) e suas aplicações para

UPQC a quatro fios, assim como projeto do sistema de controle e simulações das topologias propostas.

3 NOVAS ESTRUTURAS DE UPQC A QUATRO FIOS BASEADAS NO CONVERSOR NOVE CHAVES

Neste capítulo é discutida a estrutura do conversor nove chaves proposta em (ZHANG; LOH; GAO, 2012), mostrando seu funcionamento e limitações em condições de carga tanto equilibrada quanto desequilibrada. Em seguida são apresentadas as topologias propostas de UPQC a quatro fios, variantes do conversor nove chaves, além de discutidos diversos aspectos de controle, construtivos e de desempenho. Além disso, são definidas figuras de mérito para comparação entre as topologias.

Como apresentado no Capítulo 2, existem duas principais soluções para controle de componentes de sequência zero: a primeira por meio do acesso ao ponto central do barramento CC, já a segunda alternativa é o uso de um novo braço no conversor, sendo esta a solução adotada para as topologias propostas.

Será apresentada uma topologia variante da proposta por (ZHANG; LOH; GAO, 2012), procurando contornar as limitações de aplicação em sistemas a quatro fios e redes desbalanceadas. Essa nova topologia consiste na adição de um braço e acréscimo de um filtro indutivo capacitivo na saída do lado paralelo do conversor. Será avalia a performance da topologia na sua aplicação.

Ainda é apresentada a estrutura derivada do conversor de oito chaves (GOMES, 2014,) aplicada a sistemas a quatro fios. Ao final deste capítulo, é apresentada uma tabela comparativa das estruturas propostas.

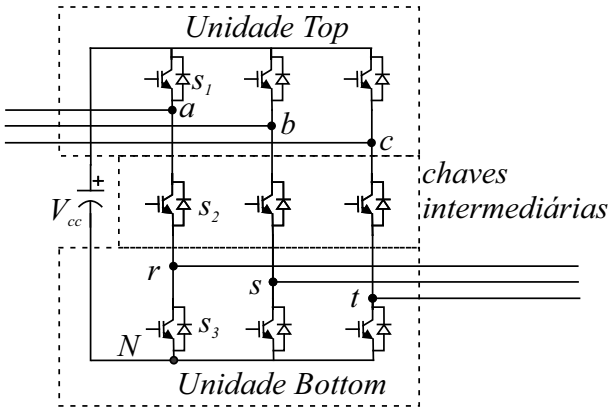
3.1 Princípio de Funcionamento do Conversor Nove Chaves

O conversor nove chaves é apresentado na Figura 27. Sua vantagem é a redução na quantidade de chaves semicondutoras em relação a estrutura convencional, ou *back-to-back*. Nela, os dois conversores são integrados em um só e as chaves intermediárias são comutadas de acordo com uma lógica ou exclusivo (XOR), de modo a evitar que o barramento CC não seja curto-circuitado (ZHANG; LOH; GAO, 2012).

O conversor nove chaves foi inicialmente proposto para o controle independente de duas cargas, como pode ser visto em (KOMINAMI; FUJIMOTO, 2007). Porém, esta não é uma aplicação ideal para este tipo de conversor, pois devido à efetiva junção dos dois conversores em um só, o barramento CC precisa ser compartilhado entre as duas saídas, criando um fator de limitação em relação à amplitude da tensão máxima que pode ser sintetizada.

Normalmente, é feita a divisão efetiva da amplitude da portadora em duas faixas, uma para a unidade *top* e outra para a unidade *bottom*, sem a sobreposição de sinais de acordo com um índice de modulação desejado, M_b, que deve ser menor ou igual a 1 como visto na Figura (28). Este índice pode ser ajustado dinamicamente de acordo com o surgimento de determinadas

Figura 27 – Conversor nove chaves.

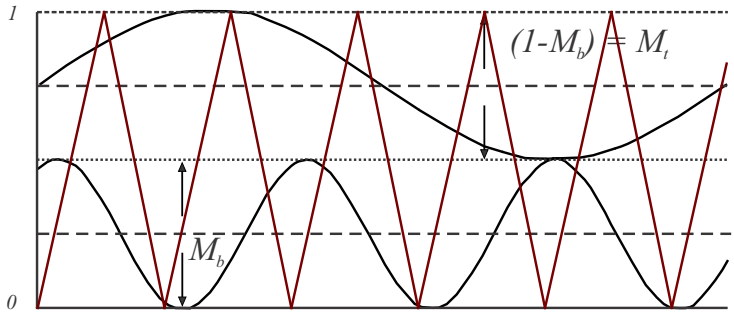


Fonte: Adaptado de (Zang, 2012.)

condições. Este ajuste dinâmico é de fundamental importância para que não seja necessária uma tensão no barramento CC muito mais alta do que a usada em um conversor *back-to-back* (ZHANG; LOH; GAO, 2012).

O fato da portadora de PWM ser dividida, implica que a tensão do barramento CC também é dividida e, assim, a tensão máxima que pode ser sintetizada também é limitada por essa divisão. Logo se, por exemplo, a portadora fosse dividida igualmente entre as duas saídas para que o conversor fosse capaz de sintetizar a mesma forma de onda com amplitude igual ao do *back-to-back* seria necessário um barramento CC com o dobro da tensão em relação ao conversor *back-to-back*, constituindo um fator limitante. No entanto, é sabido que na rede elétrica as perturbações de tensão ocorrem de forma transitória, enquanto que as perturbações nas correntes são causadas pelas cargas que estão ligadas à rede elétrica, dessa forma, são de longa duração. Sendo assim, se a maior parte da banda da portadora for dedicada à saída responsável pelo controle das correntes da rede e uma fração pequena ao controle de tensões, é possível implementar o UPQC com a estrutura nove chaves sem acrescer, de forma significativa, a tensão do barramento CC.

Figura 28 – Exemplo do compartilhamento da portadora.



Fonte: Adaptado de Zang, 2012.

Em uma rede elétrica ideal, seria possível dedicar toda a amplitude da portadora apenas para a saída de controle das correntes da rede, enquanto não ocorresse qualquer distúrbio de tensão na rede e, assim, ter um valor de tensão de barramento igual ao do conversor na topologia *back-to-back*. No entanto, em redes elétricas reais, onde há presença de pertubações, isso não é possível e dedica-se em torno de 10% a 20% do barramento CC de forma fixa à saída do lado série, em situações sem pertubações significativas de tensão. Na ocorrência de uma perturbação uma amplitude maior é alocada para o lado série do conversor. A otimização do uso da portadora leva a um acréscimo médio 15% no valor da tensão do barramento CC do conversor, em relação ao *back-to-back*. Outra consequência do nível da tensão do barramento CC ser somente um pouco superior ao da solução *back-to-back* é a utilização de chaves IGBT de características nominais semelhantes as do conversor *back-to-back* (ZHANG; LOH; GAO, 2012).

O PWM usado no conversor nove chaves consiste na comparação dos sinais modulantes com a portadora triangular de acordo com a seguinte lógica (ZHANG; LOH; GAO, 2012):

$$S_1 = \begin{cases} ON & \text{se a referência é maior que a portadora} \\ OFF & \text{caso contrário} \end{cases}$$

$$S_3 = \begin{cases} ON & \text{se a referência é menor que a portadora} \\ OFF & \text{caso contrário} \end{cases}$$

Já as chaves do meio têm sua lógica de comando dada pelo XOR entre S_1 e S_3, evitando-se assim a ocorrência de um curto-circuito no barramento CC

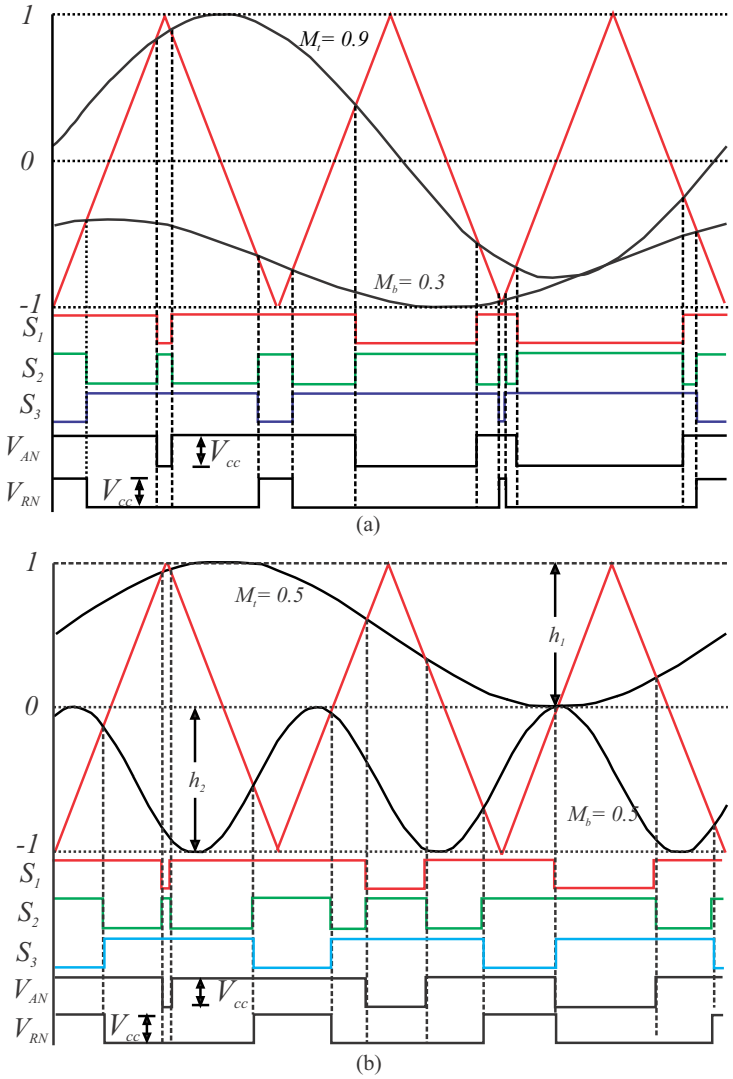
$$S_2 = S_1 \oplus S_3. \tag{1}$$

A soma dos índices de modulação M_b e M_t pode ser superior a um, quando as duas unidades trabalham com ciclos de trabalho de frequências e fases fixas, como mostra a Figura 29a, entretanto esta é uma condição de operação muito idealizada e na aplicação como UPQC não se mostra viável, visto os diversos tipos de modulantes que precisam ser sintetizados, com possuem amplitudes, fases e frequências variáveis. Como solução, é utilizado o modo de operação com soma dos índices de modulação M_b e M_t igual a um, apresentada na Figura 29b.

A aplicação desta lógica resulta nos pulsos de gatilho para as chaves IGBT exemplificados na Figura 29. Devido à limitação de chaveamento que ocorre nas chaves intermediárias do conversor, os estados das chaves e das tensões de saída são os mostrados na Tabela 2

Como mencionado, o conversor nove chaves encontra sua melhor aplicação em qualidade de energia do que propriamente alimentando cargas independentes. Este tipo de conversor foi desenvolvido para aplicação em redes elétricas a três fios com cargas equilibradas. Porém, como demonstrado no Capítulo 2 deste trabalho, a aplicação em sistemas desequilibrados requer a modificação na configuração do conversor para que o mesmo seja capaz de realizar a compensação de grandezas desequilibradas (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007). Assim na próxima seção são apresentadas as modificações na estrutura de nove chaves incluindo o filtro híbrido adaptado de (SRIANTHUMRONG; AKAGI, 2003).

Figura 29 – Exemplo dos sinais de gatilho para as chaves IGBT. (a) mesma frequência; (b) frequências distintas.



Fonte: Adaptado de (Zang, 2012.)

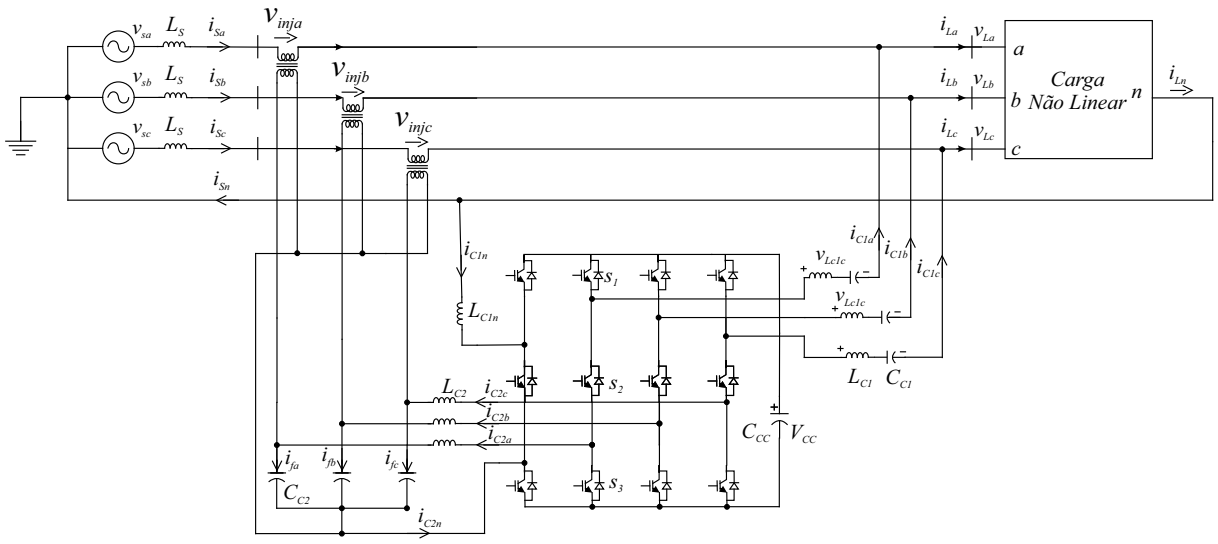
Tabela 2 – Estados das chaves e das tensões de saída do UPQC nove chaves.

S_1	S_2	S_3	V_{AN}	V_{RN}
ON	ON	OFF	V_{CC}	V_{CC}
ON	OFF	ON	V_{CC}	0
OFF	ON	ON	0	0

3.2 Adaptações do Conversor Nove Chaves Aplicadas a UPQC a Quatro Fios

O desenvolvimento de topologias com número reduzido de chaves adaptadas a sistemas com quatro fios é um dos objetivos deste trabalho. Os equipamentos de baseados em eletrônica de potência possuem vantagens no controle de qualidade de energia como, por exemplo, a filtragem ativa de componentes harmônicas, e a mitigação de perturbações de tensão em um só

Figura 30 – UPQC com doze chaves.



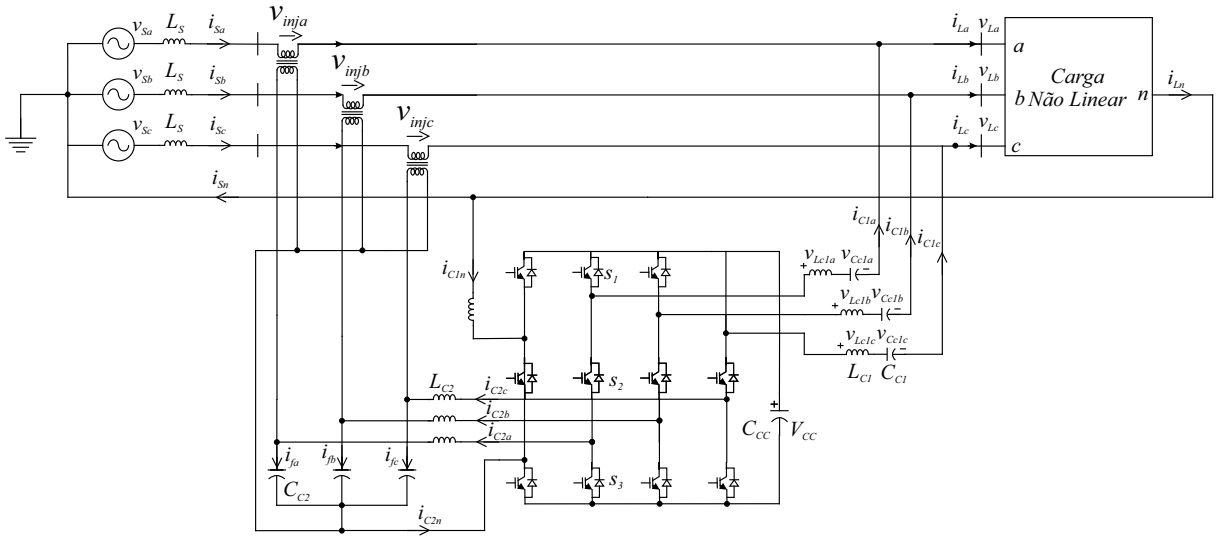
Fonte: o autor (2019).

equipamento. Entretanto, seu custo ainda é elevado devido ao uso de dispositivos semicondutores de potência elevada, como os IGBTs. Assim, uma forma de reduzir esse custo é por meio do desenvolvimento de soluções que permitam a utilização de dispositivos com potência menores e tensões reduzidas. Akagi e Srianthumrong em 2003 (SRIANTHUMRONG; AKAGI, 2003) propuseram usar um filtro *LC* acoplado à saída do filtro ativo reduzindo assim a potência e também a tensão do barramento CC, essa solução é conhecida como filtro híbrido.

No filtro híbrido paralelo proposto em (SRIANTHUMRONG; AKAGI, 2003), o filtro LC passivo absorve as correntes harmônicas produzidas pela carga não-linear, próximas a sua frequência de ressonância, enquanto que o filtro ativo melhora as características de filtragem do mesmo. O filtro ativo, atua como uma impedância dinâmica, tornando possível alterar a largura da banda do filtro passivo permitindo que ele absorva uma faixa de harmônicas maior que sua frequência de sintonia original.

Baseado no proposto em (SRIANTHUMRONG; AKAGI, 2003) e (ZHANG; LOH; GAO, 2012), foram projetadas modificações de modo que o conversor nove chaves proposto em (ZHANG; LOH; GAO, 2012) se torne capaz de injetar tensões e correntes no neutro da rede elétrica. Esta funcionalidade é de fundamental importância para um UPQC, pois a maioria das perturbações da rede elétrica são de natureza desbalanceada. Na Figura 30 é mostrada a topologia baseada no conversor nove chaves, porém com um braço adicional, que é denominada de UPQC doze chaves, já na Figura 31 é mostrada a segunda modificação que consiste na eliminação de uma das chaves da unidade *top* do conversor que será denominada a partir agora de UPQC onze chaves.

Figura 31 – UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

3.2.1 Projeto dos Componentes

O dimensionamento dos componentes do conversor é dado de acordo com a potência da carga e, para o caso do lado série do conversor, da intensidade máxima dos afundamentos de tensão que se pretende compensar. Para efeitos de comparação todas as topologias são ligadas a redes elétricas idênticas e com cargas idênticas de modo que se possa avaliar adequadamente o desempenho uma delas.

A carga tem uma potência total de 1,17kVA e, para efeitos de projeto, assume-se que a potência aparente da mesma será igual à potência ativa (fator de potência unitário) e assim:

$$S_{carga3\phi} = P_{carga3\phi} = 1,17kVA. \tag{2}$$

Como critério de projeto, foi escolhido que o lado série deve ser capaz de compensar afundamentos de tensão monofásicos de até 50% em relação ao valor nominal da rede, que, neste caso é uma rede trifásica cuja a tensão de linha e de $220V_{rms}$. Pode-se definir o fator $K_{1\phi} = 0,5$ que é a magnitude do afundamento a ser compensado. Assim a potência que o conversor deve ser capaz de injetar no pior caso, é dada por:

$$P_{DVR1\phi} = K_{1\phi}P_{carga1\phi} = 0,2kVA. \tag{3}$$

A saída série do conversor deverá também compensar afundamentos de tensão trifásicos, que exige mais potência do conversor. Portanto, é de fundamental importância o dimensionamento da potência máxima que o lado série poderá injetar. Por ser uma perturbação de tensão mais rara e que exige maiores quantidades de energia para ser compensada, optou-se por um valor de afundamento menor, apenas 40% do valor nominal da rede. com um raciocínio

análogo ao feito para o caso monofásico, pode-se definir agora o fator $K_{3\phi}$ que possui a mesma representatividade do fator $K_{1\phi}$, porém para o caso trifásico:

$$P_{DVR3\phi} = K_{3\phi} P_{carga3\phi} = 0,468kVA. \tag{4}$$

Por meio de (3) e (4) conclui-se que o pior caso para é o trifásico, onde ele deve injetar uma potência de 0,468kVA na rede e assim determina-se que a potência teórica do UPQC.

O dimensionamento do banco de capacitores é uma função, também, da tensão nominal da rede elétrica, 110V tensão fase-neutro. Como foi utilizado um transformador de relação 1:1 na conexão do lado série do UPQC, a tensão mínima no terminais do barramento CC precisa ser maior que o valor de pico da tensão da rede de linha que o UPQC será conectado sendo dada por:

$$V_{capmin} \geq V_{FNrms}\sqrt{2}\sqrt{3} \tag{5}$$

$$V_{capmin} \geq 110\sqrt{2}\sqrt{3} = 310,2V. \tag{6}$$

onde V_{FNrms} é a tensão fase-neutro da rede elétrica.

O valor determinado por (6) é teórico e não leva em consideração as quedas de tensão nos indutores do filtro para poder impor uma resposta rápida, frente aos eventos que precisam ser compensados. Portanto, como valor prático foi utilizado 350V de tensão de barramento CC.

O valor da capacitância total do banco de capacitores é dada em função da tensão de barramento CC que se projetou, 350V, da potência máxima que o conversor poderá injetar e do tempo máximo de duração da pior perturbação, em termos de potência, que o conversor deverá operar. A energia armazenada em um capacitor é dada por:

$$E_{cap} = \frac{C_{cc} V_{capmin}^2}{2}, \tag{7}$$

onde E_{cap} é a energia armazenada no capacitor.

Usando a relação entre energia e potência em (7), pode-se escrever que:

$$C_{cc} = \frac{2 * P_{DVR3\phi} T}{V_{capmax}^2 - V_{capmin}^2}, \tag{8}$$

onde T representa o tempo máximo, em segundos, da pior perturbação que o conversor deverá compensar. Neste caso T foi escolhido como sendo 0,5s ou 30 ciclos da frequência fundamental (60Hz).

Realizando a substituição dos valores em (8), pode-se calcular o valor da capacitância. Sendo o valor obtido de $3,98mF$.

Com base no valor obtido em (8) e nos capacitores disponíveis em laboratório, foi utilizado um barramento CC com capacitância de $4,7mF$.

O filtro de saída do lado série do UPQC foi selecionado de modo que a grande parte da ondulação provocada pelo chaveamento não fosse transferido para a rede. Para tanto, foram utilizados os valores adotados em (ZHANG; LOH; GAO, 2012), uma frequência de corte de 1 kHz, por estar a mais de uma década da frequência fundamental e por atenuar praticamente toda a ondulação.

Uma vez que o carregamento do barramento CC é realizado na frequência fundamental da rede por meio do filtro híbrido paralelo, a sintonia do filtro LC será uma relação de compromisso entre a frequência fundamental da rede com as componentes harmônicas da carga. Neste trabalho, foi selecionada a frequência do quinto harmônico por não se distanciar da frequência fundamental da rede e estar próxima das componentes harmônicas da carga utilizada. Com base na relação de compromisso citada, e na necessidade de filtragem da ondulação de chaveamento é realizado o dimensionamento do componente usando como referência (LINDEKE, 2003).

Em (LINDEKE, 2003), é levado em consideração a tensão da rede, a corrente de pico da carga, a frequência de chaveamento e a tensão do barramento CC. Este método, apesar de simples, mostrou-se eficaz aliando um dimensionamento racional com bom desempenho. A Equação a seguir sintetiza este método

$$L_{c1} = \frac{\sqrt{2}V_s}{\Delta i_L f_{sw}}(1 - \frac{3\sqrt{2}V_s}{2V_{dc}}), \tag{9}$$

onde Δi_L representa a máxima ondulação de corrente que ocorre no valor de corrente de pico da carga, f_{sw} representa a frequência de chaveamento

A corrente de pico pode ser determinada por meio de

$$i_p = \frac{\sqrt{2}P_{carga3\phi}}{3V_{srms}}. \tag{10}$$

Sendo a frequência de chaveamento de $20kHz$, a tensão do barramento CC de 350V e a ondulação máxima de corrente de 10%, obtém-se um indutor de aproximadamente 3 mH.

3.2.2 Projeto dos Controladores

De posse dos valores dos componentes é possível realizar o projeto dos ganhos dos controladores do UPQC. Como método de determinação dos ganhos dos controladores, foram utilizados os critérios de margem de fase e margem de ganho. Primeiramente será desenvolvido os projeto dos ganhos dos controladores do filtro híbrido paralelo, em seguida, das controladores do filtro série.

Tendo definido o valor da indutância do filtro, a capacitância é definida de modo que a frequência de ressonância esteja próxima ao 5° harmônico, pois não é uma frequência muito distante da fundamental, e por outro lado permite a passagem de grande parte das componentes harmônicas (SRIANTHUMRONG; AKAGI, 2003). Portanto, o valor de capacitância utilizado foi de $61,2\mu F$ por ser um valor comercial de capacitância.

Neste trabalho optou-se pelo uso de controladores proporcionais ressonantes por possuírem como vantagem a característica de conseguir seguir um sinal periódico. Como característica principal tem seu ganho tendendo a infinito em sua frequência de sintonia (ou frequências), fazendo com que o sistema apresente nela(s), erro igual ou muito próximo de zero em regime permanente.

Esse controlador se comporta como o controlador PI, aplicando um ganho teoricamente infinito sobre a frequência em que está sintonizado, fazendo com que o erro nessa frequência tenda a zero. A diferença entre o controlador PR e o PI está no fato que a frequência de sintonia do segundo é em 0Hz (JUNIOR, 2013).

Com o propósito de definir a largura de banda do controlador do filtro híbrido e de modo a garantir uma margem de fase ao sistema controlado, algumas condições devem ser satisfeitas. Para que a função de transferência em malha aberta cruze 0dB na frequência de cruzamento escolhida é necessário que (11) seja atendida. A margem de fase do sistema é obtida satisfazendo (13). Por consequência, obtém-se as condições dadas por (14) e (15).

$$|G_{MA}(\omega_c)| = 1 \tag{11}$$

onde G_{MA} representa a função de transferência do sistema em malha aberta e neste caso é dada por:

$$G_{MA}(\omega_c) = G_{planta}(s)G_{PR}(s) \tag{12}$$

onde G_{planta} representa a função de transferência da planta em questão, enquanto que $G_{PR}(s)$ representa a função de transferência do controlador proporcional ressonante.

A margem de fase do sistema com os controladores projetados deve atender à

$$M_\phi = 180 + \angle G_{MA}(\omega_c) \tag{13}$$

onde M_ϕ representa a margem de fase do sistema em malha aberta.

Fazendo uso de (12) e (13), pode-se escrever que o ângulo da função de transferência do controlador PR é:

$$\angle G_{PR}(\omega_c) = M_\phi - 180 - \angle G_{MA}(\omega_c). \tag{14}$$

Fazendo uso de (12) pode-se escrever que:

$$G_{PR}(\omega_c) = \frac{1}{|G_{MA}(\omega)|}. \tag{15}$$

A função de transferência do controlador PR é dada por:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + \omega^2} \tag{16}$$

As funções de transferência da planta de corrente do filtro híbrido paralelo são escritas a partir Figura 22, estes circuitos foram deduzidos no Capítulo 2 e as funções de transferência são reproduzidas:

$$G_{iC1\alpha}(s) = \frac{i_{C1\alpha}(s)}{V'_{inv1\alpha}(s)} = \frac{C_{C1}s}{L_tC_{C1}s^2 + r_tC_{C1}s + 1}, \tag{17}$$

$$G_{iC1\beta}(s) = \frac{i_{C1\beta}(s)}{V'_{inv1\beta}(s)} = \frac{C_{C1}s}{L_tC_{C1}s^2 + r_tC_{C1}s + 1}, \tag{18}$$

$$G_{iC10}(s) = \frac{i_{C10}(s)}{V'_{inv10}(s)} = \frac{C_{C1}s}{L_tC_{C1}s^2 + r_tC_{C1}s + 1}. \tag{19}$$

Para que a planta possa ser controlada é preciso que atenda aos critérios de estabilidade de margem de ganho $M_G > 1$ e margem de fase $M_\phi > 0$, as margens de ganho que podem ser determinadas através de

$$M_{G\alpha} = \frac{1}{|G_{i\alpha}(j\omega_c)|}, \tag{20}$$

$$M_{G\beta} = \frac{1}{|G_{i\beta}(j\omega_c)|}, \tag{21}$$

$$M_{G0} = \frac{1}{|G_{i0}(j\omega_c)|}, \tag{22}$$

já as margens de fase podem ser determinadas por meio de

$$M_{f\alpha} = \angle G_{i\alpha}(j\omega_c), \tag{23}$$

$$M_{f\beta} = \angle G_{i\beta}(j\omega_c), \tag{24}$$

$$M_{f0} = \angle G_{i0}(j\omega_c). \tag{25}$$

Os valores de margem de ganho obtidos foram

$$M_{G\alpha} = M_{G\beta} = M_{G0} = 8,1x10^7, \tag{26}$$

os valores de margem de fase foram

$$M_{f\alpha} = M_{f\beta} = M_{f0} = 60^o, \tag{27}$$

atendendo assim aos critérios de estabilidade.

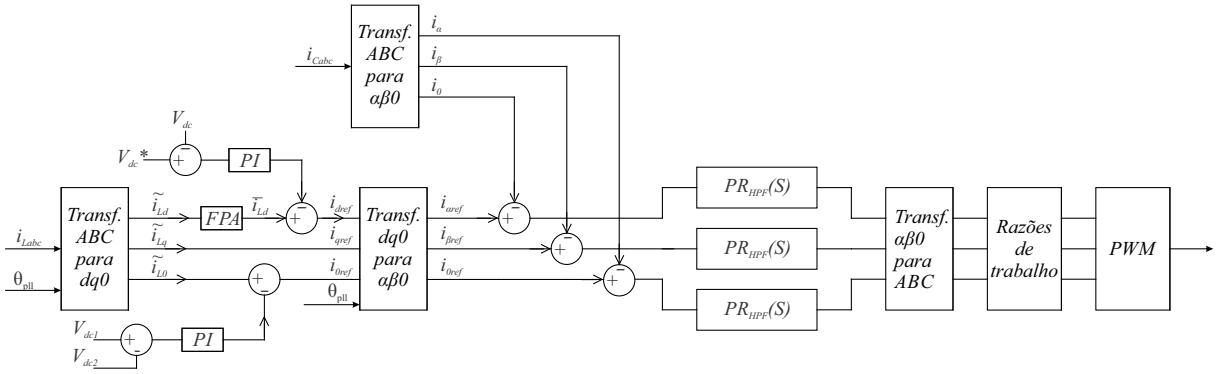
Como critério de projeto foi definido, a frequência de cruzamento ω_c é definida em 2kHz. Esta frequência foi escolhida por estar uma década antes da frequência de chaveamento $(20kHz)$. A margem de fase M_ϕ é definida em $60°$. Por meio da equações (11) e (13), determinam-se

os ganhos dos dos controladores com sendo $K_p = 19,9963$ e $K_i = 628,3185$. O diagrama de controle do filtro híbrido é mostrado na Figura 32.

Seguindo os mesmos passos para o lado série do conversor, usando o modelo mostrado na Figura 26 e a função de transferência obtida na Equação 77, foram obtidos ganhos de $K_p = 0,6$ e $K_i = 71,6$ dos controladores proporcionais ressonantes do lado série do UPQC.

Com base no que foi projetado, o digrama de controle do lado paralelo do UPQC com doze chaves é mostrado na Figura 32, observa-se que as correntes de referência geradas são obtidas por meio de uso de filtros passa alta (FPA), estes filtros extraem do sinal total as componentes harmônicas a serem sintetizadas pelo lado paralelo, além disso a corrente de referência para o carregamento do barramento CC é adicionada à corrente de referência de eixo q de modo que o conversor possa controlar adequadamente a tensão do barramento CC. Após a geração das correntes de referência, estas são transformadas para o referencial $\alpha\beta 0$ e comparadas com os valores medidos, o erro obtido é a entrada utilizada pelos controladores gerando um sinal de controle que por sua vez é normalizado pelo valor de tensão no barramento CC, em seguida gerando as razões de trabalho e PWM.

Figura 32 – Diagrama do controle do filtro híbrido paralelo.

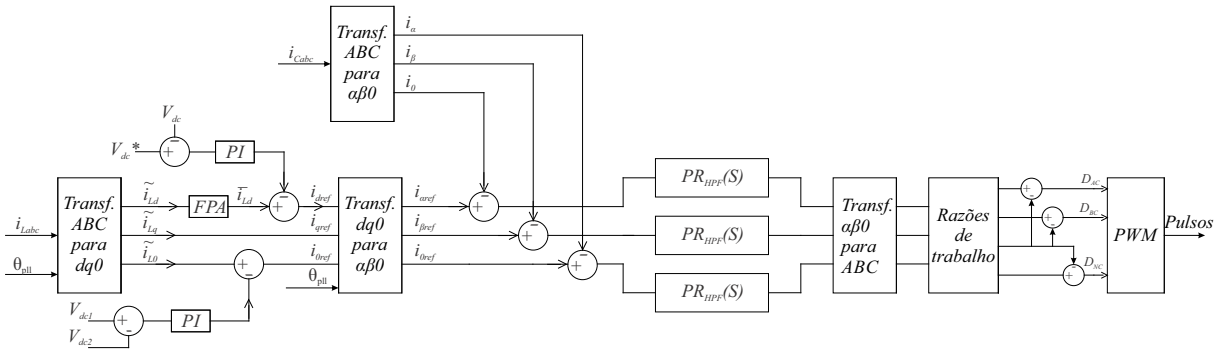


Fonte: o autor (2019).

Tanto a geração quanto o controle das correntes harmônicas do lado paralelo do UPQC onze chaves é semelhante ao que foi apresentado para o UPQC doze chaves, porém com a eliminação de umas das chaves da unidade *top* é necessário que os outros braços restantes sintetizem o sinal que seria executado pelo braço C da unidade *top*, resultando no diagrama mostrado na Figura 33.

Em relação ao lado série tanto do UPQC doze chaves quanto do UPQC onze chaves, observa-se por meio da Figura 34 que os sinais de referência são gerados por meio de um gerador de referências que consiste de filtro passa baixas com grande constate de tempo o que o deixa pouco sensível às variações da rede elétrica, seu esquema de controle é exibido na Figura 34. As tensões de referência são comparadas com suas respectivas tensões por fase e o erro obtido é usado na entrada dos controladores PR gerando um sinal de controle que por sua vez é

Figura 33 – Controle do filtro híbrido - UPQC onze chaves com braço adicional.



Fonte: o autor (2019).

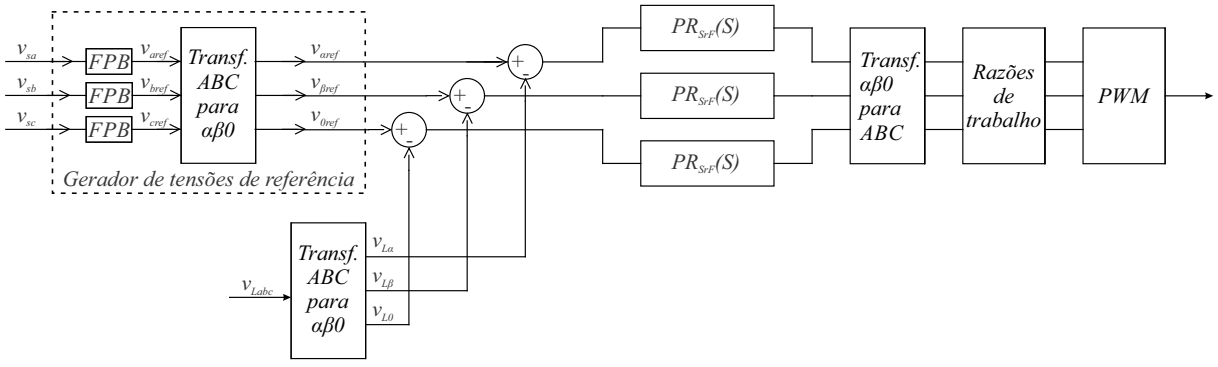
normalizado pelo valor de tensão no barramento CC, em seguida gerando as razões de trabalho e PWM.

O controle da tensão do barramento CC é realizado pelo eixo em quadratura, Figura 34, a justificativa para essa particularidade se encontra na característica capacitiva predominante em baixas frequências no filtro LC da saída da unidade *top*, onde a impedância quase não possui parte real, por outro lado, o conversor necessita de uma corrente ativa (I_{CC}) para realizar o carregamento do barramento CC, e como o conversor é do tipo fonte de tensão deve sintetizar uma tensão com a mesma fase da impedância do filtro, essa tensão é portanto no eixo em quadratura, como pode ser visto no diagrama da Figura 35.

Percorrendo o circuito da Figura 35, pode-se determinar o modelo para carregamento do barramento e projetar os ganhos do controlador PI. Como na frequência fundamental a impedância de Z_{LC1} é muito menor que a impedância de Z_{Cc1} pode-se desprezar o efeito do indutor, assim a função de transferência $I_{CC}(s)/V_{INV(s)}$ será

$$I_{CC}(s)/V_{INV}(s) = sC_1 = G(s) \tag{28}$$

Figura 34 – Diagrama do controle para o lado série do conversor.



