

Universidade Federal de Pernambuco
Centro de Tecnologia e Geociências
Departamento de Engenharia Elétrica
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

LEANDRO SANTOS FIGUEIREDO

**CONDICIONADOR DE ENERGIA DE DOZE CHAVES APLICADO A SISTEMAS
TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS A QUATRO FIOS**

Recife

2018

LEANDRO SANTOS FIGUEIREDO

**CONDICIONADOR DE ENERGIA DE DOZE CHAVES APLICADO A SISTEMAS
TRIFÁSICOS DESEQUILIBRADOS A QUATRO FIOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento de Energia.
Orientador: Prof.º Dr. Leonardo Rodrigues Limongi.

Recife

2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

- F475c Figueiredo , Leandro Santos.
Condicionador de energia de doze chaves aplicado a sistemas trifásicos
desequilibrados a quatro fios / Leandro Santos Figueiredo. – 2018.
88 folhas, il., gráfs., tabs.
- Orientador: Prof. Dr. Leonardo Rodrigues Limongi.
Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2018.
Inclui Referências.
1. Engenharia Elétrica. 2. Condicionador de energia de doze chaves.
3. Sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios. 4. Conversor nove chaves.
I. Limongi, Leonardo Rodrigues. (Orientador). II. Título.
- UFPE
- 621.3 CDD (22. ed.). BCTG/2018-440



Universidade Federal de Pernambuco

Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE
DISSERTAÇÃO DO MESTRADO ACADÊMICO DE

LEANDRO SANTOS FIGUEIREDO

TÍTULO

**“CONDICIONADOR DE ENERGIA DE DOZE CHAVES
APLICADO A SISTEMAS TRIFÁSICOS
DESEQUILIBRADOS A QUATRO FIOS”**

A comissão examinadora composta pelos professores: LEONARDO RODRIGUES LIMONGI, DEE/UFPE; MARCELO CABRAL CAVALCANTI, DEE/UFPE e ZANONI DUEIRE LINS, DEE/UFPE, sob a presidência do primeiro, consideram o candidato **LEANDRO SANTOS FIGUEIREDO APROVADO.**

Recife, 31 de julho de 2018.

EDUARDO FONTANA
Vice-Coordenador do PPGE

LEONARDO RODRIGUES LIMONGI
Orientador e Membro Titular Interno

ZANONI DUEIRE LINS
Membro Titular Externo

MARCELO CABRAL CAVALCANTI
Membro Titular Interno

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, professor Leonardo Rodrigues Limongi, pela dedicação e apoio incondicional na realização deste trabalho. A toda minha família, professores e amigos da Universidade Federal de Pernambuco, principalmente do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) pelas grandes amizades conquistadas no decorrer do curso. Por fim a Deus e a todas as pessoas que estiveram ao meu lado ao longo desta jornada.

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de estudar uma topologia alternativa de condicionador de energia de doze chaves com a finalidade de realizar a supressão de variações de tensão de curta duração e harmônicos de corrente da rede elétrica em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios. Esta topologia é baseada no conversor de nove chaves que quando utilizado como condicionador de energia na sua forma tradicional possui a limitação de só realizar compensações na tensão e corrente em sistemas trifásicos a três fios. O condicionador de energia apresentado possui um sistema de controle que propicia a realização de um controle independente por fase juntamente com a adição de um quarto braço ao conversor de nove chaves que fornece um caminho para circulação das correntes de neutro que permitem que o conversor injete componentes de sequência zero e realize a supressão de variações de tensão de curta duração e harmônicos de corrente em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios. Por meio de simulações realizadas através do software *Simulink/MATLAB* foi possível verificar que o condicionador de energia estudado atende os principais procedimentos e normas nacionais e internacionais em relação as compensações de afundamentos de tensão nas cargas sensíveis e harmônicos de corrente da fonte em sistemas desequilibrados por possuir topologia e controle adequados para tais aplicações.

Palavras-chave: Condicionador de energia de doze chaves. Sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios. Conversor nove chaves.

ABSTRACT

This work has the objective to present an alternative topology of energy conditioner of twelve switches with the purpose of performing the suppression of short-term voltage variations and harmonics of mains current in three-phase unbalanced four-wire systems. This topology is based on the nine switches converter when used as an energy conditioner in its traditional form has the limitation of only realizing voltage and current compensations in three-wire three-phase systems. The proposed power conditioner has a control system that provides for an independent control per phase along with the addition of a fourth leg to the converter that provides a path for the circulation of the neutral currents that allow the converter to inject zero sequence components and carry out the suppression of short-term voltage variations and current harmonics in three-phase unbalanced four-wire systems. With the software Simulink / MATLAB it was possible to verify that the proposed power conditioner meets the main national and international procedures and standards in relation to the compensations of voltage sag in the sensitive loads and harmonics of current of the source in systems unbalanced to have topology and control for such applications.

Keywords: Energy conditioner of twelve switches. Three-phase unbalanced four-wire systems. Nine switches converter.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – UPQC doze chaves: DVR e FHP.	16
Figura 2 – UPQC nove chaves: DVR E FHP.	16
Figura 3 – Curva de tolerância para sensibilidade de computadores.	21
Figura 4 – Curva de sensibilidade de dispositivos eletrônicos.	21
Figura 5 – Princípio de operação do DVR.	24
Figura 6 – Topologia do DVR com energia extraída do lado da rede.	25
Figura 7 – Topologia do DVR com energia extraída do lado da carga.	26
Figura 8 – Topologia de DVR com barramento CC alimentado pelo próprio inversor.	27
Figura 9 – Topologia de DVR com baterias.	27
Figura 10 – Filtro ativo de potência paralelo.	29
Figura 11 – Filtro ativo de potência série.	30
Figura 12 – Filtro híbrido composto por filtro ativo paralelo e filtro passivo paralelo.	30
Figura 13 – Filtro híbrido composto por filtro ativo em série com filtro passivo.	31
Figura 14 – UPQC na tradicional topologia <i>back-to-back</i>	33
Figura 15 – Conversor de nove chaves.	35
Figura 16 – Sinais de gatilho de mesma frequência e amplitudes diferentes.	36
Figura 17 – Sinais de gatilho de frequências diferentes e mesmas amplitudes.	37
Figura 18 – UPQC de nove chaves usando DVR e FAPP.	38
Figura 19 – Transição das referências de modulação.	38
Figura 20 – Topologia de FHP sem conexão do neutro da carga com o ponto central do barramento CC do conversor.	39
Figura 21 – Topologia de FHP com conexão do neutro da carga ao ponto central do barramento CC do conversor.	40
Figura 22 – Topologia de FHP com quatro braços aplicável a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.	42
Figura 23 – Tradicional topologia de DVR empregado em sistemas trifásicos a três fios.	43
Figura 24 – Topologia de DVR com barramento CC dividido aplicado a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.	46
Figura 25 – Topologia de DVR com quatro braços aplicado a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.	49
Figura 26 – Circuito completo do UPQC doze chaves: DVR e FHP.	51
Figura 27 – Sistema PLL.	55
Figura 28 – Esquema de controle do DVR aplicado a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.	59
Figura 29 – Esquema de controle do FHP aplicado a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.	61
Figura 30 – Afundamento de tensão monofásico de 15 %: tensão na rede elétrica.	69
Figura 31 – Afundamento de tensão monofásico de 15 %: tensão na carga.	69

Figura 32 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico de 15 %.	70
Figura 33 – Corrente na rede: afundamento de tensão monofásico de 15 %.	70
Figura 34 – Corrente na carga: afundamento de tensão monofásico de 15 %.	71
Figura 35 – Afundamento de tensão monofásico de 30 %: tensão na rede elétrica.	71
Figura 36 – Afundamento de tensão monofásico de 30 %: tensão na carga.	71
Figura 37 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico de 30 %.	72
Figura 38 – Corrente na rede: afundamento de tensão monofásico de 30 %.	72
Figura 39 – Corrente na carga: afundamento de tensão monofásico de 30 %.	72
Figura 40 – Afundamento de tensão trifásico de 15 %: tensão na rede elétrica.	73
Figura 41 – Afundamento de tensão trifásico de 15 %: tensão na carga.	74
Figura 42 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão trifásico de 15 %.	74
Figura 43 – Corrente na rede: afundamento de tensão trifásico de 15 %.	74
Figura 44 – Corrente na carga: afundamento de tensão trifásico de 15 %.	75
Figura 45 – Afundamento de tensão trifásico de 30 %: tensão na rede elétrica.	75
Figura 46 – Afundamento de tensão trifásico de 30 %: tensão na carga.	76
Figura 47 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão trifásico de 30 %.	76
Figura 48 – Corrente na rede: afundamento de tensão trifásico de 30 %.	76
Figura 49 – Corrente na carga: afundamento de tensão trifásico de 30 %.	77
Figura 50 – Circuito completo do retificador.	78
Figura 51 – Corrente das cargas não lineares monofásicas balanceadas.	79
Figura 52 – Corrente da rede com cargas não lineares monofásicas balanceadas.	79
Figura 53 – Tensão nas cargas não lineares monofásicas balanceadas.	80
Figura 54 – Tensão na rede com cargas não lineares monofásicas balanceadas.	80
Figura 55 – Corrente das cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.	81
Figura 56 – Corrente da rede com cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.	82
Figura 57 – Tensão nas cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.	82
Figura 58 – Tensão na rede com cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparativo entre as topologias <i>back-to-back</i> e nove chaves.	34
Tabela 2 – Estados das chaves e tensões nas saídas em um braço.	36
Tabela 3 – Comparativo das principais topologias de conversores de nove chaves adaptadas para aplicações em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios	52
Tabela 4 – Parâmetros utilizados na simulação do UPQC de doze chaves.	67
Tabela 5 – Resultados do THD das correntes da carga e da rede em um sistema balanceado. . .	80
Tabela 6 – Resultados do THD das correntes da carga e da rede em um sistema desbalanceado.	81

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Corrente Alternada
CBEMA	<i>Computer and Business Equipment Manufactures Association</i> - Associação de Fabricantes de Equipamentos para Computadores e Empresas
CC	Corrente Contínua
CSI	<i>Current Source Inverter</i> - Inversor Fonte de Corrente
DVR	<i>Dynamic Voltage Restorer</i> - Restaurador Dinâmico de Tensão
FAP	Filtro Ativo de Potência
FAPP	Filtro Ativo de Potência Paralelo
FAPS	Filtro Ativo de Potência Série
FHP	Filtro Híbrido de Potência
FPP	Filtro Passivo de Potência
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i> - Transistor Bipolar de Porta Isolada
ITIC	<i>Information Technology Industry Curve</i> - Curva da Indústria da Tecnologia da Informação
LVRC	<i>Line Voltage Regulator Conditioner</i> - Condicionador Regulador de Tensão de Linha
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PI	Proporcional Integral
PLL	<i>Phase Locked Loop</i> - Detecção do ângulo de fase
PR	Proporcional Ressonante
PRODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
p.u.	por unidade
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Pulso
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
SPWM	<i>Sinusoidal Pulse Width Modulation</i> - Modulação por Largura de Pulso Senoidal
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i> - Distorção Harmônica Total

VSI	<i>Voltage Source Inverter</i> - Inversor Fonte de Tensão
VTCD	Varição de Tensão de Curta Duração
UPQC	<i>Unified Power Quality Conditioner</i> - Condicionador Unificado de Potência
UPS	<i>Uninterruptible Power Supply</i> - Sistema de Energia Ininterrupta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	14
1.2	MOTIVAÇÃO	15
1.3	OBJETIVO DA PESQUISA	15
1.3.1	Objetivo Geral	15
1.3.2	Objetivo Específico	16
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	17
2	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA	18
2.1	PROBLEMAS RELACIONADOS À QEE	18
2.1.1	Afundamento de Tensão	19
2.1.2	Desequilíbrio de Tensão	22
2.1.3	Distorções Harmônicas	22
2.2	RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO	24
2.2.1	Topologias de DVR sem Armazenamento de Energia	25
2.2.1.1	Energia extraída do lado da rede	25
2.2.1.2	Energia extraída do lado da carga	26
2.2.2	Topologias de DVR com Armazenamento de Energia	26
2.2.2.1	Barramento CC Alimentado pelo Próprio Inversor	26
2.2.2.2	Baterias	26
2.3	TÉCNICAS DE FILTRAGEM DE HARMÔNICOS DE CORRENTE	27
2.3.1	Filtro Passivo	28
2.3.2	Filtro Ativo	28
2.3.3	Filtro Híbrido	29
2.4	FILTRO UNIVERSAL	32
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	33
3	ANÁLISE DO CONVERSOR DE NOVE CHAVES E TOPOLOGIAS DE CONVERSORES PARA IMPLEMENTAÇÃO DO DVR E DO FHP EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A QUATRO FIOS	34
3.1	ANÁLISE DO CONVERSOR DE NOVE CHAVES	35
3.2	TOPOLOGIAS DE CONVERSORES PARA IMPLEMENTAÇÃO DO FHP EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A QUATRO FIOS	38
3.2.1	Topologia de FHP com Barramento CC Dividido	41
3.2.2	Topologia de FHP com Quatro Braços	41
3.3	TOPOLOGIAS DE CONVERSORES PARA IMPLEMENTAÇÃO DO DVR EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A QUATRO FIOS	42
3.3.1	Topologia de DVR com Divisão do Barramento CC	46
3.3.2	Topologia de DVR com Adição de um Quarto Braço ao Conversor	48
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49

4	TOPOLOGIA DE CONDICIONADOR DE ENERGIA DE DOZE CHAVES COM DVR E FHP	51
4.1	ESTRATÉGIA DE CONTROLE	52
4.1.1	Transformada entre eixos de referência	53
4.1.1.1	Transformada de Clarke	53
4.1.1.2	Transformada de Park	53
4.1.2	PLL	54
4.1.3	Controladores	55
4.1.3.1	Controlador Proporcional-Integral	55
4.1.3.2	Controlador proporcional-ressonante	56
4.1.4	Geração das tensões de referências das fases e do neutro	57
4.1.5	Controle do DVR	58
4.1.6	Controle do FHP	60
4.1.6.1	Ação de controle <i>feedback</i>	61
4.1.6.2	Ação de controle <i>feedforward</i>	62
4.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	64
4.2.1	Parâmetros utilizados nas simulações	64
4.2.2	Simulações de afundamentos de tensão	67
4.2.2.1	Simulações de afundamentos de tensão monofásicos	68
4.2.2.2	Simulações de afundamentos de tensão trifásicos	73
4.2.2.3	Análise do Barramento CC	77
4.2.3	Simulações de distorções harmônicas de corrente	77
4.2.3.1	Distorções Harmônicas de correntes de cargas não lineares monofásicas balanceadas	78
4.2.3.2	Distorções harmônicas de corrente de cargas não lineares monofásicas desbalanceadas	80
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
5	CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	84
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	85
	REFERÊNCIAS	86

1 INTRODUÇÃO

Com o aumento de cargas não lineares no sistema elétrico, o problema da distorção harmônica tem se tornado cada vez mais significativo. Algumas medidas de conservação, tais como: a aplicação de inversores de frequência para o controle da velocidade de motores, controladores de intensidade luminosa (dimmers), utilização de lâmpadas fluorescentes compactas com reatores eletrônicos, controladores de potência para chuveiros, entre outras, podem interferir na qualidade do sistema elétrico, de forma a aumentar as perdas e até causarem danos e prejuízos aos consumidores e à concessionária (EDUCAÇÃO, 2006). A utilização desses tipos de cargas pode ocasionar problemas na operação dos sistemas elétricos, além de distorcer a tensão relacionadas ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC).

Os problemas relacionados à Qualidade de Energia Elétrica (QEE) têm merecido cada vez mais a atenção de profissionais da área. Os prejuízos econômicos decorrentes de uma energia de baixa qualidade podem ser muito acentuados. Isto porque nos últimos anos, ocorreu um considerável aumento do número de equipamentos residenciais e industriais que são extremamente sensíveis a qualidade da energia entregue para o consumo (GILLESKIE, 1996)

Uma alternativa para minimizar problemas relacionados a distorções harmônicas e Variações de Tensão de Curta Duração (VTCD) é a utilização de um condicionador unificado de energia (UPQC- *Unified Power Quality Conditioner*), que consiste na integração dos filtros ativos série e paralelo. Assim sendo, o UPQC possui a função de propiciar a melhoria da QEE a partir do seu ponto de instalação no sistema elétrico. Devido ao seu alto custo deve ser empregado apenas nas situações em que cargas sensíveis são alimentadas pelo mesmo barramento que cargas não lineares justificando a necessidade de haver simultaneamente compensações de distúrbios na tensão e corrente.

A função do Filtro Ativo de Potência Paralelo (FAPP) que compõe o UPQC é realizar a compensação das correntes geradas pela carga não linear para que as correntes drenadas da rede tornem-se senoidais e equilibradas e a função do Filtro Ativo de Potência Série (FAPS) que compõe o UPQC é realizar a compensação dos distúrbios de tensão provenientes do sistema.

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

As VTCD são os principais tipos de distúrbio que afetam as cargas sensíveis (GOMEZ; MARCOS, 2000). Um dos principais problemas relacionados à QEE que ocorrem nos sistemas elétricos são os afundamentos de tensão que são causados principalmente por curtos-circuitos que podem ocorrer em uma ou duas fases provocando um desequilíbrio de tensão no sistema trifásico, como também pode ocorrer nas três fases simultaneamente no caso de um curto-circuito trifásico.

Outro grave problema relacionado à QEE são as conexões de cargas não lineares ao sistema elétrico que implicam em níveis elevados de correntes harmônicas drenadas na rede elétrica. A interação dessas correntes com a impedância da linha acarreta em distorções das tensões relacionadas ao PAC do sistema elétrico de potência.

A circulação de correntes harmônicas originadas por cargas não lineares podem provocar a operação indevida de proteções, danificar bancos de capacitores e aumento das perdas no sistema elétrico, entre outros efeitos indesejáveis.

Temos ainda, que quando há a conexão de cargas monofásicas desbalanceadas ou uma falta assimétrica, num sistema trifásico a quatro fios, ocorre a circulação de correntes de sequência zero pelo condutor de neutro. Em alguns casos essas correntes podem exceder as amplitudes das correntes de fase, causando danos ao condutor de neutro.