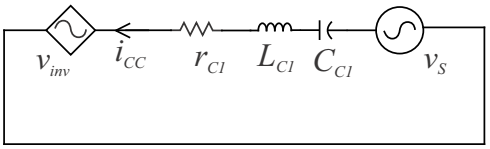
Fonte: o autor (2019).

fazendo uso de um controlador PI a função de transferência em malha aberta é

$$G(s)H(s) = C_1 K_p \left(s + \frac{K_i}{C_1 K_p} \right). \tag{29}$$

De (29), pode-se determinar os ganhos de K_p e K_i, (28) é válida se a malha de controle dos harmônicos de corrente for bem mais rápida que a de controle de I_{CC}, assim K_p e K_i foram escolhidos sendo pelo menos 10 vezes menores que os ganhos dos controladores proporcionais ressonantes ($K_p = 1,6$ e $K_i = 10$).

Figura 35 – Circuito para carregamento do barramento CC.



Fonte: o autor (2019).

Para realizar as transformações *abc-dq0* é necessário se ter a referência angular da tensão e para tanto se faz o uso de um PLL (*Phase Locked Loop*). Basicamente, para obter a referência angular da tensão, o PLL procura um ângulo que faça a tensão de eixo em quadratura igual a zero, levando a tensão de eixo direto a ficar em fase com a tensão da rede. O diagrama de blocos do PLL utilizado é mostrado na Figura 36. O PLL é o mesmo utilizado tanto no UPQC doze chaves quanto no UPQC onze chaves.

O PLL é baseado no algoritmo de geração de sinais em quadratura adaptativos em frequência por meio do filtro SOGI (*second-order generalized integrator* - integrador generalizado de segunda ordem) (AZEVEDO et al., 2014), cuja função de transferência é

$$G_{SOGI}(s) = \frac{ks\omega_0}{s^2 + \omega_0^2} \tag{30}$$

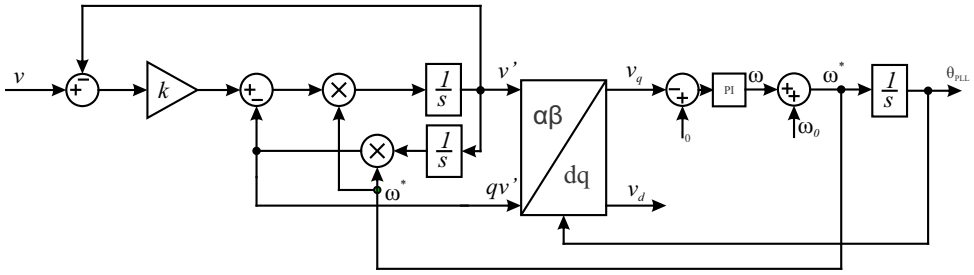
onde ω_0 representa a frequência fundamental em radianos por segundo.

Por meio do ajuste da constante k é possível o ajuste da dinâmica do filtro. Os sinais de saída são duas senoides (v' e qv') com uma diferença de fase de 90 graus entre si. A componente v' possui a mesma fase e magnitude da senoide v da entrada. A sintonia do SOGI é dependente da frequência e o ajuste de k permite o controle da capacidade de filtragem, permitindo que o PLL em si não seja afetado por flutuações de frequência. As duas senoide em quadratura são a entrada da PLL, que irá gerar uma frequência igual a da rede e por consequência o ângulo θ_{PLL} que é utilizado pelo algoritmo de controle.

3.2.3 Técnicas de PWM

O PWM implementado para os conversores é baseado na comparação seno-triângulo, como foi mostrado na Figura 29, entretanto foi realizada uma modificação na lógica de comando

Figura 36 – Diagrama de blocos do PLL.



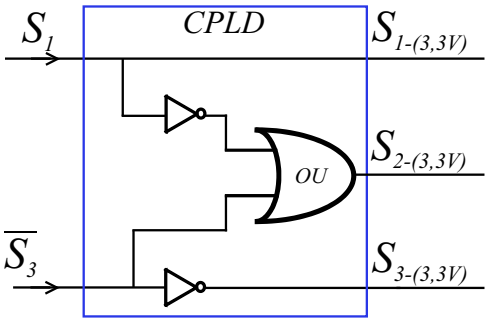
Fonte: o autor (2019).

das chaves intermediárias, que agora são acionadas segundo

$$S_2 = \overline{S_1} + \overline{S_3} \tag{31}$$

onde as chaves inferiores do conversor são acionadas por lógica barrada, enquanto que as superiores por lógica direta como mostrado na Figura 37.

Figura 37 – Lógica de comando das intermediárias.



Fonte: o autor (2019).

O PWM em si é implementado em um CPLD, instalado na parte digital da placa de condicionamento de sinais do protótipo.

Os ciclos de trabalho são gerados a partir das tensões de saída do controle. Os sinais gerados pelo controladores de eixo $\alpha\beta$ produzem as saídas das três fases, enquanto que o braço do neutro sintetiza a componente de eixo 0 do controle. Essa mesma lógica é aplicada também ao lado série do conversor.

Para a unidade *top* do conversor doze chaves, os ciclos de trabalho são gerados de acordo

com

$$\begin{aligned} D_{A1} &= V_{A1controle} + \frac{(1+M_b)}{2}, \\ D_{B1} &= V_{B1controle} + \frac{(1+M_b)}{2}, \\ D_{C1} &= V_{C1controle} + \frac{(1+M_b)}{2}, \\ D_{N1} &= V_{01controle} + \frac{(1+M_b)}{2}, \end{aligned} \tag{32}$$

onde $D_{A1}, D_{B1}, D_{C1}, D_{N1}$ representam os ciclos de trabalho gerados pelo controle e $V_{A1controle}, V_{B1controle}, V_{C1controle}, V_{01controle}$ representam as tensões geradas pelo controle do lado paralelo, a parte constate é responsável pelo *offset* necessário ao compartilhamento da amplitude da portadora.

Em relação ao lado série tanto do conversor doze quanto do de onze chaves os ciclos de trabalho para o PWM são gerados de acordo com

$$\begin{aligned} D_{A2} &= V_{A2controle} + \frac{M_b}{2}, \\ D_{B2} &= V_{B2controle} + \frac{M_b}{2}, \\ D_{C2} &= V_{C2controle} + \frac{M_b}{2}, \\ D_{N2} &= V_{02controle} + \frac{M_b}{2}, \end{aligned} \tag{33}$$

onde $D_{A2}, D_{B2}, D_{C2}, D_{N2}$ representam os ciclos de trabalho gerados pelo controle do lado série e $V_{A2controle}, V_{B2controle}, V_{C2controle}, V_{02controle}$ representam as tensões geradas pelo controle do lado série.

Em relação ao UPQC onze chaves há uma particularidade, a tensão produzida pelo controle da unidade *top* do conversor na fase C é acrescentada às tensões produzidas para os outros três braços, como consequência ocorre que nas fases as tensões agora serão de linha, $V_{AC1controle}$, $V_{BC1controle}$ e $V_{NC1controle}$, assim (32) é reescrita como

$$\begin{aligned} D_{A1} &= V_{AC1controle} + \frac{(1+M_b)}{2}, \\ D_{B1} &= V_{BC1controle} + \frac{(1+M_b)}{2}, \\ D_{N1} &= V_{0C1controle} + \frac{(1+M_b)}{2}. \end{aligned} \tag{34}$$

3.3 Resultados de Simulação do UPQC Doze Chaves

Com base no que foi projetado na seção anterior, foram realizadas simulações de modo a comprovar o funcionamento da topologia e do seu controle. As simulações foram realizadas utilizando a plataforma *Simulink do Software MATLAB*. O esquema de ligações e a estrutura do conversor doze chaves podem ser visualizados na Figura 30.

A impedância do filtro passivo de saída do do condicionador paralelo é maior que a encontrada na configuração com apenas o indutor para a frequência fundamental. Como consequência, há uma dificuldade adicional no carregamento do barramento CC visto que ele é realizado com corrente na frequência fundamental. Este fator é um limitante na atuação do lado série em situações de pertubações de tensão. Por outro lado, mais de 80% dos afundamentos de tensão são maiores que 70% do valor nominal da tensão e mais de 60% dos afundamento de tensão possuem duração de menos que 5 ciclos segundo Mertens (MERTENS et al., 2007).

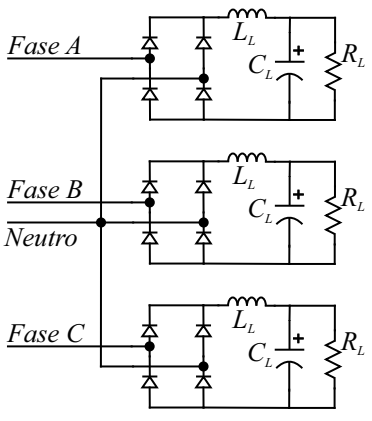
Os parâmetros de simulação são mostrados na Tabela 3. A primeira simulação realizada teve por objetivo avaliar o comportamento das correntes da rede e da carga em regime permanente sem perturbações de na tensão da rede, medir a distorção harmônica total (THD) nesta situação, verificar o comportamento das tensões da rede elétrica e da carga, e também o comportamento da tensão do barramento CC na referida condição.

Tanto nas simulações, quanto no experimento, a carga é constituída por três retificadores monofásicos, cada um conectado em uma das fases com o neutro em comum, conforme é mostrado na Figura 38.

Na situação de regime permanente, sem perturbação nas tensões da rede, as correntes são simuladas em duas situações: com carga equilibrada com os valores de resistência iguais nos três retificadores e com valores distintos de resistência nas três fases. Os valores considerados foram de 84,7 Ω na fase “A"96,8 Ω na fase "B"e 108,9 Ω na fase "C", esses valores foram selecionados com base nas opções de resistências disponíveis no laboratório e estes valores foram os mesmos utilizados no experimento.

O conversor apresentou efetiva atuação na correção das correntes harmônicas, levando o THD das correntes da fonte (I_{Sabc}) para valores abaixo de 5%, conforme mostrado na Figura 39a e Tabela 4, atendendo dessa forma ao que é pedido na norma (IEEE. . . , 1995). Observa-se na Figura 39c que o conversor fornece as correntes harmônicas exigidas pela carga (I_{Fabc}), as

Figura 38 – Carga Utilizada nas simulações.



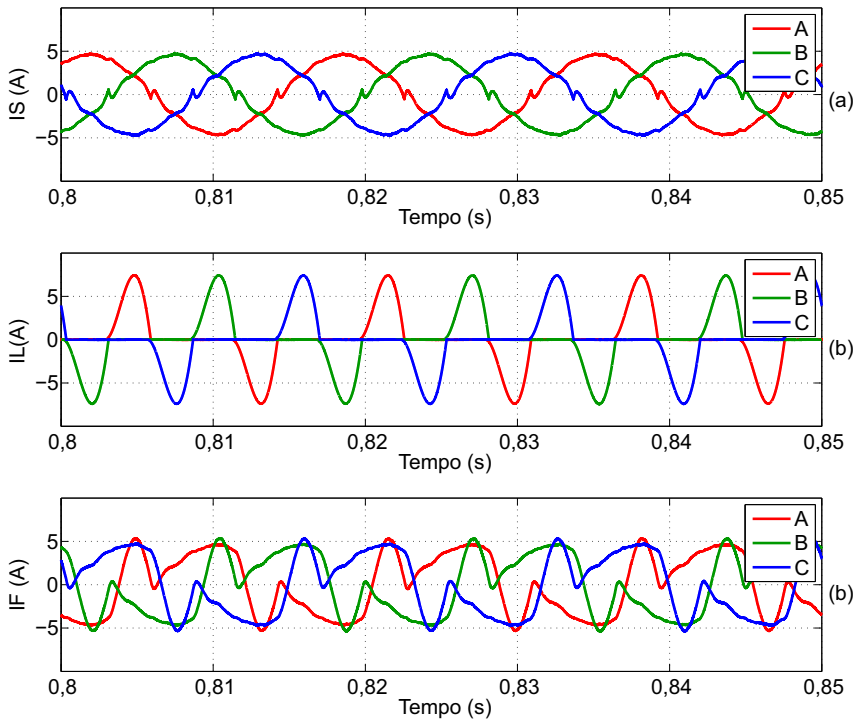
Fonte: o autor (2019).

Tabela 3 – Parâmetros gerais de simulação dos UPQCs de doze e onze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão eficaz, fase-neutro, da rede (V_s)	110	V
Resistência da carga (R_L)	$96,8$	Ω
Indutância da carga (L_L)	2,83	mH
Capacitância da carga (C_L)	300	μF
Indutância do lado paralelo (L_{c1})	2,91	mH
Capacitância total do barramento CC (C_{cc})	4,7	mu F
Capacitância do filtro do lado série (C_{c2})	50,89	μ F
Indutância do filtro do lado série (L_{c2})	0,5	mH
Relação de espiras dos transformadores série (N)	1.0	-
Tensão de referência do barramento CC	350	V
Ganho proporcional do controlador do barramento CC	1,6	-
Ganho integral do controlador do barramento CC	5	-
Ganho proporcional dos controladores P+Ressonante filtro paralelo	25	-
Ganho integral dos controladores P+Ressonante filtro paralelo	1200	-
Ganho proporcional dos controladores P+Ressonante filtro série	0,9	-
Ganho integral dos controladores P+Ressonante filtro série	100	-

correntes da carga são mostradas na Figura 39b.

Figura 39 – Correntes da rede, carga e filtro com carga equilibrada - UPQC doze chaves.

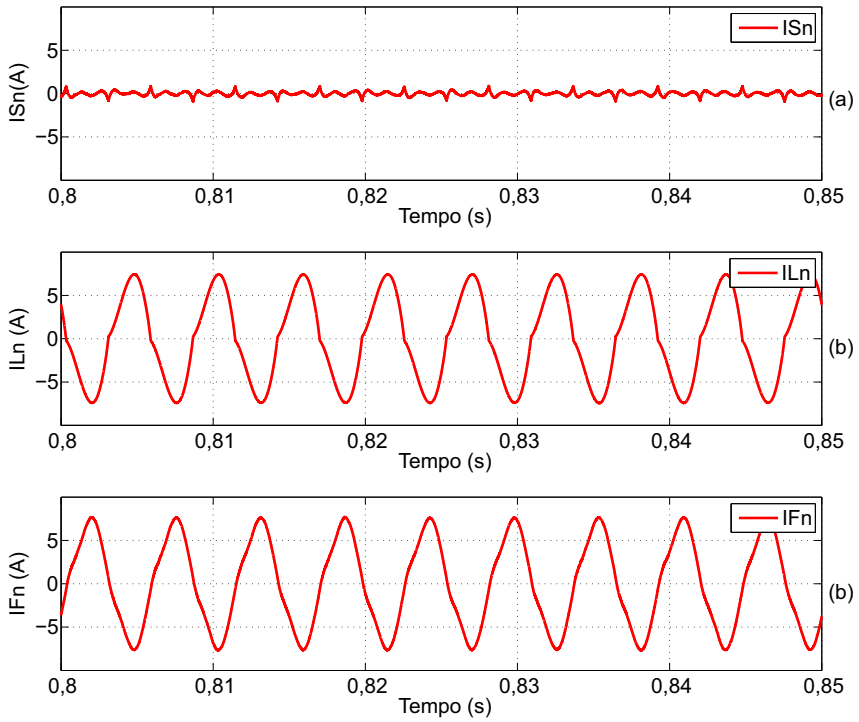


Fonte: o autor (2019).

A corrente de neutro da rede (I_{Sn}) foi praticamente zerada como mostrado na Tabela 4, conforme mostrado na Figura 40a. Observa-se que o conversor sintetiza uma corrente (I_{Fn}), por meio do quarto braço, equivalente à corrente de neutro da carga (I_{Fn}), Figuras 40b e 40c.

Na Figura 41, observa-se o comportamento da tensão no barramento CC do UPQC, visto que não há atuação do lado série, nesta simulação. A tensão se apresenta constante, pois o filtro

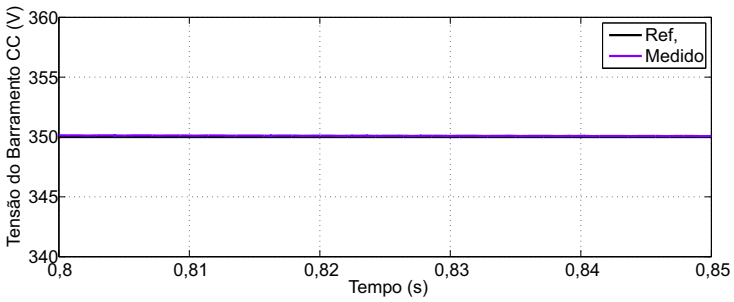
Figura 40 – Correntes de neutro e carga equilibrada - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

híbrido tem uma pequena exigência por energia e esta demanda é devidamente suprida pelo controle do barramento CC. É importante notar que a tensão está sobre o valor de referência de 350V, conforme projetado.

Figura 41 – Comportamento do barramento CC -UPQC doze chaves.



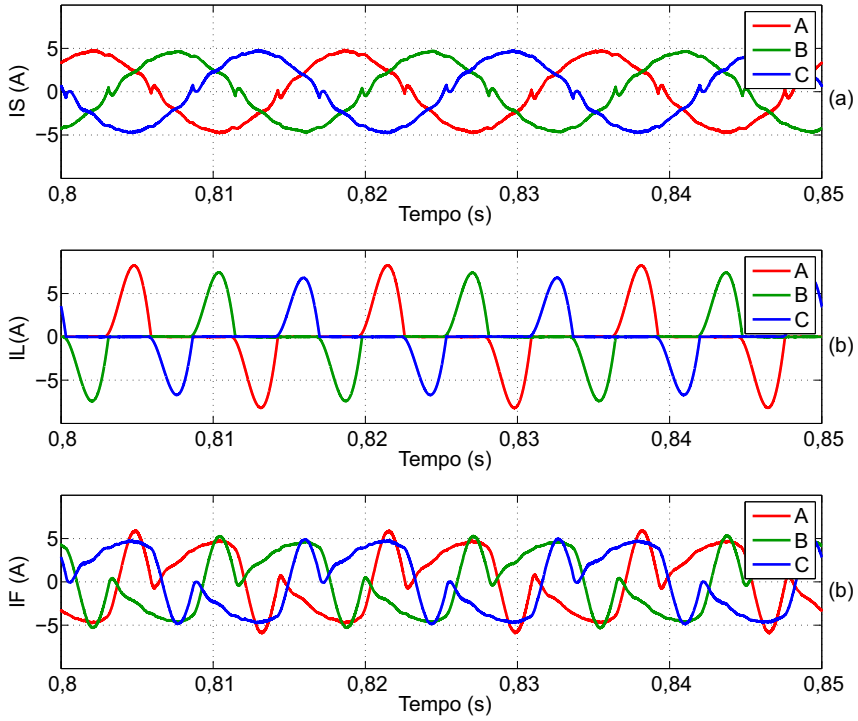
Fonte: o autor (2019).

Os resultados obtidos em simulação para o UPQC operando com cargas desbalanceadas, são resumidos na Tabela 5 e ilustrados nas Figuras 42 e 43. Observa-se que agora as correntes de carga nas três fase são distintas, porém as correntes de fases fornecidas pela rede são equilibradas e a corrente de neutro é praticamente eliminada, comprovando a eficácia do UPQC na compensação de harmônicos com cargas desbalanceadas.

Tabela 4 – Resultados de simulação correntes das fases em regime - carga equilibrada - UPQC doze chaves.

	Parâmetro	Unidade	Valor
Carga	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	2,903	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	2,903	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	2,903	A
	Corrente de pico de neutro	7,535	A
	THD na fase A	100,78	$\%$
	THD na fase B	100,78	$\%$
	THD na fase C	100,78	$\%$
Rede	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,222	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,226	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,223	A
	Corrente de pico de neutro	0,8	A
	THD na fase A	3,78	$\%$
	THD na fase B	3,78	$\%$
	THD na fase C	3,78	$\%$

Figura 42 – Correntes de rede com carga desbalanceada - UPQC doze chaves.

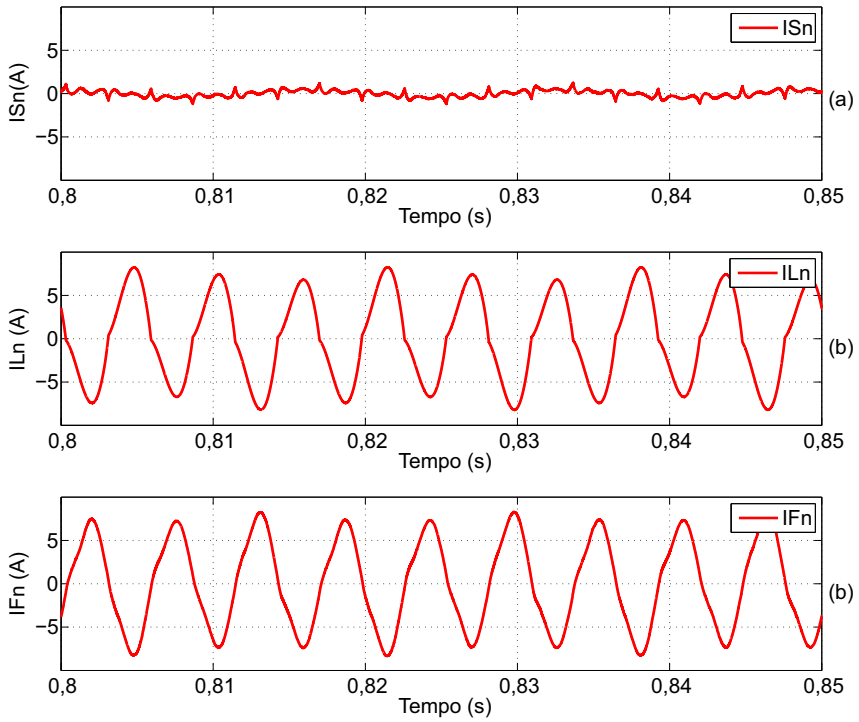


Fonte: o autor (2019).

Na Figura 44 podem ser observadas as tensões da rede e da carga, como não há pertubação de tensão, neste caso, as duas medidas tendem a ser muito parecidas.

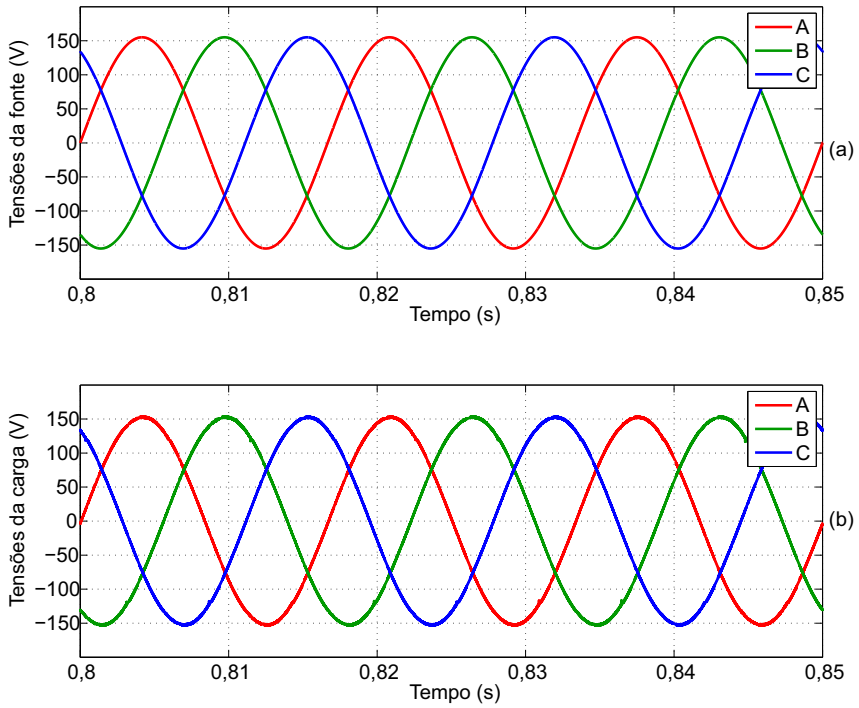
Foram simulados afundamentos de tensão desbalanceados e trifásicos, e os resultados da compensação são exibidos na Tabela 6. O barramento CC tem sua taxa de carregamento limitada pela impedância do filtro LC do lado paralelo do conversor, porém como o barramento CC foi dimensionado levando em consideração esta limitação. O conversor é capaz de compensar as perturbações de tensão presentes na rede elétrica que foi projetado (MERTENS et al., 2007).

Figura 43 – Correntes de neutro com carga desbalanceada - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 44 – Comportamento das tensões da rede e da carga -UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 5 – Resultados de simulação correntes das fases em regime permanente - carga desbalanceada - UPQC doze chaves.

	Parâmetro	Unidade	Valor
Carga	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	2,335	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	2,053	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	1,831	A
	Corrente de pico de neutro	8,232	A
	THD na fase A	98,32	$\%$
	THD na fase B	100,78	$\%$
	THD na fase C	102,97	$\%$
Rede	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,222	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,226	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,223	A
	Corrente de pico de neutro	1,1	A
	THD na fase A	3,67	$\%$
	THD na fase B	3,77	$\%$
	THD na fase C	3,76	$\%$

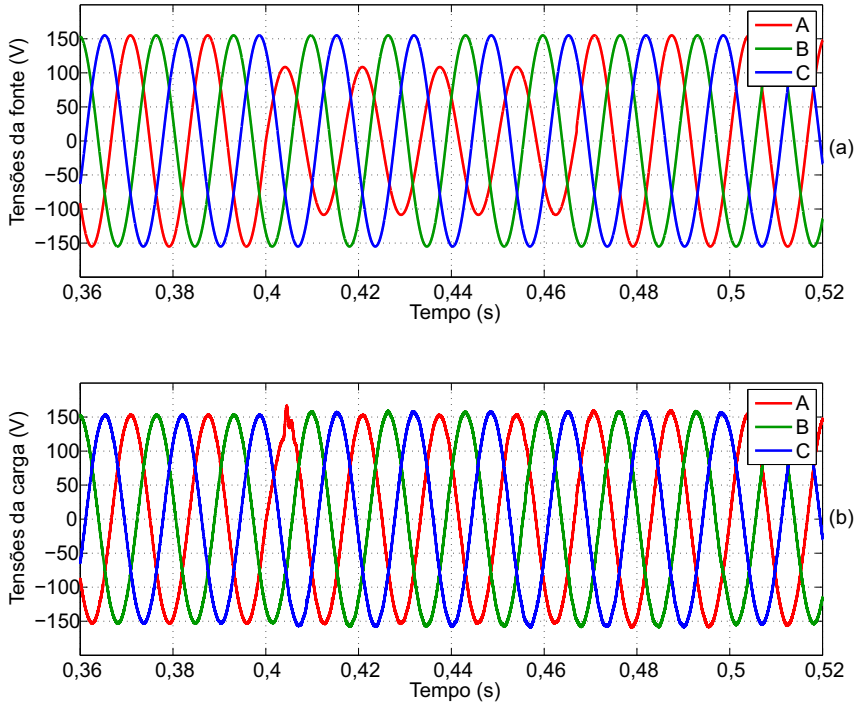
No caso do afundamento de tensão monofásico de 30% do valor nominal na fase "A"da rede durante 4 ciclos da frequência fundamental, as formas de onda das tensões da rede e da carga são mostradas na Figura 45, também foram plotadas as correntes das fases durante o evento da rede(Figuras 46), assim como a tensão no barramento CC (Figura 47). A demanda por energia durante um afundamento de tensão monofásico é menor em relação aos eventos de tensão trifásicos e por consequência a tensão do barramento CC praticamente não varia.

Tabela 6 – Resultados de simulação afundamento de tensão monofásico 30% - UPQC doze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	76,8	V
Tensão RMS fase B	110	V
Tensão RMS fase C	110	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	348	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	107,8	V
Tensão RMS fase B	109	V
Tensão RMS fase C	109	V

Como o conversor foi projetado para compensar afundamentos monofásicos de até 50%, foi realizada uma simulação, nos mesmos moldes da anterior, para avaliar o comportamento do UPQC 12 chaves nesta situação. No caso do afundamento de tensão monofásico de 50% do valor nominal na fase "A"da rede durante 4 ciclos da frequência fundamental, as formas de onda das tensões da rede e da carga são mostradas na Figura 48, também foram plotadas correntes das fases e do neutro durante o evento (Figuras 49 e 50), assim como a tensão no barramento CC (Figura 51). A demanda por energia durante este afundamento é superior, em relação ao afundamento monofásico de 30%, causando uma oscilação maior no barramento CC, porém dentro dos limites operacionais do UPQC, como pode ser observado na Tabela 7. Observa-se que as tensões da carga são mantidas próximas ao valor nominal, conforme mostrado na Tabela 7.

Figura 45 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 7 – Resultados de simulação afundamento de tensão monofásico 50% - UPQC doze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	55	V
Tensão RMS fase B	110	V
Tensão RMS fase C	110	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	347,6	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	105,8	V
Tensão RMS fase B	109,8	V
Tensão RMS fase C	110	V

Como a amplitude da perturbação é superior, verifica-se que as correntes da fonte (Figuras 50 50) se tornam maiores durante a ocorrência do evento, porém ao término do evento, o UPQC volta a mitigar a corrente de neutro. Nos eventos de tensão, a prioridade do conversor é a mitigação das oscilações de tensão na carga e manter o barramento CC carregado, para que o lodo série do UPQC continue a sintetizar as tensões necessárias, sendo este o motivo para a piora do controle das correntes harmônicas durante os eventos de tensão na rede, principalmente nos mais severos.

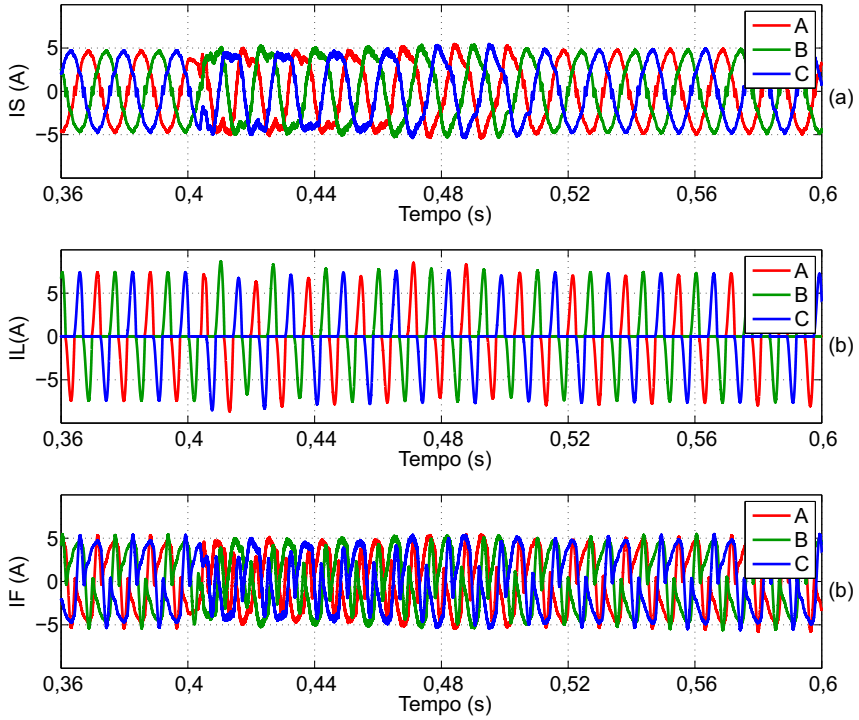
Na simulação de um afundamento de tensão trifásico de 30% do valor nominal durante 4 ciclos, (Figura 52a) o UPQC necessita injetar mais potência na rede, exigindo mais do barramento CC, conforme mostrado na Figura 55, porém como esta perturbação está dentro do limites

de operação que o UPQC foi projetado a tensão na carga é mantida, Figura 52b, durante o afundamento trifásico, as correntes das fases se comportam como mostrado na Figura 53 e as correntes de neutro conforme mostrado na Figura 54, como a prioridade do conversor se torna a compensação do afundamento de tensão, há uma piora na compensação de harmônicos neste período. Os resultados desta simulação, foram condensados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados de simulação afundamento de tensão trifásico 30% - UPQC doze chaves

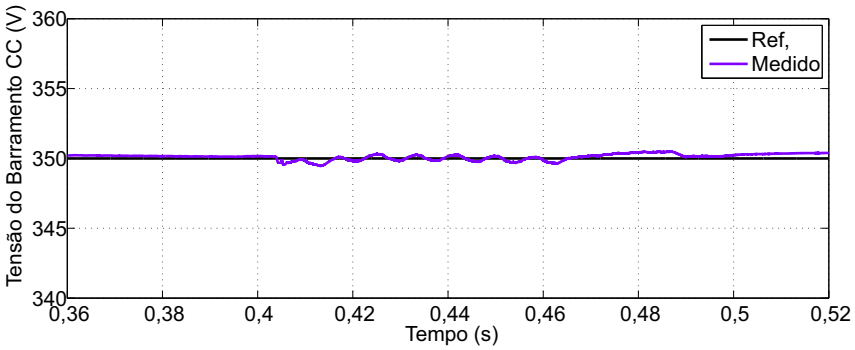
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77	V
Tensão RMS fase B	77	V
Tensão RMS fase C	77	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	346,5	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	107,8	V
Tensão RMS fase B	107,8	V
Tensão RMS fase C	107,8	V

Figura 46 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



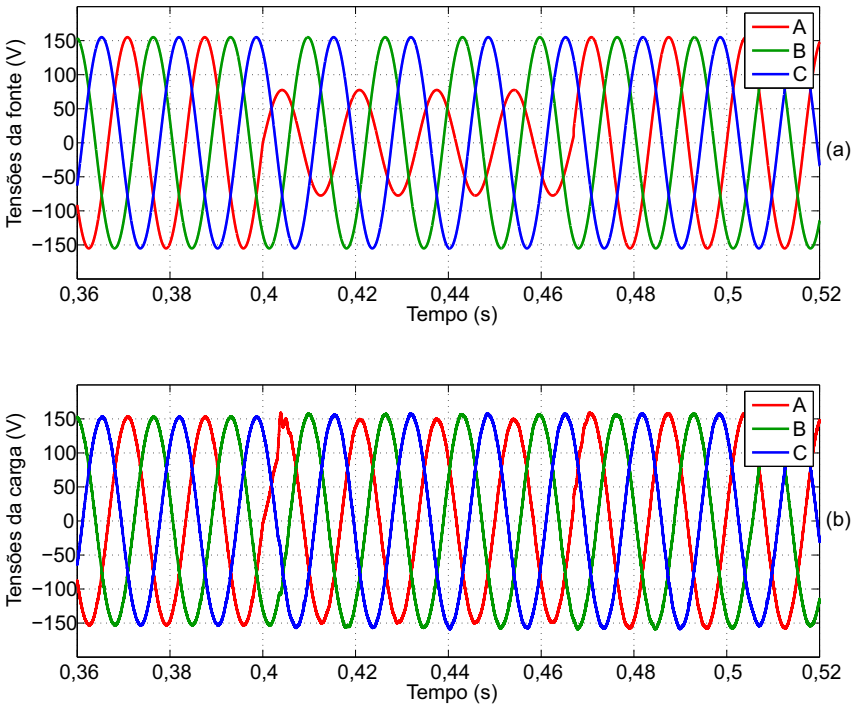
Fonte: o autor (2019).

Figura 47 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



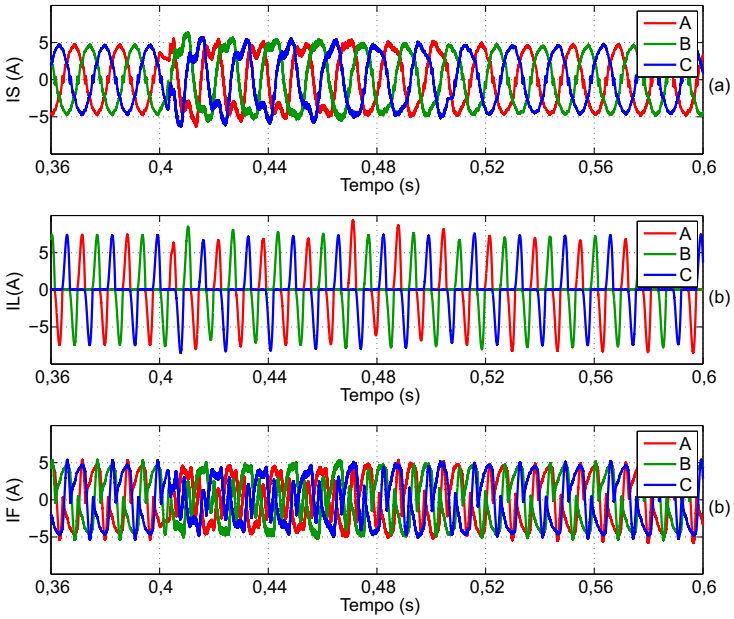
Fonte: o autor (2019).

Figura 48 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



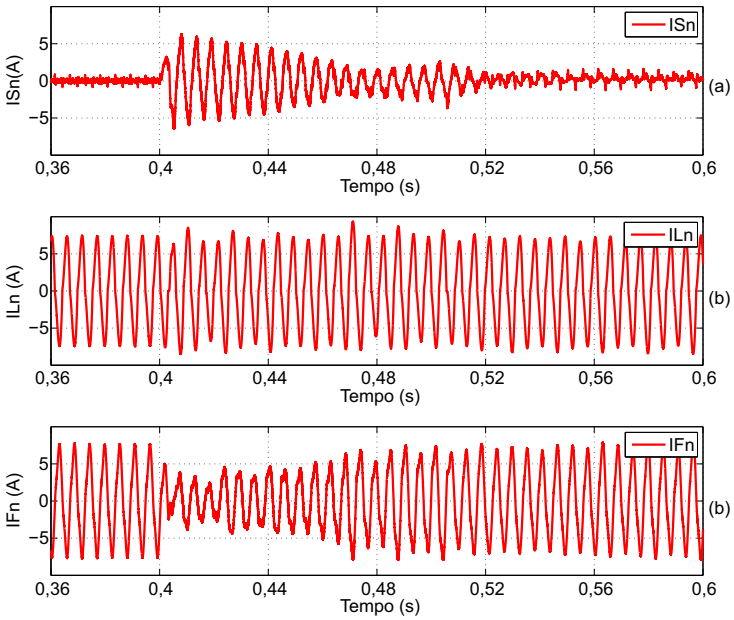
Fonte: o autor (2019).

Figura 49 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



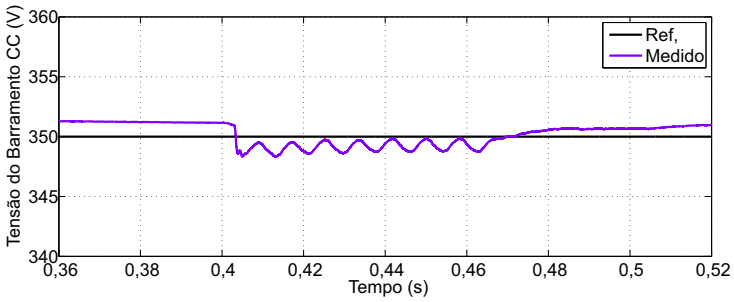
Fonte: o autor (2019).

Figura 50 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC com doze chaves e filtro híbrido.



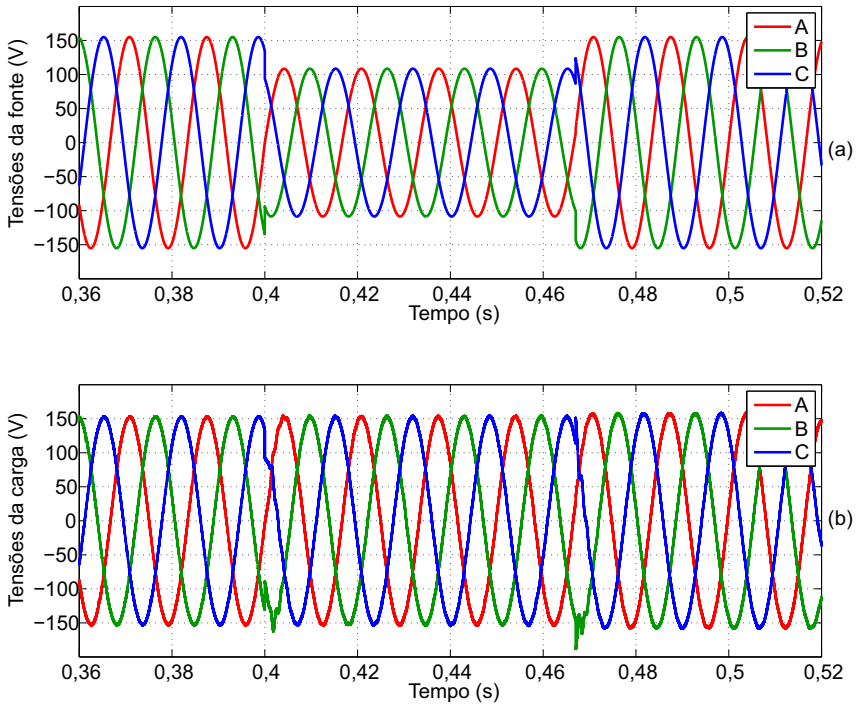
Fonte: o autor (2019).

Figura 51 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC doze chaves



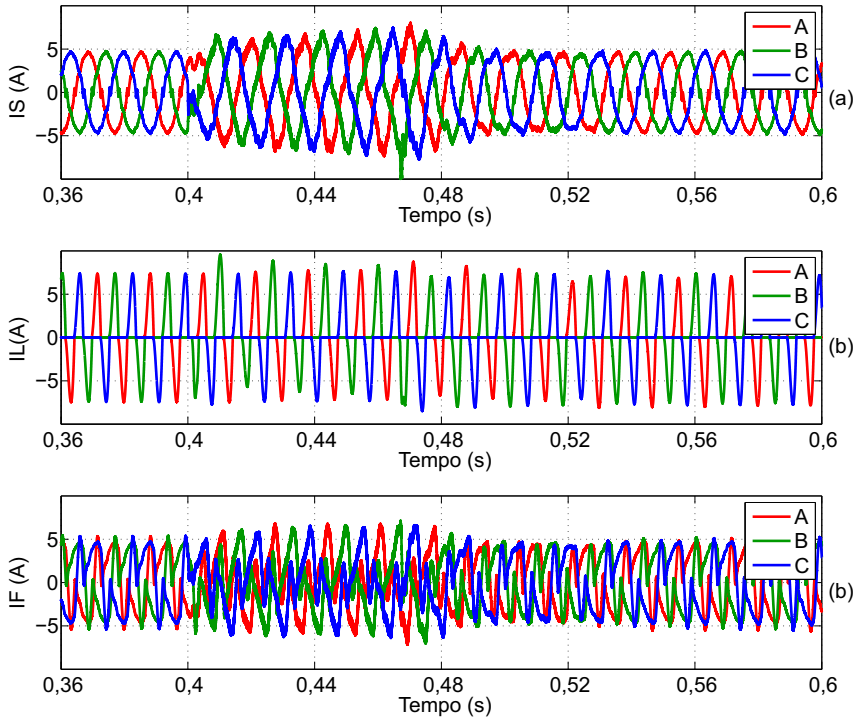
Fonte: o autor (2019).

Figura 52 – Tensões na rede e na carga durante afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



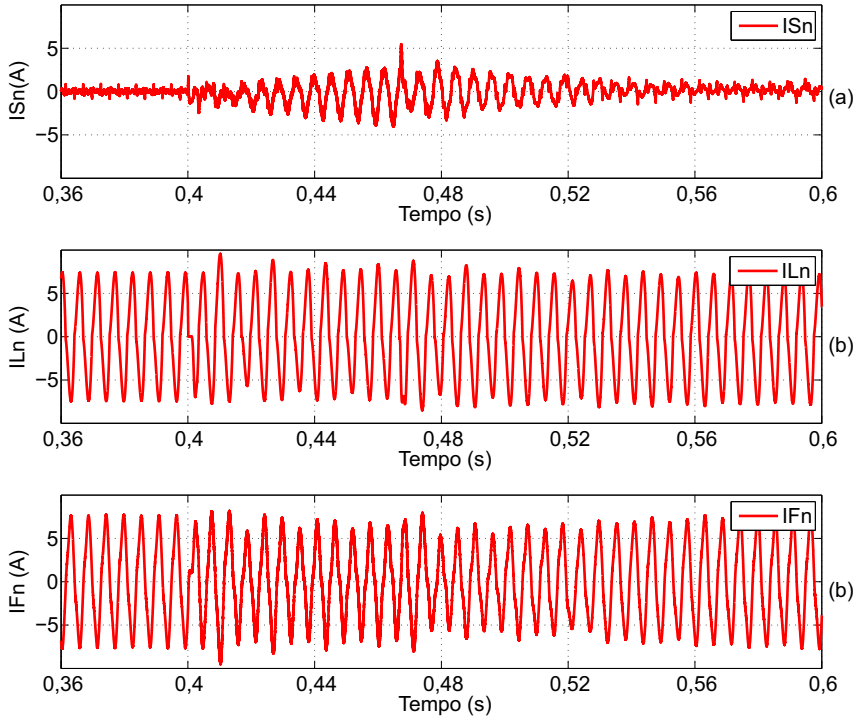
Fonte: o autor (2019).

Figura 53 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



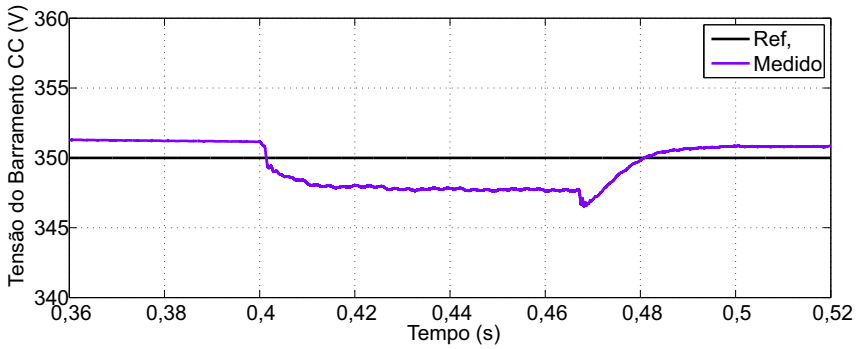
Fonte: o autor (2019).

Figura 54 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

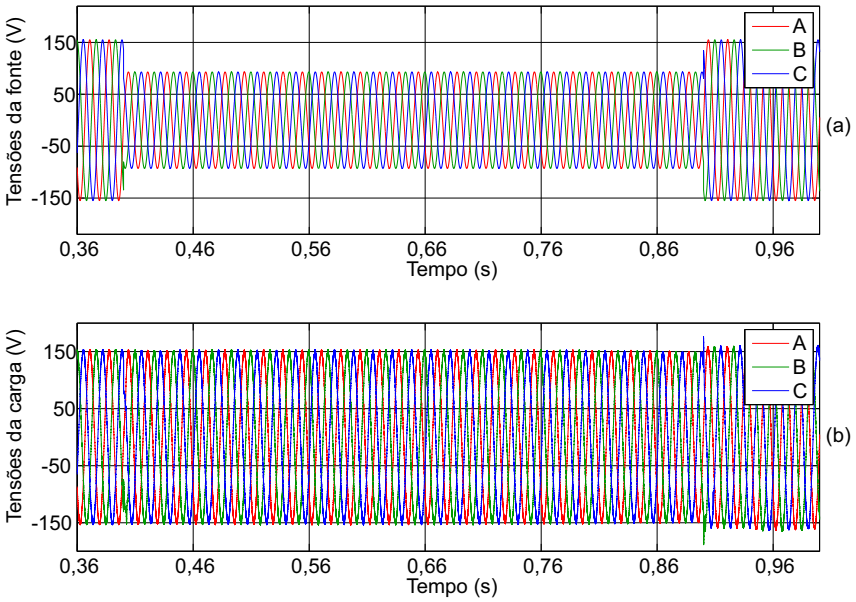
Figura 55 – Tensão no barramento CC durante afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves



Fonte: o autor (2019).

Como o UPQC foi projetado para compensar afundamentos de tensão trifásicos de até 40% por 30 ciclos da frequência fundamental, a simulação a seguir tem por objetivo mostrar o comportamento do conversor nesta situação. Pode ser visto na Figura 56b que as tensões na carga permanecem praticamente inalteras ao longo do período da perturbação.Em relação à tensão do barramento CC, observa-se que a mesma decai ao longo do tempo da perturbação, chegando a um valor mínimo de 253V, porém com esta tensão o lado série consegue mitigar os efeitos do afundamento de tensão nos terminais da carga. Ao final da perturbação, observa-se que o barramento CC é recarregado, conforme Figura 57.

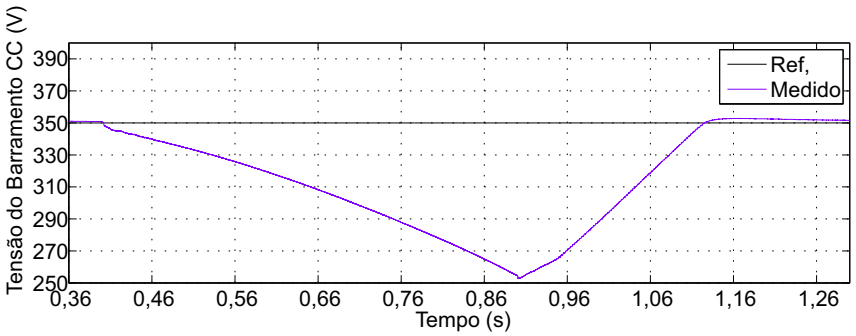
Figura 56 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão trifásico 40% de 30 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Como foi visto no dimensionamento do barramento CC (8), a capacidade de compensação do conversor está ligada tanto à potência da carga, intensidade da perturbação e sua duração.

Figura 57 – Tensão no barramento CC durante afundamento trifásico 40% de 30 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 9 – Resultados de simulação afundamento de tensão trifásico 40% - UPQC doze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77	V
Tensão RMS fase B	77	V
Tensão RMS fase C	77	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	253	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	107,8	V
Tensão RMS fase B	107,8	V
Tensão RMS fase C	107,8	V

Portanto perturbações de menor amplitude podem ser compensada por períodos mais longos de tempo.

Na rede elétrica de um modo geral, elevações no valor das tensões da rede elétrica também são rotineiras, principalmente nos períodos em que a maioria das cargas indutivas está desligada, fazendo com que a rede possa adquirir características capacitivas. Dessa forma a mitigação destes distúrbios é de grande importância para o usuário final e com o objetivo de avaliar a capacidade de compensação deste tipo de pertubação, são mostradas duas simulações para o conversor doze chaves, a primeira se trata de uma sobretensão monofásica de 30% na fase "A"da rede. Já a segunda simulação utilizada para demonstrar o funcionamento do conversor é uma sobretensão trifásica também de 30% do valor nominal da rede elétrica.

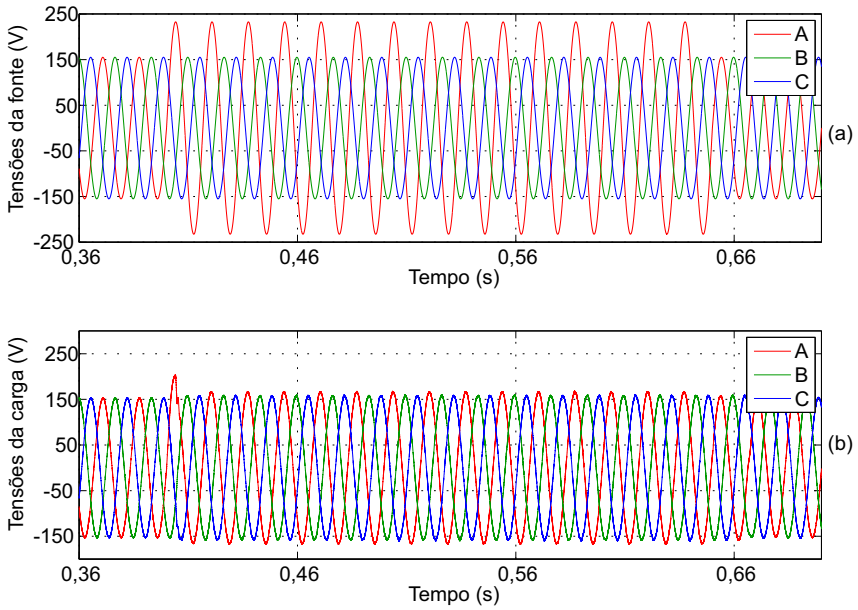
Observa-se que a tensão na carga sofre uma elevação inicial, chegando no início da perturbação a 170V de pico, mas dentro dos limites aceitáveis da curva ITIC, citada no Capítulo 01, esta sobretensão tem duração de menos de meio ciclo (Figura 58), já as correntes da fonte da carga e filtro paralelo são apresentadas nas Figuras 59e 60, nesta situação a saída paralela do conversor trabalha de modo a evitar a elevação da tensão no barramento CC, cujo comportamento é mostrado na Figura 61. Os resultados obtidos na simulação são resumidos na Tabela 10.

Tabela 10 – Resultados de simulação sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143	V
Tensão RMS fase B	110	V
Tensão RMS fase C	110	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	112	V
Tensão RMS fase B	109	V
Tensão RMS fase C	109	V

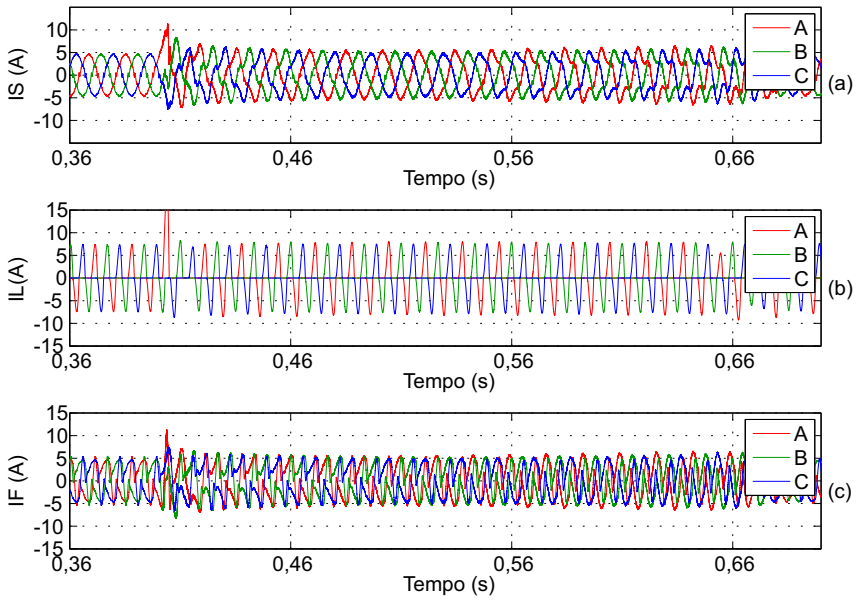
Observa-se que a tensão na carga sofre uma elevação inicial, chegando no início da perturbação a 170V de pico, mas dentro dos limites aceitáveis da curva ITIC, citada no Capítulo 01, esta sobretensão tem duração de menos de um quarto de ciclo (Figura 62), já as correntes

Figura 58 – Tensões na rede e na carga durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

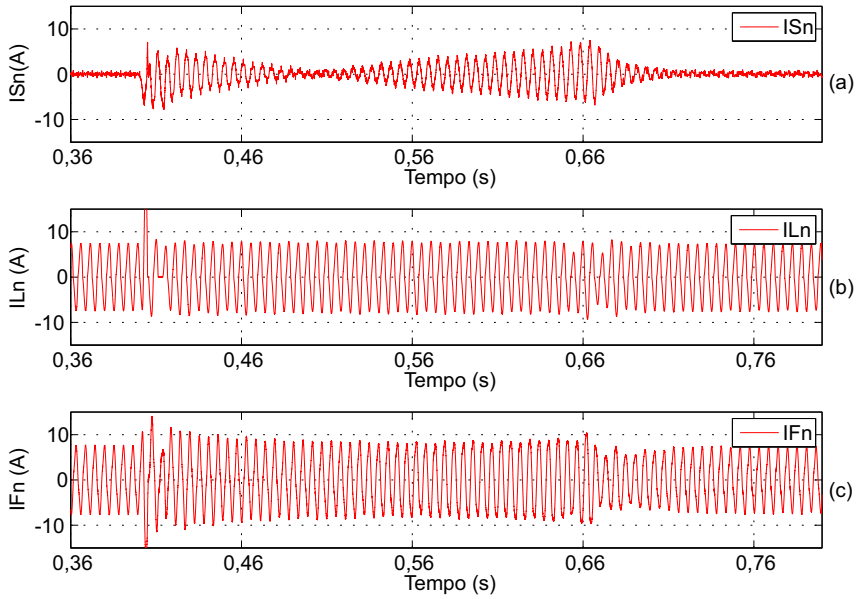
Figura 59 – Correntes da rede, carga e filtro durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

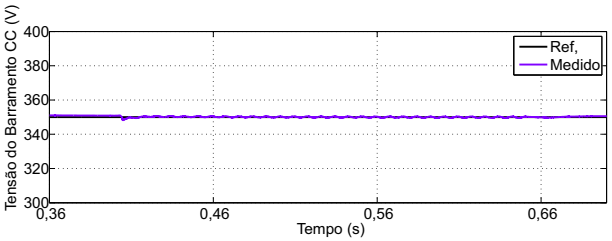
da fonte da carga e filtro paralelo são apresentadas nas Figuras 63e 64, nesta situação a saída paralela do conversor trabalha de modo a evitar a elevação da tensão no barramento CC. Os resultados obtidos na simulação são resumidos na Tabela 11.

Figura 60 – Correntes de neutro rede, carga e filtro durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 61 – Tensão no barramento CC durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves.

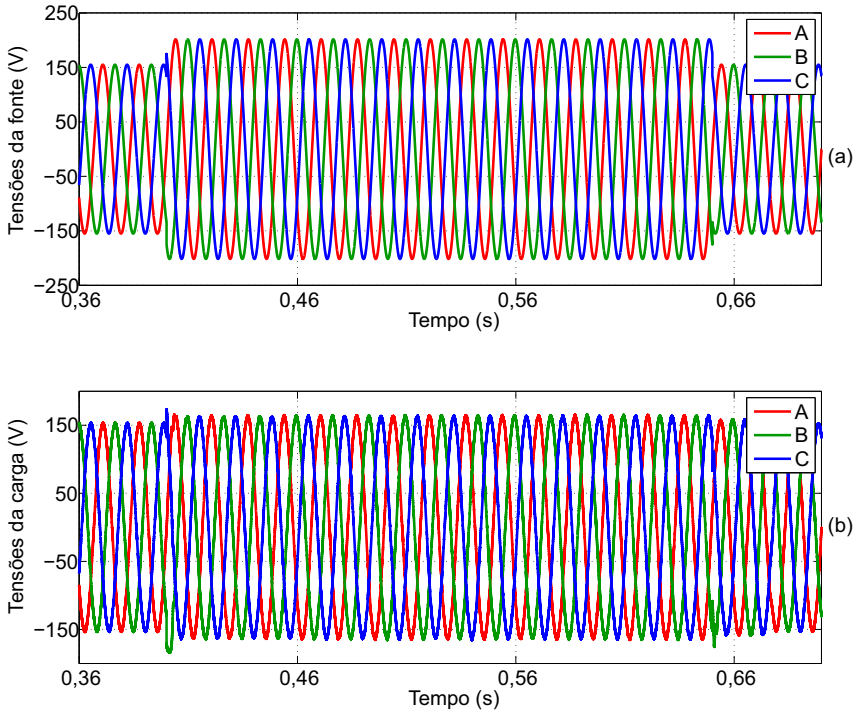


Fonte: o autor (2019).

Tabela 11 – Resultados de simulação sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves

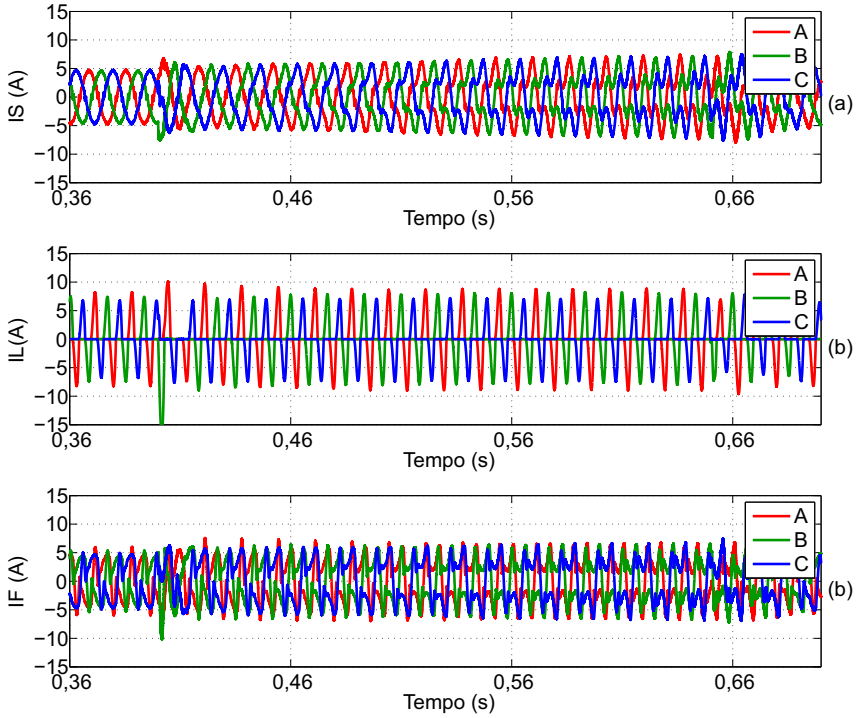
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143	V
Tensão RMS fase B	143	V
Tensão RMS fase C	143	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	351	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	115	V
Tensão RMS fase B	115	V
Tensão RMS fase C	115	V

Figura 62 – Tensões na rede e na carga durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves.



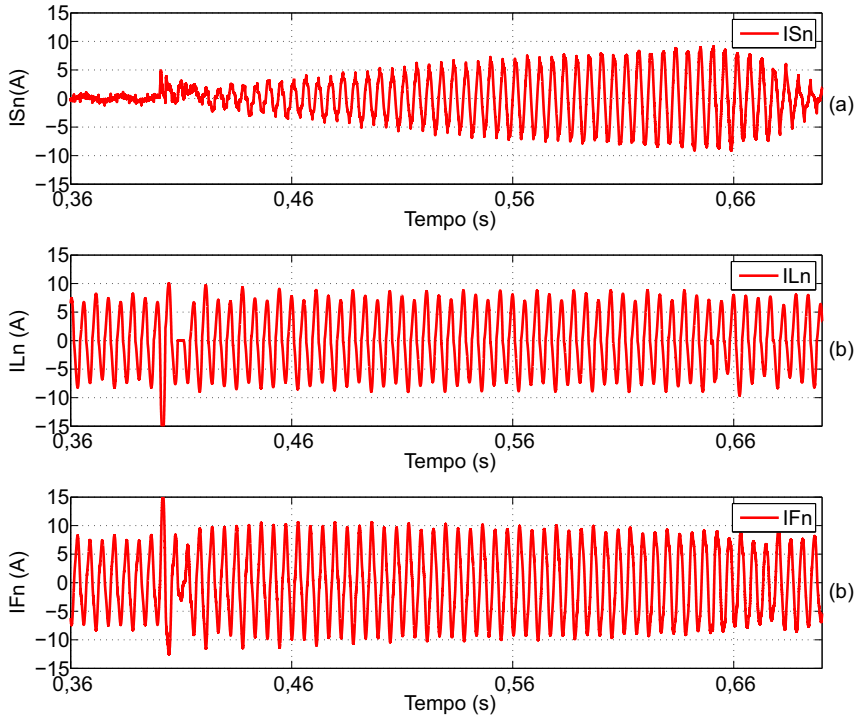
Fonte: o autor (2019).

Figura 63 – Correntes da rede, carga e filtro durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves.



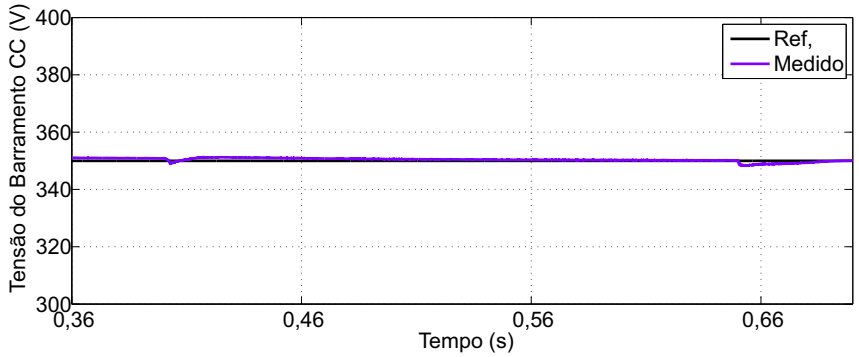
Fonte: o autor (2019).

Figura 64 – Correntes de neutro rede, carga e filtro durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 65 – Tensão no barramento CC durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

3.4 Resultados de Simulação do UPQC Onze Chaves

A outra topologia a ser estudada é variante do conversor de oito chaves que foi apresentado em (GOMES, 2014,), em que uma das chaves da unidade *top* do conversor de nove chaves é removida, reduzindo o custo total em relação à topologia de nove chaves proposta como UPQC por Zhang em 2012 (ZHANG; LOH; GAO, 2012). Como uma das saídas, não pode mais ser comandada diretamente é necessário que os outros braços do conversor sintetizem a forma de onda do braço sem a chave, a topologia a ser estudada é apresentada na Figura 31. Portanto, é necessário realizar algumas alterações no controle do filtro híbrido de modo a viabilizar a atuação da topologia.

Para desenvolver o UPQC de onze chaves foi também utilizada a estrutura proposta por Limongi em 2015 (LIMONGI et al., 2015). Este UPQC apresenta como diferencial a redução de uma chave IGBT, esta redução é possível graças ao uso de um filtro LC na saída da unidade *top*, que age como um alta impedância em baixas frequências mitigando correntes na frequência fundamental. Dessa forma, a saída que seria sintetizada pela chave que foi removida, pode ser sintetizada pelos outros braços.

Essa modificação é interessante em aplicações que visam a redução de custos. Por outro lado, traz consigo algumas limitações: como uma das chaves foi removida, as tensões agora são sintetizadas em valores de linha, já no UPQC doze chaves, as tensões são sintetizadas em valores de fase resultando em redução da capacidade de síntese de tensões, afetando diretamente o carregamento do barramento CC, o que acaba por limitar a atuação do UPQC onze chaves em distúrbios de tensão, principalmente os trifásicos.

Visto que há uma impedância de valor elevado na frequência fundamental, a corrente no ramo filtro híbrido é limitada, tanto no UPQC doze chaves quanto no de onze chaves. Porém, enquanto no conversor de doze chaves o controle de carregamento do barramento CC atua nas três fases, nesta configuração o controle possui apenas duas fases para atuar diretamente.

Em relação ao controle de harmônicos, este não é muito prejudicado, visto que a impedância do filtro LC se torna menor em frequências mais altas e as tensões são sintetizadas em valores de linha, que contém a informação das tensões que seriam sintetizadas pela unidade *top* no braço C do UPQC. Como o UPQC sintetiza tensões de linha, foi necessário reduzir os ganhos do controlado PI, idealmente os ganhos poderiam ser reduzidos por $\sqrt{3}$, porém foram foram reduzidos pela metade, então $K_p = 0,8$ e$K_i = 2,5$.

A geração das correntes de referência para o filtro híbrido utiliza as correntes da carga. O conteúdo harmônico é extraído por meio de filtros passa altas, gerando o sinal de referencia do controle. O controle do lado série é o mesmo já utilizado anteriormente.

A topologia foi simulada com os mesmos parâmetros aplicados ao UPQC 12 chaves, e os resultados da simulação da distorção harmônica e das correntes de neutro em regime permanente são sintetizados na Tabela 12. Como a topologia possui uma chave a menos no braço responsável

pela síntese das tensões da fase C, é preciso um tempo maior para que o conversor consiga levar o THD das correntes da fonte para um valor menor que 5%, no entanto, consegue-se valores em torno de 4%. A forma de onda das correntes obtidas é mostrada na Figura 66, assim como o comportamento do barramento CC (Figura 70).

Na situação de regime permanente, sem perturbação nas tensões de rede, as correntes são aviladas em duas situações: com carga equilibrada com os valores de resistência iguais nos três retificadores e com valores distintos de resistência nas três fases. Os valores considerados foram de 84,7 Ω na fase "A"96,8 Ω na fase "B"e 108,9 Ω na fase "C", esses valores foram selecionados com base nas opções de resistências disponíveis no laboratório e estes valores foram os mesmos utilizados no experimento.

Tabela 12 – Resultados de simulação correntes em regime permanente - UPQC onze chaves.

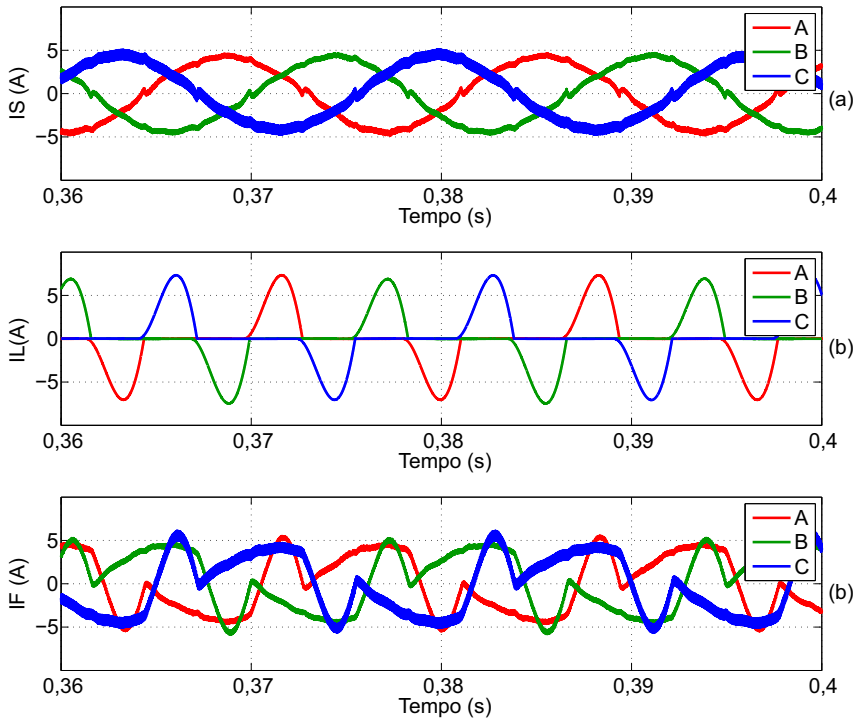
	Parâmetro	Unidade	Valor
Carga	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	2,033	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	2,034	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	2,035	A
	Corrente de pico de neutro	7,278	A
	THD na fase A	100,78	%
	THD na fase B	100,78	%
	THD na fase C	100,78	%
Rede	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,079	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,078	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,014	A
	Corrente de pico de neutro	0,0	A
	THD na fase A	4,17	%
	THD na fase B	4,07	%
	THD na fase C	3,92	%

A corrente de neutro da rede (I_{Sn}) foi praticamente zerada como mostrado na Tabela 4, conforme mostrado na Figura 67a. Observa-se que o conversor sintetiza uma corrente (I_{Fn}), por meio do quarto braço, equivalente à corrente de neutro da carga (I_{Fn}), Figuras 67b e 67c. Observa-se ainda que por meio das saídas dos outros braços da unidade *top* o conversor sintetiza os sinais referentes ao braço C.

Na Figura 68 observa-se o comportamento da tensão no barramento CC do UPQC, visto que não há atuação da unidade *bottom*, nesta simulação, a tensão se apresenta constante, pois o filtro híbrido tem uma pequena exigência por energia e esta demanda também é devidamente suprida pelo controle do barramento CC. é importante notar que a tensão está sobre o valor de referência de 350V, conforme projetado. O comportamento da tensões da rede e da carga pode ser visualizado na Figura 65. Como não há eventos de tensão nesta simulação, as duas tensões são praticamente iguais.

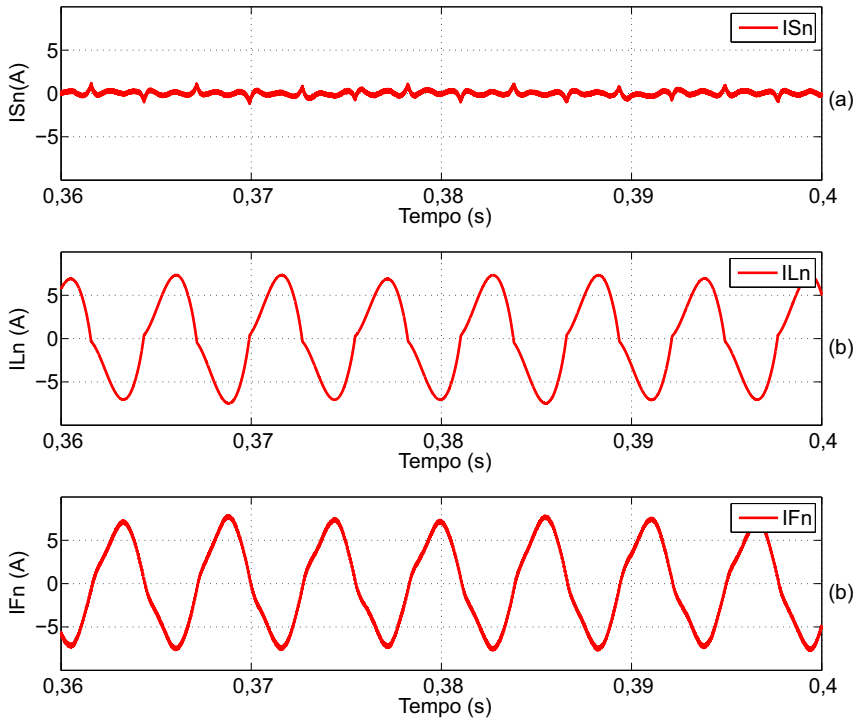
Os resultados obtidos em simulação para o UPQC operando com cargas desbalanceadas, são resumidos na Tabela 13 e ilustrados nas Figuras 70 e 71, observa-se que agora as correntes de carga nas três fases são distintas, porém as correntes de fase fornecidas pela rede são

Figura 66 – Correntes da rede, carga e filtro com carga equilibrada - UPQC onze chaves.