1.2 MOTIVAÇÃO

A contribuição desta dissertação é estudar uma topologia de UPQC de doze chaves, proposta na qualificação de doutorado de (GOMES, 2017) e apresentada na figura 1, com restaurador dinâmico de tensão (*Dynamic Voltage Restorer – DVR*) na parte do conversor conectada em série entre a rede e a carga e Filtro Híbrido de Potência (FHP) na parte do conversor conectado em paralelo com a rede com a finalidade de realizar a supressão de afundamentos de tensão e harmônicos de corrente da rede elétrica, respectivamente, em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios. Usa-se um sistema de controle e uma adaptação na topologia do conversor de nove chaves que propicia o desacoplamento das fases umas das outras permitindo a injeção de sinais independentes em cada uma das fases. Esta topologia estudada neste trabalho tem uma aplicabilidade mais vasta que o UPQC de nove chaves com DVR e FHP para sistemas trifásicos a três fios proposto em (GOMES, 2014), e apresentado na figura 2, que possui a limitação de não possuir um controle independente por fase que impossibilita o conversor de injetar sinais de amplitudes distintas de acordo com a necessidade de cada fase.

1.3 OBJETIVO DA PESQUISA

O objetivo deste trabalho é estudar uma topologia de um conversor de doze chaves como UPQC com custo reduzido, baseado na estrutura de nove chaves proposta em (ZHANG; LOH; GAO, 2012) que tenha capacidade de realizar a compensação de afundamentos de tensão nas cargas sensíveis e harmônicos de corrente da rede em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é o estudo e a análise de uma topologia alternativa de UPQC, proposta na qualificação de doutorado de (GOMES, 2017), adaptada do conversor de

3. Estudar as técnicas de compensação de VTCD, filtragem passiva, ativa e híbrida;
4. Estudar o princípio de funcionamento, modulação e restrições do conversor nove chaves, além de fazer uma análise do conversor nove chaves como UPQC;
5. Estudar as principais topologias de DVR e FHP aplicáveis em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios e analisar as vantagens e desvantagens de cada uma delas;
6. Estudar uma topologia de UPQC de doze chaves aplicado a sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios que consiste na adição de um quarto braço ao conversor de nove chaves, estudar o controle do UPQC de doze chaves e analisar o seu funcionamento perante perturbações na tensão e corrente com simulações realizadas através do software *Simulink/MATLAB*.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos:

- **Capítulo 2** - É feita uma revisão bibliográfica em que são abordados o conceito de QEE, os problemas relacionados à QEE, normas e procedimentos estabelecendo os limites aceitáveis dos problemas relacionados à QEE tratados neste trabalho e formas de mitigar os problemas relacionados aos afundamentos de tensão e harmônicos de corrente.
- **Capítulo 3** - É apresentado o princípio de funcionamento, modulação e limitações do conversor de nove chaves, em seguida é estudado o conversor de nove chaves como UPQC. São analisadas as principais topologias de conversores para implementação do DVR e FHP em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios, onde são apresentadas as estruturas com barramento CC dividido e com quatro braços, e ainda, são apresentados para cada caso as vantagens e desvantagens de cada uma delas.
- **Capítulo 4** - É apresentada uma topologia de UPQC de doze chaves usando DVR e FHP baseada no UPQC de nove chaves usando DVR e FHP proposto em (GOMES, 2014) com o intuito de realizar as compensações de VTCD nas cargas sensíveis e harmônicos de corrente da fonte em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios através da adição de um quarto braço ao conversor de nove chaves juntamente com um controle apropriado. Em seguida a topologia estudada é simulada e os resultados são demonstrados e avaliados.
- **Capítulo 5** - São apresentadas as conclusões do trabalho e são dadas sugestões para a realização de trabalhos futuros.

2 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

QEE pode ser definida como a ausência relativa de variações de tensão provocadas pelo sistema da concessionária, particularmente a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, surtos e harmônicos, medidos no ponto de entrega de energia (fronteira entre as instalações da concessionária e as do consumidor). Se, entretanto, olharmos o problema do ponto de vista do consumidor, energia elétrica de boa qualidade, é aquela que garante o funcionamento contínuo, seguro e adequado dos equipamentos elétricos e processos associados, sem afetar o meio ambiente e o bem estar das pessoas (BRONZEADO; RAMOS; OLIVEIRA, 1997).

As cargas não-lineares são cargas elétricas cuja as correntes que absorvem não possuem a mesma forma de onda da tensão que as alimenta. Portanto, as cargas eletrônicas são responsáveis pela distorção da forma de onda da tensão e corrente que lhe são fornecidas e conseqüentemente geram uma “poluição” na rede de energia elétrica.

Esta "poluição" sob forma de harmônicos de corrente, ao interagirem com a impedância da rede elétrica origina os harmônicos de tensão que ocasionam vários distúrbios na QEE que serão estudados na seção 2.1 do capítulo 2 desta dissertação. É fundamental observar que estas mesmas cargas não lineares além de poluírem a rede de energia elétrica, são as mais afetadas pela má qualidade da energia que as mesmas produzem quando conectadas no mesmo barramento de cargas sensíveis que possuem uma baixa tolerância a VTCDs.

2.1 PROBLEMAS RELACIONADOS À QEE

Um problema de QEE é definido como qualquer problema de energia elétrica manifestado na tensão, corrente ou frequência que resulte em falha ou mau funcionamento do equipamento do consumidor (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 1996).

O problema da QEE pode ser visto sob três perspectivas diferentes. A primeira delas, a correspondente ao lado dos consumidores depois do medidor de energia, é o impacto dos distúrbios nos equipamentos. A segunda, também do lado dos consumidores, é que os fabricantes de equipamentos devem conhecer os níveis destes distúrbios e a frequência com que ocorrem, para assim determinar uma tolerância razoável para seus equipamentos. A terceira, que concerne a ambos os lados do medidor, é como os distúrbios ocasionados por um consumidor afetam a outros consumidores que estão conectados na mesma rede de distribuição (CABRAL, 2010).

Atualmente, a questão da QEE surge como um fator muito mais relevante e necessário aos vários envolvidos no sistema elétrico. A deterioração da QEE pode provocar ineficiências técnicas e econômicas com significativas perdas para a comunidade e o consumidor (EDUCAÇÃO, 2006).

Diante de um mercado globalizado crescentemente competitivo, o assunto da QEE tem se tornado de fundamental importância no cenário econômico nacional, uma vez que os modernos

processos industriais produtivos podem sofrer interrupções mais ou menos longas devido às variações momentâneas da tensão, implicando em significativas perdas econômicas. E também porque a sensibilidade dos equipamentos aos distúrbios originários do sistema elétrico tem aumentado (EDUCAÇÃO, 2006).

Vários fatores permitem a avaliação da qualidade do fornecimento de energia elétrica, tais como: nível de tensão, continuidade do fornecimento, desequilíbrio, oscilações de tensão, distorções harmônicas de tensão e interferência em sistemas de comunicações. Estes distúrbios ocasionam alterações da forma de onda da tensão em regime permanente, em relação à onda puramente senoidal.

Os problemas relacionados à QEE mais relevantes para este trabalho serão apresentados nas próximas subseções desta seção.

2.1.1 Afundamento de Tensão

A norma IEEE std. 1159-1995 define afundamento de tensão como um decréscimo de 0,1 a 0,9 por unidade (p.u.) da tensão, na frequência fundamental, com duração de meio ciclo da frequência da rede a um minuto. Portanto, a duração do afundamento de tensão é compreendida entre o período em que a tensão eficaz torna-se menor que o valor limite de 0,9 p.u. da tensão nominal e tem fim no momento que a tensão ultrapassa a amplitude de 0,9 p.u. da tensão nominal.

No decorrer dos últimos anos o cenário da energia elétrica tem passado por profundas mudanças com a alteração das características das cargas que compõem o sistema elétrico. No passado, existia uma grande quantidade de equipamentos robustos, eletromecânicos, e atualmente grande parte dos equipamentos é constituída por componentes eletrônicos que acarreta numa maior sensibilidade dos equipamentos a VTCD.

Com a alteração das características das cargas, os distúrbios na QEE passaram a ocasionar desligamentos, funcionamento incorreto e até a danificação de equipamentos sensíveis. Dentre os diversos distúrbios de QEE, os afundamentos de tensão são os que causam os maiores prejuízos financeiros aos consumidores industriais (BOLLEN, 2000).

As cargas que possuem maior sensibilidade aos afundamentos de tensão são: computadores, relés, contadores, controladores lógicos programáveis e variadores de velocidade (acionamento de motores).

Os afundamentos de tensão são ocasionados pela partida de grandes motores, sobrecargas ou faltas, sendo as faltas a causa principal dos afundamentos de tensão que ocorrem ao longo do sistema elétrico tanto na transmissão quanto na distribuição de energia elétrica. Podem ocasionar danos a equipamentos e paralisação de processos fabris. São causadas por:

1. Fenômenos naturais (descargas atmosféricas, tempestades, vendavais, enchentes e incêndios);

2. Vandalismo (destruição intencional de isoladores de vidro, queimadas, balões, etc);
3. Contato acidental com árvores ou animais;
4. Poluição;
5. Falha de operação ou manutenção.

As principais faltas que podem ocasionar afundamento de tensão em um sistema elétrico trifásico a quatro fios são: curto-circuito trifásico, curto-circuito bifásico, curto-circuito bifásico à terra e curto-circuito monofásico. Os curtos-circuitos trifásicos são geralmente os mais severos e também os mais raros, além de não provocarem desequilíbrio de tensão uma vez que as tensões e correntes no sistema são equilibradas. A falta de maior ocorrência no sistema elétrico é o curto-circuito monofásico principalmente devido as redes de distribuição aéreas das concessionárias de energia elétrica serem predominantemente do tipo convencional, condutores nus, que acarreta em uma alta susceptibilidade a falhas não técnicas. Assim, as concessionárias de distribuição de energia elétrica já estão substituindo as redes aéreas de distribuição convencionais por redes aéreas compactas, condutores protegidos, minimizando a ocorrências de contatos acidentais com as linhas. As faltas monofásicas, bifásicas e bifásicas à terra são geralmente menos severas, mas são assimétricas, ou seja, causam desequilíbrios no sistema elétrico.

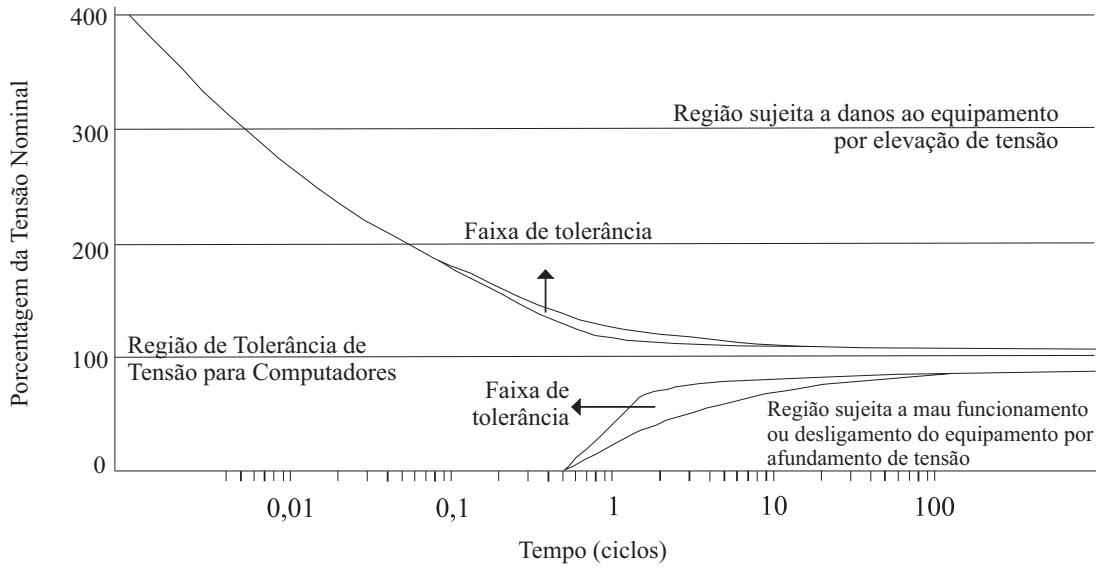
Com o desenvolvimento da eletrônica de potência os equipamentos estão cada vez mais sensíveis a variações na forma de onda da tensão fornecida. Para verificar a sensibilidade dos equipamentos duas curvas se apresentam:

1. CBEMA (*Computer and Business Equipment Manufactures Association*);
2. ITIC (*Information Technology Industry Curve*).

No final da década de 70 como resultado de estudos feitos por Thomas Key para verificar como os afundamentos de tensão de curta duração poderiam afetar a operação normal dos computadores de instalações militares foi criada a curva CBEMA, apresentada na figura 3, para caracterizar a sensibilidade dos computadores frente as VTCDs ocorridas no sistema elétrico.

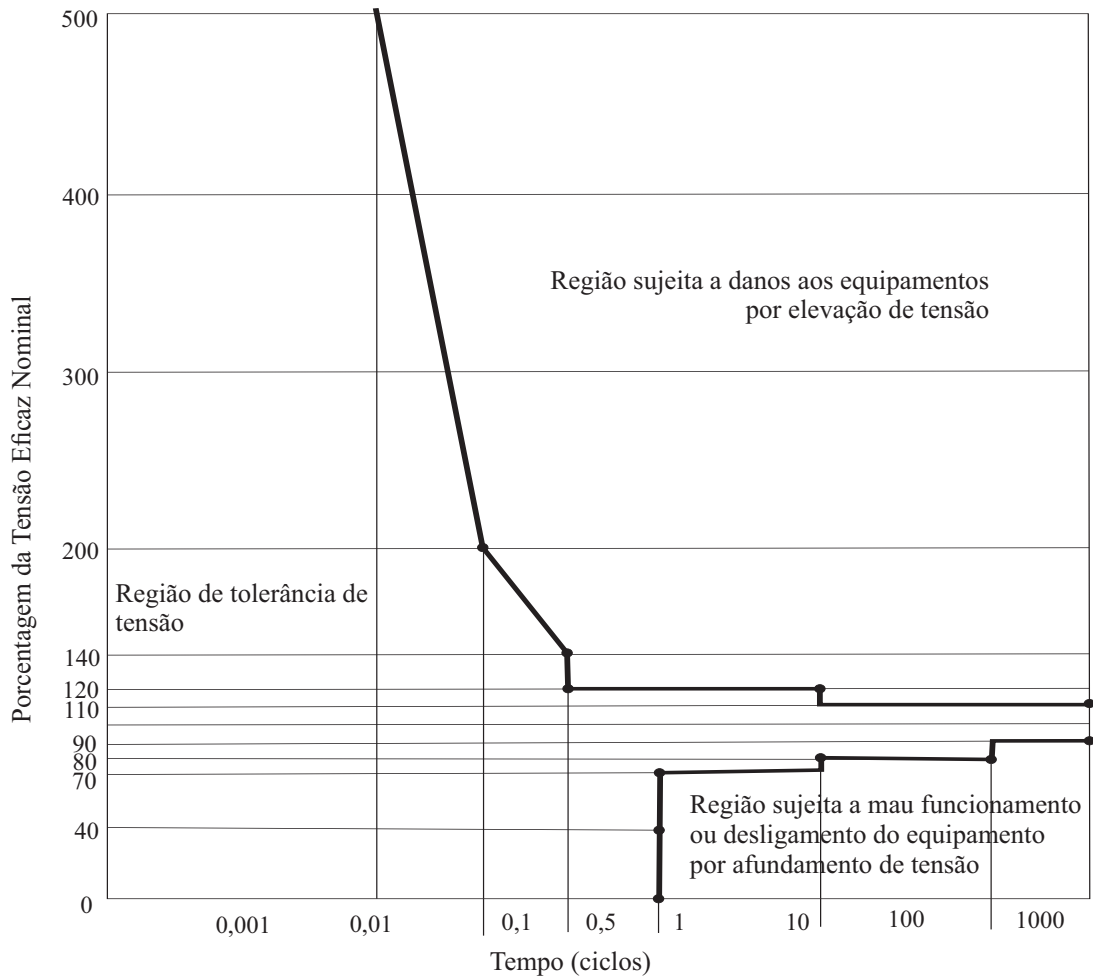
Em 1994, a curva CBEMA foi modificada e revisada para além dos computadores, também caracterizar melhor a sensibilidade dos diversos dispositivos eletrônicos existentes. Essa curva é a ITIC, apresentada na figura 4.

Figura 3 – Curva de tolerância para sensibilidade de computadores.



Fonte: adaptado de CBEMA.

Figura 4 – Curva de sensibilidade de dispositivos eletrônicos.



Fonte: adaptado de ITIC.

2.1.2 Desequilíbrio de Tensão

Num sistema elétrico trifásico o desequilíbrio é definido como uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo, desbalanceamento de tensão, ou defasagem angular entre fases diferentes de 120° elétricos, assimetria, ou as duas condições simultaneamente.

O desequilíbrio pode ser originado por faltas monofásicas, bifásica à terra e bifásicas ou pela conexão de cargas elétricas monofásicas ao sistema elétrico. Num sistema de distribuição trifásico a quatro fios as cargas monofásicas devem ter as suas potências distribuídas uniformemente entre as três fases de modo a manter o sistema equilibrado (balanceado e simétrico) sob condições normais, porém na maioria das vezes ocorre a distribuição de cargas monofásicas de maneira desbalanceada entre as três fases fazendo surgir o desequilíbrio da tensão. O desbalanceamento das cargas elétricas acarreta no surgimento de componentes de sequência zero que circulam pelo condutor de neutro.

2.1.3 Distorções Harmônicas

Uma distorção da forma de onda é chamada de harmônica quando o espectro contém frequências múltiplas inteiras da fundamental. Essas deformações da forma de onda geralmente são impostas por dispositivos que apresentam relação não linear entre tensão e corrente, tais como: motores e transformadores, cujos núcleos ferromagnéticos estão sujeitos a saturação. As cargas eletrônicas também representam elementos não lineares, pois produzem descontinuidade na corrente devido ao chaveamento dos conversores.

As cargas não lineares drenam altos níveis de harmônicos de corrente da rede elétrica que interagem com a impedância da linha e produzem distorção das tensões no PAC.

O índice utilizado para medir a distorção harmônica total da tensão ou da corrente é o THD (*Total Harmonic Distortion*). A distorção harmônica da tensão é apresentada como:

$$THD_{V_n} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_n} \times 100\%, \quad (1)$$

em que:

- V_h - valor eficaz das componentes harmônicas individuais;
- h - ordem das harmônicas;
- V_n - valor eficaz da componente fundamental.

Analogamente pode ser obtida a distorção harmônica total da corrente.

A IEEE 519-1992 é a principal norma internacional que limita a injeção harmônica do consumidor na rede elétrica para que estes não causem distorção de tensão inaceitável, sendo

recomendado o THD de no máximo 5 % para sistemas elétricos tradicionais. Para sistemas elétricos com aplicações especiais como hospitais e aeroportos é recomendado um THD de 3 %. No Brasil, os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) são documentos elaborados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que em seu Módulo 8 estabelece os procedimentos relativos à QEE.