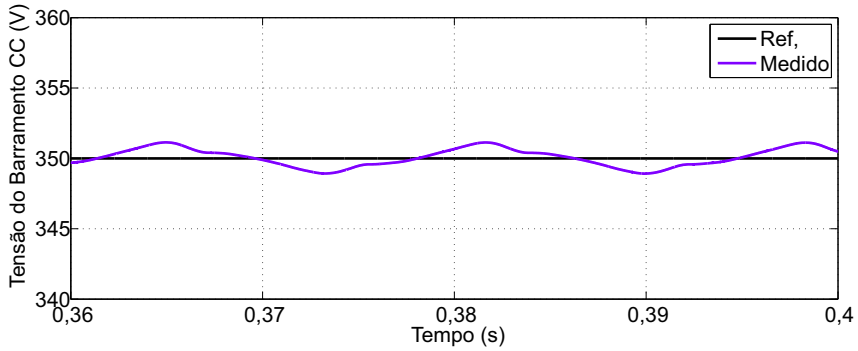
Fonte: o autor (2019).

Figura 67 – Correntes de neutro com carga equilibrada - UPQC onze chaves.



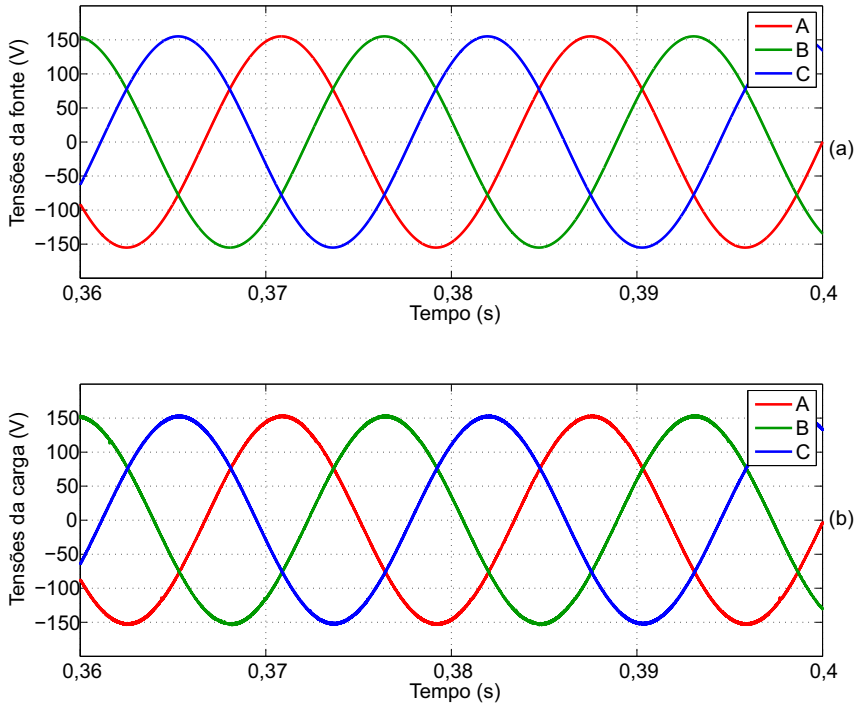
Fonte: o autor (2019).

Figura 68 – Comportamento do barramento CC em regime permanente -UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 69 – Comportamento das tensões da rede e da carga em regime permanente -UPQC onze chaves.



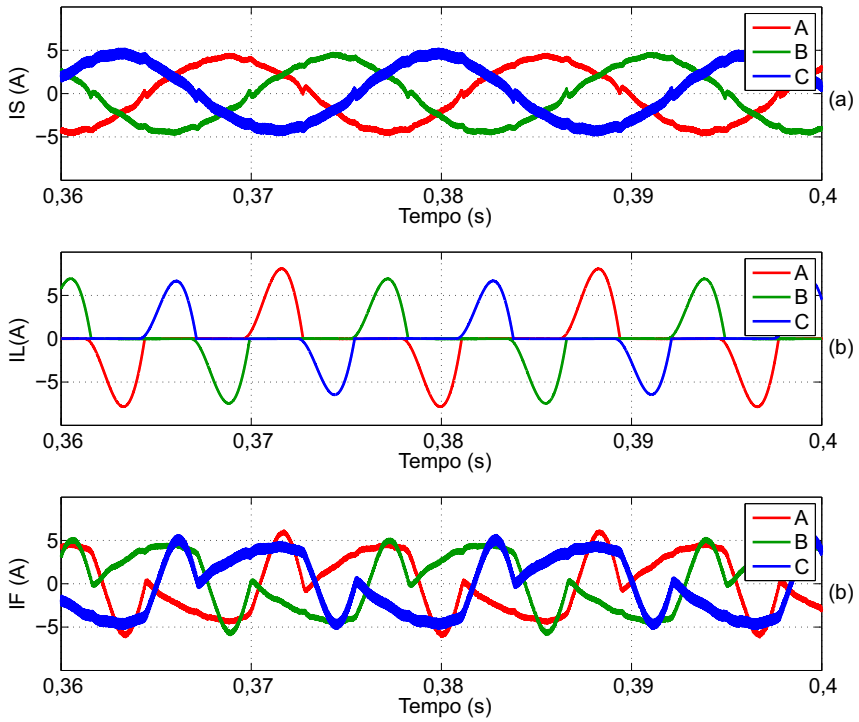
Fonte: o autor (2019).

equilibradas e a corrente de neutro é praticamente eliminada. Comprovando a eficácia do UPQC na compensação de harmônicos de corrente com cargas desbalanceadas.

Na Figura 44 podem ser observadas as tensões da rede e da carga, como não há pertubação de tensão, neste caso, as duas medidas tendem a ser muito parecidas.

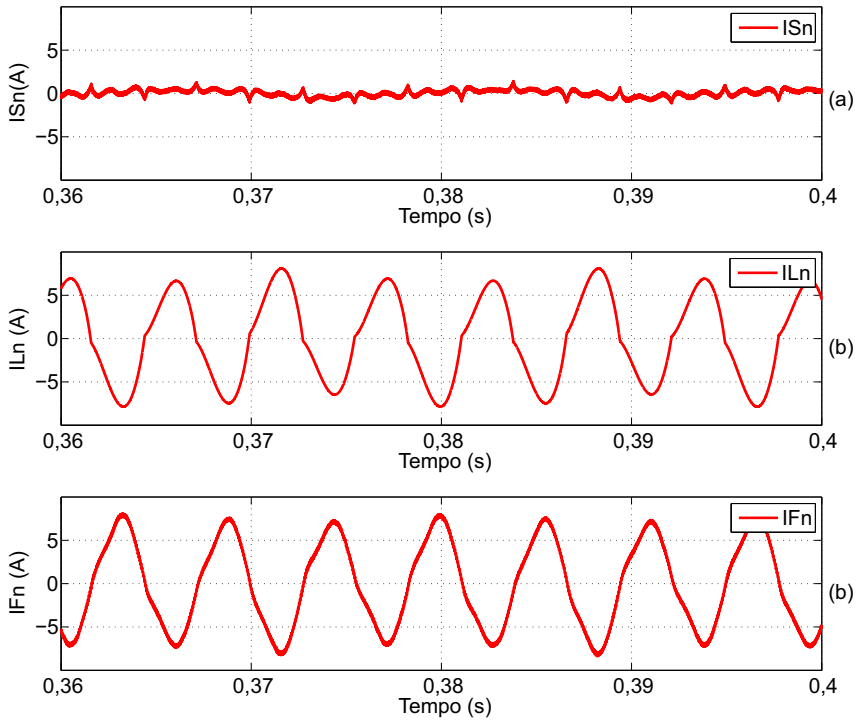
Asim como foi feito para o UPQC 12 chaves, foram simulados afundamentos de tensão desbalanceados e trifásicos, e os resultados da compensação são exibidos na Tabela 6. O barramento CC tem sua taxa de carregamento mais limitada se comparada ao UPQC 12 chaves, isso limita a intensidade máxima dos afundamentos de tensão trifásicos, pois demandam grande

Figura 70 – Correntes de rede e carga desbalanceada - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 71 – Correntes de rede e carga desbalanceada - UPQC onze chaves.

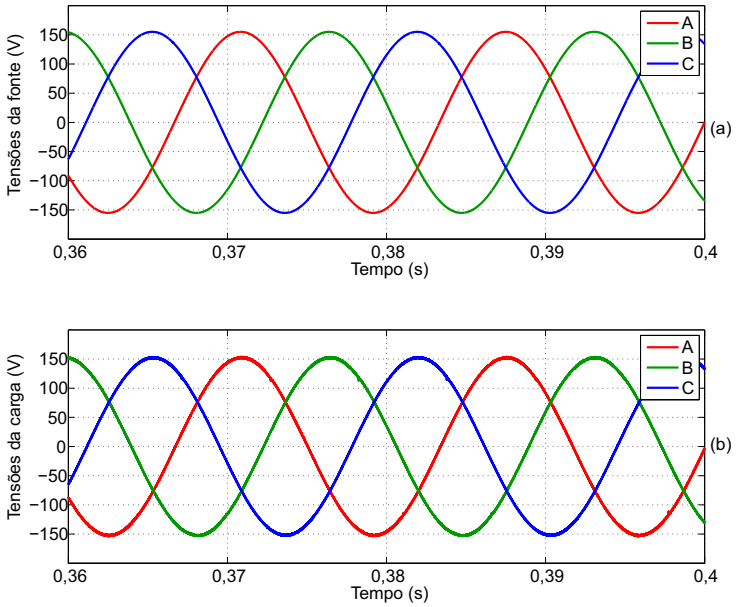


Fonte: o autor (2019).

Tabela 13 – Resultados de simulação correntes das fases em regime permanente - carga desequilibrada - UPQC onze chaves.

	Parâmetro	Unidade	Valor
Carga	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	2,312	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	2,033	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	1,815	A
	Corrente de pico de neutro	8,0	A
	THD na fase A	96,32	%
	THD na fase B	98,88	%
	THD na fase C	101,07	%
Rede	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,043	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,080	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,086	A
	Corrente de pico de neutro	0,301	A
	THD na fase A	3,67	%
	THD na fase B	3,77	%
	THD na fase C	3,76	%

Figura 72 – Comportamento das tensões da rede e da carga -UPQC onze chaves.



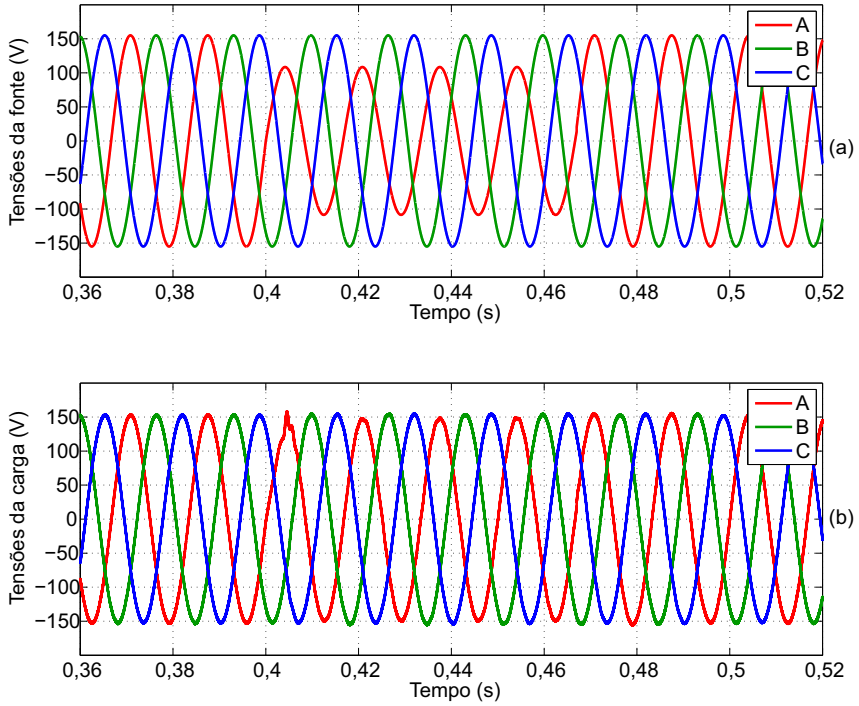
Fonte: o autor (2019).

quantidade de energia. Neste caso o maior afundamento trifásico que o UPQC onze chaves conseguiu compensar foi 30% do valor da tensão da rede.

A primeira simulação de perturbação de tensão a ter seus resultados mostrados é a de um afundamento de tensão monofásico de 30% do valor nominal na fase "A"da rede durante 4 ciclos da frequência fundamental, as formas de onda das tensões da rede e da carga são mostradas na Figura 73, também foram plotadas correntes das fases e do neutro durante o evento da rede e da carga (Figuras 74 e 75), assim como a tensão no barramento CC (Figura 76).

A simulação seguir mostra o comportamento do UPQC onze chaves em um afundamentos monofásicos de 50%. No caso do afundamento de tensão monofásico de 50% do valor nominal

Figura 73 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

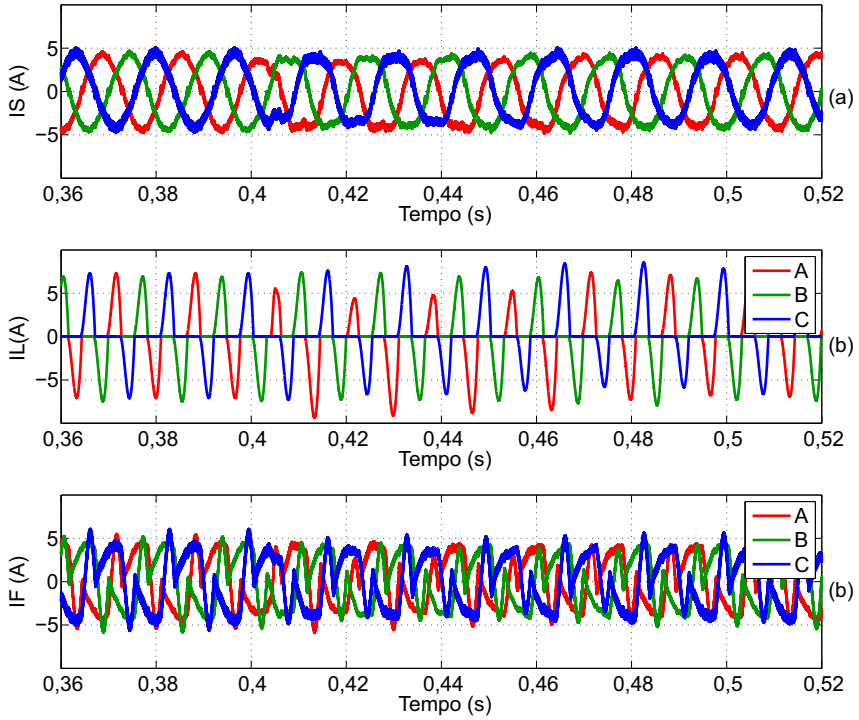
Tabela 14 – Resultados de simulação afundamento de tensão monofásico 30% - UPQC onze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	76,8	V
Tensão RMS fase B	110	V
Tensão RMS fase C	110	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	346,5	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	105,2	V
Tensão RMS fase B	109	V
Tensão RMS fase C	109	V

na fase "A"da rede durante 4 ciclos da frequência fundamental, as formas de onda das tensões da rede e da carga são mostradas na Figura 77, também foram plotadas correntes das fases e do neutro durante o evento da rede e da carga (Figuras 78 e 79), assim como a tensão no barramento CC (Figura 80). A demanda por energia durante este afundamento é superior, em relação ao afundamento monofásico de 30%, causando uma oscilação maior no barramento CC, porém dentro dos limites operacionais do UPQC, como pode ser observado na Tabela 15. Observa-se que as tensões da carga são mantidas próximas ao valor nominal, conforme mostrado na Tabela 15.

Assim como ocorre no UPQC 12chaves, verifica-se que a corrente de neutro da fonte (Figura 50) se torna maior durante a ocorrência do evento, porém ao término do evento, o UPQC

Figura 74 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

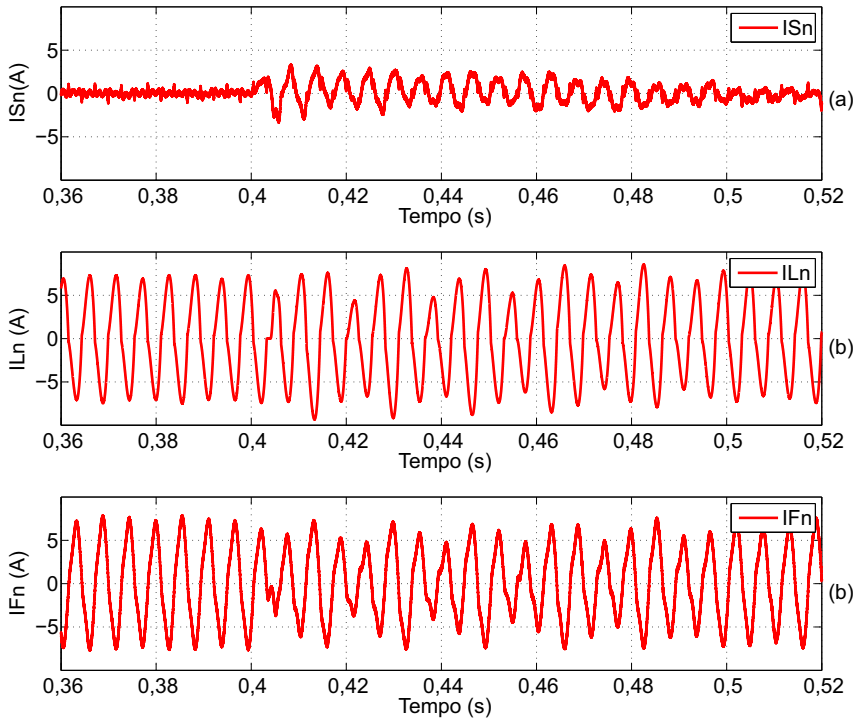
volta a mitigar a corrente de neutro. Nos eventos de tensão, as prioridades do conversor são a mitigação das oscilações de tensão na carga e manter o barramento CC carregado, para que o lodo série do UPQC continue a sintetizar as tensões necessárias, sendo este o motivo para a piora do controle das correntes harmônicas durante os eventos de tensão na rede, principalmente nos mais severos.

Tabela 15 – Resultados de simulação afundamento de tensão monofásico 50% - UPQC onze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	55	V
Tensão RMS fase B	110	V
Tensão RMS fase C	110	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	345	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	103,5	V
Tensão RMS fase B	109,8	V
Tensão RMS fase C	109,8	V

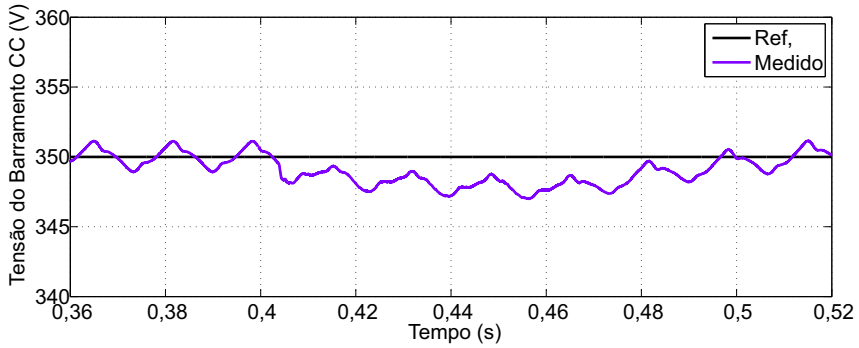
A próxima simulação mostra o comportamento do UPQC 11 chaves em um afundamento de tensão trifásico 30% do valor nominal durante 4 ciclos, (Figura 81a) o UPQC necessita injetar mais potência na rede, exigindo mais do barramento CC, conforme mostrado na Figura 84, durante o afundamento trifásico, as correntes das fases se comportam como mostrado na Figura

Figura 75 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos -UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 76 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves.

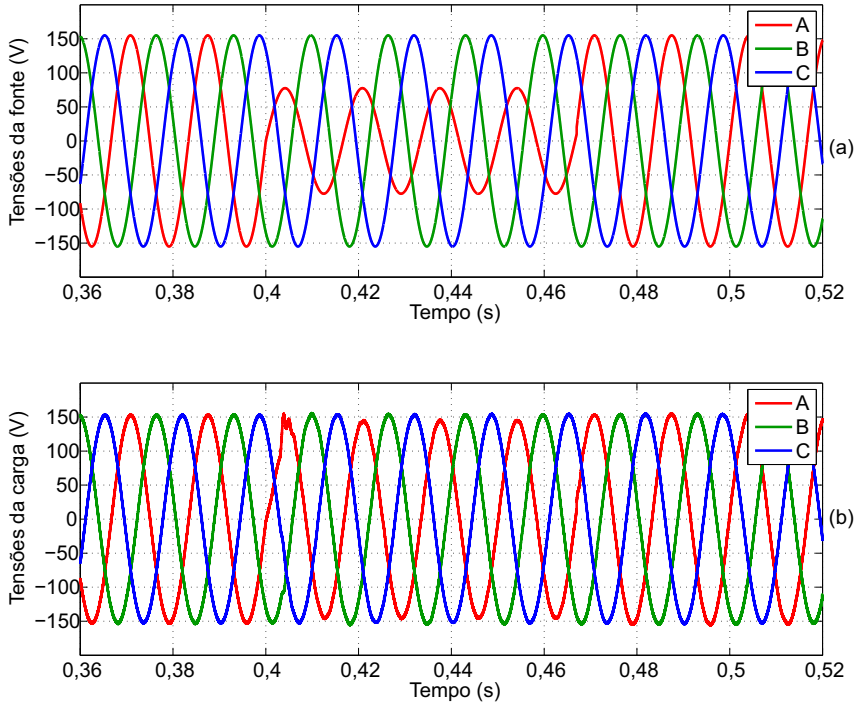


Fonte: o autor (2019).

82 e as correntes de neutro conforme mostrado na Figura 83, como a prioridade do conversor se torna a compensação do afundamento de tensão, há uma piora na compensação de harmônicos neste período. Os resultados desta simulação, foram condensados na Tabela 16.

Como o UPQC onze chaves possui uma maior limitação no carregamento do barramento CC, comparado ao UPQC doze chaves, o maior afundamento, por um período mais longo de tempo, que se conseguiu compensar com essa topologia foi um afundamento de tensão trifásico de 30% por 30 ciclos da frequência fundamental. Pode ser visto na Figura 85b que as tensões na

Figura 77 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

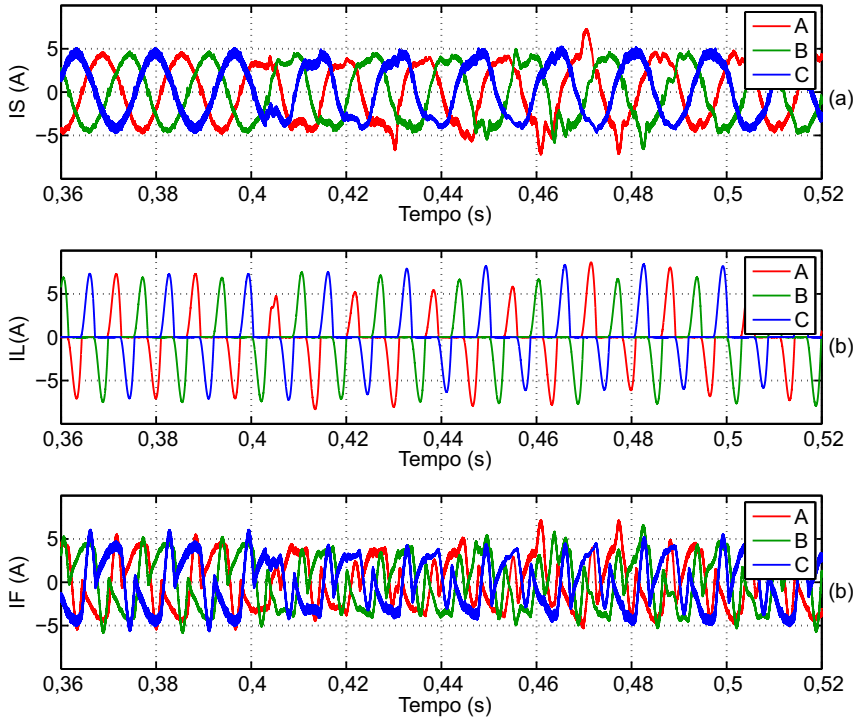
Tabela 16 – Resultados de simulação afundamento de tensão trifásico 30% - UPQC onze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77	V
Tensão RMS fase B	77	V
Tensão RMS fase C	77	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	341	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	105,0	V
Tensão RMS fase B	104,96	V
Tensão RMS fase C	105,67	V

carga permanecem próximas ao valor nominal ao longo do período da perturbação, por outro lado, se observa um aumento nas correntes da rede e do filtro (Figura 86 e 87). Em relação à tensão do barramento CC, observa-se que a mesma decai ao longo do tempo da perturbação, chegando a um valor mínimo de 290V, porém com esta tensão o lado série consegue mitigar os efeitos do afundamento de tensão nos terminais da carga. Ao final da perturbação, observa-se que o barramento CC é recarregado, conforme Figura 88. Os resultados são resumidos na tabela 17.

Como foi feito com o UPQC doze chaves, são mostradas duas simulações com sobretensões para o conversor onze chaves, a primeira se trata de uma sobretensão monofásica de 30% na fase "A"da rede. Já a segunda simulação é uma sobretensão trifásica também de 30%

Figura 78 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 17 – Resultados de simulação afundamento de tensão trifásico 30% - UPQC onze chaves

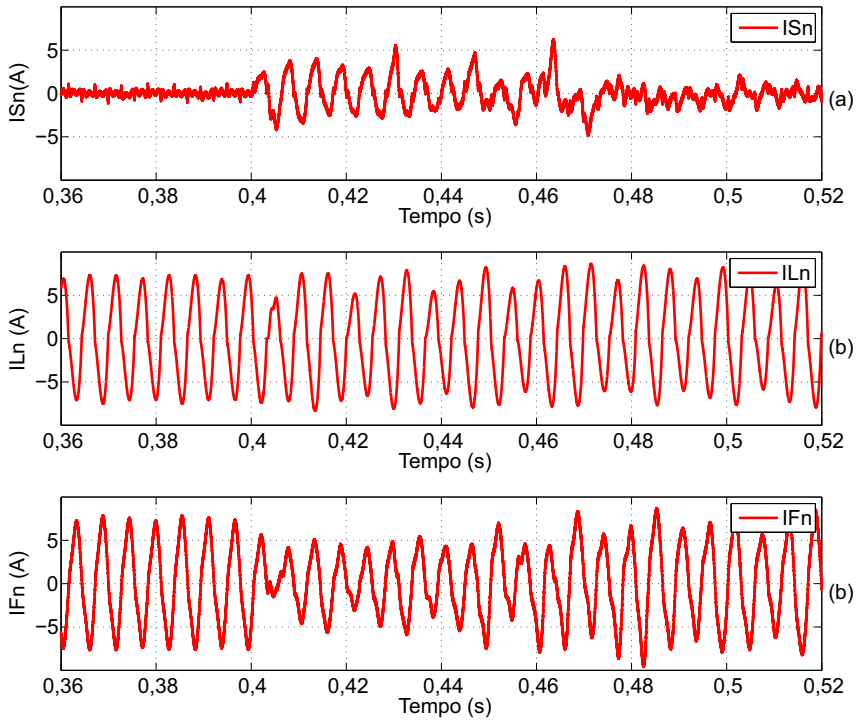
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77	V
Tensão RMS fase B	77	V
Tensão RMS fase C	77	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	253	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	105,1	V
Tensão RMS fase B	106,4	V
Tensão RMS fase C	106,2	V

do valor nominal da rede elétrica.

Observa-se que a tensão na carga sofre uma elevação inicial, chegando no início da perturbação a 177V de pico, mas dentro dos limites aceitáveis da curva ITIC (Figura 89), já as correntes da fonte da carga e filtro paralelo são apresentadas nas Figuras 90e 91, nesta situação a saída paralela do conversor trabalha de modo a evitar a elevação da tensão no barramento CC, cujo comportamento é mostrado na Figura 92. Os resultados obtidos na simulação são resumidos na Tabela 18.

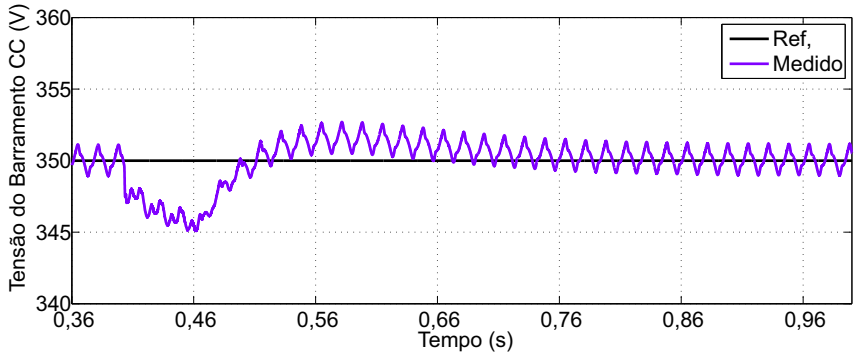
Esta última simulação trás um evento de sobretensão trifásico de 30% pelo período de 15 ciclos (Figura 93), já as correntes da rede são apresentadas na Figura 94, nesta situação a

Figura 79 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC com onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

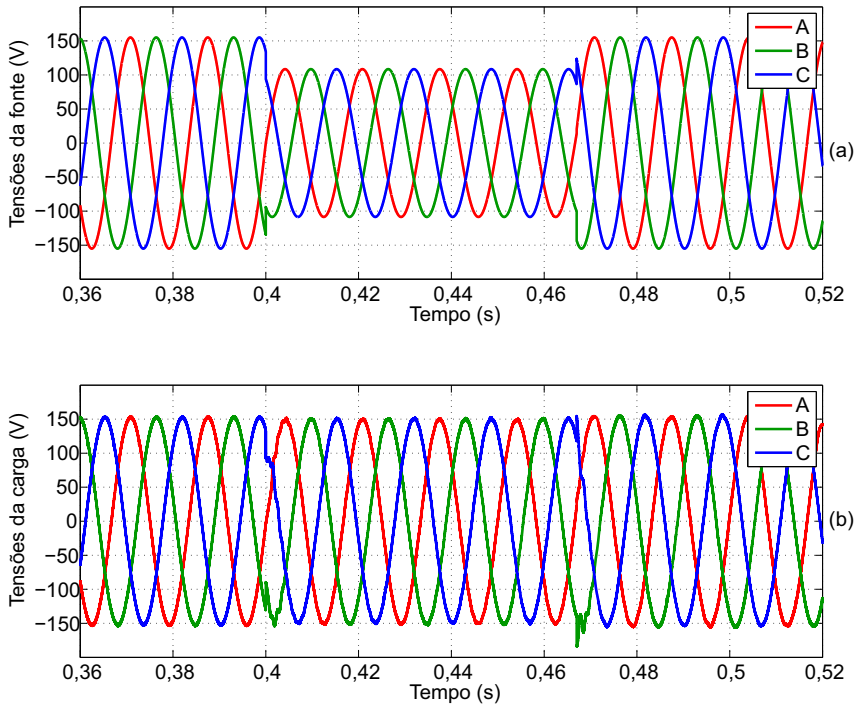
Figura 80 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico 50% de 4 ciclos - UPQC onze chaves



Fonte: o autor (2019).

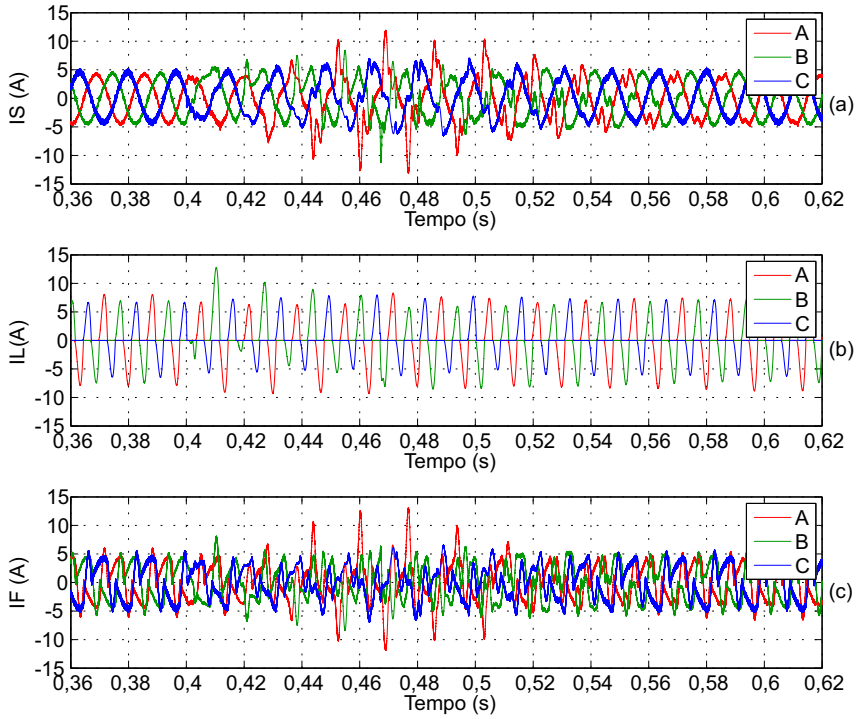
saída paralela do conversor trabalha de modo a evitar a elevação da tensão no barramento CC. Os resultados obtidos na simulação são resumidos na Tabela 11.

Figura 81 – Tensões na rede e na carga durante afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC doze chaves.



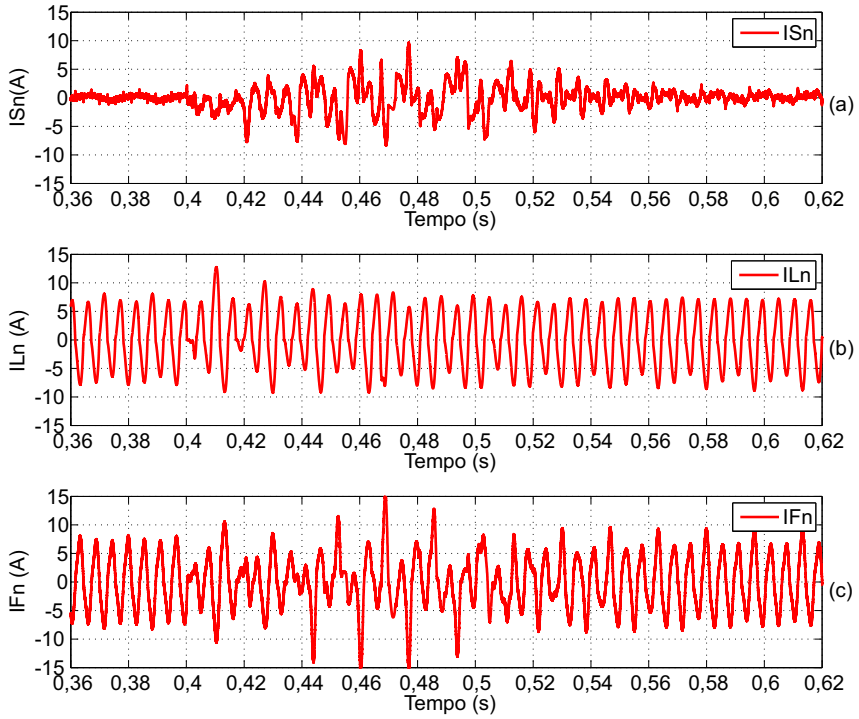
Fonte: o autor (2019).

Figura 82 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves.



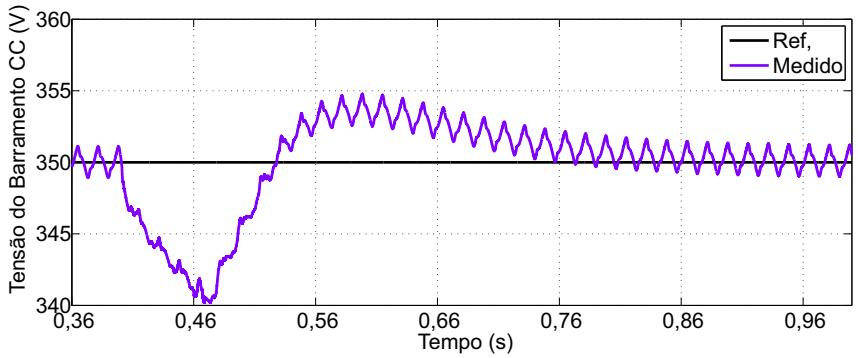
Fonte: o autor (2019).

Figura 83 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 84 – Tensão no barramento CC durante afundamento trifásico 30% de 4 ciclos - UPQC onze chaves

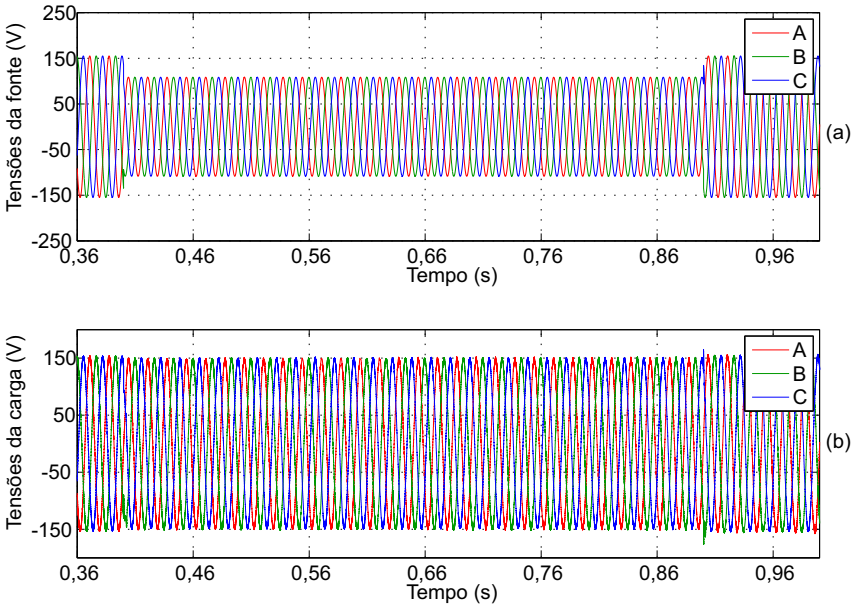


Fonte: o autor (2019).

Tabela 18 – Resultados de simulação sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves

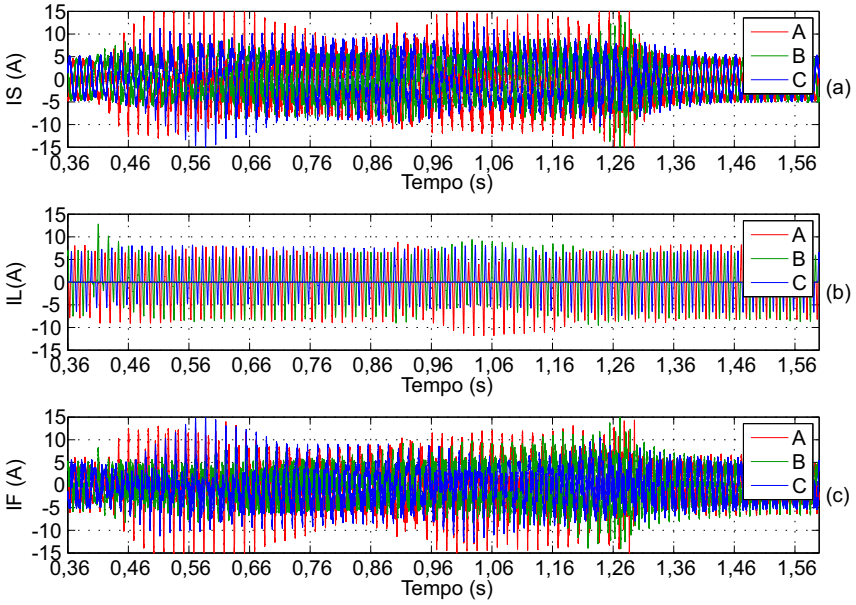
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143	V
Tensão RMS fase B	110	V
Tensão RMS fase C	110	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	113	V
Tensão RMS fase B	109	V
Tensão RMS fase C	109	V

Figura 85 – Tensões na rede e na carga durante afundamento de tensão trifásico 30% de 30 ciclos - UPQC onze chaves.



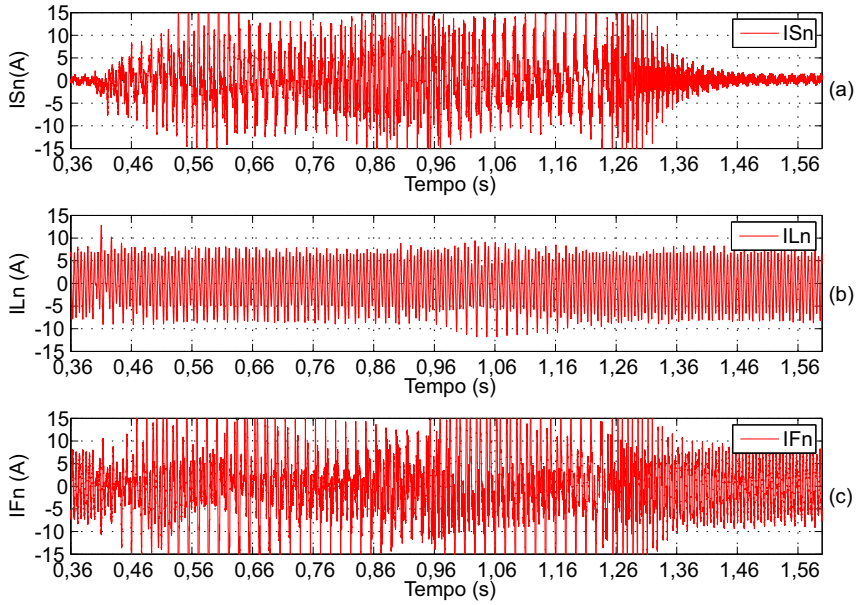
Fonte: o autor (2019).

Figura 86 – Correntes da rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 30 ciclos - UPQC onze chaves.



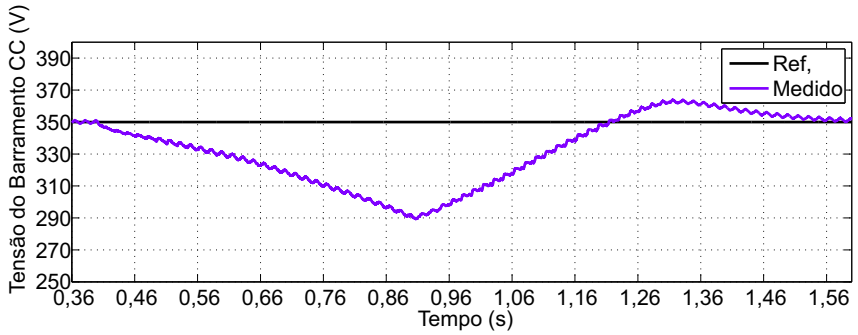
Fonte: o autor (2019).

Figura 87 – Correntes de neutro rede, carga e filtro em afundamento trifásico 30% de 30 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 88 – Tensão no barramento CC durante afundamento trifásico 30% de 30 ciclos - UPQC onze chaves.

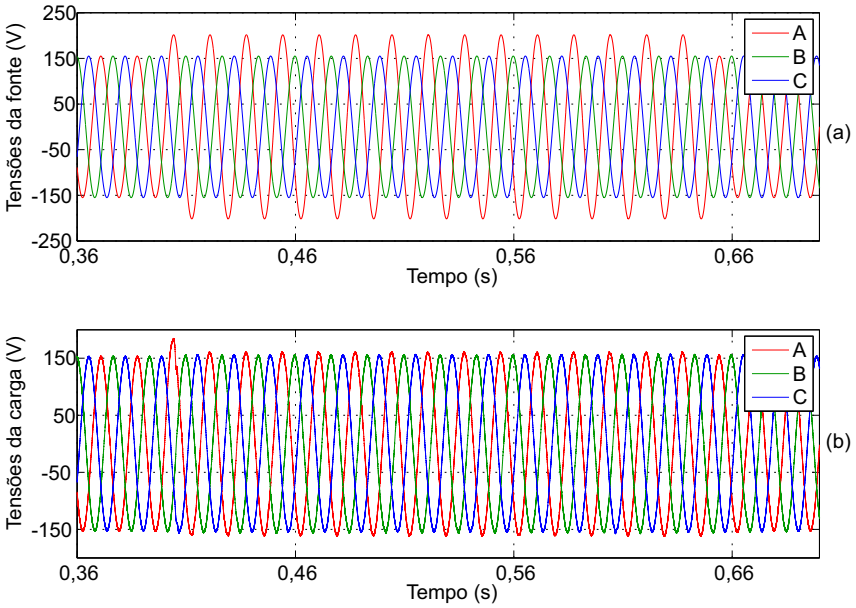


Fonte: o autor (2019).

Tabela 19 – Resultados de simulação sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC onze chaves

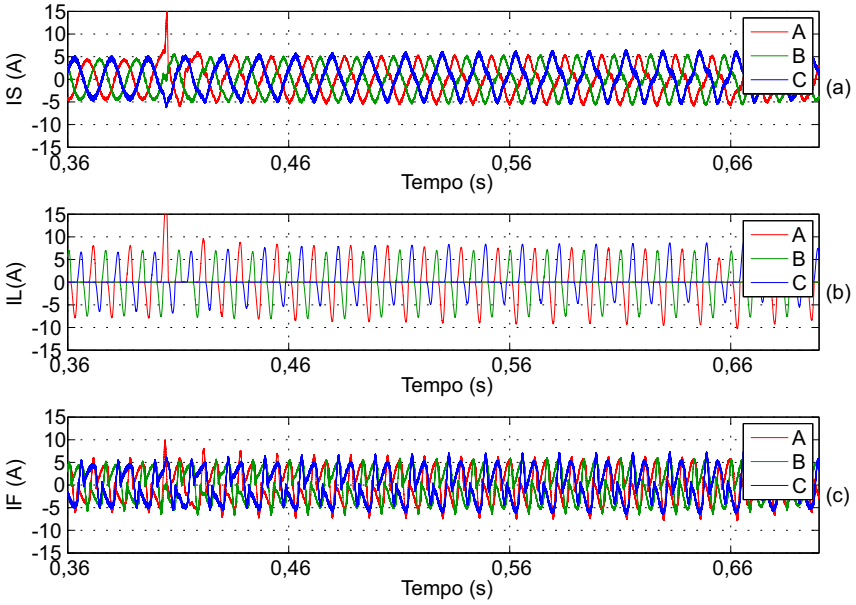
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143	V
Tensão RMS fase B	143	V
Tensão RMS fase C	143	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	351	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	115	V
Tensão RMS fase B	115	V
Tensão RMS fase C	115	V

Figura 89 – Tensões na rede e na carga durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves.



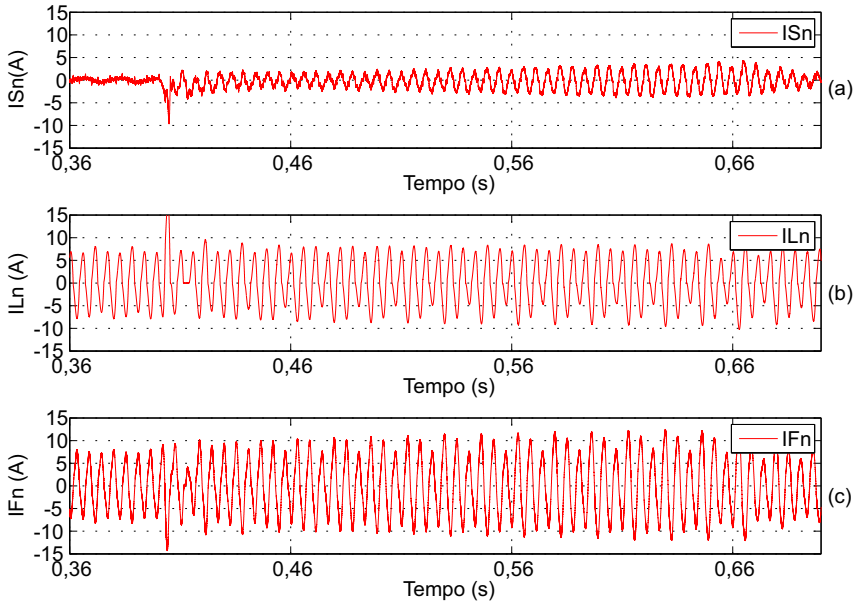
Fonte: o autor (2019).

Figura 90 – Correntes da rede, carga e filtro durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves.



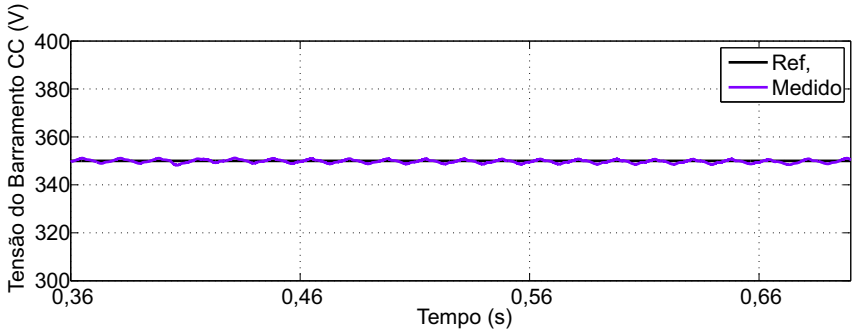
Fonte: o autor (2019).

Figura 91 – Correntes de neutro rede, carga e filtro durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves.



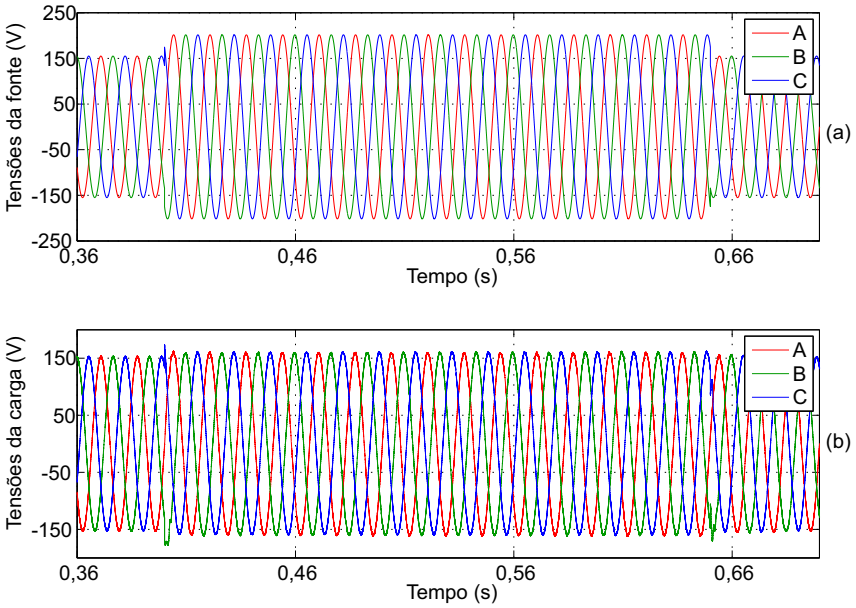
Fonte: o autor (2019).

Figura 92 – Tensão no barramento CC durante sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves.



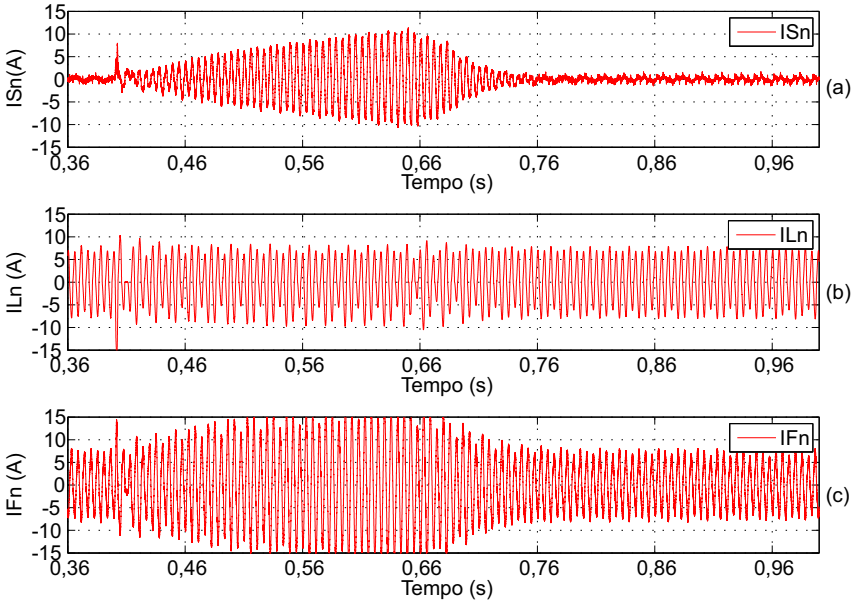
Fonte: o autor (2019).

Figura 93 – Tensões na rede e na carga durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 94 – Corrente de neutro rede, carga e filtro durante sobretensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

3.5 Conclusões

Ao longo deste capítulo foram discutidas e simuladas as duas topologias variantes do conversor de nove chaves que foram implementadas em laboratório, desenvolvidos seus projetos, simuladas individualmente e agora é apresentada uma tabela resumo com todos os resultados de simulação obtidos. Por meio dela é possível realizar um comparativo melhor entre as duas topologias. Na topologia do UPQC onze chaves a taxa de carregamento do barramento CC é mais limitada, porém as da perturbações de tensão são devidamente mitigadas.

Tabela 20 – Comparativo de desempenho entre as topologias.

	Parâmetro	12SW	11SW	Und
Carga	I_{RMS} na fase A	2,033	2,033	A
	I_{RMS} na fase B	2,033	2,033	A
	I_{RMS} na fase C	2,033	2,033	A
	I_{pico} no neutro	7,278	7,278	A
	THD na fase A	100,78	100,78	$\%$
	THD na fase B	100,78	100,78	$\%$
	THD na fase C	100,78	100,78	$\%$
Rede	I_{RMS} na fase A	3,222	3,079	A
	I_{RMS} na fase B	3,226	3,078	A
	I_{RMS} na fase C	3,223	3,014	A
	I_{pico} no neutro	0,8	0,9	A
	THD na fase A	3,78	4,17	$\%$
	THD na fase B	3,78	4,07	$\%$
	THD na fase C	3,78	3,92	$\%$
Afundamento de Tensão Monofásico 30%	Valores Medidos na Fonte	-	-	-
	Tensão RMS fase A	76,8	76,8	V
	Tensão RMS fase B	110,0	110,0	V
	Tensão RMS fase C	110,0	110,0	V
	V_{CCmin}	348	346,5	V
	Valores Medidos na Carga	-	-	-
	Tensão RMS fase A	107,8	105,2	V
	Tensão RMS fase B	109,0	109,0	V
	Tensão RMS fase C	109,0	109,0	V
Afundamento de Tensão Trifásico 30%	Valores Medidos na Fonte	-	-	-
	Tensão RMS fase A	77,0	77,0	V
	Tensão RMS fase B	77,0	77,0	V
	Tensão RMS fase C	77,0	77,0	V
	V_{CCmin}	346,5	788	V
	Valores Medidos na Carga	-	-	-
	Tensão RMS fase A	107,8	105,0	V
	Tensão RMS fase B	107,8	105,0	V
	Tensão RMS fase C	107,8	105,7	V
Sobretensão trifásica 30%	Valores Medidos na Fonte	-	-	-
	Tensão RMS fase A	143,0	143,0	V
	Tensão RMS fase B	143,0	143,0	V
	Tensão RMS fase C	143,0	143,0	V
	V_{CCmin}	351	351	V
	Valores Medidos na Carga	-	-	-
	Tensão RMS fase A	115,0	115,0	V
	Tensão RMS fase B	115,0	115,0	V
	Tensão RMS fase C	115,0	115,0	V

Pela Tabela 20 percebe-se que tanto o UPQC doze chaves quanto o UPQC onze chaves apresentam desempenhos bastante próximos, a limitação da topologia com onze chaves está na compensação de afundamentos de tensão trifásicos de grande intensidade e duração. Então,em

aplicações em que o custo seja imperativo, pode-se aplicar o conversor 11 chaves, já em aplicações que exijam uma performance mais aprimorada o conversor 12 chaves é mais aplicável.

Ao longo das simulações observou-se o comportamento dos dois conversores em situações agressivas com objetivo de mostrar os limites operacionais e a performance dos equipamentos, em situações corriqueiras, afundamentos e sobretensões de tais magnitudes não são tão comuns (MERTENS et al., 2007).

Em laboratório, foram realizados experimentos com a topologia com onze e doze chaves simuladas ao longo deste capítulo e os resultados experimentais foram apresentados no Capítulo 4. Serão avaliados os desempenhos com base no mesmo roteiro desenvolvido em simulação. A montagem de bancada utilizada foi a mesma para as duas topologias, por sua construção permitir que seja modificada rapidamente.

4 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo, é apresentado o protótipo desenvolvido, assim como são apresentados os resultados experimentais obtidos com os UPQCs de doze e onze chaves seguindo o mesmo roteiro de apresentação do Capítulo 3.

Para obter as formas de onda apresentas neste capítulo foram utilizados osciloscópios da fabricante *Yokogawa* modelo *DL850*.

Inicialmente, será apresentada a descrição do protótipo que foi implementado para validação das topologias apresentando seus principais componentes.

4.1 Descrição do Protótipo

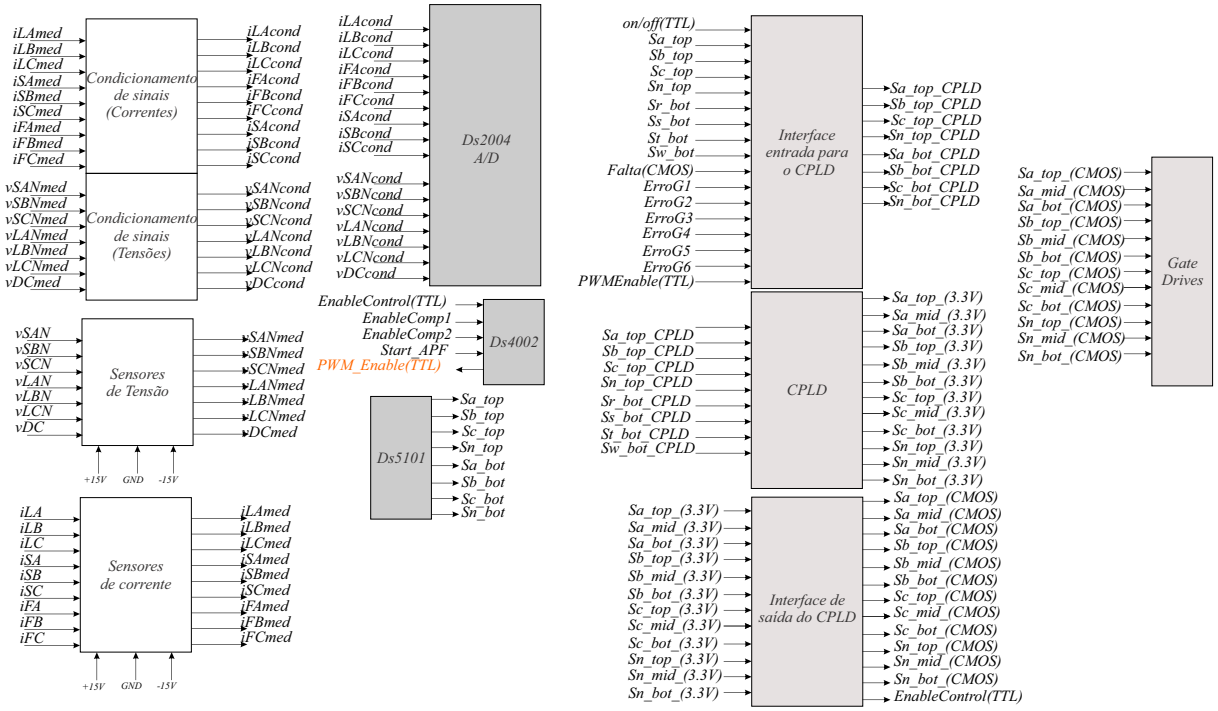
Tendo por objetivo a validação dos resultados de simulação, foi projetado e implementado um protótipo baseado nas simulações do Capítulo 3. Como as duas propostas de UPQC tem uma estrutura física semelhante, buscou-se um projeto que pudesse ser utilizado para as duas propostas, sendo assim, modular e de fácil acesso aos terminais de modo a permitir a conexão e desconexão de elementos, medições e proteções. O conversor em si, é constituído por módulos de duas chaves IGBT com capacidade nominal de 50A, comandadas via circuitos de *gate drive*, que por sua vez recebem os pulsos de PWM da placa de condicionamento de sinais e PWM.

O CPLD presente placa de condicionamento de sinais é responsável pela implementação da lógica de chaveamento das chaves intermediárias do conversor, pela geração de tempo morto e proteção de hardware do conversor. Todas as entradas e saídas do CPLD são opto acopladas, garantindo a isolação dos componentes. Um diagrama de blocos de entradas e saídas é mostrado na Figura 95. O CPLD recebe do *Dspace*, via módulo DS 5101, os ciclos de trabalho gerados pelo controle e envia sinais ao *dSpace* via placa DS4002. Na placa de condicionamento de sinais e PWM também é gerada a portadora de PWM que é comparada com os ciclos de trabalho, produzindo os pulsos de PWM. Uma visão geral da placa é mostrada na Figura 96. A placa ainda é responsável pelo condicionamento dos sinais analógicos medidos e por sua transmissão via cabos coaxiais à placa DS2004 que realiza a discretização dos sinais e os envia ao *dSpace*.

Por se tratar de uma topologia não convencional, optou-se pelo uso de placas de *gate drive* com comando independente para as duas chaves do módulo. Como cada braço do conversor é constituído por três chaves, foram necessários oito módulos IGBT para a implementação do conversor, porém apenas 12 chaves foram efetivamente utilizadas no conversor de doze chaves e uma a menos para o conversor de onze chaves. O esquema de montagem do módulo conversor pode ser visualizado na Figura 97.

As chaves foram montadas sobre um dissipador de calor com ventilação forçada, a

Figura 95 – Diagrama de blocos do condicionamento de sinais e PWM.



Fonte: o autor (2019).

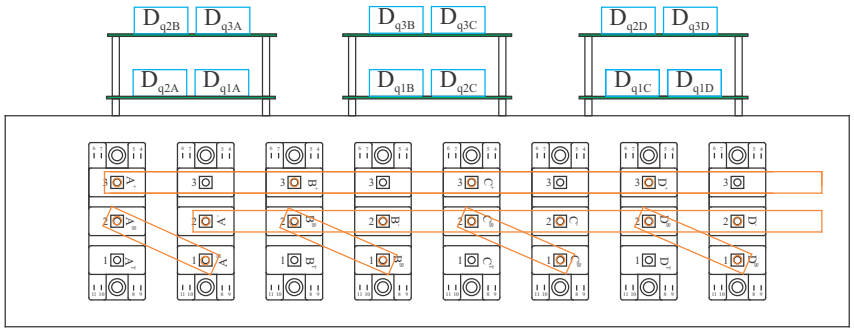
Figura 96 – Placa de condicionamento de sinais e PWM.

Fonte: o autor (2019).

conexão entre o barramento CC e as chaves foi construída com barras de cobre, devido aos efeitos de indutâncias e capacitâncias parasitas. Uma visão geral do protótipo montado é exibida nas Figuras 98 e 99.

Na Figura 98 são mostradas as conexões internas, o conversor em si as placas de medição de os bornes de conexão. As placas de medição de tensão e corrente estão na parte lateral direita do quadro, enquanto que o conversor está fixado na chapa do painel. Pode-se observar as

Figura 97 – Diagrama de conexões do conversor.



Fonte: o autor (2019).

Figura 98 – Visão geral da montagem, conexões internas.

Fonte: o autor (2019).

placas de *gate drive* conectadas às chaves IGBT, o barramento CC implementado por meio de capacitores na parte inferior do conversor. Os bornes de conexão que fazem a interface entre os diversos componentes da parte de potência. Ainda é possível visualizar a capacitância do filtro do lado série do UPQC implementadas nas três placas fixadas na lateral superior esquerda do quadro, foram utilizados capacitores de poliéster.

Na Figura 99 pode-se observar os transformadores série na parte inferior, enquanto que o filtro LC do filtro híbrido é está localizado na parte superior da imagem. Os indutores foram todos projetados e implementados no próprio laboratório, sendo todos de núcleo a ar, conforme mostram as imagens.

A carga utilizada é mostrada na Figura 100, onde podem ser vistos os retificadores

Figura 99 – Visão geral da montagem, conexões externas, transformadores e filtros.

Fonte: o autor (2019).

Figura 100 – Visão geral da montagem, carga utilizada.

Fonte: o autor (2019).

monofásicos e a carga RLC conectada na saída de cada retificador.

4.2 Resultados Experimentais do UPQC Doze Chaves

Para realizar os ensaios, o sistema foi alimentado por uma fonte de tensão CA trifásica programável fabricada pela empresa SUPPLIER modelo *FCATC 3000-38-15*, através da qual foram emuladas as perturbações de tensão da rede elétrica. Os resultados foram salvos por meio de osciloscópios *Yokogawa* modelo *DL850*.

Os parâmetros gerais utilizados para obter os resultados experimentais são resumidos na Tabela 21.

Tabela 21 – Parâmetros gerais para ensaios dos UPQCs de Doze e Onze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Tensão eficaz, fase-neutro, da rede (V_s)	110	V
Resistência da carga (R_L)	$96,8$	Ω
Indutância da carga (L_L)	2,83	mH
Capacitância da carga (C_L)	300	μ F
Indutância do filtro ativo paralelo (L_{C1})	2,91	mH
Capacitância total do barramento CC (C_{cc})	4.700	μ F
Capacitância do filtro série (C_{c2})	50,89	μ F
Indutância do filtro série (L_{C2})	0,5	mH
Relação de espiras dos transformadores série (n)	1.0	-
Tensão de referência do barramento CC	350	V
Ganho proporcional do controlador do barramento CC	1,6	-
Ganho do integral do controlador do barramento CC	5	-
Ajuste do filtro passa altas do controle	10	Hz
Ganho proporcional dos controladores P+Ressonante filtro paralelo	25	-
Ganho do integral dos controladores P+Ressonante filtro paralelo	660	-
Ganho proporcional dos controladores P+Ressonante filtro série	0,9	-
Ganho do integral dos controladores P+Ressonante filtro série	100	-

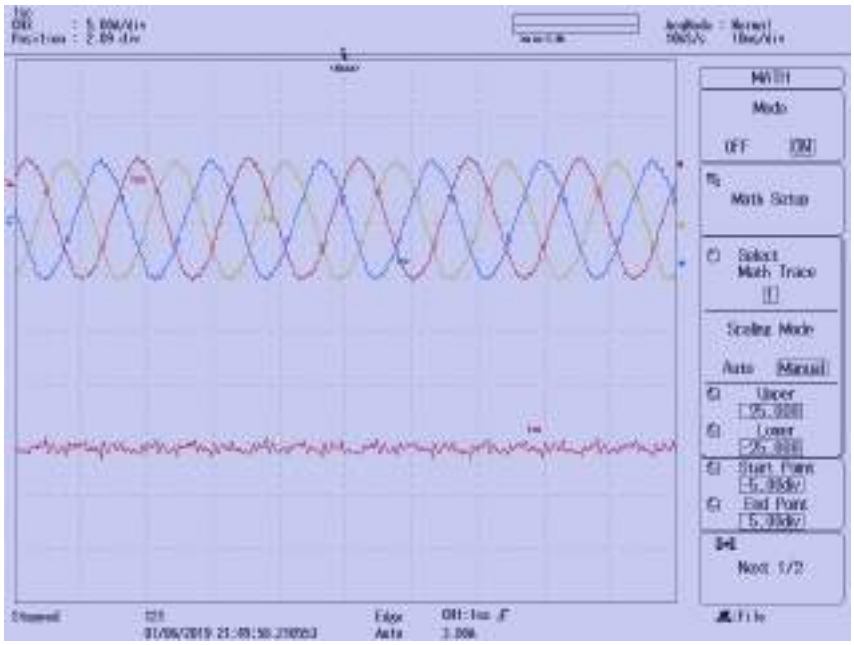
A Figura 101 mostra o comportamento das correntes da rede em regime permanente com o filtro híbrido do UPQC doze chaves em operação com carga equilibrada e sem harmônicos ou afundamentos na tensão da rede, percebe-se que a corrente de neutro é praticamente eliminada, como mostrado nas simulações do Capítulo 3. A distorção harmônica total (THD) das correntes da carga é de 96,8% enquanto que a distorção obtida nas correntes da rede é de apenas 4,71% na fase "A", na fase "B"4,61% e na fase "C"de 3,98%. Os resultados para deste ensaio são condensados na Tabela 22.

A Figura 102 mostra o formato da corrente que a carga demanda. Tratam-se de três retificadores ponte completa monofásicos, na mesma configuração do que foi simulado no Capítulo 3. Esta é uma carga que consome correntes altamente distorcidas e sua corrente de neutro possui alto conteúdo harmônico mesmo a carga estando equilibrada, o que comprova a eficácia do UPQC doze chaves na compensação de harmônicos.

A Figura 103 mostra as correntes injetadas pelo filtro híbrido no sistema de modo a compensar as correntes harmônicas solicitadas pela carga, e manter a tensão do barramento CC no valor de referência.

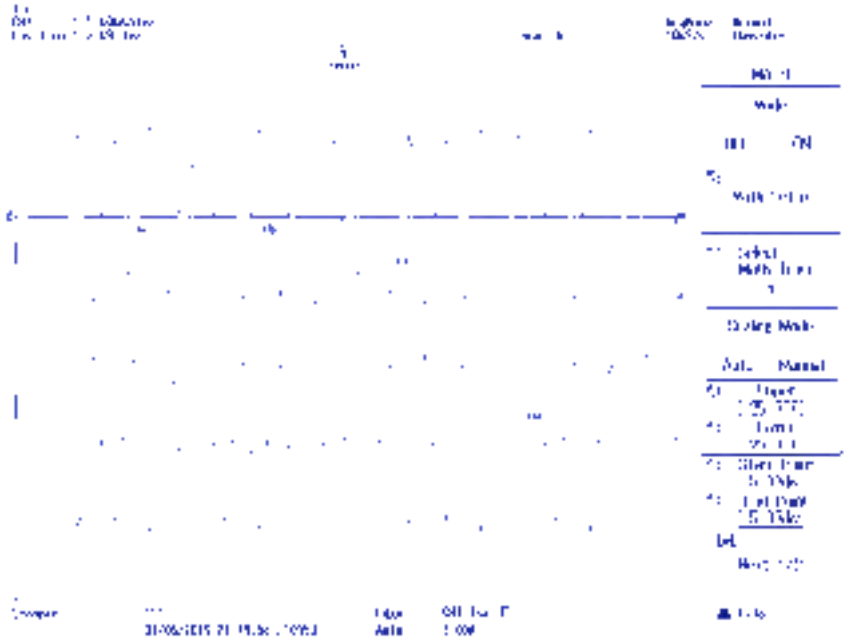
As tensões na rede e na carga são mostradas na Figura 104 são bastante similares, pois

Figura 101 – Correntes da rede em regime permanente com carga equilibrada.



Fonte: o autor (2019).

Figura 102 – Correntes de carga equilibradas.



Fonte: o autor (2019).

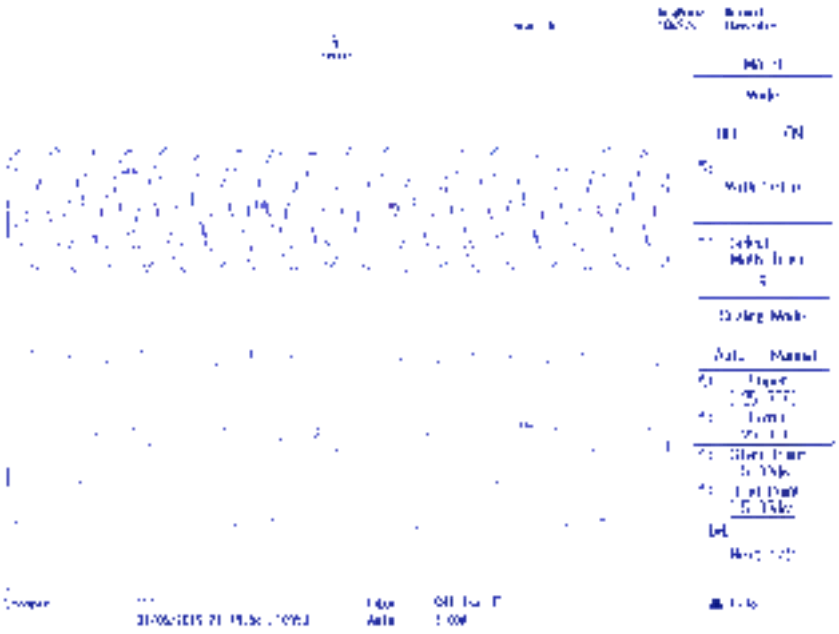
não há evento de tensão na rede.