Num sistema trifásico a quatro fios a conexão de cargas não lineares monofásicas desbalanceadas provocam a circulação de correntes no condutor de neutro, devido à presença de harmônicos de ordem três e seus múltiplos. De acordo com a NBR-5410, norma brasileira para Instalações Elétricas de Baixa Tensão, o THD da corrente da rede influi diretamente no dimensionamento do condutor de neutro:

1. THD até 15 % - condutor neutro pode ser igual ou menor que o condutor fase de acordo com a bitola especificada;
2. THD de 15 % até 33 % - independente da bitola especificada o condutor de neutro tem que ter a mesma bitola do condutor de fase;
3. THD superior a 33 % - a bitola do condutor de neutro vai ser superior a bitola do condutor de fase.

Outros problemas relacionados as distorções harmônicas são:

1. Danificação de bancos de capacitores instalados próximos a cargas não lineares porque estes servirão como filtros para as correntes harmônicas.
2. Aumento da bitola dos condutores de fase que passam a ter a sua ampacidade calculadas a partir da seguinte equação:

$$I_b = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_n^2}, \quad (2)$$

em que:

- I_b - valor da corrente de projeto calculada;
- I_1 - valor da corrente fundamental;
- I_2 - valor da corrente correspondente ao segundo harmônico;
- I_n - valor da corrente correspondente ao enésimo harmônico.

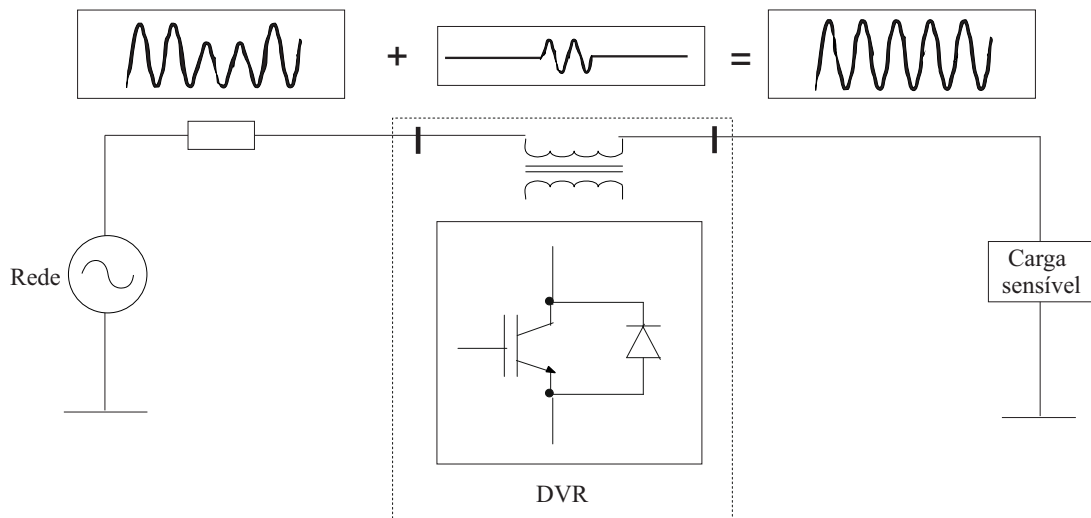
As fontes geradoras de harmônicas mais comuns são: reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, dimmers para controle da iluminação, aparelhos de TV, computadores, fornos micro-ondas, soft starter, inversores de frequência, fornos a arco e lâmpadas de descarga.

2.2 RESTAURADOR DINÂMICO DE TENSÃO

Entre os problemas de QEE, os afundamentos e as interrupções de energia elétrica representam os mais significativos distúrbios presentes na rede elétrica (DUGAN; MCGRANAGHAN; BEATY, 1996). A maioria dos afundamentos de tensão é desequilibrado fazendo surgir componentes de sequência negativa e zero em sistemas aterrados.

O DVR é um equipamento conectado em série com a rede de modo que a carga seja alimentada com a tensão da rede somada à tensão do dispositivo, podendo-se compensar flutuações momentâneas de tensão conforme apresentado na figura 5. O compensador série é inserido entre a rede e a carga sensível através de transformadores de acoplamento, um por fase, em que as tensões são geradas por um inversor que é alimentado por uma tensão CC e tem a abertura e fechamento das suas chaves semicondutoras controladas por modulação em largura de pulso (*Pulse Width Modulation - PWM*) que faz com que o conversor injete tensões de amplitude e ângulos de fase determinados que propicia uma rápida compensação de variações de tensão. Na saída do inversor é conectado um filtro LC para mitigação das componentes harmônicas geradas pelas altas frequências de chaveamento.

Figura 5 – Princípio de operação do DVR.



Fonte: próprio autor.

O princípio de funcionamento do controle do DVR se baseia na comparação da tensão medida na carga com a tensão de referência que produz um sinal de erro, o qual através de uma estratégia específica é reduzido até a sua extinção.

O DVR tem se destacado como uma importante solução para os problemas de QEE, provocados pelas variações momentâneas de tensão. Aliando um bom desempenho a um custo competitivo, comparado com outras soluções, como os sistemas de energia ininterrupta (*Uninterruptible Power Supply - UPS*), o DVR é capaz de reduzir em mais de 90 % o número de

desligamentos inoportunos da carga sensível, quando da ocorrência das variações momentâneas de tensão (STUMP; KEANE; LEONG, 1998).

A principal vantagem de um DVR é que este injeta no PAC a diferença entre a tensão de referência e a tensão medida na carga apenas durante VTCD não necessitando de energia para suprir plena carga como é o caso da UPS. A desvantagem do DVR é não trabalhar durante interrupções de energia.

As características do DVR que o tornam uma opção vantajosa para compensação de VTCD em relação a outras soluções, têm sido ressaltadas na literatura, como em (SILVA, 1999) e (BRUMSICKLE et al., 2001).

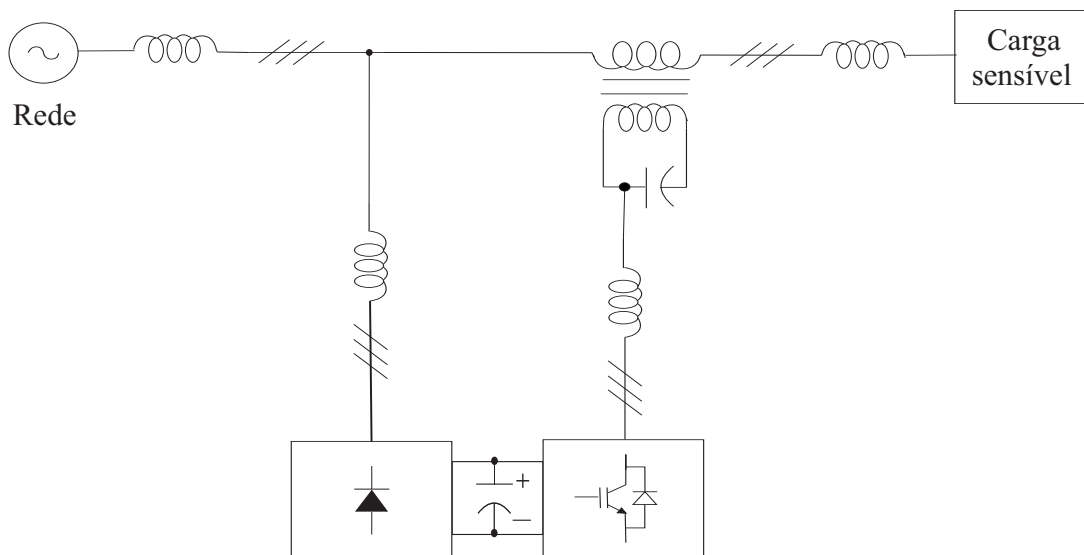
2.2.1 Topologias de DVR sem Armazenamento de Energia

Nesta subseção serão apresentadas as principais topologias de DVR sem armazenamento de energia.

2.2.1.1 Energia extraída do lado da rede

A alimentação do barramento CC é feita por meio da própria rede elétrica, fazendo-se o uso de um retificador a diodos. É uma alternativa mais simples e mais econômica, porém tem a desvantagem de durante o afundamento de tensão o barramento CC ser alimentado pela mesma rede onde está ocorrendo a VTCD. A topologia é apresentada na figura 6.

Figura 6 – Topologia do DVR com energia extraída do lado da rede.

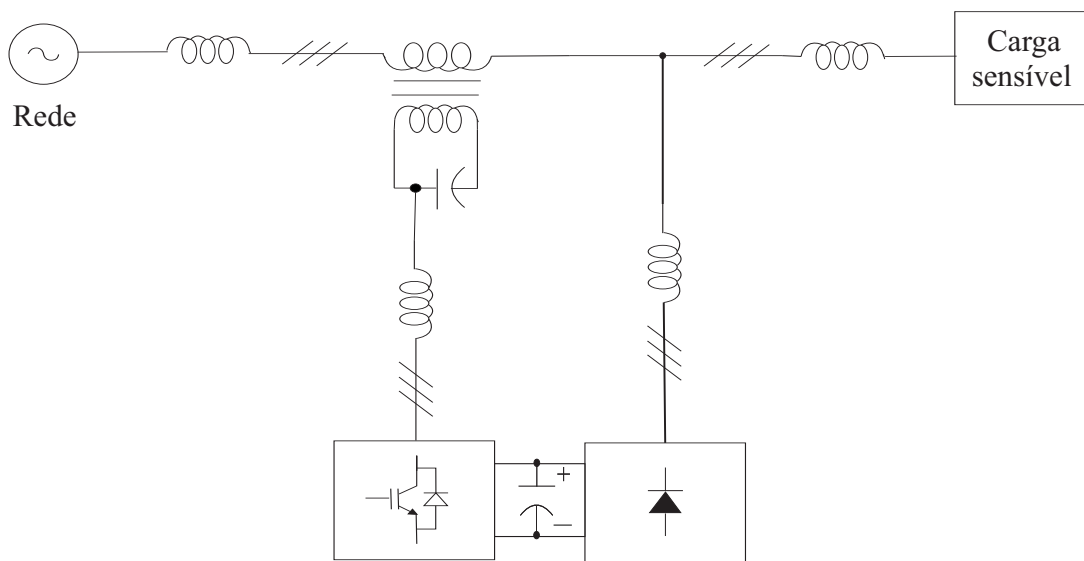


Fonte: próprio autor.

2.2.1.2 Energia extraída do lado da carga

Nesta topologia, as posições do retificador e do inversor série são invertidas em relação a topologia anterior com a finalidade de contornar o inconveniente das variações das tensões da rede elétrica durante os distúrbios de tensão. Assim sendo, as tensões do retificador em paralelo são aproximadamente constantes, pois são controlados pelo próprio DVR. A desvantagem dessa modificação é que a carga pode ser afetada pela absorção de correntes não lineares do retificador e com isso o inversor trabalha com correntes mais elevadas. A topologia é apresentada na figura 7.

Figura 7 – Topologia do DVR com energia extraída do lado da carga.



Fonte: próprio autor.

2.2.2 Topologias de DVR com Armazenamento de Energia

Nesta subseção serão apresentadas as principais topologias de DVR com armazenamento de energia.

2.2.2.1 Barramento CC Alimentado pelo Próprio Inversor

O fornecimento de energia ao barramento CC é feito através do próprio inversor. A desvantagem dessa topologia é a necessidade da utilização de grandes capacitores no barramento CC devido à necessidade de armazenar grandes quantidades de energia. A topologia é apresentada na figura 8.

2.2.2.2 Baterias

O armazenamento de energia é obtido através de um banco de baterias. Possui a desvantagem do alto custo. A topologia é apresentada na figura 9.

Figura 8 – Topologia de DVR com barramento CC alimentado pelo próprio inversor.

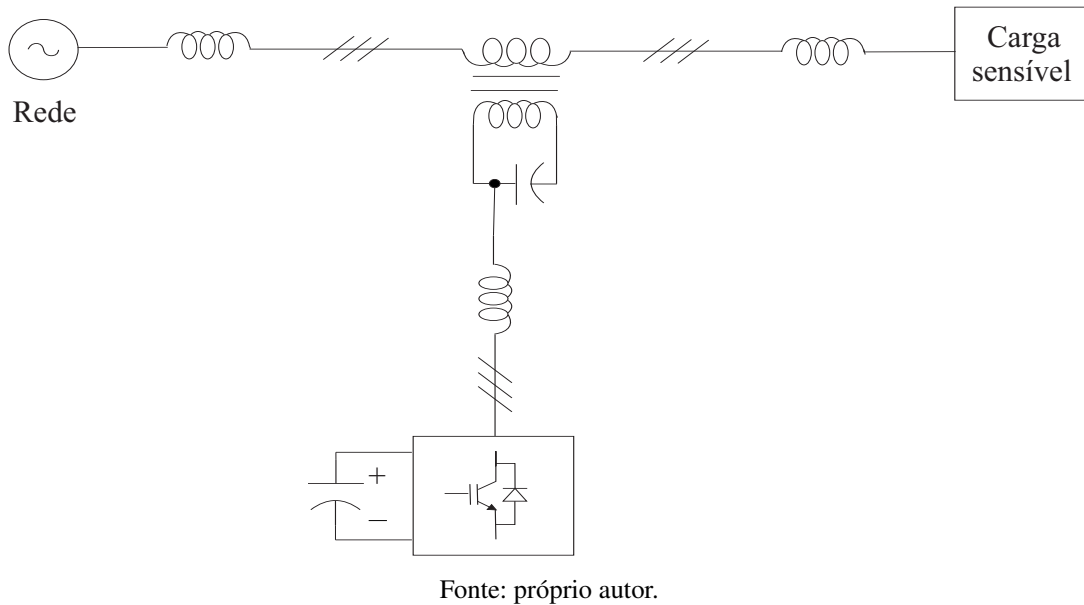
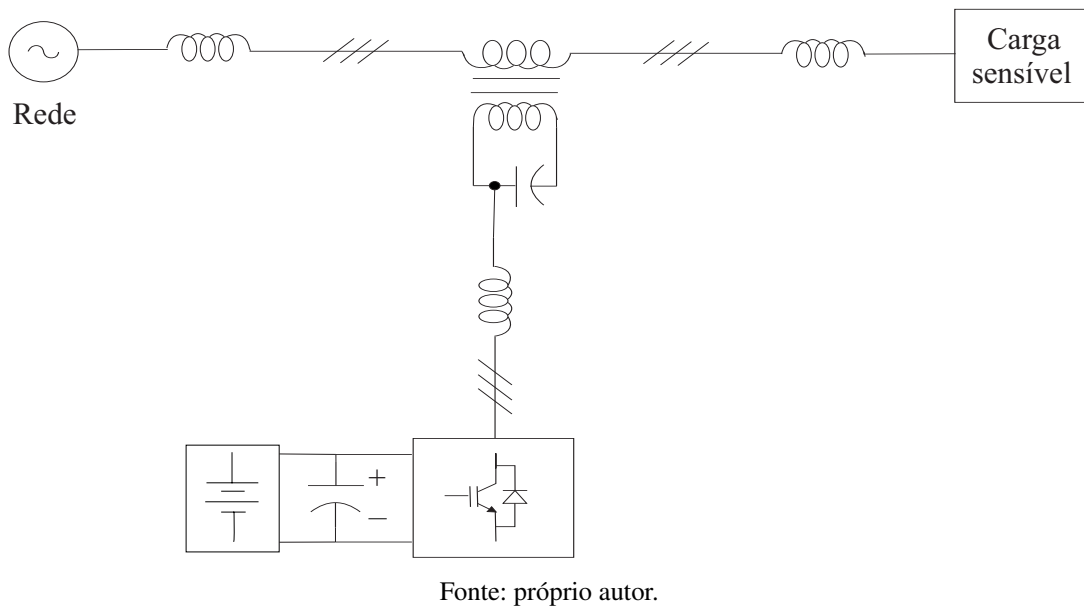


Figura 9 – Topologia de DVR com baterias.



2.3 TÉCNICAS DE FILTRAGEM DE HARMÔNICOS DE CORRENTE

Os harmônicos são originados a partir de inúmeras fontes como conversores de potência, fornos a arco, corrente de magnetização de transformadores, máquinas rotativas, entre outras.

Para o controle e diminuição da taxa de distorção harmônica em uma instalação, algumas estratégias de filtragem são propostas na literatura, onde o principal objetivo é garantir a circulação de uma corrente senoidal pela rede elétrica (AKAGI, 2005), (SILVA, 2001).

Diversas técnicas para filtragem de correntes harmônicas geradas por cargas não-lineares têm sido propostas com a utilização de técnicas passivas, ativas ou híbridas (AKAGI, 2005), (SILVA, 2001), (AREDES, 1996).

O objetivo desta seção é descrever os principais tipos de filtros para mitigação dos harmônicos de corrente.

2.3.1 Filtro Passivo

Os FPPs são utilizados para evitar a circulação de harmônicos de corrente na rede elétrica. São uma solução simples e de baixo custo quando comparados a outras formas de filtragem de harmônicos. São constituídos basicamente por um ou mais conjuntos de associações de componentes passivos, tais como: resistores, indutores e capacitores. Os FPPs são sintonizados nas frequências dos harmônicos de corrente que se desejam compensar, representando um caminho de baixa impedância para estas componentes harmônicas, portanto são empregados para compensar harmônicos de corrente específicos, havendo necessidade de uma análise criteriosa do sistema onde o FPP será conectado. Possuem a desvantagem de serem pesados e volumosos, além de haver a possibilidade de interação com a impedância da rede elétrica, podendo resultar em ressonância com a rede.

2.3.2 Filtro Ativo

Com o aparecimento de novos dispositivos semicondutores como o IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) surgiram novas soluções para a compensação de harmônicos na rede elétrica que eram feitas principalmente por filtros passivos. Em 1976 foi publicado o primeiro trabalho sobre Filtro Ativo de Potência (FAP) (GYUGYI, 1976) no qual FAP foi definido como um dispositivo compensador de harmônicos formado por chaves semicondutoras de potência. Com o contínuo desenvolvimento dos FAPs suas aplicações se expandiram também para a correção do desbalanceamento de tensão, correção do fator de potência e distúrbios de tensão.