A Figura 105 mostra o comportamento das correntes da rede quando há uma carga desequilibrada conectada ao sistema. Neste caso, as resistências do lado CC do retificador foram alteradas de modo a produzir um desequilíbrio nas correntes, as resistências utilizadas foram

Tabela 22 – Resultados experimentais correntes das fases em regime com carga equilibrada - UPQC doze chaves.

	Parâmetro	Unidade	Valor
Carga	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,18	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,08	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,04	A
	Corrente de pico de neutro	7,5	A
	THD na fase A	96,8	%
	THD na fase B	96,8	%
	THD na fase C	96,8	%
Rede	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,60	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,59	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,49	A
	Corrente de pico de neutro	0,7	A
	THD na fase A	4,71	%
	THD na fase B	4,61	%
	THD na fase C	3,98	%

Figura 103 – Correntes do filtro híbrido com carga equilibrada - UPQC doze chaves.



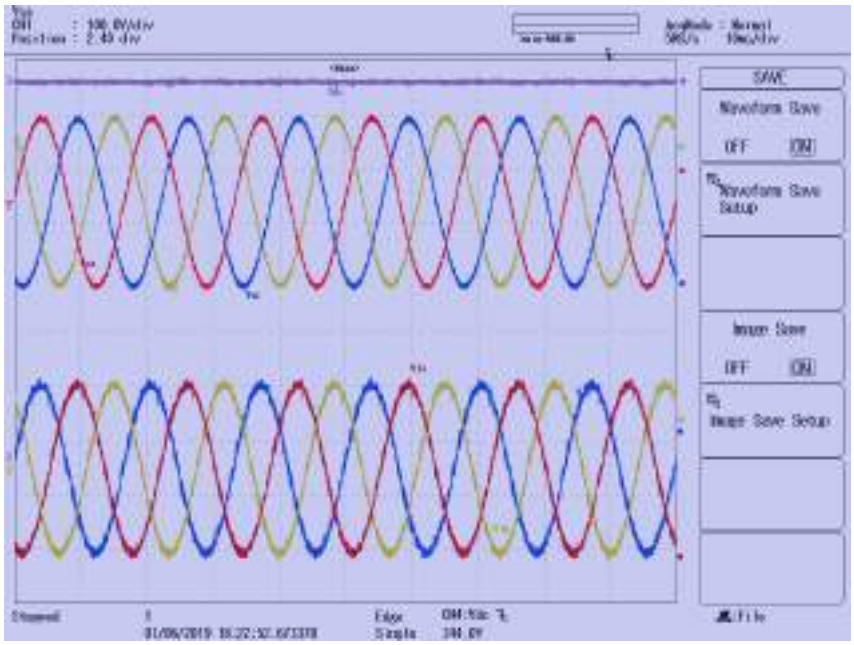
Fonte: o autor (2019).

de 84,7Ω na fase "A", 96,8Ω na fase "B"e 108,7Ω na fase "C". A corrente de neutro da rede foi praticamente eliminada, enquanto que a corrente de neutro da carga possui amplitude de 8,3A, com alto conteúdo harmônico, como mostrado na Figura 106, mostrando a eficácia do conversor nesta situação, onde os resultados são resumidos na Tabela 23.

Na Figura 107, são mostradas as correntes injetadas pelo filtro híbrido para compensar as componentes harmônicas da carga.

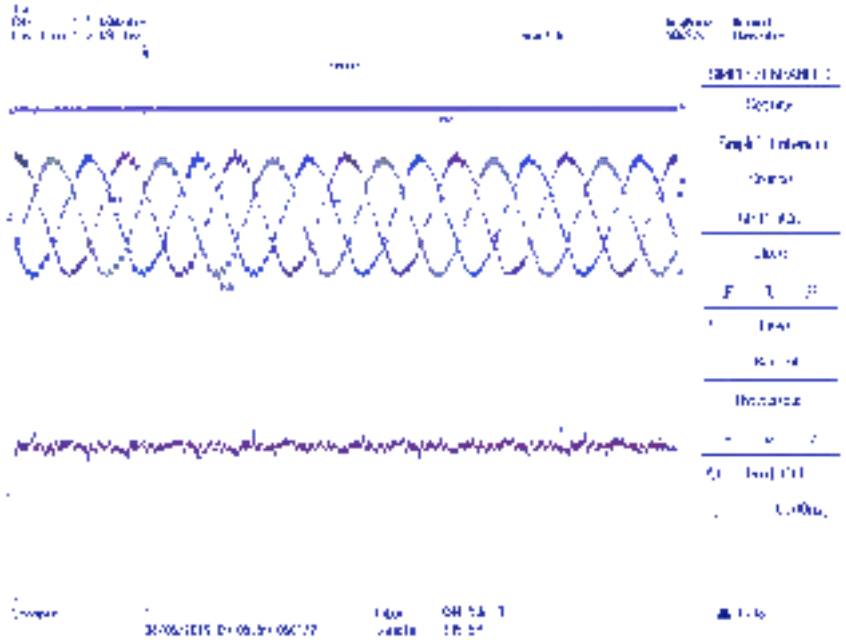
O UPQC 12 chaves foi ensaiado em situações de afundamentos de tensão monofásicos, para demonstrar sua atuação neste tipo de perturbação. O primeiro afundamento ensaiado foi 30% na fase "A"da rede. A Figura 108 mostra que o UPQC mitigou o afundamento de tensão,

Figura 104 – Tensões na rede e na carga e no barramento CC - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

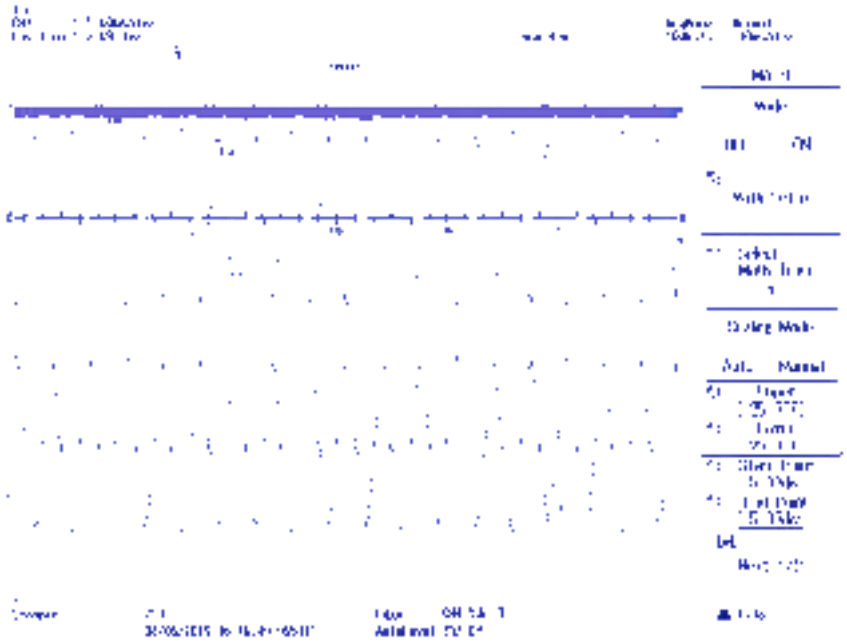
Figura 105 – Correntes da rede em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

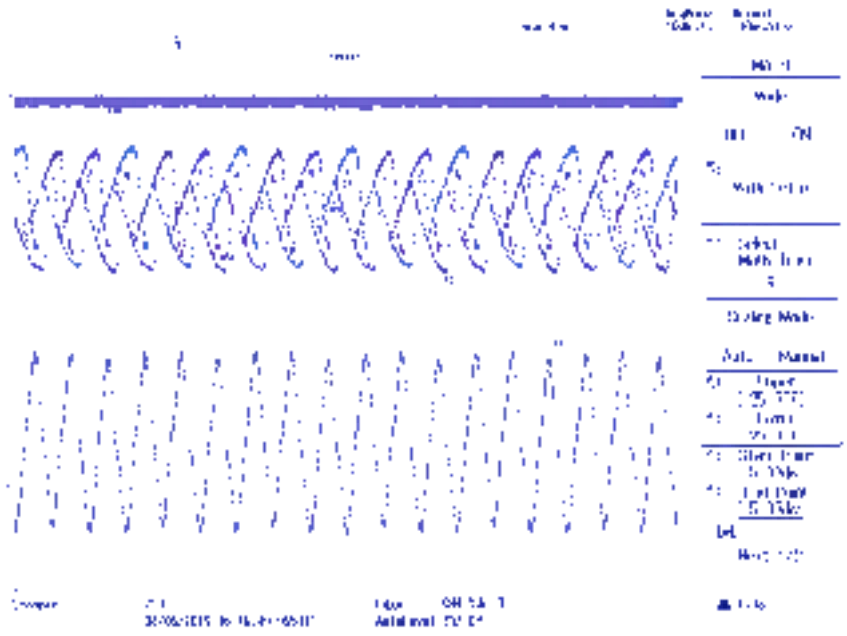
mantendo as tensões nos terminais da carga praticamente inalteradas, a tensão na fase a da carga ficou em 106,6V, enquanto que a tensão no barramento CC foi mantida. Conforme a curva de suportabilidade ITIC, mostrada no Capítulo 1, a tensão nos terminais da carga não causará danos ao equipamento, podendo ser suportada por tempo indefinido.

Figura 106 – Correntes da carga desequilibradas - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 107 – Correntes do filtro em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

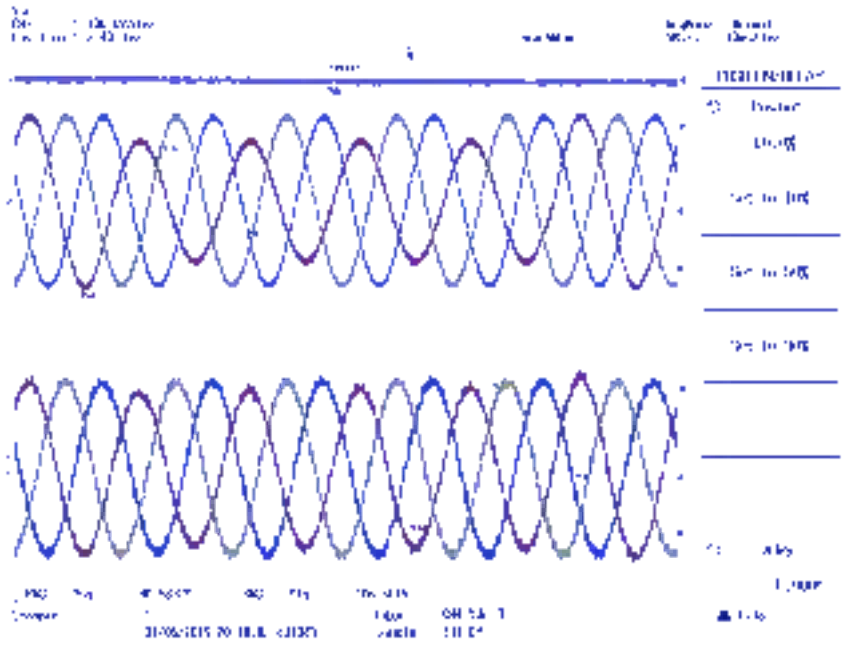
As correntes na fonte são mostradas na Figura 109, nota-se um aumento nelas, pois o controle do barramento CC está atuando para manter a tensão no valor de referência de 350V, os resultados são resumidos na Tabela 24.

Como nas simulações, o UPQC doze chaves também foi ensaiado na condição de um

Tabela 23 – Resultados experimentais correntes das fases em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC doze chaves.

	Parâmetro	Unidade	Valor
Carga	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,90	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,07	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	2,70	A
	Corrente de pico de neutro	8,30	A
	THD na fase A	96,0	%
	THD na fase B	98,5	%
	THD na fase C	101,0	%
Rede	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,89	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,60	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,67	A
	Corrente de pico de neutro	1.0	A
	THD na fase A	4,28	%
	THD na fase B	5,03	%
	THD na fase C	5,12	%

Figura 108 – Tensões na rede e na carga na ocorrência de um afundamento de tensão monofásico de 30% por 4 ciclos - UPQC doze chaves.

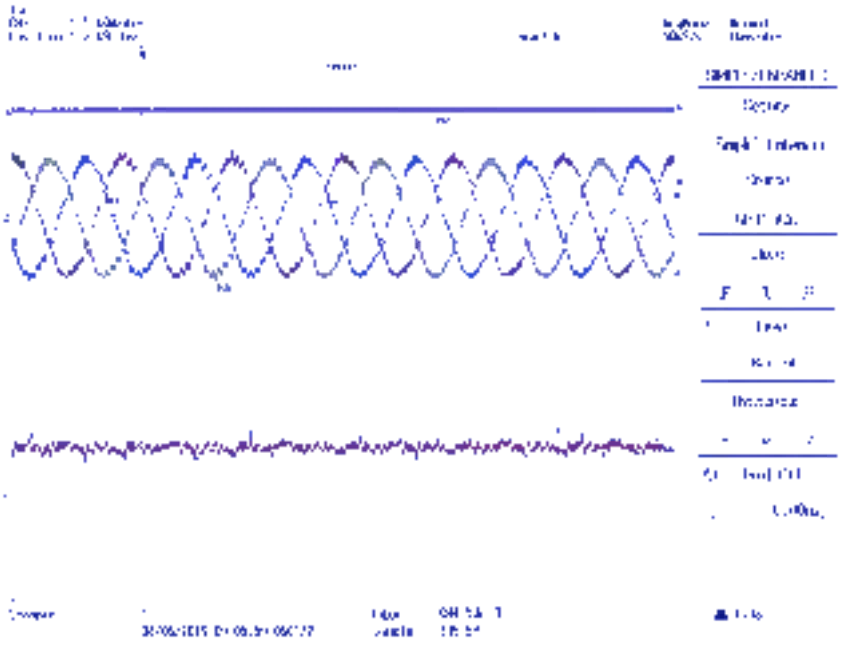


Fonte: o autor (2019).

afundamento de tensão monofásico de 50% na fase "A", cujos resultados são apresentados na Tabela 25. Conforme a curva de suportabilidade ITIC, mostrada no Capítulo 1, a tensão que está sendo aplicada nos terminais da carga durante o afundamento não causará danos ao equipamento, podendo ser suportada por tempo indefinido.

As correntes na fonte são mostradas na Figura 111, nota-se um pico de corrente na volta da tensão da fase "A"ao valor nominal, porém é de pequena duração, não afetando a carga. Como esse evento é de maior intensidade, a demanda do barramento CC se torna maior, porém o controle consegue manter a tensão constante.

Figura 109 – Correntes da rede na ocorrência de um afundamento de tensão monofásico de 30% 4 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

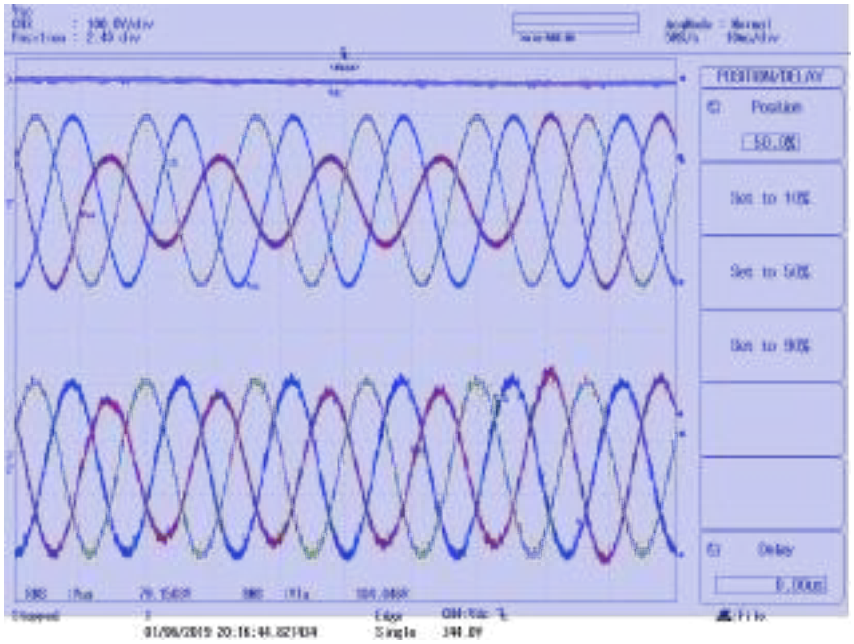
Tabela 24 – Resultados experimentais de um afundamento de tensão monofásico de 30% por 4 ciclos - UPQC doze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	348	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	106,6	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

Tabela 25 – Resultados experimentais de um afundamento de tensão monofásico de 50% por 4 ciclos - UPQC doze chaves.

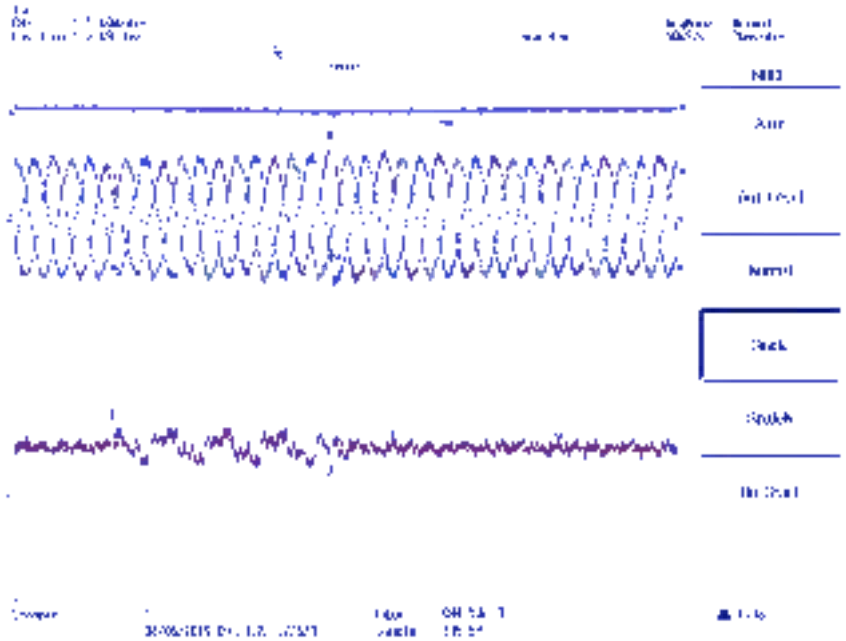
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	55,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	344,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	104,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

Figura 110 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão monofásico de 50% por 4 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 111 – Correntes da rede em um afundamento de tensão monofásico de 50% por 4 ciclos - UPQC doze chaves.

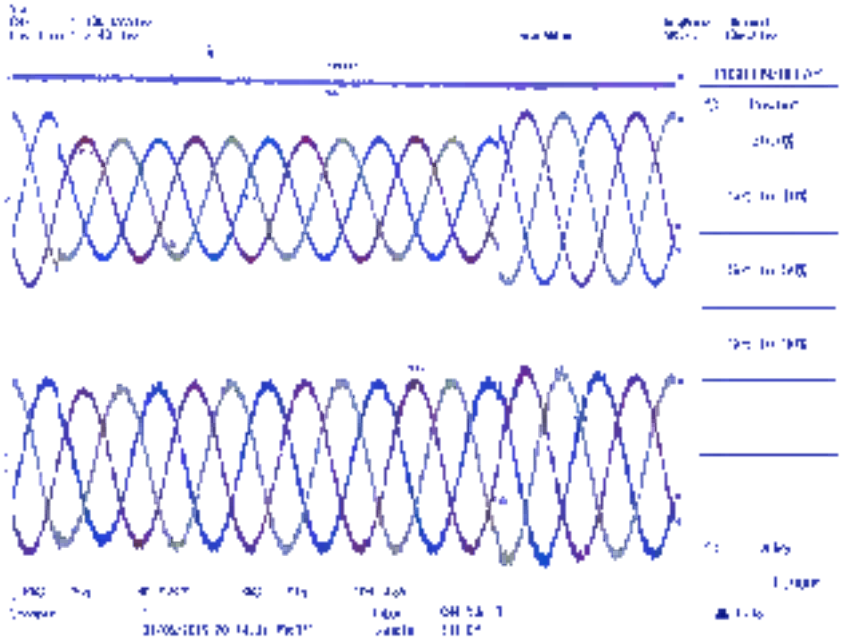


Fonte: o autor (2019).

O UPQC doze chaves também foi ensaiado em um afundamento de tensão trifásico de 30% e o comportamento das tensões é retratado na Figura 112. A tensão no barramento CC chega a 341V durante essa pertubação, visto a grande intensidade da perturbação, a potência que

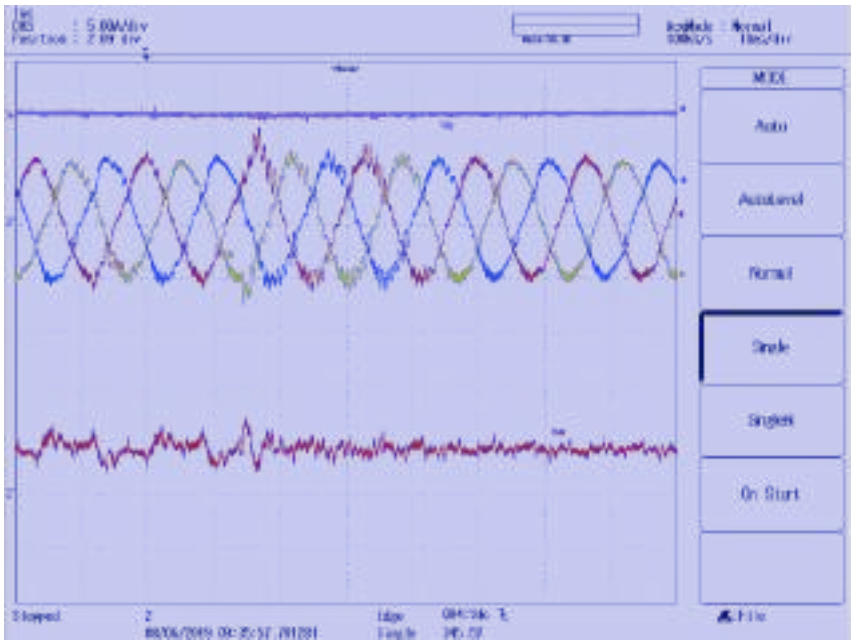
o conversor necessita para manter as tensões nos terminais da carga estáveis também é maior. A tensão nos terminais da carga é mantida em 109,5V, mostrando a efetiva atuação do conversor. As correntes da rede são mostradas na Figura 113. Os resultados são condensados na Tabela 26.

Figura 112 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico de 30% 4 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 113 – Correntes da rede em um afundamento de tensão trifásico de 30% 4 ciclos - UPQC doze chaves.



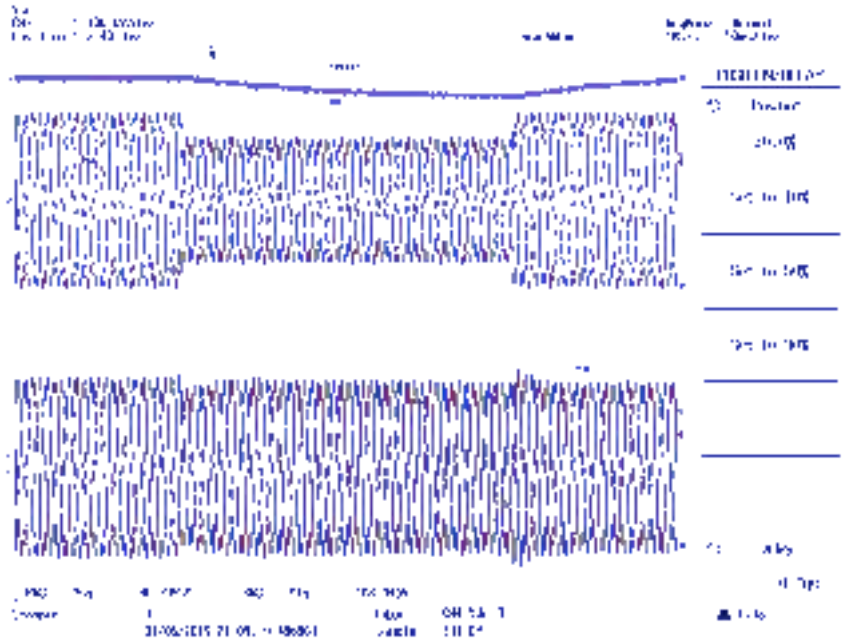
Fonte: o autor (2019).

Tabela 26 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico 30% 4 ciclos - UPQC doze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77,0	V
Tensão RMS fase B	77,0	V
Tensão RMS fase C	77,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	340,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	109,5	V
Tensão RMS fase B	109,5	V
Tensão RMS fase C	109,5	V

Uma condição de operação mais severa também foi ensaiada como visto na Tabela 27, neste caso um afundamento de tensão de 30% com duração de 15 ciclos. Nesta condição a tensão do barramento CC vai a 330V, dentro dos limites de operação do UPQC. As tensões na carga são mantidas constantes ao longo do evento em 105V, como pode ser visto na Figura 114. As correntes da rede aumentam (Figura 115),pois o controle do barramento CC está atuando para manter a tensão no valor referencial, 350V.

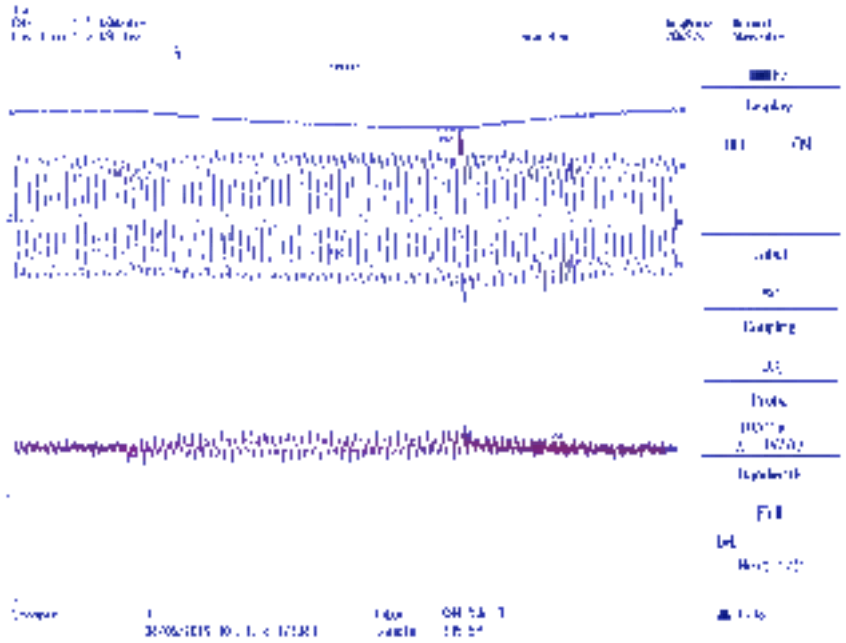
Figura 114 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Os dois próximos eventos se referem a elevações de tensão de 30%, sendo o primeiro monofásico e segundo trifásico. Os Resultados para a elevação de tensão monofásica de 30% são mostrados nas Figuras 116 e 117 e na Tabela 28, já os resultados para uma elevação de tensão trifásica são mostrados na Figura 118 e Tabela 29. Estes resultados comprovam a atuação de converso também em situações de elevação de tensão da rede elétrica, mostrando sua atuação

Figura 115 – Correntes da rede em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 27 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77,0	V
Tensão RMS fase B	77,0	V
Tensão RMS fase C	77,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	330,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	105,0	V
Tensão RMS fase B	105,0	V
Tensão RMS fase C	105,0	V

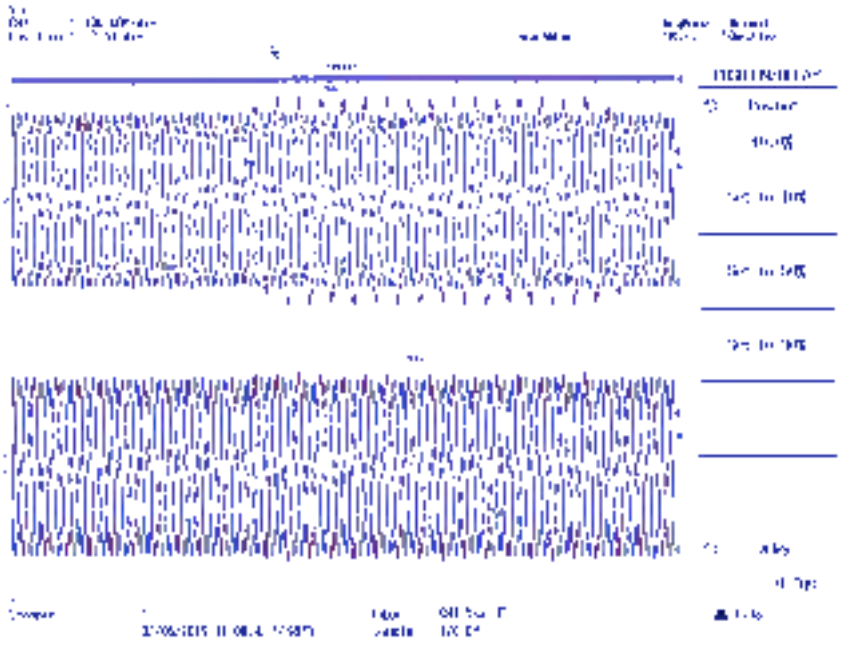
como um UPQC.

Tabela 28 – Resultados experimentais sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC doze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	110,0	V
Tensão RMS fase B	108,8	V
Tensão RMS fase C	108,7	V

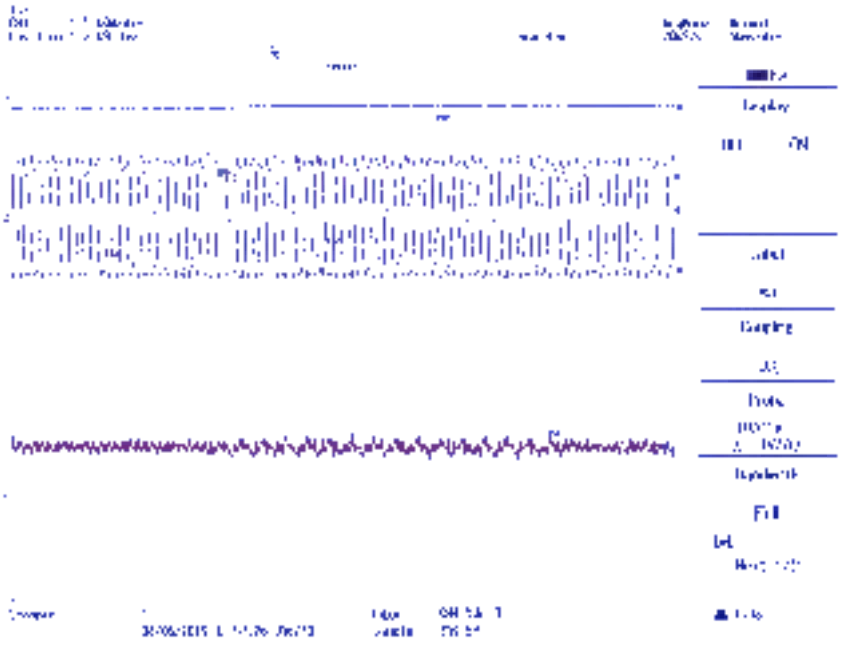
No UPQC doze chaves também foram ensaiadas outras pertubações de tensão, além das listadas acima, são elas: afundamento de tensão trifásico desequilibrado sendo de 10%, 20% e

Figura 116 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão monofásica de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 117 – Correntes da rede em em uma elevação de tensão monofásica de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves.



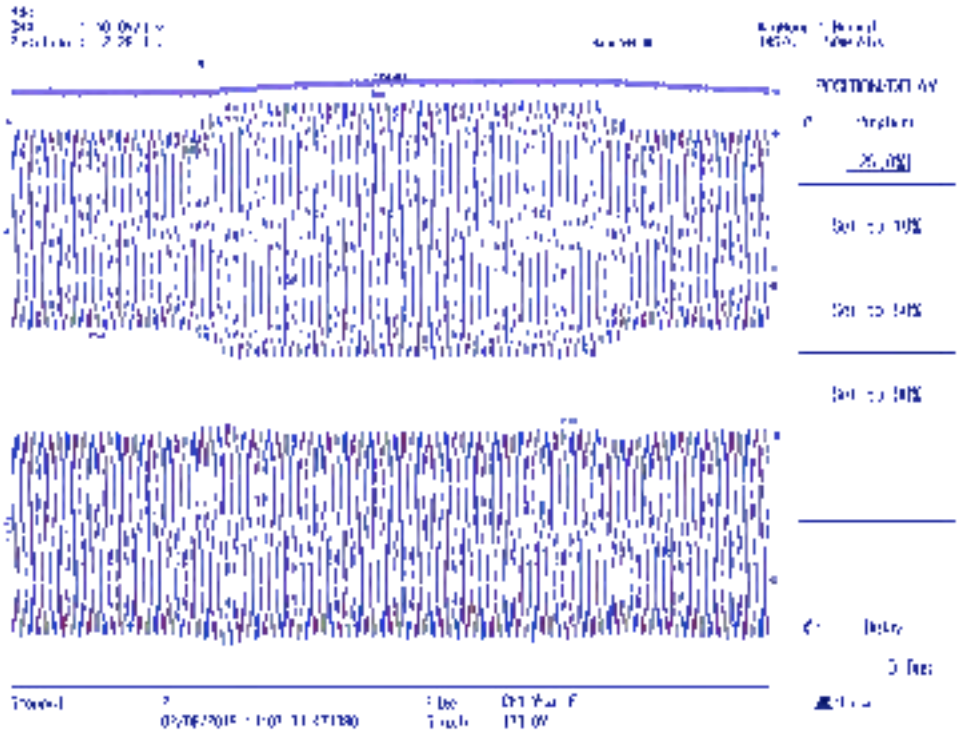
Fonte: o autor (2019).

30% nas fases "A", "B"e "C"da rede durante quatro ciclos, resultados mostrados na Figura 119 e resumidos na Tabela 30; elevação de tensão bifásica nas fases "A"e "B"de 20% durante quatro ciclos, resultados mostrados na Figura 120 e na Tabela 31; elevação de tensão monofásica de

Tabela 29 – Resultados experimentais sobretensão trifásica de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143,0	V
Tensão RMS fase B	143,0	V
Tensão RMS fase C	143,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	353	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	110,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

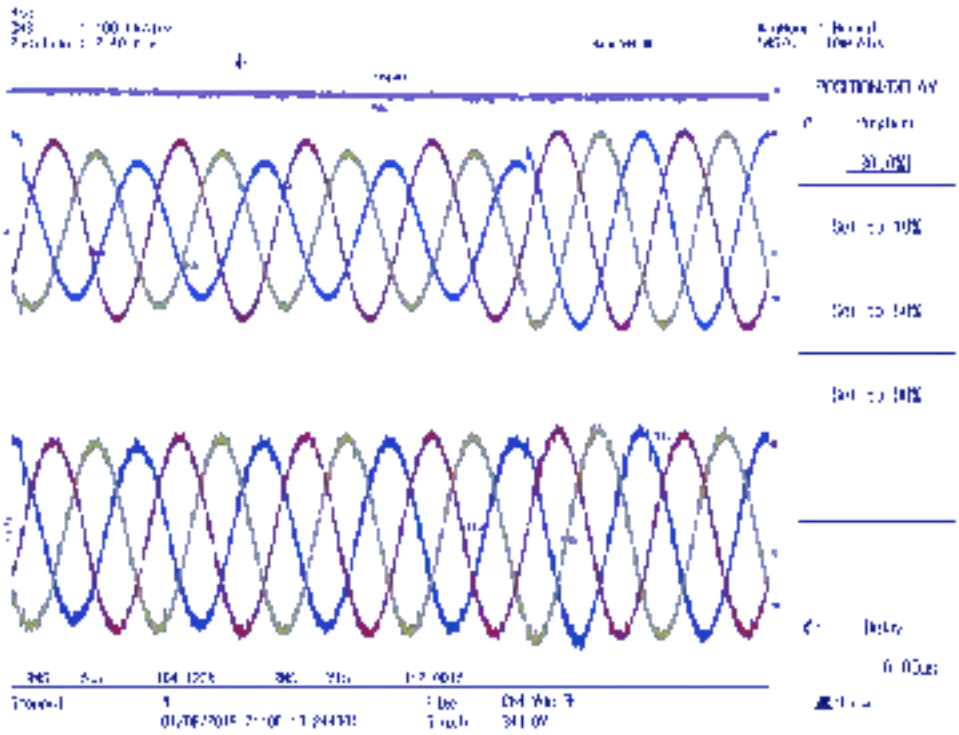
Figura 118 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão trifásica de 30% 15 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

30% na fase "A"da rede, resultados mostrados na Figura 121 e na Tabela 32; afundamento de tensão bifásico na fases "A"e "B"de 20%, resultados mostrado na Figura 122 e na Tabela 33.