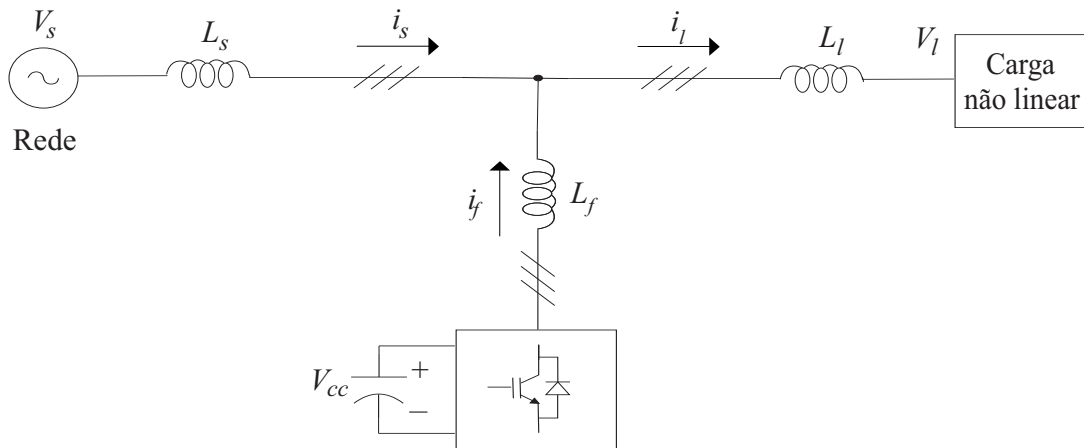
Comparando com os FPPs, os FAPs têm um melhor desempenho, são fisicamente menores, possuem maior flexibilidade nas aplicações, não têm problemas em relação a ressonâncias com a rede elétrica, porém possuem um alto custo de implantação, maiores perdas operacionais e caso seja necessário efetuar reparos é requerida mão de obra especializada.

Os FAPs podem ser implementados em paralelo ou em série com a carga. O FAPP tem a finalidade de compensar harmônicos de corrente gerados pela carga não linear e/ou compensar os reativos da carga. O FAPS é utilizado na compensação de harmônicos, desbalanços e distúrbios na tensão.

O FAPP, apresentado na figura 10, é mais utilizado para compensar harmônicos de corrente gerados por cargas não lineares. Atua injetando correntes harmônicas em fase àquelas geradas pela carga não linear. O FAPP faz o papel de uma fonte de corrente não senoidal que injeta correntes de compensação iguais em amplitude e em fase às correntes harmônicas da

carga para cancelar os harmônicos de corrente gerados por cargas não lineares. Sendo assim, a corrente oriunda da fonte para a carga será teoricamente senoidal, sendo responsabilidade do FAPP fornecer a parcela harmônica.

Figura 10 – Filtro ativo de potência paralelo.



Fonte: próprio autor.

O FAPS é ligado em série entre a fonte de energia e a carga através dos enrolamentos secundários dos transformadores de acoplamento. O primário desse trafo é ligado a um inversor através de um filtro LC ou de um indutor como apresentado na figura 11. São utilizados principalmente para proteger a carga de distúrbios de tensão provenientes da rede de distribuição produzindo uma tensão nos terminais dos transformadores de acoplamento proporcional ao distúrbio na tensão da rede de alimentação.

2.3.3 Filtro Híbrido

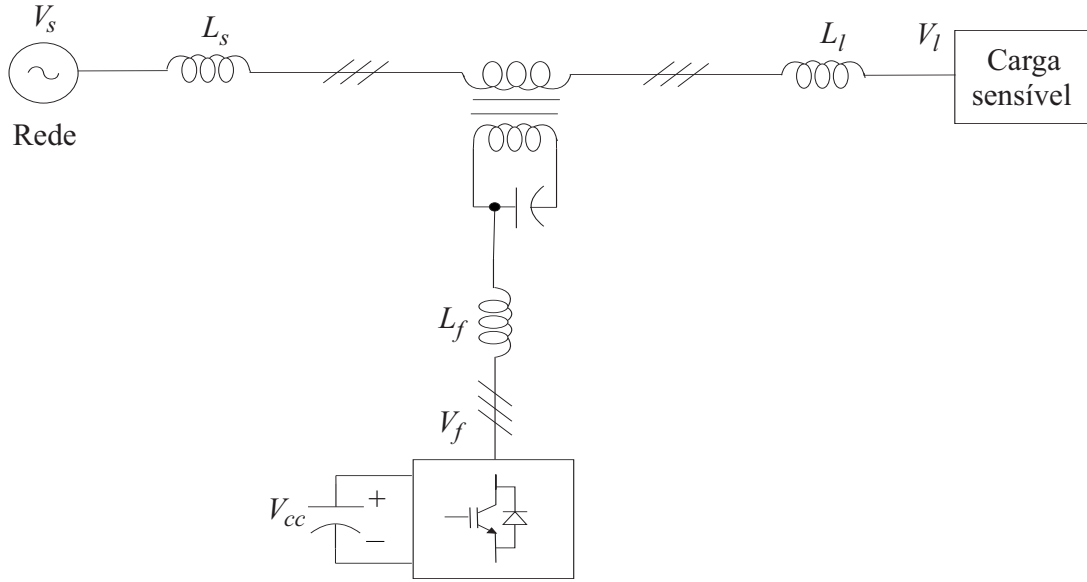
O FAP é uma alternativa ao FPP para mitigação de componentes harmônicos. Entretanto, apresentam um alto custo principalmente quando aplicados em potências mais elevadas. Deste modo, os FHPs têm despertado grande interesse de pesquisadores por aliar a flexibilidade e robustez dos FAP com o baixo custo dos FPP na compensação de harmônicos de corrente.

Na figura 12 é apresentado um FHP composto por FAP e FPP ambos conectados separadamente em paralelo ao sistema. Nesta topologia cada filtro opera de forma independente.

Na figura 13 é apresentado um FHP composto por FAP em série com um FPP, e ambos conectados em paralelo no PAC com a rede elétrica.

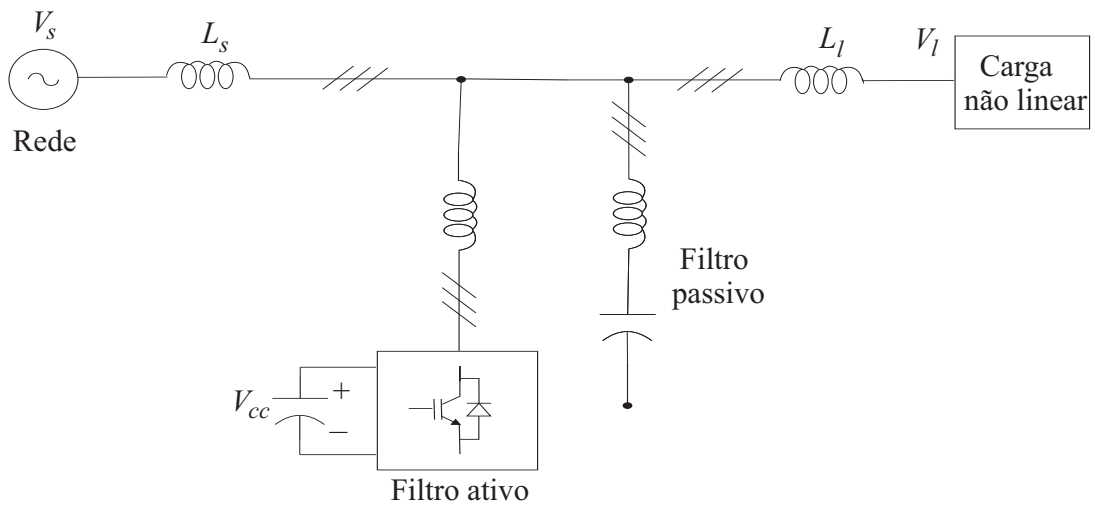
Em (AKAGI; SRIANTHUMRONG; TAMAI, 2003) foi realizada uma comparação entre o desempenho do filtro híbrido de potência paralelo e o filtro ativo paralelo puro; através de simulações e análises teóricas foi verificado que o filtro híbrido é mais eficiente, possui um *ripple* de chaveamento menor e necessita de um menor capacitor no lado CC do conversor em relação ao FAPP.

Figura 11 – Filtro ativo de potência série.



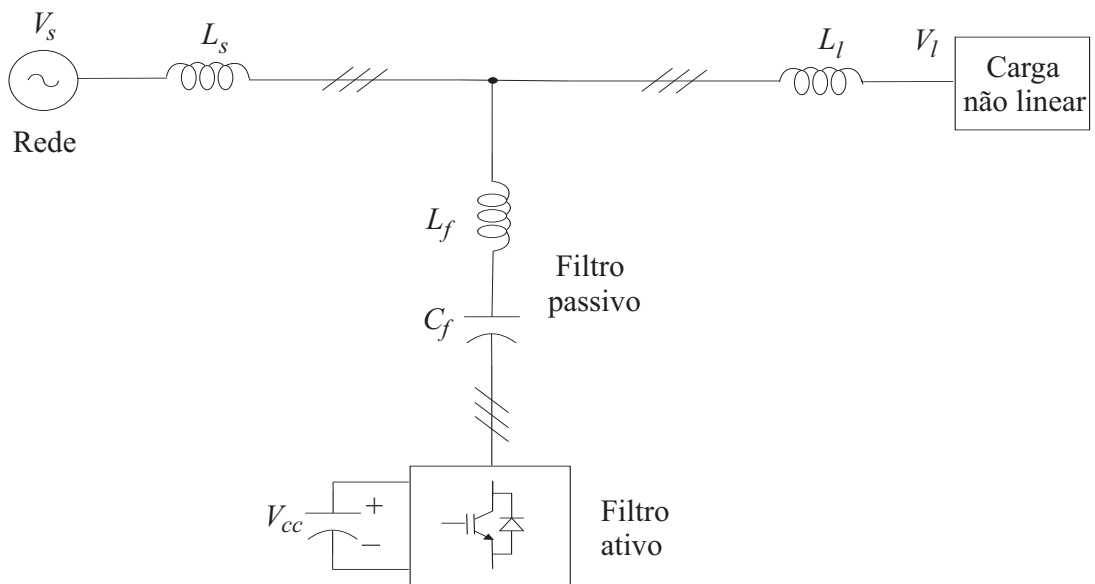
Fonte: próprio autor.

Figura 12 – Filtro híbrido composto por filtro ativo paralelo e filtro passivo paralelo.



Fonte: próprio autor.

Figura 13 – Filtro híbrido composto por filtro ativo em série com filtro passivo.



Fonte: próprio autor.

2.4 FILTRO UNIVERSAL

O UPQC, filtro universal, consiste em uma combinação de um FAPS com um FAPP em uma única estrutura com a capacidade de compensar praticamente todos os problemas relacionados à QEE a partir do seu ponto de instalação no sistema elétrico. Entretanto, devido as desvantagens de possuir um complexo sistema de controle e um alto custo o UPQC é utilizado em situações onde cargas não lineares são alimentadas por um mesmo barramento que contém cargas sensíveis.

Em (MORAN, 1989) foi proposto um dos primeiros sistemas com a capacidade de realizar o condicionamento simultâneo da corrente da rede elétrica e da tensão da carga em sistemas monofásicos, o qual foi denominado *Line Voltage Regulator Conditioner* (LVRC). Na sua configuração foram utilizados dois conversores fonte de corrente (CSI – *Current Source Inverter*) conectados num mesmo barramento CC.

Por conseguinte, foi possível comprovar a eficácia prática desses sistemas através de resultados experimentais obtidos através de um protótipo de 20 kVA alimentado por uma rede elétrica trifásica a três fios, no qual sua topologia foi composta por dois conversores fonte de tensão (VSI – *Voltage Source Inverter*) em que um destes tinha a finalidade de realizar a função de um filtro ativo série enquanto o outro era utilizado como um filtro ativo paralelo (FUJITA; AKAGI, 1998).

Existem várias topologias de UPQC, a mais comum é apresentada na figura 14, onde são utilizados dois VSIs compartilhando o mesmo barramento CC na tradicional configuração *back-to-back* em que um deles é conectado em série entre a fonte e a carga através de transformadores de acoplamento, FAPS, com a função de compensar distúrbios na tensão da carga e o outro é conectado em paralelo com a rede no PAC, FAPP, com a função de mitigar harmônicos de corrente da fonte.

3 ANÁLISE DO CONVERSOR DE NOVE CHAVES E TOPOLOGIAS DE CONVERSORES PARA IMPLEMENTAÇÃO DO DVR E DO FHP EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A QUATRO FIOS

Na tradicional configuração *back-to-back*, apresentada na figura 14, o barramento CC é dividido entre dois VSIs operando como compensadores série e paralelo. O conversor de potência com nove chaves foi proposto como uma topologia alternativa para substituir a tradicional configuração de conversor *back-to-back* que utiliza doze chaves.

Na tabela 1 é apresentado um comparativo entre as principais características das topologias de conversores *back-to-back* e nove chaves:

A eficácia do conversor nove chaves pode ser verificada em aplicações como UPQC (ZHANG; LOH; GAO, 2012), (GOMES, 2014) e FHP (LIMONGI et al., 2014).

Tabela 1 – Comparativo entre as topologias *back-to-back* e nove chaves.

	Conversor <i>back-to-back</i>	Conversor nove chaves
Comparativo entre as topologias	Possui doze chaves semicondutoras	Possui nove chaves semicondutoras
	Menor tensão no barramento CC	Maior tensão no barramento CC
	Dois VSIs dissociados	Limitação da amplitude das tensões de saída devido ao compartilhamento das chaves intermediárias

Fonte: (ZHANG; LOH; GAO, 2012).

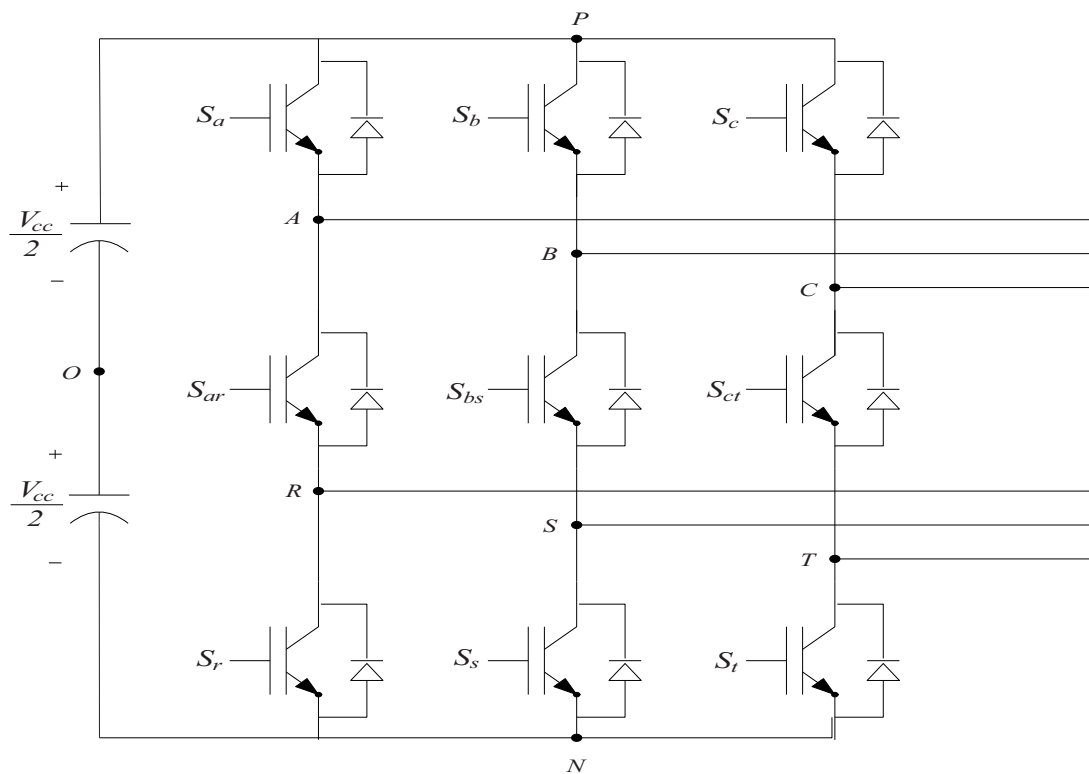
Além disto, o objetivo deste capítulo é apresentar as topologias tradicionais de conversores que possam suprimir os efeitos causados pela conexão de cargas monofásicas desbalanceadas ou afundamentos de tensão em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios, visto que as topologias aplicáveis em sistemas trifásicos a três fios possuem as limitações de realizarem compensações de afundamentos de tensão nas cargas sensíveis e harmônicos de corrente da rede apenas em sistemas equilibrados devido a limitações físicas das topologias e à ausência de um controle independente para cada uma das fases.

O intuito deste trabalho é estudar uma topologia alternativa de UPQC de doze chaves baseada na estrutura do conversor de nove chaves com a finalidade de realizar a compensação de afundamentos de tensão nas cargas sensíveis e harmônicos de corrente da fonte em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios. Para isto é necessário que haja um entendimento das topologias de FHP e DVR aplicáveis a sistemas trifásicos a quatro fios apresentadas neste capítulo que aliadas a um controle adequado possuem a funcionalidade de contornar tais problemas.

3.1 ANÁLISE DO CONVERSOR DE NOVE CHAVES

O conversor de nove chaves, apresentado na figura 15, foi proposto por (LIU et al., 2009) e (KOMINAMI; FUJIMOTO, 2007). Este conversor é constituído por três braços em que cada um deles está associado a uma fase, três chaves semicondutoras e duas saídas distintas, resultando no total de nove chaves contabilizando as três fases. As chaves superiores, unidade *top*, são chamadas de S_a , S_b e S_c , as inferiores, unidade *bottom*, são denominadas de S_r , S_s e S_t e, finalmente, as chaves intermediárias, utilizadas simultaneamente pelas unidades *top* e *bottom*, são denominadas de S_{ar} , S_{bs} e S_{ct} .

Figura 15 – Conversor de nove chaves.



Fonte: próprio autor.

Como a maioria das topologias alternativas que possuem quantidade de componentes reduzidos em relação as tradicionais, o conversor nove chaves enfrenta limitações impostas aos seus estados de comutação assumíveis, ao contrário da configuração *back-to-back* que possui doze chaves e possui dois VSIs desacoplados. Esses estados de comutação admissíveis são apresentados na tabela 2, onde não é possível que as saídas da unidade *top* tenham tensões inferiores as saídas da unidade *bottom*, portanto, constituindo uma limitação do conversor nove chaves. Essa limitação pode ser resolvida através da coordenação de duas referências de modulação por fase, de modo que as referências para as saídas da unidade *top* sejam sempre colocadas acima das referências para as saídas da unidade *bottom*. A imposição desta regra básica na colocação das referências resulta nos sinais de gatilho desenhados nas figuras 16 e 17,

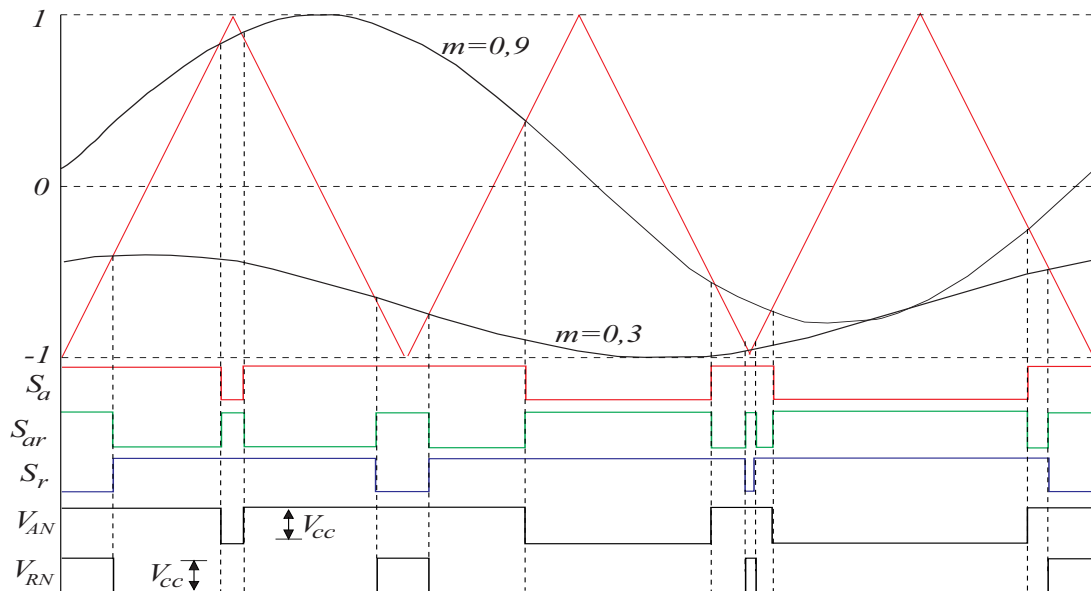
Tabela 2 – Estados das chaves e tensões nas saídas em um braço.

Estados das chaves			Tensão na saída	
S_a	S_{ar}	S_r	V_{AN}	V_{RN}
ON	ON	OFF	V_{cc}	V_{cc}
ON	OFF	ON	V_{cc}	0
OFF	ON	ON	0	0

Fonte: próprio autor.

em que cada braço do conversor é correspondente a uma fase, neste caso, representado pelas chaves S_a , S_{ar} e S_r (ZHANG; LOH; GAO, 2012).

Figura 16 – Sinais de gatilho de mesma frequência e amplitudes diferentes.

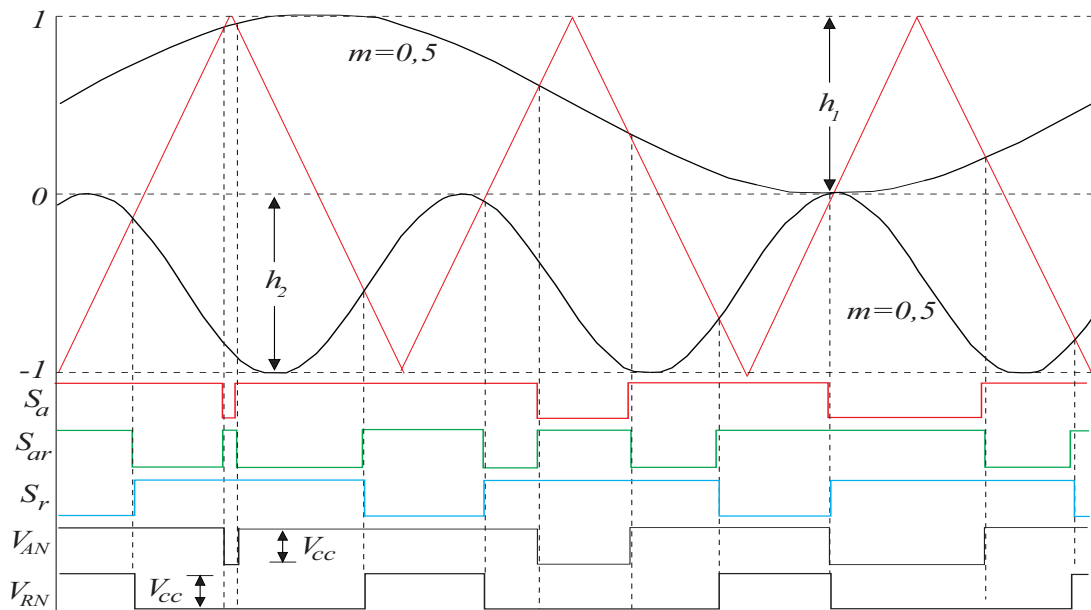


Fonte: (ZHANG; LOH; GAO, 2012).

Os sinais de gatilho para a realização da abertura e fechamento das chaves é gerado através do SPWM (Sinusoidal PWM):

- Os sinais de referência das chaves superiores, S_a , S_b e S_c , são comparados com a portadora, forma de onda triangular, e caso a respectiva referência superior seja maior que a portadora a chave está fechada, caso contrário está aberta.
- Os sinais de referência das chaves inferiores, S_r , S_s e S_t , são comparados com a portadora e caso a respectiva referência inferior seja menor que a portadora a chave está fechada, caso contrário está aberta.
- Os estados das chaves intermediárias são obtidos a partir da operação lógica ou-exclusivo (XOR) entre as respectivas chaves superiores e inferiores de cada braço do conversor.

Figura 17 – Sinais de gatilho de frequências diferentes e mesmas amplitudes.



Fonte: (ZHANG; LOH; GAO, 2012).

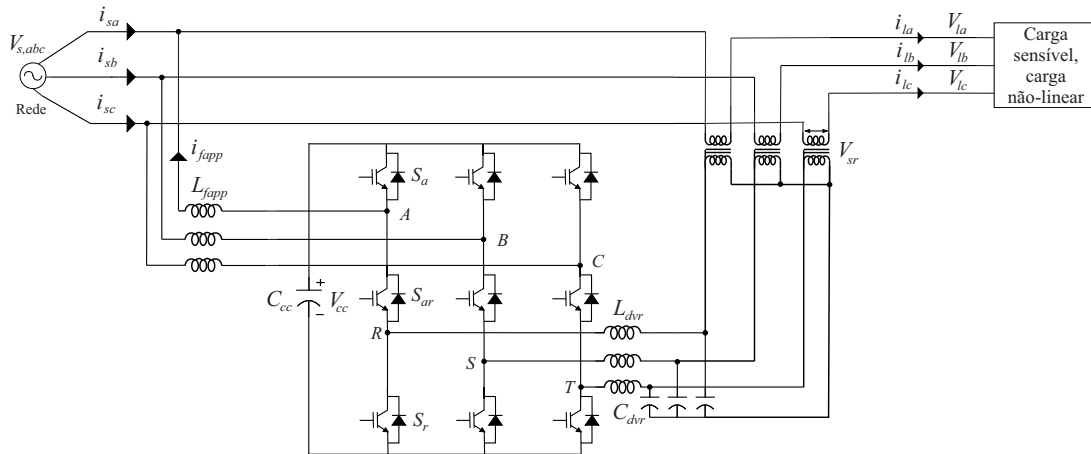
Todas as chaves de um mesmo braço não devem estar fechadas simultaneamente para não curto-circuitar o barramento CC.

$$S_{ar} = S_a \oplus S_r \quad (1)$$

A análise do conversor nove chaves como UPQC, figura 18, é diferente da configuração de conversores *back-to-back* por conta da sua fusão de funcionalidades para obtenção da redução de três chaves semicondutoras. No condicionador de energia de nove chaves, sob condições normais de operação, a amplitude da tensão de saída do conversor conectado em paralelo com a rede elétrica é bem maior que a do conversor conectado em série entre a rede e a carga. Isso significa que a faixa da referência de modulação necessária para o conversor em paralelo, h_1 , é muito maior que aquela associada com o conversor em série, h_2 (ZHANG; LOH; GAO, 2012). Entretanto, no momento em que houver um afundamento na tensão a faixa da portadora dedicada ao conversor em série, h_2 , vai aumentar proporcionalmente a severidade do afundamento, podendo durante esse período transitório se tornar maior que a faixa da portadora dedicada ao conversor paralelo, h_1 . Após ser restabelecido o regime permanente a situação volta ao descrito no início deste parágrafo. As transições das referências de modulação, podem ser visualizadas na figura 19.

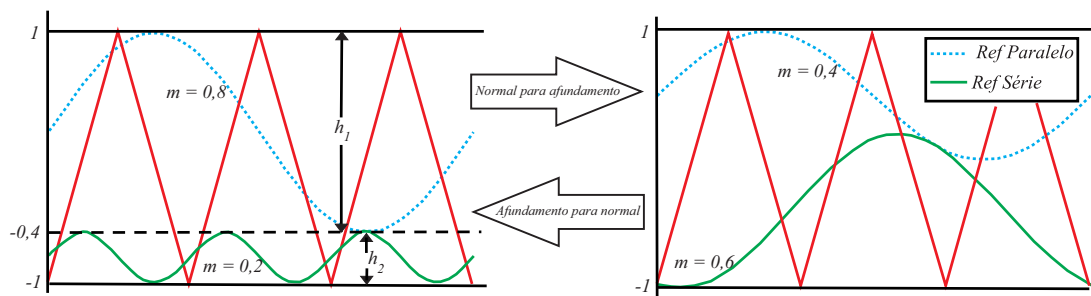
Conclui-se que o conversor de nove chaves como UPQC tem um funcionamento satisfatório em condições normais e de afundamento de tensão devido a sua sintonização complementar das referências série e paralelo dentro da faixa da portadora em comum.

Figura 18 – UPQC de nove chaves usando DVR e FAPP.



Fonte: próprio autor.

Figura 19 – Transição das referências de modulação.



Fonte: adaptado de (ZHANG; LOH; GAO, 2012).

3.2 TOPOLOGIAS DE CONVERSORES PARA IMPLEMENTAÇÃO DO FHP EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A QUATRO FIOS

Pelo método dos componentes simétricos, num sistema trifásico a soma das correntes de fase é igual à corrente de retorno pelo neutro, isto é:

$$i_a + i_b + i_c = i_n = 3i_0, \quad (2)$$

em que:

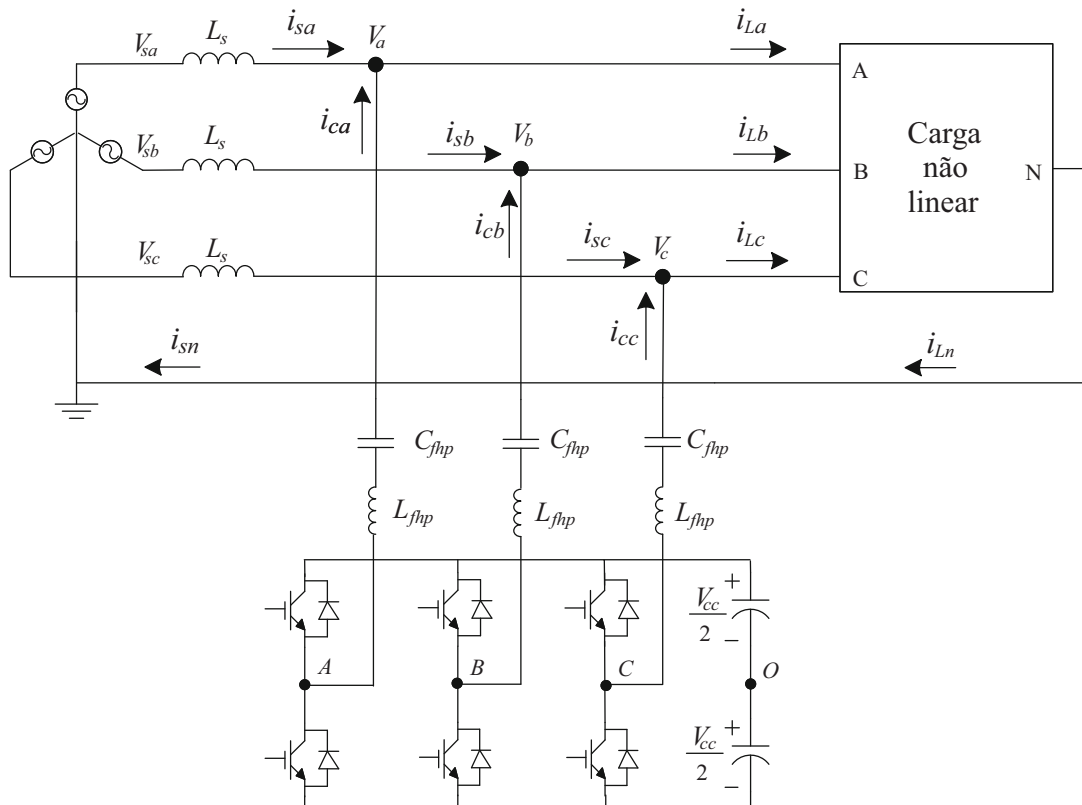
- i_a - corrente da fase a;
- i_b - corrente da fase b;
- i_c - corrente da fase c;
- i_n - corrente de neutro;
- i_0 - corrente de sequência zero.

Portanto, quando não houver retorno pelo neutro num sistema trifásico $i_n=0$, não existe componentes de sequência zero nas correntes de fase.

Na tradicional topologia de FHP, apresentada na figura 20, em que o neutro da carga não é conectado ao ponto central do barramento CC do conversor, a soma das correntes das fases no conversor é zero, conforme equação:

$$i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = 0 \quad (3)$$

Figura 20 – Topologia de FHP sem conexão do neutro da carga com o ponto central do barramento CC do conversor.



Fonte: próprio autor.

Na topologia de FHP com barramento CC dividido, apresentada na figura 21, em que o neutro da carga é conectado a derivação central do barramento CC, o somatório das correntes das fases no conversor é:

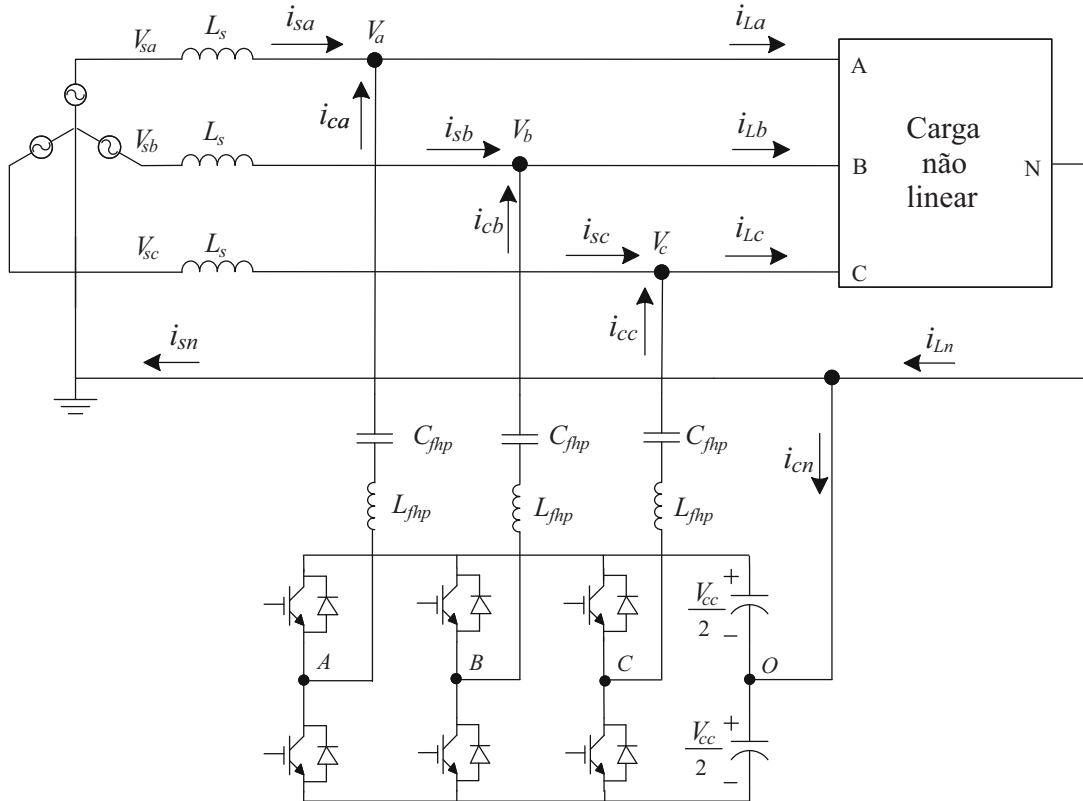
$$i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = i_{cn} \quad (4)$$

Em ambas as topologias citadas anteriormente nesta seção ao aplicarmos novamente o método dos componentes simétricos nas correntes da rede e da carga e a lei de *Kirchhoff* em uma das fases no PAC obtemos, respectivamente:

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} = i_{sn} \quad (5)$$

$$i_{la} + i_{lb} + i_{lc} = i_{ln} \quad (6)$$

Figura 21 – Topologia de FHP com conexão do neutro da carga ao ponto central do barramento CC do conversor.



Fonte: próprio autor.

$$i_{sa} + i_{ca} = i_{la} \quad (7)$$

Portanto substituindo (3), (5) e (6) em (7), obtemos:

$$i_{sa} + i_{sb} + i_{sc} + i_{ca} + i_{cb} + i_{cc} = i_{la} + i_{lb} + i_{lc}, \quad (8)$$

resultando em:

$$i_{sn} = i_{ln} \quad (9)$$

Deste modo, na topologia tradicional em que o neutro da carga não é conectado ao conversor, a corrente de neutro da rede é igual a corrente de neutro da carga uma vez que a corrente de sequência zero do conversor é nula. Comprovando que a topologia de FHP tradicional não é aplicável em sistemas trifásicos a quatro fios, pois não é capaz de suprimir harmônicos de corrente da fonte resultantes da conexão de cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.

Em contrapartida ao substituímos (4), (5) e (6) em (7), resulta em:

$$i_{sn} + i_{cn} = i_{ln}, \quad (10)$$

onde fica provado que a topologia de FHP apresentada na figura 21 em conjunto com um sistema de controle adequado permite que o conversor injete sinais para a realização do controle independente de cada uma das fases.

Num sistema trifásico a quatro fios à baixa QEE está relacionada diretamente com os altos valores de corrente que circulam pelo condutor de neutro e com os harmônicos de corrente gerados pelas cargas não lineares (POTDAR; CHOWHAN, 2011). Para que exista correntes circulando pelo condutor de neutro, obtida pela soma fasorial das correntes de fase, basta que as cargas não lineares estejam desbalanceadas ou que ocorra um desequilíbrio de tensão (GRUZS, 1990).