Figura 119 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico desequilibrado de 10%, 20%, 30% por 4 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

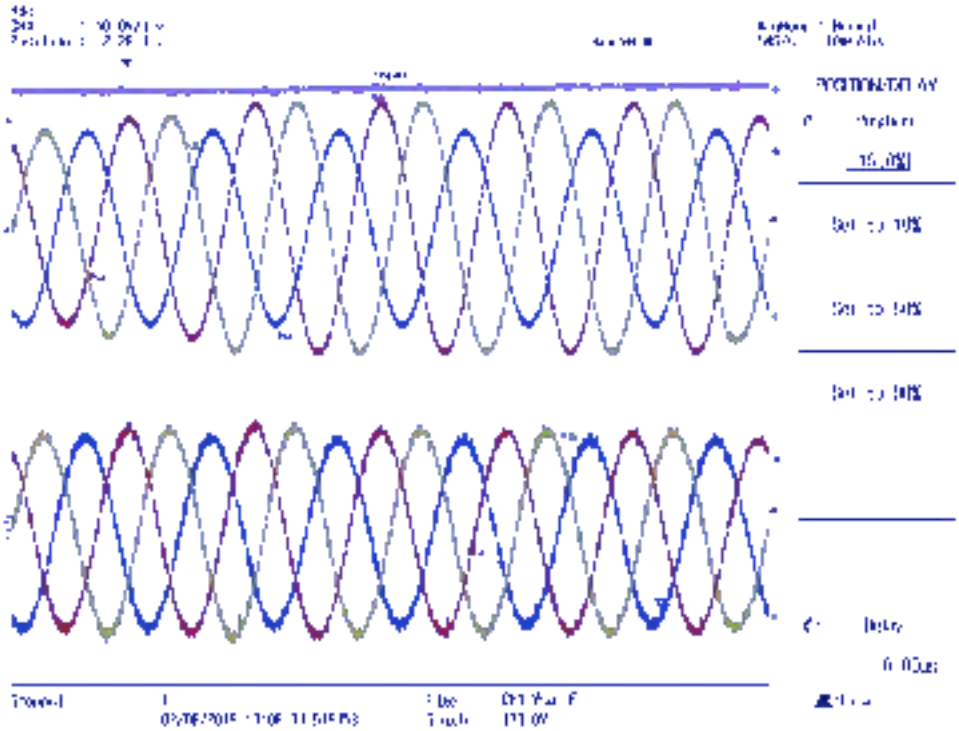
Tabela 30 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico desequilibrado de 10%, 20%, 30% por 4 ciclos - UPQC doze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	99,0	V
Tensão RMS fase B	88,0	V
Tensão RMS fase C	77,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	110,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	108,0	V

Tabela 31 – Resultados experimentais elevação de tensão bifásica de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC doze chaves.

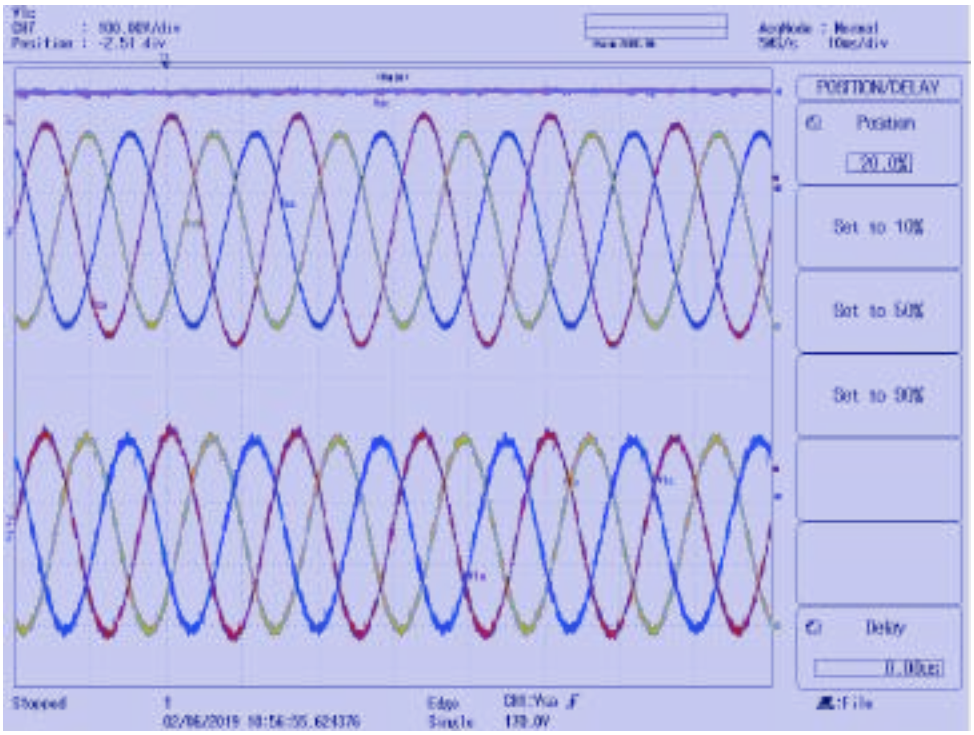
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	132,0	V
Tensão RMS fase B	132,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	353	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	111,1	V
Tensão RMS fase B	111,1	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

Figura 120 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão bifásica de 20% nas fases "A"e "B"4 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 121 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão monofásica de 30% na fase "A"por 4 ciclos - UPQC doze chaves.

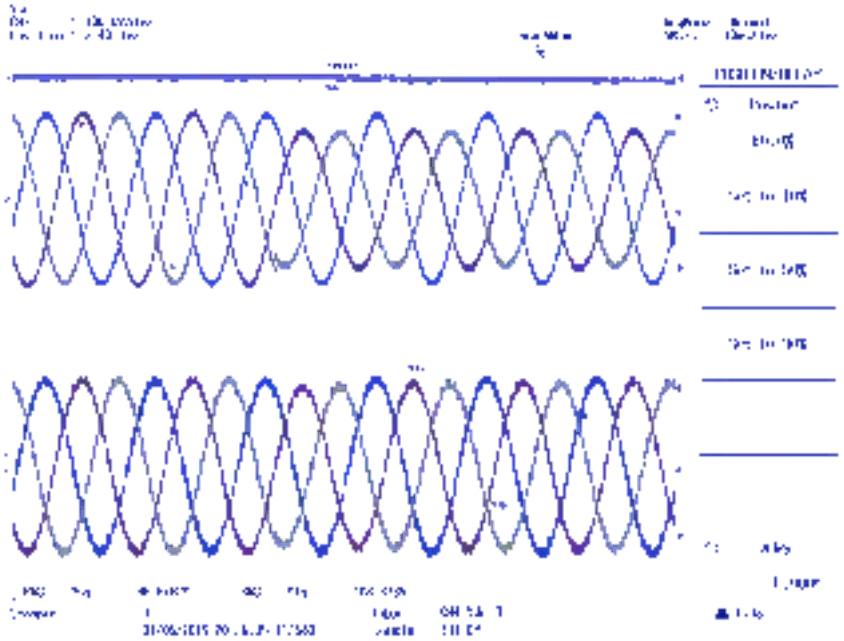


Fonte: o autor (2019).

Tabela 32 – Resultados experimentais elevação de tensão monofásica de 30% na fase "A"por 4 ciclos - UPQC doze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	111,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

Figura 122 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão bifásico de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC doze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 33 – Resultados experimentais afundamento de tensão bifásico de 20% nas fases "A"e "B- UPQC doze chaves

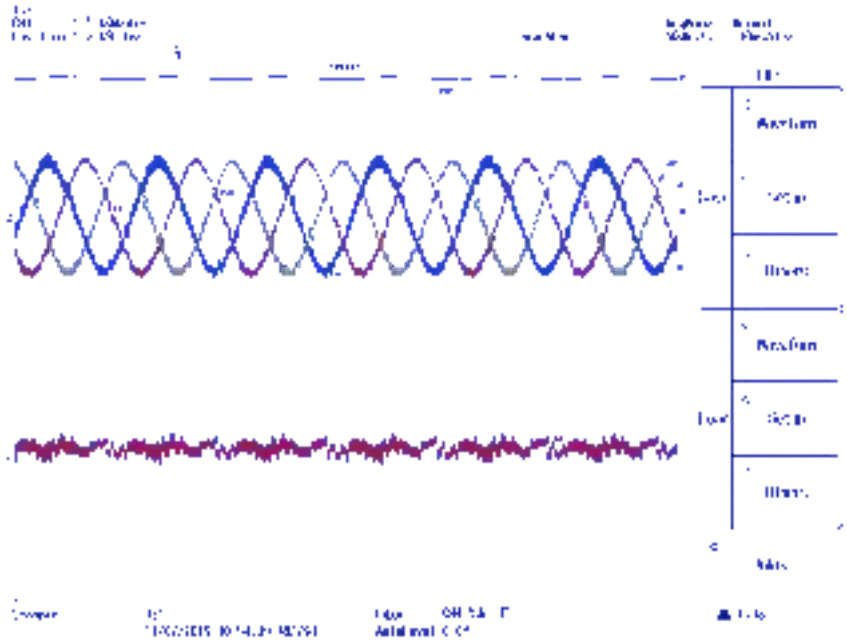
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	88,0	V
Tensão RMS fase B	88,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	109,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

4.3 Resultados Experimentais do UPQC Onze Chaves

Para realização dos ensaios como UPQC onze chaves foi utilizado o mesmo protótipo que foi usado nos ensaios do conversor doze chaves, porém com a Chave IGBT do braço "C"da unidade *top* do conversor desabilitada. As medições foram realizada da mesma forma que na topologia anterior, para permitir realizar comparações. Os parâmetros de utilizados no experimento são os mesmos da Tabela 21, a exceção dos ganhos do controlador do barramento CC que foram ajustados para $K_p = 0,04$ e $K_i = 0,20$.

A Figura 123 mostra o comportamento das correntes da rede em regime permanente com o filtro híbrido do UPQC onze chaves em operação com carga equilibrada e sem oscilação na tensão da rede, percebe-se que a corrente de neutro é praticamente eliminada, como mostrado nas simulações do Capítulo 3. A distorção harmônica total (THD) das correntes da carga é de 96,8%, enquanto que a distorção obtida nas correntes da rede é de 5,27% na fase "A", na fase "B"5,47% e na fase "C"de 5,73%.

Figura 123 – Correntes na rede em regime permanente com carga equilibrada UPQC onze chaves.



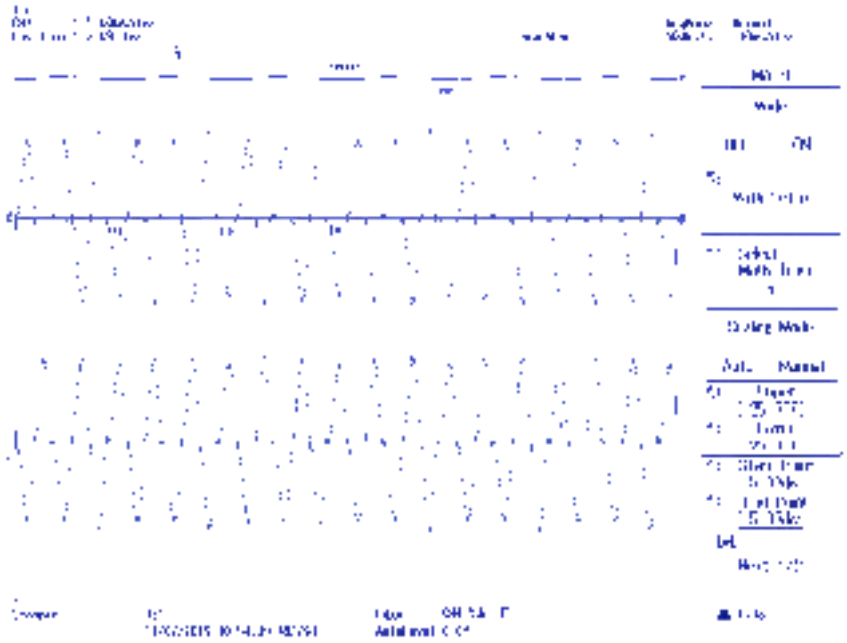
Fonte: o autor (2019).

A Figura 124 mostra o formato da corrente da carga que foi a mesma utilizada no experimento do UPQC doze chaves.

A Figura 125 mostra as correntes injetadas pelo filtro híbrido no sistema de modo a compensar as correntes harmônicas solicitadas pela carga, e manter a tensão do barramento CC no valor de referência.

As tensões na rede e na carga são mostradas na Figura 126, ela são bastante similares pois não há evento de tensão na rede.

Figura 124 – Correntes de carga equilibradas.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 34 – Resultados experimentais correntes das fases em regime com carga equilibrada - UPQC onze chaves.

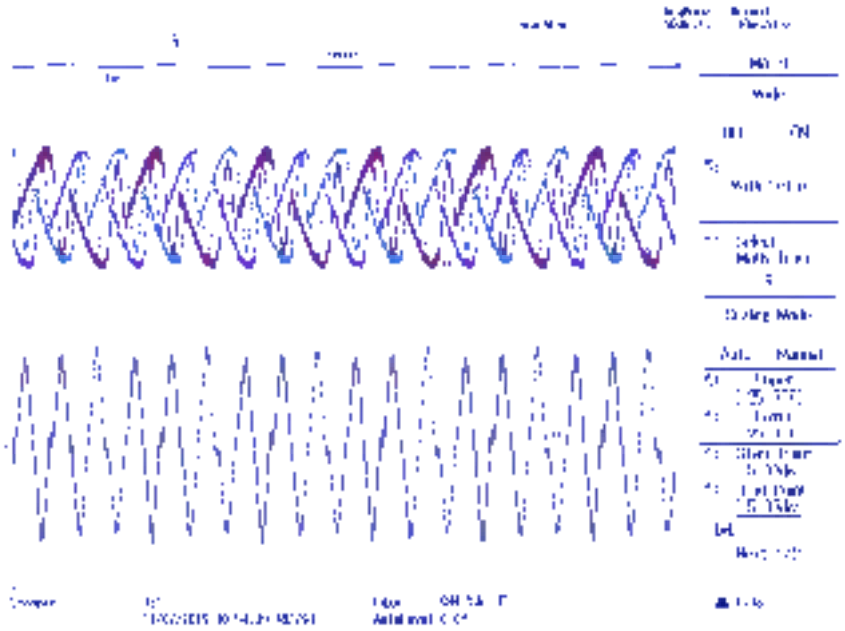
	Parâmetro	Unidade	Valor
Carga	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,18	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,08	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,04	A
	Corrente de pico de neutro	7,5	A
	THD na fase A	96,8	%
	THD na fase B	96,8	%
	THD na fase C	96,8	%
Rede	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,60	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,59	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,49	A
	Corrente de pico de neutro	0,7	A
	THD na fase A	5,27	%
	THD na fase B	5,47	%
	THD na fase C	5,73	%

A Figura 127 mostra o comportamento das correntes da fonte quando há uma carga desequilibrada conectada ao sistema, neste caso as resistências do lado CC do retificador foram variada de modo a produzir um desequilíbrio nas correntes, as resistências utilizadas foram de 84,7Ω na fase "A", 96,8Ω e 108,7Ω. A corrente de neutro foi praticamente eliminada, enquanto que a corrente de neutro da carga possui amplitude de 8,3A como mostra a Figura 106, mostrando a eficácia do conversor nesta situação.

Na Figura 129 são mostradas as correntes injetadas pelo filtro híbrido para compensar as componentes harmônicas da carga.

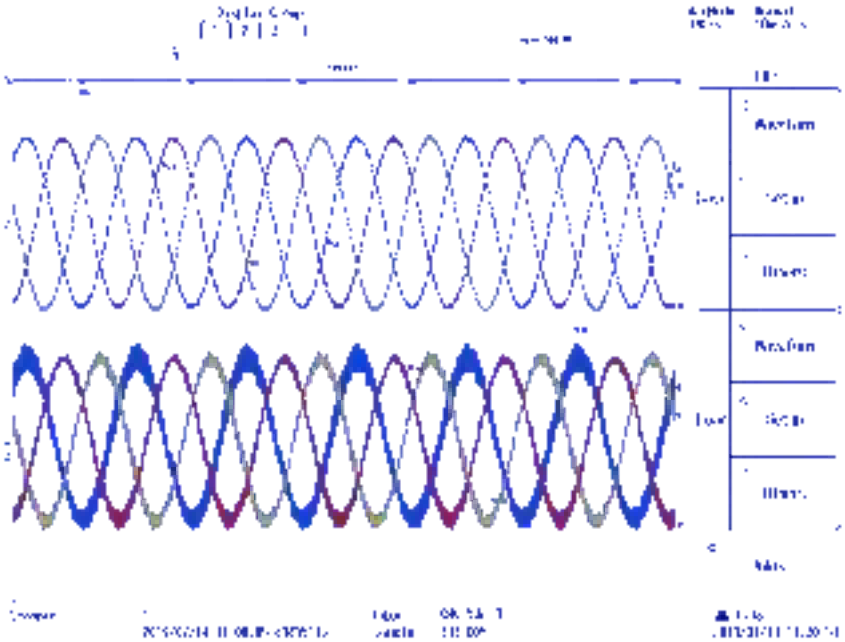
O UPQC onze chaves foi ensaiado na situação de afundamentos de tensão monofásicos,

Figura 125 – Correntes do filtro híbrido com carga equilibrada - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

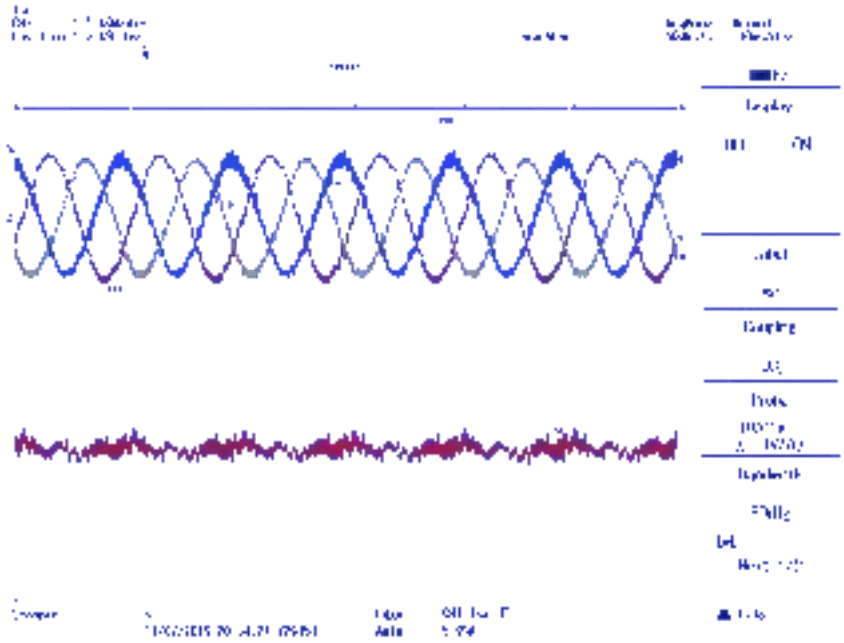
Figura 126 – Tensões na rede e na carga em regime permanente - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

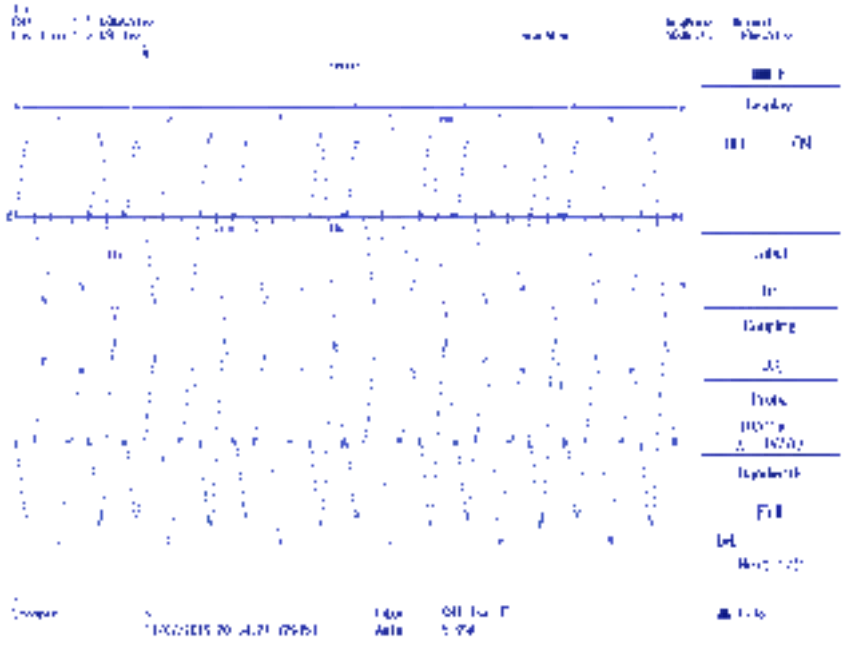
para comprovar sua atuação neste tipo de perturbação. O primeiro afundamento ensaiado foi 30% na fase "A"da rede. A Figura 130 mostra que o UPQC mitigou o afundamento de tensão, mantendo as tensões nos terminais da carga praticamente inalteradas, a tensão na fase "A"da carga foi mantida em 106,6V. A tensão no barramento CC foi mantida inalterada. Conforme a

Figura 127 – Correntes na rede em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 128 – Correntes na carga em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC onze chaves.

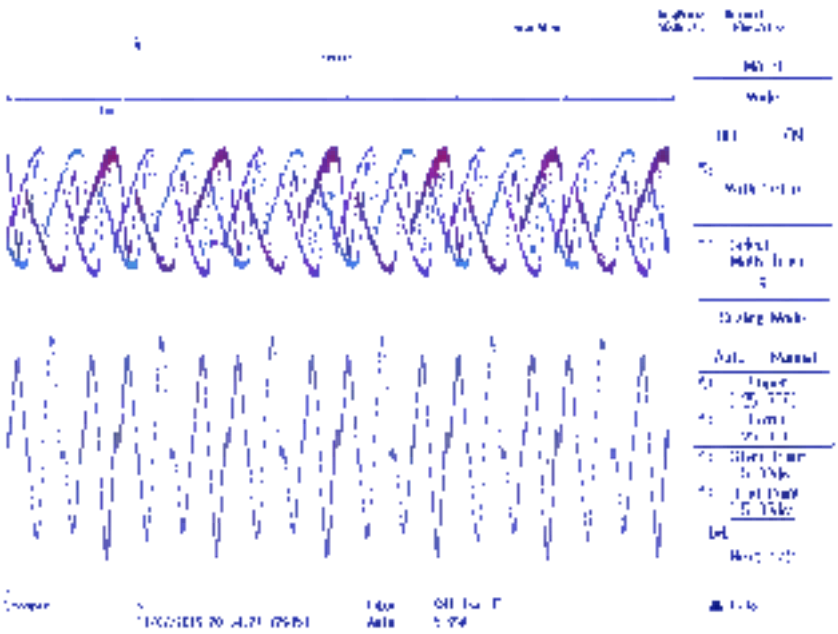


Fonte: o autor (2019).

curva de suportabilidade ITIC, mostrada no Capítulo 1, a tensão que está sendo aplicada nos terminais da carga durante o afundamento de tensão não causará danos ao equipamento, podendo ser suportada por tempo indefinido, mostrando a efetiva atuação do UPQC onze chaves

As correntes na fonte são mostradas na Figura 131, nota-se um aumento, pois o controle

Figura 129 – Correntes no filtro em regime permanente com carga desequilibrada - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 35 – Resultados experimentais com correntes das fases em regime com carga desequilibrada - UPQC onze chaves.

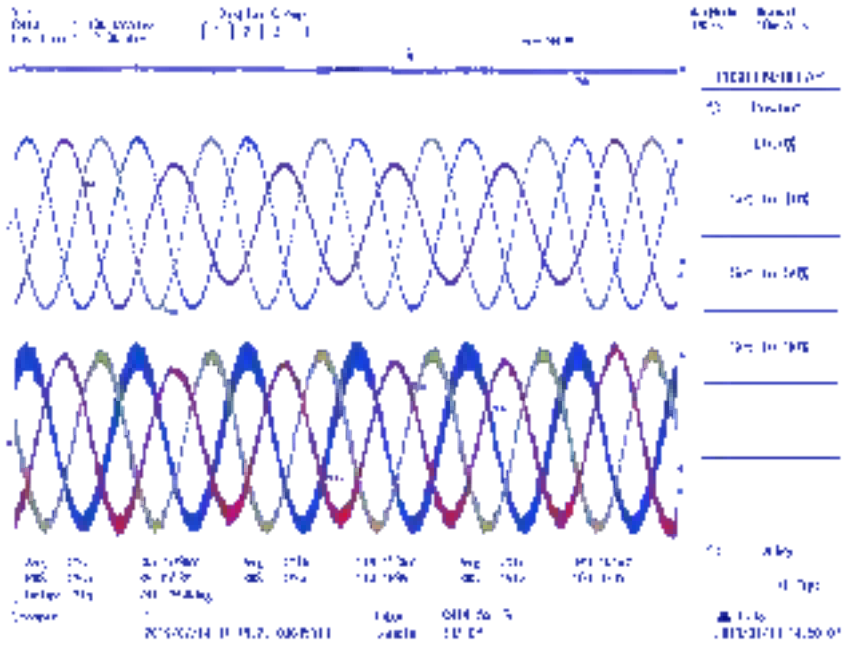
	Parâmetro	Unidade	Valor
Carga	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,18	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,08	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,04	A
	Corrente de pico de neutro	7,5	A
	THD na fase A	96,8	%
	THD na fase B	96,8	%
	THD na fase C	96,8	%
Rede	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase A	3,60	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase B	3,59	A
	Corrente eficaz na frequência fundamental na fase C	3,49	A
	Corrente de pico de neutro	0,7	A
	THD na fase A	4,09	%
	THD na fase B	5,81	%
	THD na fase C	7,56	%

do barramento CC está atuando para manter a tensão no valor de referência de 350V.

Como nas simulações, o UPQC onze chaves foi ensaiado na condição de um afundamento de tensão monofásico de 50% na fase "A". Conforme a curva de suportabilidade ITIC, a tensão que está sendo aplicada nos terminais da carga durante o afundamento de tensão não causará danos ao equipamento, podendo ser suportada por tempo indefinido, mostrando a efetiva atuação do UPQC onze chaves

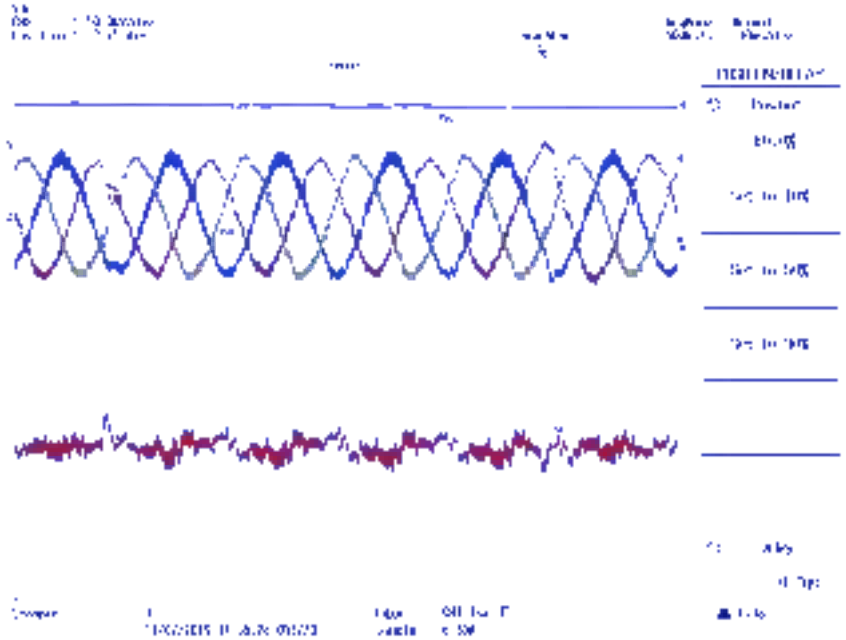
As correntes na fonte são mostradas na Figura 133, nota-se um pico de corrente na volta da tensão da fase "A"ao valor nominal, porém é de pequena duração, não afetando a carga.

Figura 130 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão monofásico de 30% - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 131 – Correntes da rede em um afundamento de tensão monofásico de 30% - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

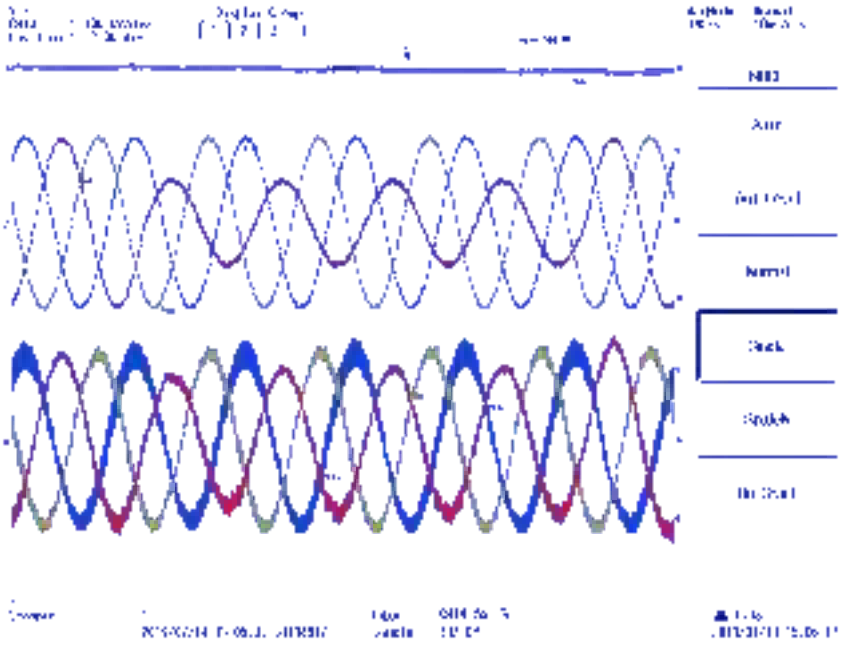
Como esse evento é de maior intensidade, a demanda do barramento CC se torna maior, porém o controle consegue manter a tensão constante.

O UPQC onze chaves também foi ensaiado em um afundamento de tensão trifásico de 30% e o comportamento das tensões é retratado na Figura 134. A tensão no barramento CC

Tabela 36 – Resultados experimentais - afundamento de tensão monofásico 30% - UPQC onze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	342,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	104,3	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	111,0	V

Figura 132 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão monofásico de 50% 4 ciclos - UPQC onze chaves.



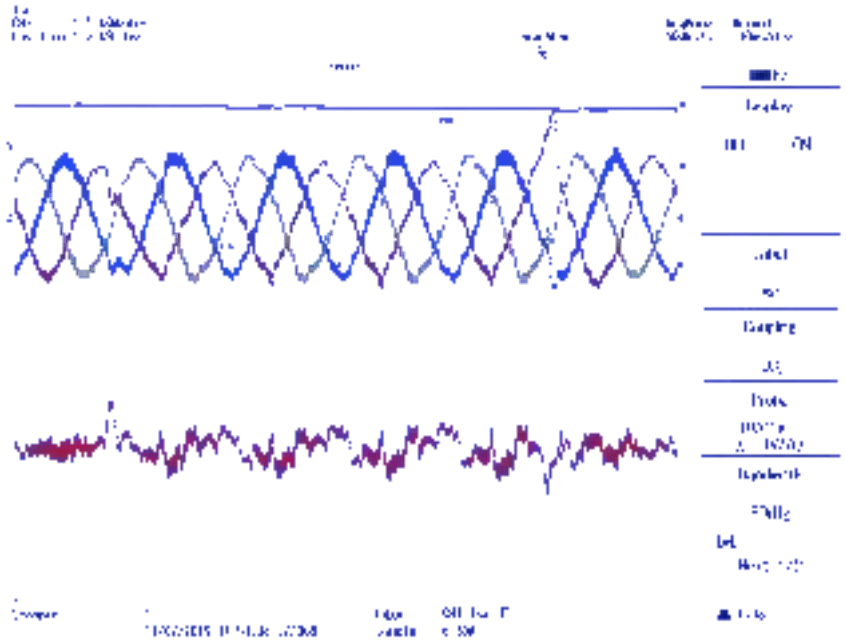
Fonte: o autor (2019).

Tabela 37 – Resultados experimentais - afundamento de tensão monofásico 50% 4 ciclos - UPQC onze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	55,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	340,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	101,1	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	111,0	V

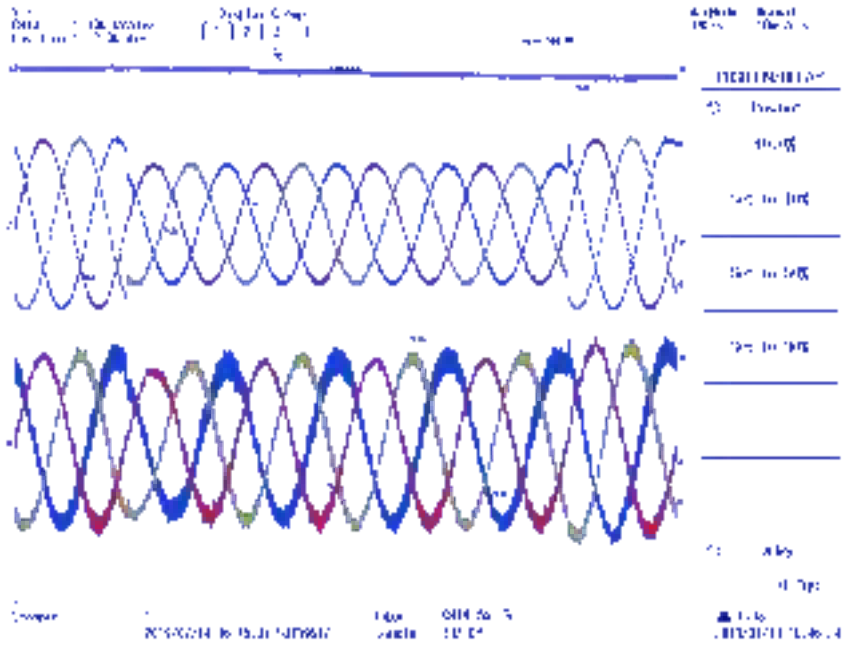
chega a 335V durante essa pertubação. A tensão nos terminais da carga é mantida em 106V, mostrando a efetiva atuação do conversor. As correntes da rede são mostradas na Figura 135.

Figura 133 – Correntes da rede em um afundamento de tensão monofásico de 50% 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

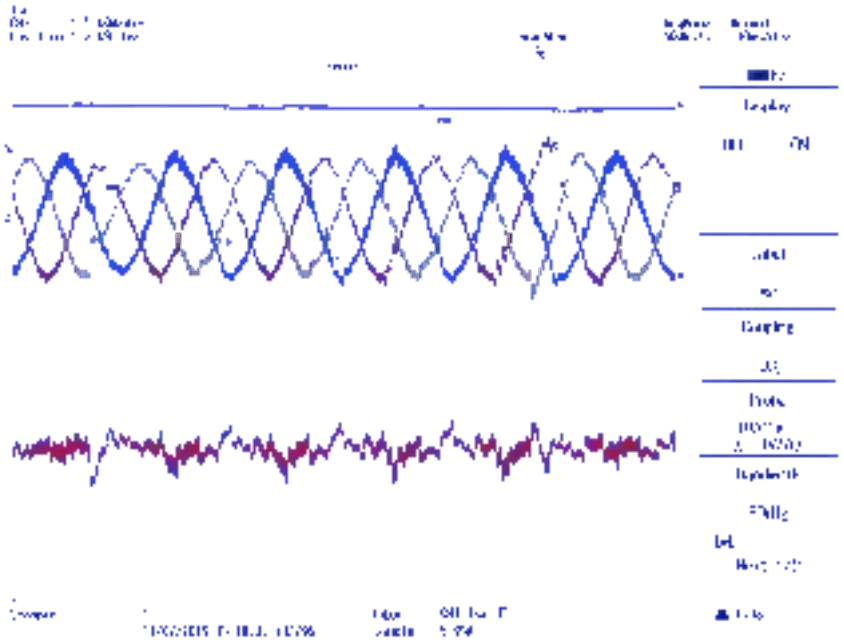
Figura 134 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Asim como foi feito com um UPQC doze chaves, uma condição de operação mais severa também foi ensaiada, neste caso um afundamento de tensão de 30% com duração de 15 ciclos. Nesta condição a tensão do barramento CC vai a 320V, dentro dos limites de operação da

Figura 135 – Correntes da rede em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 38 – Resultados experimentais - afundamento de tensão trifásico 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves.