As principais topologias de FHP empregadas em sistemas trifásicos a quatro fios que permitem o controle da corrente de neutro são:

- Barramento CC dividido;
- Quatro braços.

3.2.1 Topologia de FHP com Barramento CC Dividido

Apresentada na figura 21, esta topologia é composta por um VSI trifásico com três braços em que cada um dos braços representa uma fase e o barramento CC é constituído por capacitores com uma derivação central onde é conectado diretamente o condutor de neutro. O ponto central do barramento CC onde o condutor de neutro é conectado possibilita um caminho para a circulação das correntes de neutro permitindo a aplicação desta topologia em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios.

A principal vantagem desta topologia é oriunda do fato do condutor de neutro ser conectado diretamente a derivação central do barramento CC que acarreta numa redução do número de chaves semicondutoras de potência, visto que não é necessária a adição de um novo braço ao conversor para a conexão do condutor de neutro. Contudo, esta topologia também apresenta inconvenientes devido as componentes de sequência zero das correntes da carga circularem pelos capacitores do barramento CC implicando em desbalanço de tensão, divisão não proporcional das correntes nos capacitores, que deve ser compensada por uma malha de controle adicional para esta finalidade. Também requer uma elevada tensão no barramento CC, além de necessitar de chaves semicondutoras que suportem maiores tensões de bloqueio.

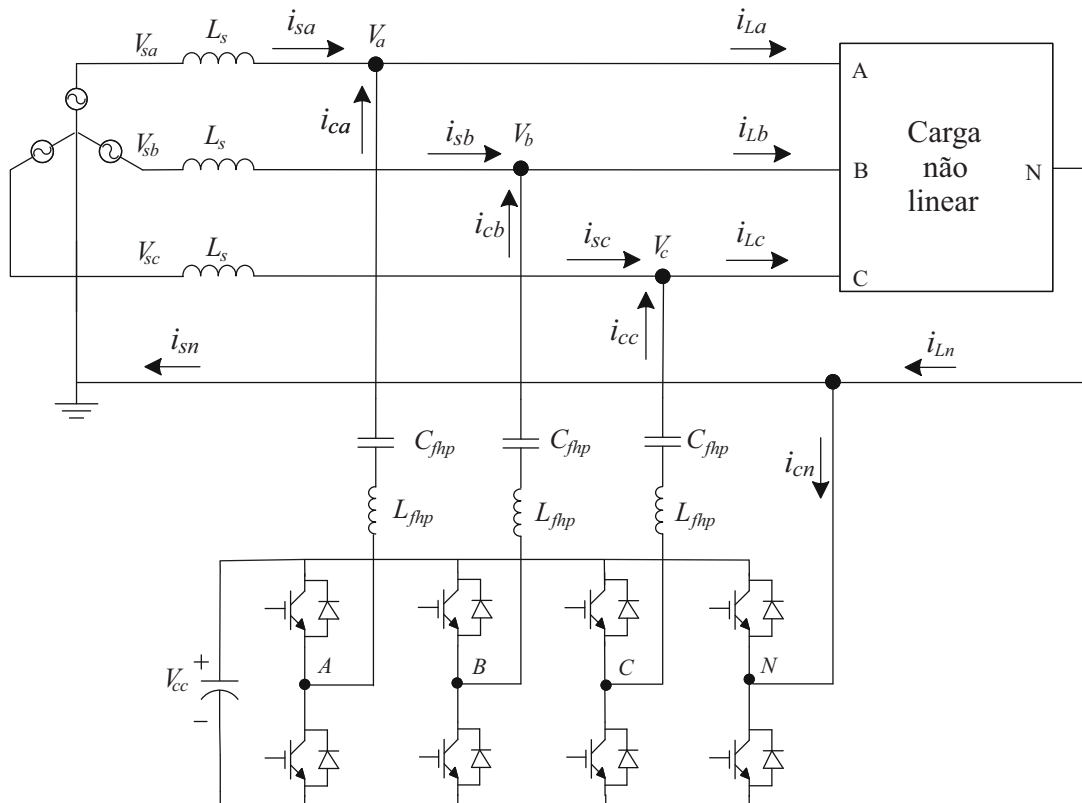
3.2.2 Topologia de FHP com Quatro Braços

Nesta topologia, apresentada na figura 22, o conversor apresenta três braços para conexão das fases da rede e um braço adicional para conexão do condutor de neutro, onde todos os braços compartilham o mesmo barramento CC. Esta configuração é apropriada para sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios, pois fornece um caminho de circulação para as correntes de sequência zero que podem ser compensadas através do correto chaveamento do braço adicional onde está conectado o condutor de neutro.

Necessita de uma tensão menor no barramento CC e possui uma melhor controlabilidade em relação a configuração com barramento CC dividido. Possui a vantagem de compensar as

correntes de neutro da rede sem reduzir o desempenho do filtro, assim sendo a configuração com quatro braços possui desempenho superior a configuração com barramento CC dividido em termos de capacidade de compensação de harmônicos e de funcionamento mesmo possuindo um maior número de chaves (QUINN; MOHAN; MEHTA, 1993).

Figura 22 – Topologia de FHP com quatro braços aplicável a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.



Fonte: próprio autor.

3.3 TOPOLOGIAS DE CONVERSORES PARA IMPLEMENTAÇÃO DO DVR EM SISTEMAS TRIFÁSICOS A QUATRO FIOS

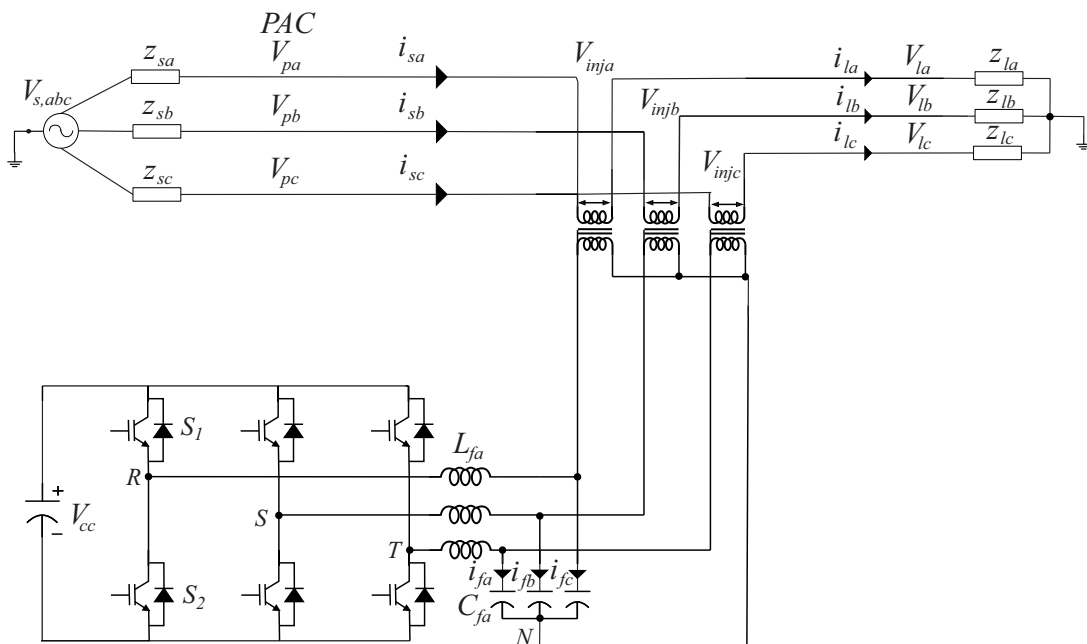
Afundamentos de tensão em redes de distribuição podem afetar negativamente os processos de produção das indústrias, como por exemplo as indústrias de fabricação de semicondutores e as indústrias químicas causando perdas financeiras substanciais (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007).

Predominantemente, na ocorrência de um afundamento de tensão no sistema de distribuição a tensão de alimentação trifásica torna-se desequilibrada com o aparecimento de componentes de sequência negativa e zero na rede. O desenvolvimento de compensadores série como o DVR com a capacidade de mitigar tais perturbações na tensão das cargas sensíveis é essencial para a manutenção da QEE.

Em instalações elétricas trifásicas que são alimentadas por transformadores conectados em estrela-delta ou delta-estrela aterrado, quando houver um afundamento de tensão no primário dos transformadores não acarretará na produção de componentes de sequência zero no secundário dos trafos (BOLLEN, 2000). Entretanto, numa indústria alimentada por um transformador na configuração delta-estrela aterrado, um curto-circuito monofásico ou bifásico à terra no lado de baixa tensão pode originar componentes de sequência zero nas cargas sensíveis. A presença de componentes de sequência zero pode ser bastante prejudicial as cargas sensíveis devido à elevação do potencial de neutro em relação ao de terra. Como exemplo pode-se citar as carcaças de motores, implicando em estresse excessivo no isolamento do equipamento levando a redução de sua vida útil.

A figura 23 apresenta a topologia tradicional do DVR aplicado em sistemas trifásicos a três fios, onde abordará a capacidade deste DVR na mitigação de componentes de sequência zero. A soma das tensões ou correntes de fase é igual a três vezes o valor da tensão ou corrente da componente de sequência zero, quando houver a existência de uma conexão estrela aterrado do lado do DVR.

Figura 23 – Tradicional topologia de DVR empregado em sistemas trifásicos a três fios.



Fonte: adaptado de (VILATHGAMUWA; WIJEKON, 2007).

As equações a seguir podem ser obtidas através do compensador série da figura 23 (VILATHGAMUWA; WIJEKON, 2007):

$$(V_{la} + V_{lb} + V_{lc}) = (V_{pa} + V_{pb} + V_{pc}) + (V_{inja} + V_{injb} + V_{inj c}) \quad (11)$$

$$3V_{l0} = 3V_{p0} + (V_{inja} + V_{injb} + V_{inj c}) \quad (12)$$

$$(i_{fa} + i_{fb} + i_{fc}) = -3ni_{l0} \quad (13)$$

$$(V_{inja} + V_{injb} + V_{inj c}) = -\frac{3n^2}{j\omega_0 C_f} i_{l0} - n^2(r_t + j\omega_0 l_t)3i_{l0}, \quad (14)$$

em que:

- V_{l0} - tensão da carga de sequência zero;
- V_{p0} - tensão de alimentação no PAC de sequência zero;
- i_{l0} - corrente da carga de sequência zero;
- n - relação de espiras do transformador de injeção;
- r_t - resistência do enrolamento do transformador de injeção;
- l_t - reatância de dispersão do transformador de injeção;
- C_f - capacitância do filtro;
- l_l - indutância da carga;
- r_l - resistência da carga.

Substituindo (14) em (12), obtemos:

$$3V_{l0} = 3V_{p0} - \frac{3i_{l0}n^2}{j\omega_0 C_f} - 3i_{l0}(r_t + j\omega_0 l_t)n^2 \quad (15)$$

Dividindo (15) por três, temos:

$$V_{l0} = V_{p0} - \frac{i_{l0}n^2}{j\omega_0 C_f} - i_{l0}(r_t + j\omega_0 l_t)n^2 \quad (16)$$

A corrente de sequência zero da carga pode ser representada por:

$$i_{l0} = \frac{V_{l0}}{z_l} \quad (17)$$

Substituindo (17) em (16), temos:

$$V_{l0} = V_{p0} - \frac{n^2 V_{l0}}{j\omega_0 C_f z_l} - \frac{n^2 (r_t + j\omega_0 l_t) V_{l0}}{z_l} \quad (18)$$

Separando todos os termos com V_{l0} de um mesmo lado da equação, obtemos:

$$V_{p0} = V_{l0} + \frac{n^2 V_{l0}}{j\omega_0 C_f z_l} + \frac{n^2 (r_t + j\omega_0 l_t) V_{l0}}{z_l} \quad (19)$$

Obtendo o menor múltiplo comum, colocando V_{l0} em evidência e depois o isolando, obtemos:

$$V_{l0} = \frac{(j\omega_0 C_f z_l) V_{p0}}{j\omega_0 C_f z_l + n^2 + n^2 r_t j\omega_0 C_f - n^2 \omega_0^2 l_t C_f}, \quad (20)$$

em que:

$$z_l = r_l + j\omega_0 l_l \quad (21)$$

Substituindo (21) no denominador de (20), obtemos:

$$V_{l0} = \frac{j\omega_0 C_f z_l V_{p0}}{j\omega_0 C_f r_l - \omega_0^2 C_f l_l + n^2 + n^2 r_t j\omega_0 C_f - n^2 \omega_0^2 l_t C_f} \quad (22)$$

Por fim, dividindo o numerador e o denominador de (22) por j e em seguida rearranjando a equação tem-se que:

$$V_{l0} = \frac{\omega_0 C_f z_l V_{p0}}{[\omega_0 C_f (r_l + n^2 r_t) + j\{\omega_0^2 C_f (l_l + n^2 l_t) - n^2\}]} \quad (23)$$

É notória a existência de uma tensão de sequência zero na carga quando um afundamento na tensão de alimentação contém componentes de sequência zero. Deste modo, a tensão compensada na carga torna-se desequilibrada. Através de (23) é possível verificar que não há nenhum termo que possa ser controlado pelo conversor para a realização da compensação de componentes de sequência zero na topologia apresentada na figura 23.

Em sistemas trifásicos a quatro fios há a necessidade que o DVR injete tensão de sequência zero para a compensação de componentes de sequência zero originadas por desequilíbrio de tensão. Deste modo existe a necessidade de um controle apropriado que considere a injeção dessas tensões na supressão de VTCD somadas a alterações na topologia do DVR.

Para compensar afundamentos de tensão contendo componentes de sequência zero, o DVR deve produzir uma componente de sequência zero que seja igual em amplitude e oposta em fase à componente de sequência zero presente na tensão de alimentação (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007).

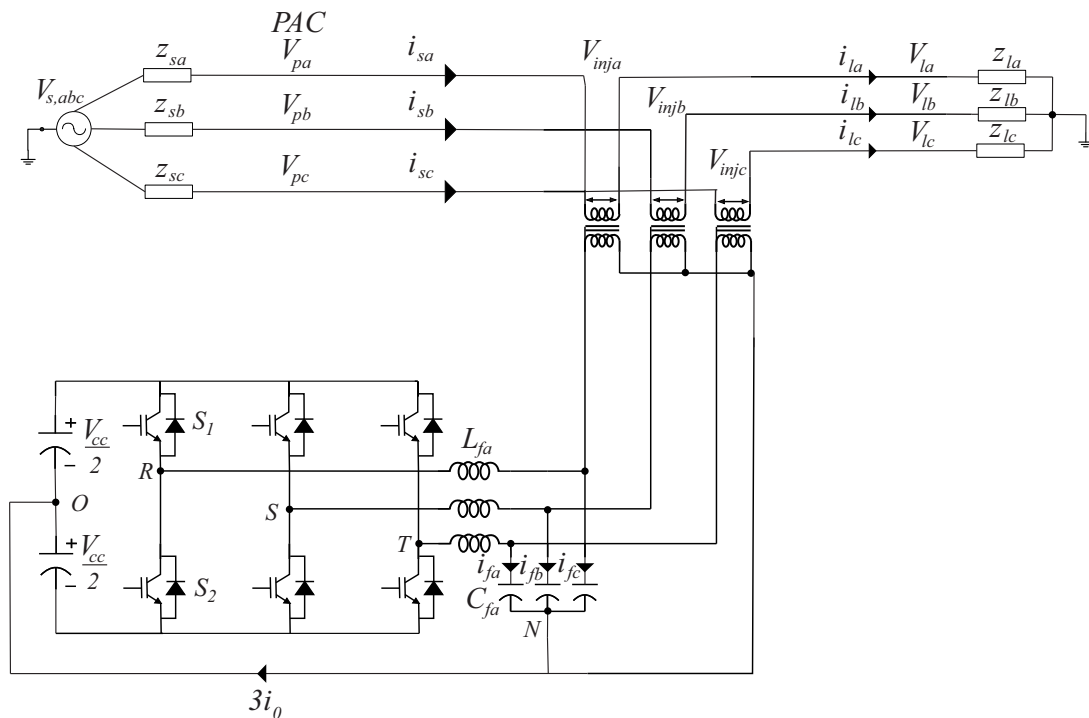
As principais topologias de DVR aplicáveis com esta finalidade são:

- Barramento CC dividido;
- Adição de um quarto braço ao conversor.

3.3.1 Topologia de DVR com Divisão do Barramento CC

A topologia, apresentada na figura 24, é uma das formas mais simples de capacitar o conversor a produzir tensões de sequência zero através da ligação do ponto comum dos capacitores do filtro do DVR e dos transformadores de injeção à derivação central do barramento CC, criando um caminho de circulação para a corrente de sequência zero que acarreta no desacoplamento das fases. A compensação por fase pode ser implementada por técnicas de controle adequadas.

Figura 24 – Topologia de DVR com barramento CC dividido aplicado a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.



Fonte: adaptado de (VILATHGAMUWA; WIJEKON, 2007).

Em regime permanente as equações a seguir podem ser obtidas para a componente de sequência zero do DVR com barramento CC dividido (VILATHGAMUWA; WIJEKON, 2007):

$$(V_{la} + V_{lb} + V_{lc}) = (V_{pa} + V_{pb} + V_{pc}) + (V_{inja} + V_{injb} + V_{injc}) \quad (24)$$

$$3V_{l0} = 3V_{p0} + (V_{inja} + V_{injb} + V_{injc}) \quad (25)$$

$$(V_{inja} + V_{injb} + V_{injc}) = n(V_{ca} + V_{cb} + V_{cc}) - n^2(r_t + j\omega_0 l_t)3i_{l0} \quad (26)$$

$$3i_o - 3ni_{l0} = j\omega_0 C_f (V_{ca} + V_{cb} + V_{cc}) \quad (27)$$

em que i_0 é a corrente de sequência zero no caminho comum NO da figura 24.

Substituindo (26) em (25), temos:

$$3V_{l0} = 3V_{p0} + n(V_{ca} + V_{cb} + V_{cc}) - n^2(r_t + jw_0l_t)3i_{l0} \quad (28)$$

Substituindo (27) em (28), temos:

$$3V_{l0} = 3V_{p0} + \frac{3ni_0 - 3n^2i_{l0}}{jw_0C_f} - n^2(r_t + jw_0l_t)3i_{l0} \quad (29)$$

A corrente de sequência da carga pode ser representada por:

$$i_{l0} = \frac{V_{l0}}{z_l} \quad (30)$$

Substituindo (30) em (29), temos:

$$3V_{l0} = 3V_{p0} + \frac{3ni_0}{jw_0C_f} - \frac{3n^2V_{l0}}{jw_0C_fz_l} - \frac{n^2(r_t + jw_0l_t)3V_{l0}}{z_l} \quad (31)$$

Dividindo (31) por três, isolando V_{p0} e obtendo o menor múltiplo comum, obtemos:

$$V_{p0} = \frac{jw_0C_fz_lV_{l0} - ni_0z_l + n^2V_{l0} + n^2(r_t + jw_0l_t)V_{l0}jw_0C_f}{jw_0C_fz_l} \quad (32)$$

Colocando V_{l0} em evidência e depois a isolando, temos:

$$V_{l0} = \frac{jw_0C_fz_lV_{p0} + ni_0z_l}{jw_0C_fz_l + n^2 + n^2r_tjw_0C_f - n^2w_0^2l_tC_f}, \quad (33)$$

em que:

$$z_l = r_l + jw_0l_l \quad (34)$$

Substituindo (34) no denominador de (33), obtemos:

$$V_{l0} = \frac{jw_0C_fz_lV_{p0} + ni_0z_l}{jw_0C_fr_l - w_0^2C_fl_l + n^2 + n^2r_tjw_0C_f - n^2w_0^2l_tC_f} \quad (35)$$

Por fim, dividindo o numerador e o denominador de (35) por j e em seguida rearranjando a equação tem-se que:

$$V_{l0} = \frac{[w_0C_fV_{p0} - jni_0]z_l}{[w_0C_f(r_l + n^2r_t) + j\{w_0^2C_f(l_l + n^2l_t) - n^2\}]} \quad (36)$$

Deste modo, se $w_0C_fV_{p0} = jni_0$, $V_{l0} = 0$.

A componente de tensão de sequência zero da carga pode ser compensada quando a condição acima ($w_0 C_f V_{p0} = jn i_0$) é satisfeita. Sob esta condição, a corrente de sequência zero flui através da conexão comum. A tensão de sequência zero injetada pelo DVR é igual em amplitude e oposta em fase à da fonte, de modo que a componente de sequência zero resultante seja nula. Consequentemente a tensão de sequência zero aparecendo na carga é teoricamente nula e a tensão da carga torna-se equilibrada (VILATHGAMUWA; WIJEKOON, 2007).

Entretanto, esta topologia possui alguns inconvenientes, tais como:

1. Redução da amplitude máxima das tensões trifásicas sintetizadas pelo conversor;
2. Possibilidade de desbalanço das tensões nos capacitores do barramento CC.

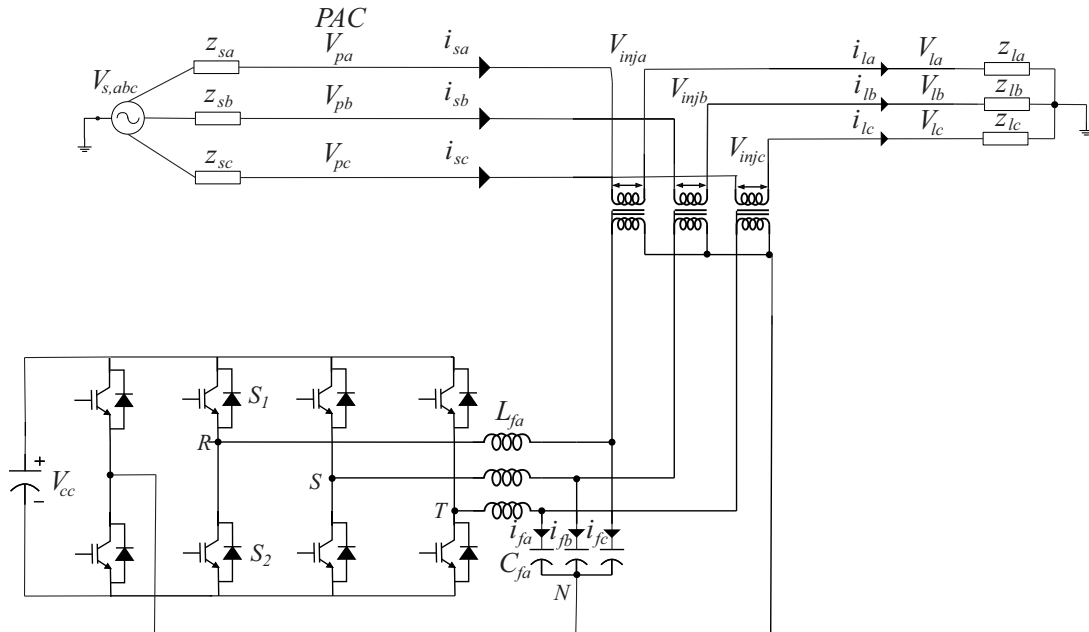
O primeiro inconveniente pode ser amenizado com o aumento da tensão do barramento CC e a segunda desvantagem exige uma estratégia de controle específica para minimizar o desbalanço de tensão no barramento CC.

3.3.2 Topologia de DVR com Adição de um Quarto Braço ao Conversor

Nesta topologia, apresentada na figura 25, o conversor possui um braço adicional em relação aos três braços já existentes da topologia tradicional com a finalidade de utilizá-lo para conexão do ponto comum dos capacitores do filtro e dos transformadores de injeção para fornecer um caminho para a circulação da corrente de sequência zero que juntamente com uma estratégia de controle adequada permite que o conversor realize a supressão de componentes de sequência zero em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios.

Esta topologia possui as vantagens de desacoplar o lado CC do lado CA e pelo fato da potência requerida pelo quarto braço, conectado ao condutor de neutro, ser menor que nos demais braços. A desvantagem é que necessita de um maior número de chaves semicondutoras em relação a topologia com barramento CC dividido.

Figura 25 – Topologia de DVR com quatro braços aplicado a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.



Fonte: adaptado de (VILATHGAMUWA; WIJEKON, 2007).

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo foi apresentado o conversor de nove chaves com seu princípio de funcionamento, modulação e restrições. Em seguida foi analisado o conversor de nove chaves como condicionador de energia e foi possível verificar que quando utilizado nas redes elétricas atuais em aplicações série-paralelo possui um bom desempenho, além de propiciar uma economia de uma chave semicondutora por braço em relação a tradicional topologia *back-to-back* visto que estas são as principais responsáveis pelos altos custos dos conversores.

Foi demonstrado que as topologias de FHP tradicionais aplicadas em sistemas trifásicos a três fios não permitem a supressão de harmônicos de correntes gerados por cargas não lineares monofásicas desbalanceadas em sistemas trifásicos a quatro fios devido ao fato de nessas configurações o conversor não poder controlar a corrente de neutro devido à ausência de um caminho para a circulação das mesmas somado a ausência de um controle apropriado para a efetivação dessa funcionalidade. Foram apresentadas as topologias mais usuais, e características de FHP que permitem um caminho para circulação das correntes de neutro que são as estruturas com barramento CC dividido e a com quatro braços.

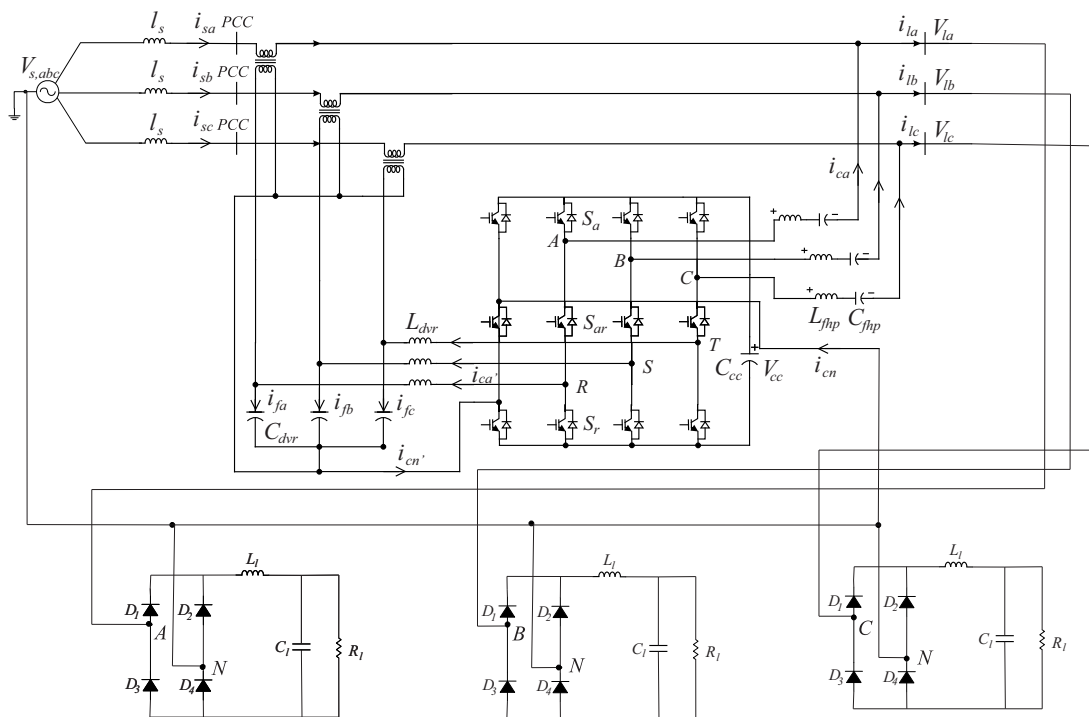
Foi demonstrado que a tradicional topologia de DVR empregada em sistemas trifásicos a três fios não consegue mitigar afundamentos de tensão desequilibrados. Em seguida foram apresentadas as principais topologias de DVR que têm bom desempenho na supressão de perturbações em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios por possibilitar em sua configuração um caminho de circulação para a corrente de sequência zero, desacoplando as fases

e permitindo a compensação de tensões desequilibradas.

4 TOPOLOGIA DE CONDICIONADOR DE ENERGIA DE DOZE CHAVES COM DVR E FHP

O objetivo deste capítulo é apresentar uma topologia de UPQC de doze chaves de custo reduzido, mostrada na figura 26, aplicável em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios. Na parte do conversor conectada em série entre a rede e a carga sensível foi utilizado um DVR com a finalidade de realizar a compensação de afundamentos de tensão, inclusive desequilibrados. Enquanto que na parte do conversor conectada em paralelo com a rede foi empregado um FHP com a função de mitigar os harmônicos de corrente da fonte, inclusive nos casos onde há a conexão de cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.

Figura 26 – Circuito completo do UPQC doze chaves: DVR e FHP.



Fonte: próprio autor.

O conversor de doze chaves como UPQC estudado neste trabalho possui um braço adicional em relação ao conversor de nove chaves, proposto em (ZHANG; LOH; GAO, 2012), para a conexão do neutro da carga na unidade *top* e do neutro do filtro de saída do DVR na unidade *bottom* com a finalidade de possibilitar a circulação das correntes de neutro, desacoplando as fases. Desta forma, com a inserção de um braço adicional na topologia do conversor de nove chaves juntamente com uma estratégia de controle adequada consegue-se adaptar a estrutura proposta em (GOMES, 2014) a realizar supressões na tensão e corrente em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios, conforme proposto na qualificação de doutorado de (GOMES, 2017).

Tabela 3 – Comparativo das principais topologias de conversores de nove chaves adaptadas para aplicações em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios

Comparativo de topologias de conversores de nove chaves adaptadas para sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios	
Barramento CC dividido	Adição de um quarto braço
As correntes de sequência zero circulam pelos capacitores implicando em desbalanço de tensão entre eles.	Compensação das correntes de neutro sem reduzir o desempenho do filtro.
Necessidade de uma estratégia de controle específica para compensar os desbalanços de tensão nos capacitores.	Desacopla o lado CC do lado CA.
Redução da amplitude máxima das tensões trifásicas sintetizadas pelo conversor.	O braço adicional tem uma potência inferior aos demais visto que é utilizado para conexão do condutor neutro.
Maior tensão no barramento CC.	Menor tensão no barramento CC.
Menor número de chaves semicondutoras.	Maior número de chaves semicondutoras.

Fonte: próprio autor.

O motivo pelo qual foi escolhida a topologia de conversor de nove chaves com a adição de um quarto braço, totalizando um conversor de doze chaves, foi devido a esta estrutura possuir mais vantagens quando comparada com a topologia com barramento CC dividido, conforme apresentado na tabela 3.

As modificações na estratégia de controle e físicas na configuração do conversor de nove chaves são importantíssimas porque permitem que ele injete componentes de sequência zero na rede elétrica. Esta funcionalidade é essencial nos sistemas de distribuição de energia elétrica em que o secundário do transformador normalmente está na configuração estrela-aterrado que deixa o sistema muito propício a incidência de desequilíbrios devido à grande quantidade de causas possíveis, tais como: conexão de cargas não lineares monofásicas desbalanceadas, curto-circuitos fase-terra, curto-circuitos bifásicos à terra, etc.

O FHP desta topologia é constituído de um FAPP em série com um FPP, com o objetivo de reduzir os custos, uma vez que possui menor tensão no barramento CC e o conversor possui potência reduzida em relação a um FAPP convencional. O FPP está sintonizado no sétimo harmônico e tem a finalidade de absorver as frequências harmônicas em torno de sua sintonia e mitigar o *ripple* de chaveamento. Enquanto que o FAPP atua como uma impedância dinâmica, alterando a largura de banda do FPP de modo a aumentar sua capacidade de absorção de harmônicos a uma faixa de harmônicos maior que sua frequência de sintonia.

4.1 ESTRATÉGIA DE CONTROLE

Nesta seção são descritas as estratégias de controle do DVR e do FHP do UPQC de doze chaves para mitigação dos afundamentos de tensão nas cargas sensíveis e harmônicos de corrente

da fonte, respectivamente, em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios. Antes de detalhar o funcionamento do controle do DVR e do FHP que são detalhados nas subseções 4.1.5 e 4.1.6, são estudados alguns elementos importantes nas subseções 4.1.1 até a 4.1.4 para o entendimento dos controles.

4.1.1 Transformada entre eixos de referência

Nesta subseção foram estudadas as transformadas entre eixos de referência que podem estar em determinado instante no referencial natural abc , estacionário $\alpha\beta 0$ ou síncrono $dq0$. Através das transformadas de Clarke e Park se torna possível a representação de variáveis trifásicas defasadas de 120° em eixos de referência estacionários e/ou síncronos.

4.1.1.1 Transformada de Clarke

Em sistemas trifásicos equilibrados a transformada de Clarke é responsável pela transformação das tensões e/ou correntes de um referencial natural abc para um sistema bifásico ortogonal com eixos de referência estacionários $\alpha\beta$. Contudo, no caso dos sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios os eixos de referência estacionários $\alpha\beta 0$ possuem três sinais em quadratura em que um desses sinais é a componente de sequência zero.

A transformada de Clarke do referencial natural abc para o referencial estacionário $\alpha\beta 0$ é dada por:

$$\begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} \quad (1)$$

A transformada inversa de Clarke do referencial estacionário $\alpha\beta 0$ para o referencial natural abc é dada por:

$$\begin{pmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

Em ambas as equações desta subsubseção x representa uma tensão ou corrente.

4.1.1.2 Transformada de Park

A transformada de Park converte sinais alternados de frequências fundamentais em sinais contínuos, é utilizada para a realização da transformação de tensões ou correntes do referencial estacionário $\alpha\beta 0$ para o referencial síncrono $dq0$.

A transformada de Park do referencial estacionário $\alpha\beta 0$ para o referencial síncrono $dq0$ é dada por:

$$\begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \text{sen}(\theta) & 0 \\ -\text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

A transformada inversa de Park do referencial síncrono $dq0$ para o referencial estacionário $\alpha\beta 0$ é dada por:

$$\begin{pmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \\ x_0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & -\text{sen}(\theta) & 0 \\ \text{sen}(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Em ambas as equações desta subsubsecção x representa uma tensão ou corrente.

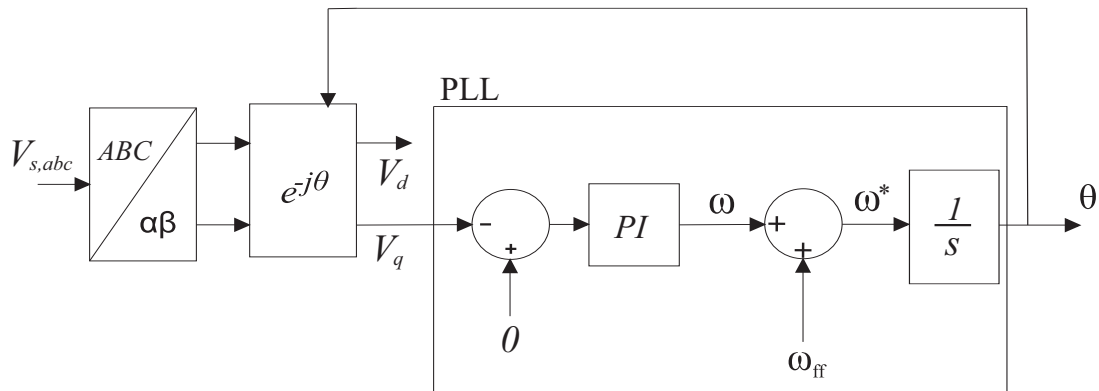
4.1.2 PLL

Para a realização da transformada de Park é necessário determinar o ângulo θ que estabelece as posições dos eixos d e q do referencial síncrono que normalmente está em sincronismo com o vetor tensão da rede elétrica. Logo, para determinar o ângulo θ usa-se um sistema chamado PLL (*Phase Locked Loop*) que tem a finalidade de calcular o módulo e o ângulo do vetor tensão.

A entrada do PLL, cujo o diagrama de blocos é apresentado na figura 27, é constituída pela tensão da rede no referencial natural abc que através das transformações de Clarke e Park são transformadas para o referencial síncrono $dq0$, onde é utilizado um controlador PI para fazer com que V_q vá para seu valor de referência que é zero. Na saída do controlador PI é obtida a velocidade angular w que é integrada para determinação do ângulo θ que é realimentado para o bloco onde é realizada a transformação do referencial estacionário $\alpha\beta 0$ para o referencial síncrono $dq0$. O comando direto de frequência ω_{ff} é inserido como forma de melhorar o desempenho do sistema uma vez que a frequência da rede elétrica é conhecida e seu valor sujeito a apenas pequenos desvios, a inclusão do comando direto faz com que o PI possa operar apenas corrigindo esses pequenos desvios.

Assim sendo, com a tensão de eixo em quadratura V_q convergindo para zero o PLL consegue fazer com que a tensão de eixo direto V_d seja o valor da amplitude das tensões e gire na mesma frequência dos sinais de entrada.

Figura 27 – Sistema PLL.



Fonte: próprio autor.