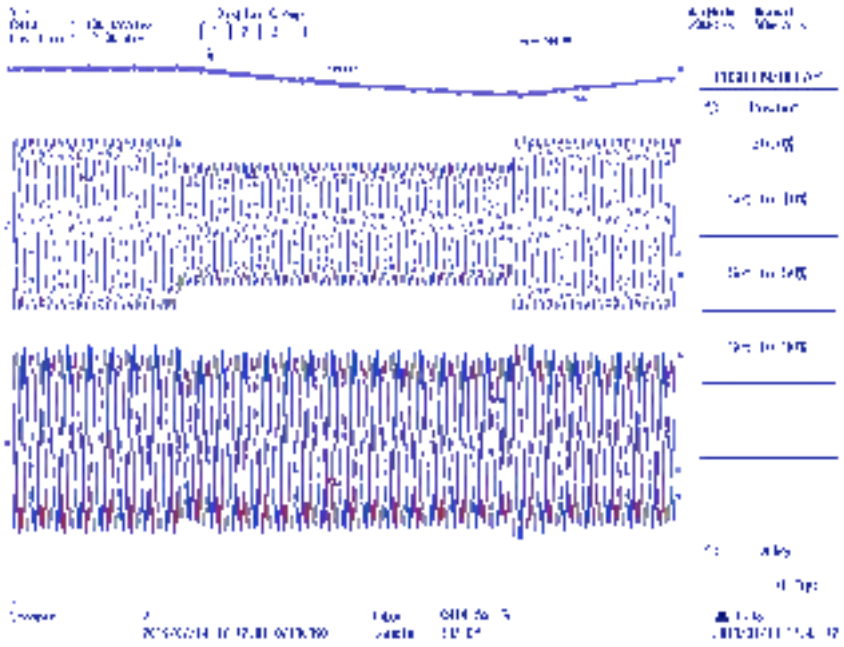
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77,0	V
Tensão RMS fase B	77,0	V
Tensão RMS fase C	77,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	335,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	106,0	V
Tensão RMS fase B	106,0	V
Tensão RMS fase C	106,0	V

topologia. As tensões na carga são mantidas constantes ao longo do evento, como pode ser visto na Figura 136. As correntes da rede aumentam (Figura 137),pois o controle do barramento CC está atuando para manter a tensão no valor referencial, 350V.

Tabela 39 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves.

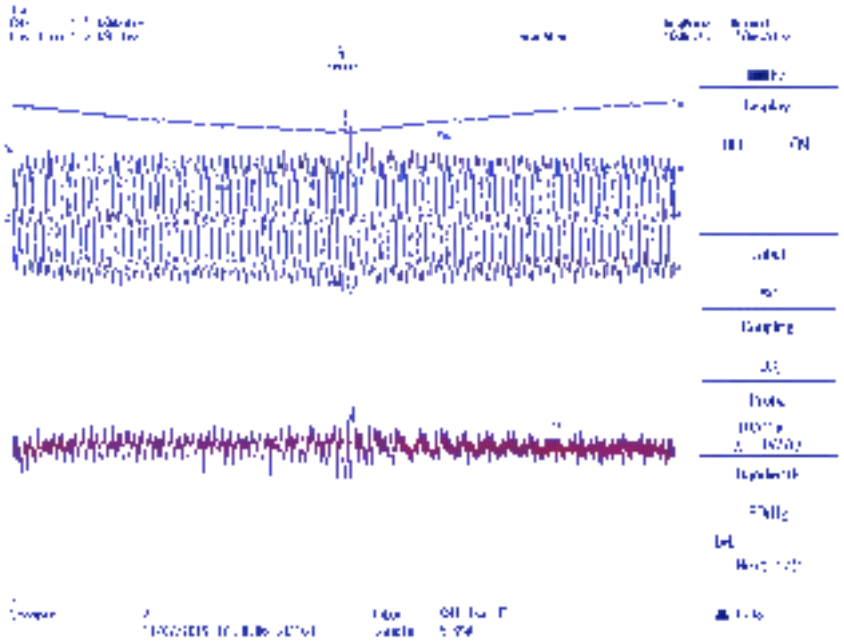
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	77,0	V
Tensão RMS fase B	77,0	V
Tensão RMS fase C	77,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	320,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	104,0	V
Tensão RMS fase B	104,0	V
Tensão RMS fase C	103,0	V

Figura 136 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 137 – Correntes da rede em um afundamento de tensão trifásico de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves.

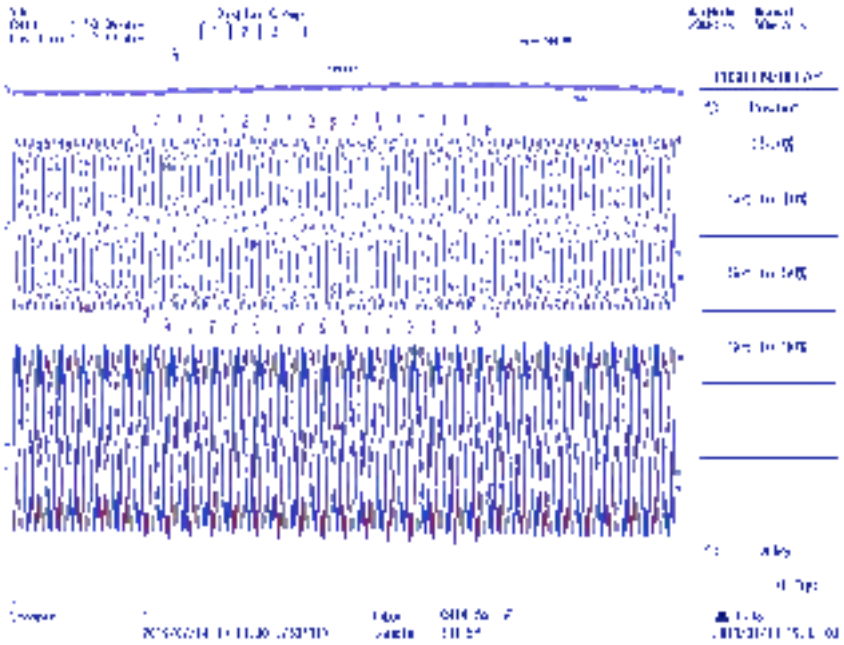


Fonte: o autor (2019).

Os dois próximos eventos se referem a elevações de tensão de 30%, sendo o primeiro monofásico e segundo trifásico. Os conversor onze chaves foi capaz de compensar adequadamente os eventos de sobre tensão tanto monofásico quanto trifásico como mostram as

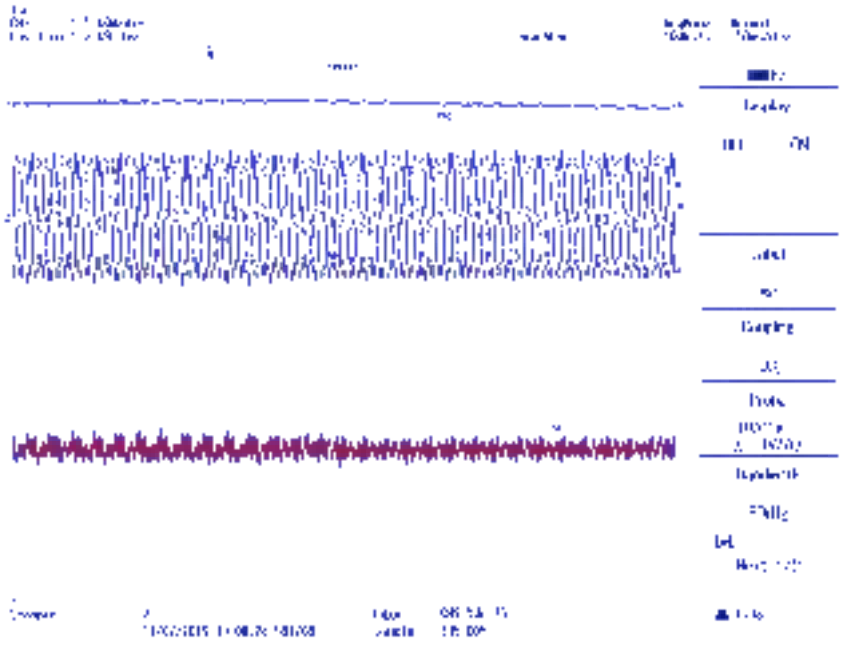
Figuras 138 a 141 e as Tabelas 40 e 41.

Figura 138 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão monofásica de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 139 – Correntes da rede em em uma elevação de tensão monofásica de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves.

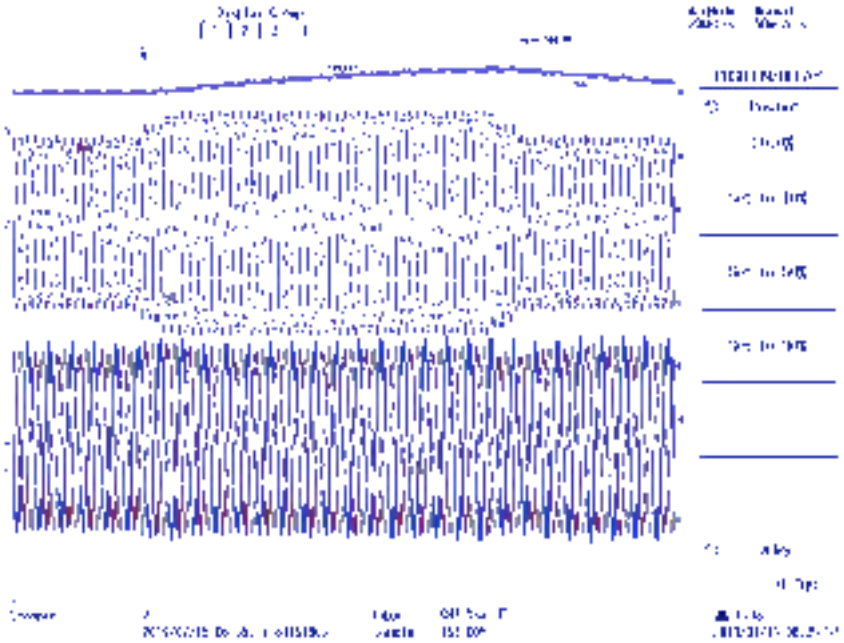


Fonte: o autor (2019).

Tabela 40 – Resultados experimentais sobretensão de 30% na fase "A"de 15 ciclos - UPQC onze chaves

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	352,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	110,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

Figura 140 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão trifásica de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves.



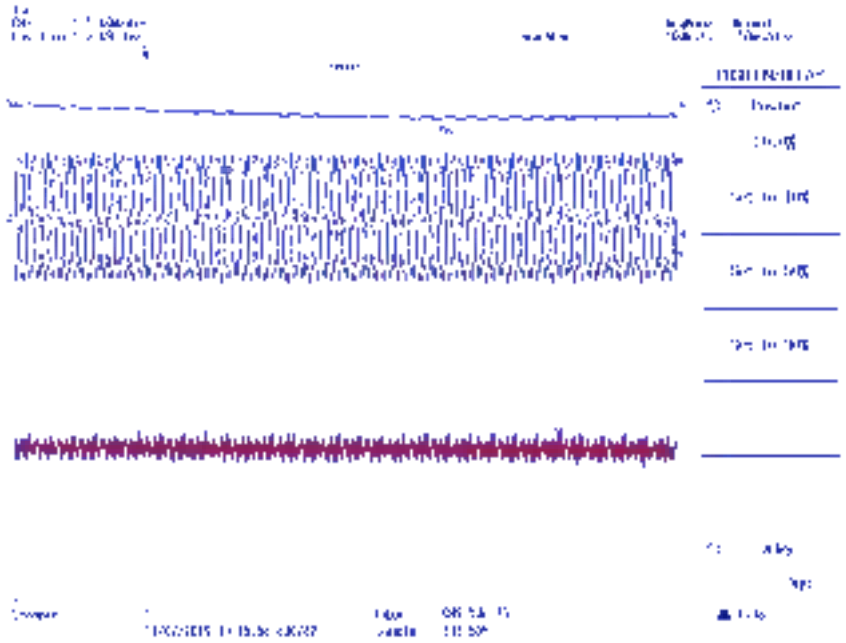
Fonte: o autor (2019).

Tabela 41 – Resultados experimentais sobretensão trifásica de 30% por 15 ciclos - UPQC doze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143,0	V
Tensão RMS fase B	143,0	V
Tensão RMS fase C	143,0	V
Valor mínimo no barramento CC durante o evento	363,0	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	113,0	V
Tensão RMS fase B	113,0	V
Tensão RMS fase C	113,1	V

O conversor onze chaves também foi ensaiado com as pertubações de tensão listadas a seguir: afundamento de tensão trifásico desequilibrado sendo de 10%, 20% e 30% nas fases "A",

Figura 141 – Correntes da rede em em uma elevação de tensão trifásica de 30% por 15 ciclos - UPQC onze chaves.



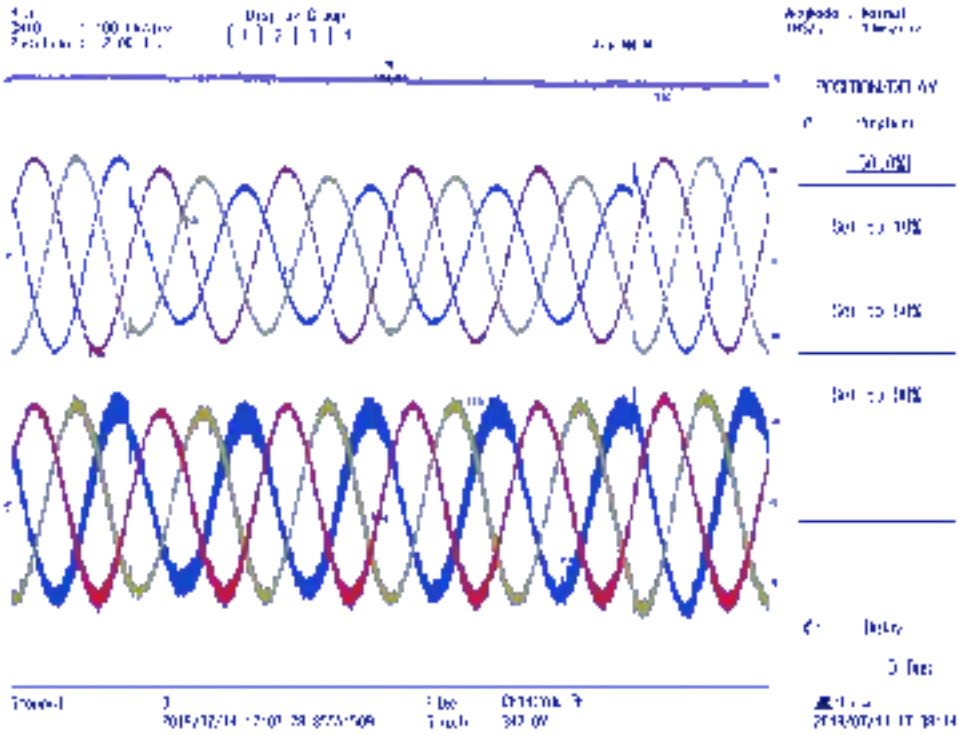
Fonte: o autor (2019).

"B"e "C"da rede durante quatro ciclos, resultados mostrados na Figura 142 e resumidos na Tabela 42; elevação de tensão bifásica nas fases "A"e "B"de 20% durante quatro ciclos, resultados mostrados na Figura 143 e na Tabela 43; elevação de tensão monofásica de 20% na fase "A"da rede, resultados mostrados na Figura 144 e na Tabela 44; afundamento de tensão bifásico na fases "A"e "B"de 20%, resultados mostrado na Figura 145 e na Tabela 45.

Tabela 42 – Resultados experimentais afundamento de tensão trifásico desequilibrado de 10%, 20%, 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	99,0	V
Tensão RMS fase B	88,0	V
Tensão RMS fase C	77,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	106,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	108,0	V

Figura 142 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão trifásico desequilibrado de 10%, 20%, 30% por 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

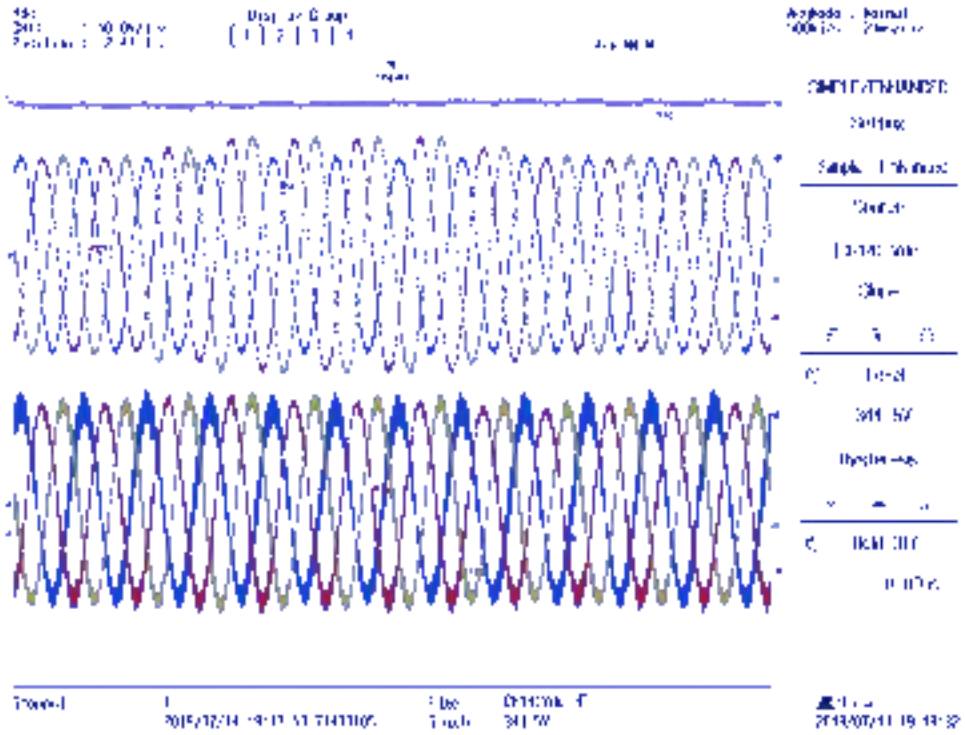
Tabela 43 – Resultados experimentais elevação de tensão bifásica de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC onze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	132,0	V
Tensão RMS fase B	132,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	351	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	110,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	106,0	V

Tabela 44 – Resultados experimentais elevação de tensão monofásica de 30% na fase "A"por 4 ciclos - UPQC onze chaves.

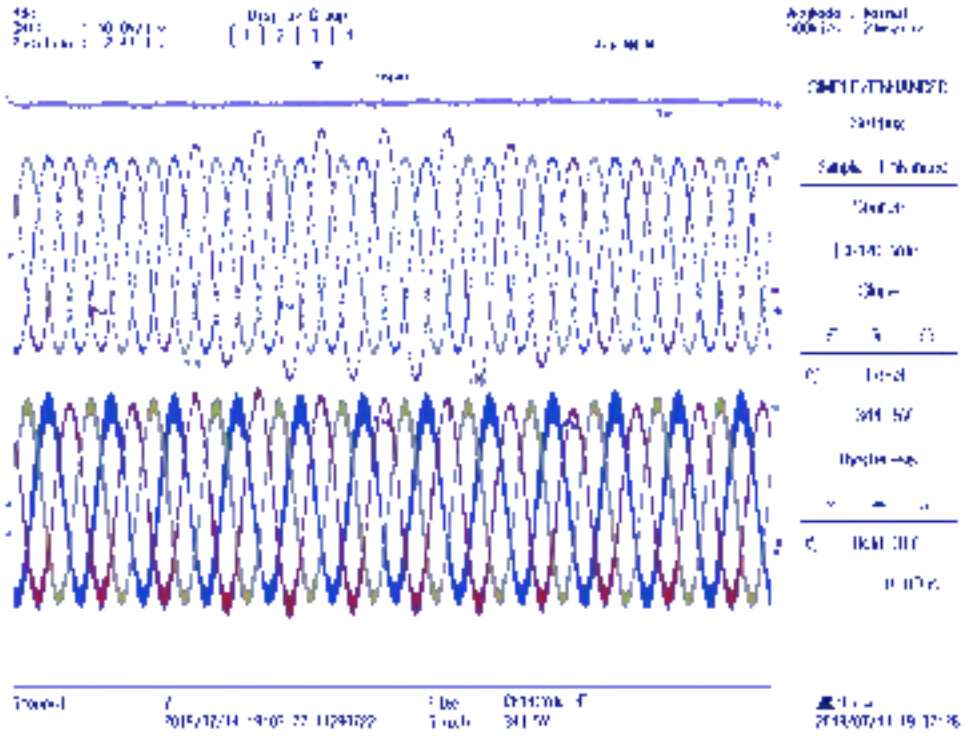
Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	143,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	113,0	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

Figura 143 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão bifásica de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC onze chaves.



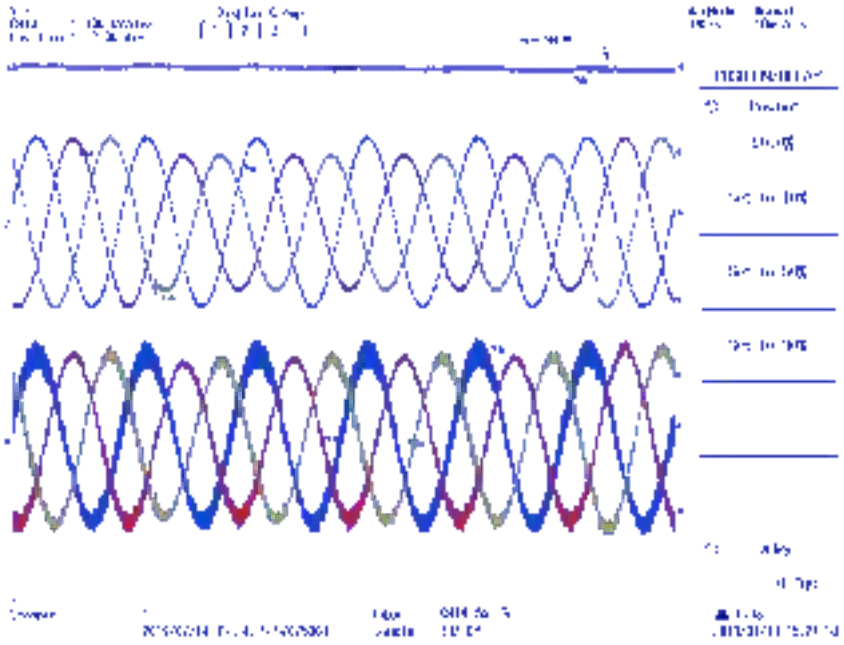
Fonte: o autor (2019).

Figura 144 – Tensões da rede e da carga em uma elevação de tensão monofásica de 30% na fase "A"por 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Figura 145 – Tensões da rede e da carga em um afundamento de tensão bifásico de 20% nas fases "A"e "B"por 4 ciclos - UPQC onze chaves.



Fonte: o autor (2019).

Tabela 45 – Resultados experimentais afundamento de tensão bifásico de 20% nas fases "A"e "B- UPQC onze chaves.

Parâmetro	Valor	Unidade
Valores medidos na fonte	-	-
Tensão RMS fase A	88,0	V
Tensão RMS fase B	88,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V
Valor da tensão no barramento CC durante o evento	350	V
Valores medidos na carga	-	-
Tensão RMS fase A	107,5	V
Tensão RMS fase B	110,0	V
Tensão RMS fase C	110,0	V

4.4 Conclusões

Nas seções anteriores foram apresentados os resultados experimentais das duas topologias de UPQC, ambas foram submetidas às mesmas condições de carga e rede, permitindo avaliar aspectos referentes aos desempenhos de cada uma delas.

A Tabela 46 mostra os resultados dos experimentos de forma condensada, pela Tabela pode ser notado que os desempenhos de compensação de harmônicas de corrente são muito próximos, entretanto, a topologia com onze chaves se saiu um pouco melhor.

Tabela 46 – Comparativo de desempenho entre as topologias - Correntes.

	Parâmetro	12SW	11SW	Und
Carga	I_{RMS} na fase A	3,18	3,18	A
	I_{RMS} na fase B	3,08	3,08	A
	I_{RMS} na fase C	3,04	3,04	A
	I_{pico} no neutro	7,50	7,50	A
	THD na fase A	96,8	96,8	$\%$
	THD na fase B	96,8	96,8	$\%$
	THD na fase C	96,8	96,8	$\%$
Rede	I_{RMS} na fase A	3,60	3,60	A
	I_{RMS} na fase B	3,59	3,078	A
	I_{RMS} na fase C	3,49	3,014	A
	I_{pico} no neutro	0,7	0,9	A
	THD na fase A	4,71	5,27	$\%$
	THD na fase B	4,61	5,47	$\%$
	THD na fase C	3,98	5,73	$\%$

Em relação à compensação de afundamentos de tensão, percebe-se que a topologia com doze chaves apresentou uma performance superior, pois a remoção de um das chaves da unidade *top*, no UPQC onze chaves, afeta diretamente a velocidade de recarga do barramento CC e dessa forma a capacidade de compensação de afundamentos de maior amplitude e/ou duração.

Tabela 47 – Comparativo de desempenho entre as topologias - Tensões.

	Parâmetro	12SW	11SW	Und
Afundamento de Tensão Monofásico 30%	Valores Medidos na Fonte	-	-	-
	Tensão RMS fase A	77,0	77,0	V
	Tensão RMS fase B	110,0	110,0	V
	Tensão RMS fase C	110,0	110,0	V
	V_{CCmin}	348	342,0	V
	Valores Medidos na Carga	-	-	-
	Tensão RMS fase A	106,6	104,3	V
	Tensão RMS fase B	110,0	110,0	V
	Tensão RMS fase C	110,0	110,0	V
Afundamento de Tensão Trifásico 30%	Valores Medidos na Fonte	-	-	-
	Tensão RMS fase A	77,0	77,0	V
	Tensão RMS fase B	77,0	77,0	V
	Tensão RMS fase C	77,0	77,0	V
	V_{CCmin}	340,0	335	V
	Valores Medidos na Carga	-	-	-
	Tensão RMS fase A	106,0	106,0	V
	Tensão RMS fase B	106,0	106,0	V
	Tensão RMS fase C	106,0	106,0	V
Sobretensão trifásica 30%	Valores Medidos na Fonte	-	-	-
	Tensão RMS fase A	143,0	143,0	V
	Tensão RMS fase B	143,0	143,0	V
	Tensão RMS fase C	143,0	143,0	V
	V_{CCmin}	353	351	V
	Valores Medidos na Carga	-	-	-
	Tensão RMS fase A	113,0	113,0	V
	Tensão RMS fase B	113,0	113,0	V
	Tensão RMS fase C	113,0	113,1	V

No que diz respeito às sobretensões os desempenhos foram semelhantes, pois o lado série do conversor injeta tensões de modo a mitigar a elevação de tensão nos terminais da carga.

Ao longo deste capítulo pode ser visto a adequada atuação das duas topologias nos eventos aos quais foram submetidas, também nota-se que os resultados de simulação do capítulo 3 se aproximam dos que foram obtidos em experimento.

Também foi explorada a implementação do experimento mostrando seus principais componentes, o protótipo foi construído de forma a ser flexível e atender às duas topologias, e ser aplicável a outros trabalhos que possam ser desenvolvidos com topologias variantes do conversor nove chaves.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve por objetivo o estudo, modelagem, simulação e implementação de duas topologias baseadas no conversor de nove chaves adaptadas a redes a quatro fios e cargas desbalanceadas. Sendo uma solução com doze chaves IGBT e outra com onze chaves IGBT.

Tendo em vista os objetivos traçados no capítulo 1 deste trabalho, e o que foi apresentado ao longo dos outros capítulos o objetivo de projetar as topologias foi atingido, tendo as duas topologias apresentado resultados satisfatórios.

Ambas as topologias foram baseadas no conversor nove chaves, porém adaptados a sistemas a quatro fios com cargas desbalanceadas. tanto em simulação quanto nos resultados experimentais, pode-se observar a alta capacidade de compensação de correntes harmônicas, das duas topologias, sendo o UPQC com doze chaves apresentou vantagem nesta comparação com a de onze chaves, pelo fato de possuir controle direto das três fases e do neutro do lado paralelo, uma vez que o a topologia com onze chaves não controla diretamente as correntes da fase C do lado paralelo.

No que diz respeito à compensação de afundamentos de tensão o UPQC com doze chaves apresentou pequena vantagem em relação ao com onze chaves, pois a remoção da chave da unidade *top* do braço C do conversor limita a taxa de reposição da energia do barramento CC.

Em ambas as topologias apresentadas, a utilização de um filtro de um filtro LC na saída permitiu a redução dos níveis de tensão do barramento CC, sendo utilizados 350V como tensão de referência.

As duas topologias propostas se mostram tecnicamente viáveis, o que embasa esta conclusão são resultados de simulação e principalmente os experimentais obtidos.

Os principais pontos que se pode destacar são: a redução da quantidade de chaves semicondutoras nos conversores, a utilização de uma topologia que integra tanto o lado paralelo e o série em um só conversor, a adaptação da topologia com nove chaves para uso em sistemas a quatro fios, a tensão reduzida do barramento CC e o desacoplamento entre o lado CC e o CA graças a utilização de um braço adicional nos conversores.

Constatou-se ao longo do trabalho que a eliminação de uma das chaves no caso do UPQC onze chaves é viável, apesar de trazer consigo algumas limitações como a taxa de recarga do barramento CC, porém a topologia é capaz de mitigar de forma satisfatória os eventos de afundamentos e elevações de tensão.

A utilização de um filtro LC no lado paralelo do conversor limita a taxa com que a energia do barramento CC é reposta, em relação a uma topologia sem esse incremento. Por outro lado, observou-se que os UPQCs foram capazes de trabalhar de forma adequada, visto que o

projeto dos componentes levou essa característica em consideração.

As topologias propostas encontram aplicabilidade na indústria de uma forma geral, em processos que dependem de uma boa qualidade da energia fornecida. As duas topologias são adequadas para compensação de afundamentos e elevações de tensão, assim como, compensação de correntes harmônicas demandadas pela carga.

5.1 Trabalhos Futuros

Em seguida, são enumeradas algumas sugestões de trabalhos futuros relacionadas com o tema desta tese:

1. Implementar técnicas de PWM vetorial aplicadas às topologias apresentadas de modo a aumentar suas performances;
2. Estudar e a aplicabilidade das topologias propostas como UPS;
3. Investigar a aplicação das topologias juntamente com sistemas fotovoltaicos;
4. Estudar e implementar o conversor doze chaves sem o filtro híbrido na saída paralela, apenas com o indutor;
5. Investigar novas técnicas de controle para os conversores.

REFERÊNCIAS

IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. In: . Orlando, FL, USA: [s.n.].

AKAGI, H. New trends in active filters for improving power quality. **IEEE Transactions On Industrial Electronics**, New Delhi, India, v. 32, p. 1312–1322, 1996.

AZEVEDO, G. M. S. et al. Microgrid power converter control with smooth transient response during the change of connection mode. **Revista Eletrônica de Potência**, Recife, v. 19, p. 285–294, 2014.

DEHNAVI, S. M. D. et al. Space vectors modulation for nine-switch converters. **IEEE Transactions On Power Electronics**, [S.L.], v. 2010, p. 1488–1496, 2010.

DUGAN, R. C. et al. In: ____. **Eletrical Power Systems Quality**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

FRANCO, E. **Qualidade de Energia - Causas, Efeitos e Soluções**. Campina Grande, PB, BR: [s.n.], 2016. Disponível em: <http://iecom.dee.ufcg.edu.br>. Acesso em: 26 nov. 2016.

FUJITA, H.; AKAGI, H. A practical approach to harmonic compensation in power systems—series connection of passive and active filters. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [S.L.], v. 27, p. 1020–1025, 1991.

FUJITA, H.; AKAGI, H. The unified power quality conditioner: The integration of series and shunt-active filters. **IEEE Transactions on Power Eletronics**, [S.L.], v. 13, p. 315–322, 1998.

GOMES, M. D. B. **Condicionador de Energia de Oito Chaves para Compensações de Harmônicos de Corrente e Variações de Tensão**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2014,.

IEEE Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality. **IEEE Std 1159-1995**, 1995.

JUNIOR, H. G. **Estudo de controladores aplicados a inversores para UPS com operação ilhada**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Pulista, Bauru, Brasil, 2013.

KAMRAN, F.; HABETLER, T. G. Combined deadbeat control of a series-parallel converter combination used as a universal power filter. **Proc. Power Electron. Spec. Conf.**, [S.L.], p. 196–201, 1995.

KHADKIKAR, V. Enhancing electric power quality using upqc: A comprehensive overview. **IEEE Transactions on Power Eletronics**, v. 27, p. 2284–2297, 2012.

KINHAL, V. G.; AGARWAL, P.; GUPTA, H. O. Performance investigation of neural-network-based unified power-quality conditioner. **IEEE Trans Power Del.**, [S.L.], p. 431–437, 2011.

KOMINAMI, T.; FUJIMOTO, Y. Inverter with reduced switching-device count for independent ac motor control. **33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)**, Taipei, Taiwan, p. 1559–1564, 2007.

LAM, C. S.; WONG, M. C. **Design and Control of Hybrid Active Power Filters**. 1. ed. Republic of China: Springer, 2014.

LANDAETA, L. M. et al. A mixed lqri pi based control for three-phase upqcs. **Proc. 32nd Annu. Conf. Ind. Electron. Soc.**, Paris, France, p. 2494–2499, 2006.

LAXMI, A. J. et al. Different control strategies for unified power quality conditioner at load side. **Proc. 1st IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.**, Singapore, p. 1–7, 2006.

LIMONGI, L. R. et al. Transformerless hybrid power filter based on a six-switch two-leg inverter for improved harmonic compensation performance. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, [S.L.], v. 62, p. 40–51, 2015.

LINDEKE, D. **Projeto de um Filtro Ativo Paralelo de 1kva Usando Técnicas de Controle Analógico e Digital**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, 2003.

LIU, C. et al. A novel three-phase three-leg ac/ac converter using nine igbts. **IEEE Transactions On Power Electronics**, [S.L.], v. 24, p. 1151–1160, 2009.

LIU, R.; XIA, N.; WANG, X. The research on fuzzy pid control in unified power quality conditioner. **Proc. 4th IEEE Int. Conf. Ind. Electron. Appl.**, Xian, China, p. 821–824, 2009.

MARQUES, G. D. A comparison of active power filter control methods in unbalanced and nonsinusoidal conditions. **Annual Conference of the IEEE**, Aachen, Germany, p. 444–449, 1998.

MERTENS, E. A. et al. Evaluation and trends of power quality indices in distribution system. **9th International Conference, Electrical Power Quality and Utilisation**, Barcelona, Spain, 2007.

MOGHADASI, A.; TORABI, S. M.; SALEHIFAR, M. Performance evaluation of unified power quality conditioner with smes. **Proc Power Quality Conf**, Tehran, Iran, p. 1–6, 2010.

MORAN, S. A line voltage regulator/conditioner for harmonic-sensitive load isolation. **Proc. Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. Conf.**, San Diego, CA, USA, p. 947–951, 1989.

MUTHU, S.; KIM, J. M. S. Steady-state operating characteristics of unified active power filters. **Proc. Power Electron. Spec. Conf.**, Atlanta, GA, USA, p. 199–205, 1997.

NASIRI, A.; EMADI, A. Different topologies for single-phase unified power quality conditioners. **Proc. 38th Int. Appl. Soc. Annu. Meet. Ind. Appl. Conf.**, Salt Lake City, UT, USA, p. 976–981, 2003.

OJO, O.; KSHIRSAGAR, P. M. Concise modulation strategies for four-leg voltage source inverters. **IEEE Transactions on Power Electronics**, Cairns, Qld., Australia, v. 19, p. 46–53, 2004.

PO-NGAM, S. The simplified control of three-phase four-leg shunt active power filter for harmonics mitigation, load balancing and reactive power compensation. **Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 11th International Conference on**, Nakhon Ratchasima, Thailand, 2014.

ROCHA, T. O. A. **Estrategia de Controle Robusto para Interconexão de Sistemas PV Trifásicos a Rede Elétrica**. Dissertação (Dissertação de Mestrado) — Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, 2014.

SINGH, B. N. et al. Fuzzy control algorithm for universal active filter. **Proc. Power Quality Conf.**, Hyderabad, India, p. 73–80, 1998.

SRIANTHUMRONG, S.; AKAGI, H. A medium-voltage transformerless ac/dc power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter. **IEEE Transactions on Industry Applications**, [S.L.], v. 39, p. 874–882, 2003.

VILATHGAMUWA, D. M.; WIJEKOON, H. M. Mitigating zero sequence effects in dynamic voltage restorers. **IEEE Power Electronics Specialists Conference**, Orlando, FL, USA, p. 3079–3085, 2007.

ZHANG, H. et al. Design of a new dc link voltage controller for universal power quality controllers. **Proc. Appl. Power Electron. Conf.**, Anaheim, CA, USA, p. 473–477, 2007.

ZHANG, L.; LOH, P. C.; GAO, F. An integrated nine-switch power conditioner for power quality enhancement and voltage sag mitigation. **IEEE Transactions on Power Electronics**, [S.L.], v. 27, p. 1177–1190, 2012.

ZHANG, R. **HIGH PERFORMANCE POWER CONVERTER SYSTEMS FOR NONLINEAR AND UNBALANCED LOAD/SOURCE**. Dissertação (Tese de Doutorado) — Virginia Polytechnic Institute and State University, Virginia, EUA, 1998.

ZHANG, Y.; ZHANG, S.; CHEN, J. The applications of bidirectional fullbridge dc–dc isolated converter in upqc. **Proc Int Conf Electr Mach Syst**, Wuhan, China, p. 1916–1921, 2008.

ZUQUAN, L.; HONGCHUN, S. A novel piλd controller and its application in upqc dc voltage control. **Proc. 3rd Int. Conf. Electr. Utility Deregulation Restruct. Power Technol.**, Nanjing, China, p. 473–477, 2007.