4.1.3 Controladores

A introdução de um controlador em um determinado sistema visa a modificação de sua dinâmica, manipulando a relação entrada/saída através da atuação sobre um ou mais dos seus parâmetros, com o objetivo de satisfazer certas especificações com relação a sua resposta (OGATA, 2003).

Nas subsubseções seguintes foram estudados os controladores utilizados nos controles do DVR e FHP do UPQC de doze chaves.

4.1.3.1 Controlador Proporcional-Integral

O controlador Proporcional-Integral (PI) é presente em diversos sistemas de eletrônica de potência, principalmente em conversores CC-CC, por sua facilidade de projeto e garantia de erro nulo a referências contínuas. Já nas aplicações em que as referências são senoidais, o controlador PI, quando aplicado em eixo estacionário $\alpha\beta 0$, não garante o seguimento de referência com erro nulo nem rejeição de perturbação em tal frequência (ANDRETA et al., 2014)

O controlador PI possui a ação proporcional que minimiza o sinal de erro e a ação integral que é responsável por eliminar o erro em referências contínuas. Sua função de transferência é dada por:

$$G_{PI}(s) = K_p + \frac{K_i}{s}, \quad (5)$$

em que:

- K_p - ganho proporcional do controlador PI;
- K_i - ganho integral do controlador PI.

Nesta dissertação o controlador PI é utilizado no controle de tensão do barramento CC que é realizado pela ação de controle *feedback* do FHP do UPQC de doze chaves. Em que, $K_p=1,6$ e $K_i=5$.

4.1.3.2 Controlador proporcional-ressonante

O controlador Proporcional-Ressonante (PR) foi proposto inicialmente como um regulador de sinais senoidais (ZMOOD; HOLMES; BODE, 2001). O controlador PR atua introduzindo um ganho infinito para eliminar o erro de regime permanente do sinal rastreado e/ou rejeitar as perturbações nas frequências de ressonâncias selecionadas.

No domínio da frequência complexa a função de transferência do controlador PR ideal é dada por:

$$G_{PR}(s) = K_p + \frac{2K_i s}{s^2 + w_0^2}, \quad (6)$$

em que:

- K_p - ganho proporcional do controlador PR;
- K_i - ganho integral do controlador PR;
- w_0 - frequência de ressonância do controlador PR.

Os controladores PR que são projetados no sistema de coordenadas estacionário, podem ser utilizados para garantir que uma determinada componente harmônica de sequência positiva ou negativa seja rastreada com erro de regime permanente nulo com objetivo de compensar um desbalanço da rede elétrica (ZMOOD; HOLMES; BODE, 2001).

Para aplicações de inversores trifásicos conectados à rede, o controlador PR está entre as escolhas mais aplicadas atualmente. Seu projeto é simples, de fácil implementação, não necessita de transformações de eixos síncronos, garante erro nulo em regime na frequência sintonizada e rejeita perturbações das frequências harmônicas específicas presentes na rede quando os termos harmônicos são adicionados (ANDRETA et al., 2014).

Como pontos negativos, o controlador PR, de forma geral, resulta em uma dinâmica lenta em relação a outras estratégias. Quando é utilizado apenas um controlador sintonizado na frequência fundamental, o sistema apresenta baixa rejeição de perturbação das harmônicas contidas na tensão da rede. Para um funcionamento adequado, é tipicamente necessário somar parcelas ressonantes sintonizadas nas frequências das perturbações existentes no sistema (ANDRETA et al., 2014).

No controle do compensador série do UPQC de doze chaves foi utilizado um controlador PR para cada eixo do referencial estacionário $\alpha\beta 0$ sintonizado na frequência fundamental e no terceiro componente harmônico (componentes de sequência zero):

$$G_{dvr}(s) = K_{p_dvr} + \frac{2K_{i_dvr}s}{s^2 + w_0^2} + \frac{2K_{i_dvr}s}{s^2 + w_3^2}, \quad (7)$$

em que $K_{p_dvr}=0,5$ e $K_{i_dvr}=1$. Esses valores dos ganhos foram obtidos empiricamente.

No controle da parte do conversor do UPQC de doze chaves conectado em paralelo com a rede foi utilizado um controlador PR para cada eixo do referencial estacionário $\alpha\beta 0$ sintonizado no terceiro, quinto, sétimo, décimo primeiro e décimo terceiro componente harmônico:

$$G_{fhp}(s) = K_{p_fhp} + \frac{2K_{i_fhp}s}{s^2 + w_3^2} + \frac{2K_{i_fhp}s}{s^2 + w_5^2} + \frac{2K_{i_fhp}s}{s^2 + w_7^2} + \frac{2K_{i_fhp}s}{s^2 + w_{11}^2} + \frac{2K_{i_fhp}s}{s^2 + w_{13}^2}, \quad (8)$$

em que $K_{p_fhp}=16$ e $K_{i_fhp}=720$. Esses valores dos ganhos foram obtidos empiricamente.

4.1.4 Geração das tensões de referências das fases e do neutro

Antes de explicar o funcionamento do controle do conversor de doze chaves como UPQC que será detalhado nas próximas subseções deste capítulo é primordial destacar que ao se utilizar um conversor com um braço adicional com a função de controlar as correntes de neutro é necessário se empregar uma técnica de modulação adequada para a geração das tensões de referência das fases e do neutro. Neste trabalho é utilizada uma técnica adaptada para conversores de quatro braços proposta em (PO-NGAM, 2014).

Tanto no controle série como no paralelo pode se gerar as tensões de referência do neutro através da equação:

$$V_{ref_n} = \frac{-(V_{max} + V_{min})}{2}, \quad (9)$$

em que:

- V_{max} - maior valor da tensão de referência produzida pelo sistema de controle do conversor entre as três fases.
- V_{min} - menor valor da tensão de referência produzida pelo sistema de controle do conversor entre as três fases.

As tensões de referências finais a serem sintetizadas pelos controles tanto do conversor série quanto do paralelo nas fases a, b e c, respectivamente, são dadas pelas equações:

$$V_{ref_final_a} = V_{ref_a} + V_{ref_n} \quad (10)$$

$$V_{ref_final_b}=V_{ref_b}+V_{ref_n} \quad (11)$$

$$V_{ref_final_c}=V_{ref_c}+V_{ref_n} \quad (12)$$

em que:

- V_{ref_a} -tensão de referência obtida através do sistema de controle do conversor na fase A.
- V_{ref_b} -tensão de referência obtida através do sistema de controle do conversor na fase B.
- V_{ref_c} -tensão de referência obtida através do sistema de controle do conversor na fase C.

4.1.5 Controle do DVR

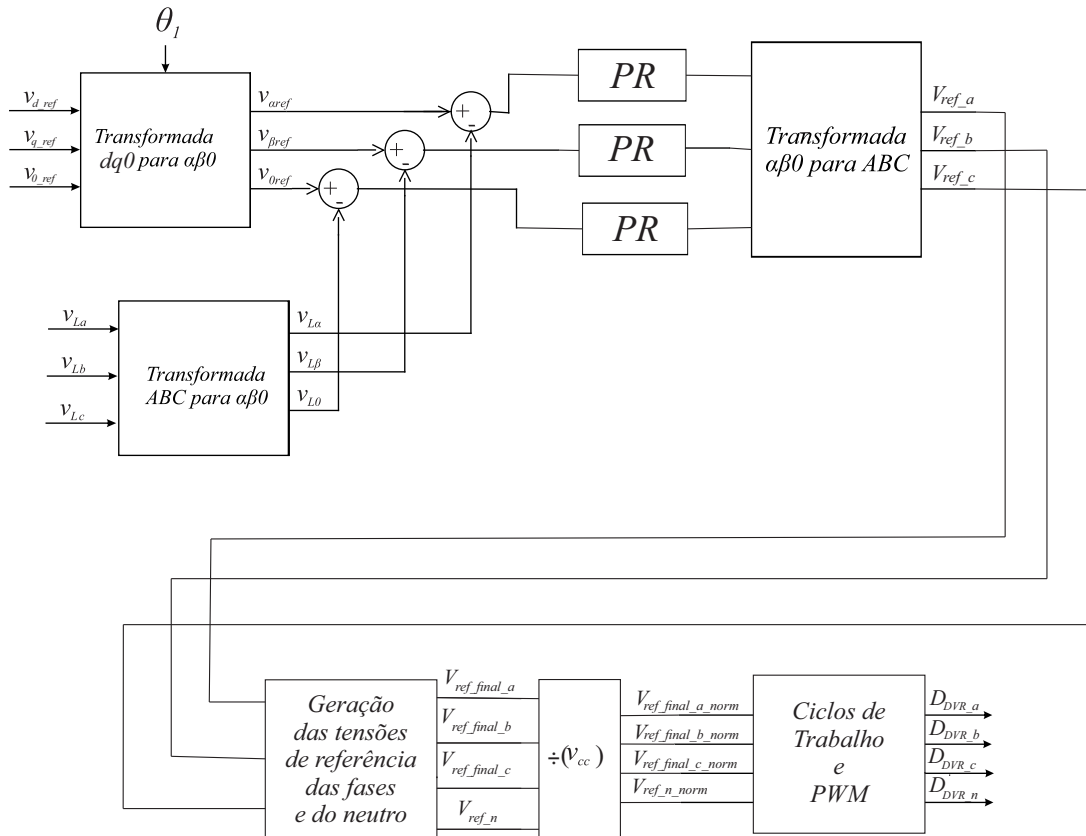
Na topologia do UPQC de nove chaves proposta em (GOMES, 2014) o FHP foi conectado antes do DVR, mas essa configuração aumenta bastante as correntes no conversor durante a ocorrência de afundamento de tensão. Portanto, no UPQC de doze chaves estudado neste trabalho, o DVR é conectado antes do FHP conforme apresentado na figura 26.

No UPQC estudado neste trabalho, o objetivo do controle da parte do conversor de doze chaves conectado em série entre a rede e a carga sensível é a realização da compensação de afundamentos de tensão em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios através de uma estratégia de controle que permita a injeção de sinais independentes de acordo com a necessidade em cada uma das fases. A parte do conversor de doze chaves como UPQC que corresponde ao DVR é constituída pela unidade *bottom* e pelas chaves intermediárias deste conversor que também são compartilhadas pela unidade *top*.

No esquema de controle do DVR, apresentado na figura 28, as entradas são constituídas pelas tensões de referências que são valores constantes e pelas tensões medidas na carga em referencial natural *abc*. Essas entradas do controle do DVR são transformadas para o referencial estacionário $\alpha\beta 0$ para terem os valores dos respectivos eixos de referências comparados de modo que o erro em cada eixo do referencial $\alpha\beta 0$ seja utilizado na entrada de um controlador PR. Na saída de cada controlador PR são determinadas as compensações de tensão necessárias para cada eixo do referencial estacionário $\alpha\beta 0$ para suprir o respectivo afundamento de tensão. Esses valores determinados para a compensação que foram estabelecidos no referencial estacionário $\alpha\beta 0$ são transformados para o referencial natural *abc* onde são definidos os valores de compensação necessários em cada uma das fases. Esses valores de compensação obtidos em cada uma das fases são somados com a tensão de referência do neutro para obtenção dos valores de referências finais a serem sintetizados pelo conversor.

Após isto, ainda em referencial natural *abc*, as saídas do controle do DVR que são as tensões de referências finais nas fases e a tensão de referência de neutro são normalizadas em

Figura 28 – Esquema de controle do DVR aplicado a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios.



Fonte: próprio autor.

relação a tensão medida no barramento CC para serem produzidos os ciclos de trabalho das chaves da unidade *bottom* que são obtidas através das equações:

$$D_{DVR_a} = V_{ref_final_a_norm} + 0,5 \cdot M_{DVR} \quad (13)$$

$$D_{DVR_b} = V_{ref_final_b_norm} + 0,5 \cdot M_{DVR} \quad (14)$$

$$D_{DVR_c} = V_{ref_final_c_norm} + 0,5 \cdot M_{DVR} \quad (15)$$

$$D_{DVR_n} = V_{ref_n_norm} + 0,5 \cdot M_{DVR}, \quad (16)$$

em que:

- D_{DVR_i} - ciclo de trabalho das chaves semicondutoras da unidade *bottom*;
- $V_{ref_final_i_norm}$ - tensão de referência final normalizada da fase *i*;

- $V_{ref_n_norm}$ - tensão de referência normalizada do neutro;
- M_{DVR} - parcela da portadora utilizada pelo DVR, que pode possuir valores que variam de 0 até 1.

Visto que M_{DVR} representa a parcela da portadora dedicada ao DVR, conclui-se que $0,5 \cdot M_{DVR}$ tem a função de centralizar o sinal de controle dentro da faixa da portadora dedicada ao DVR. Além disto, os ciclos de trabalho são saturados de modo a não ultrapassarem nem o limite superior nem o limite inferior da faixa da portadora dedicada ao DVR.

Os ciclos de trabalhos produzidos para cada uma das fases e para o neutro são utilizados na geração de pulsos de SPWM pela comparação dos sinais de referência com a portadora triangular que possui frequência de chaveamento de 20 KHz, e caso a respectiva referência da unidade *bottom* seja menor que a portadora a chave está ativa, caso contrário está inativa.

4.1.6 Controle do FHP

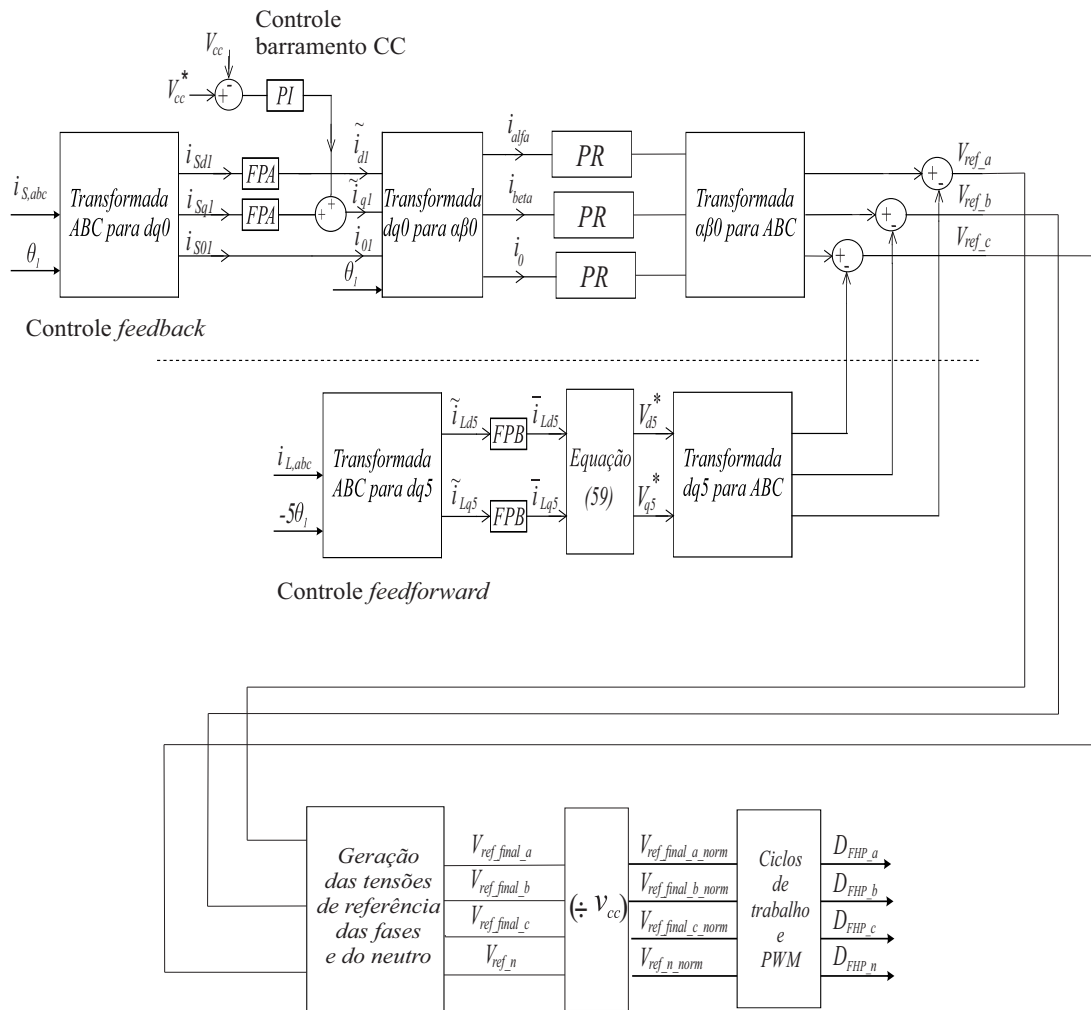
No UPQC estudado neste trabalho, apresentado na figura 26, o objetivo do controle da parte do conversor de doze chaves conectado em paralelo com as cargas não lineares monofásicas desbalanceadas é a realização da mitigação dos harmônicos de corrente da fonte em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios através de uma estratégia de controle que permita que o conversor injete correntes de compensação, incluindo correntes de sequência zero, para supressão dos harmônicos de corrente da rede em sistemas desequilibrados. A parte do conversor de doze chaves como UPQC que corresponde ao FHP é constituída pela unidade *top* e pelas chaves intermediárias deste conversor que também são compartilhadas pela unidade *bottom*.

O FHP estudado é constituído de um FAPP em série com um filtro LC, por fase, sintonizado na sétima componente harmônica. Os motivos para a seleção da sétima componente harmônica são:

1. O filtro LC sintonizado na sétima componente harmônica é menos volumoso e menos dispendioso do que o sintonizado na quinta frequência harmônica;
2. O filtro sintonizado na sétima frequência harmônica apresenta impedâncias mais baixas em torno das décima primeira e décima terceira frequências harmônicas que um filtro sintonizado na quinta componente harmônica (SRIANTHUMRONG; AKAGI, 2002).

No esquema de controle do FHP, apresentado na figura 29, as entradas são constituídas pelas correntes medidas na rede (ação de controle *feedback*), correntes medidas na carga (ação de controle *feedforward*), tensão medida e de referência do barramento CC (controlar a tensão do barramento CC) e da tensão da rede para encontrar o ângulo θ utilizado nas transformações de referenciais.

Figura 29 – Esquema de controle do FHP aplicado a sistemas elétricos trifásicos a quatro fios .



Fonte: próprio autor.

4.1.6.1 Ação de controle feedback

O objetivo da ação de controle *feedback* é mitigar perturbações das frequências harmônicas específicas presentes na rede, além de controlar a tensão do barramento CC.

Para realização da ação de controle *feedback* as correntes da rede, $i_{S,abc}$, são medidas e em seguida transformadas do referencial natural *abc* para o referencial síncrono *dq0*. As correntes da rede de eixo direto, i_{Sd1} , e em quadratura, i_{Sq1} , passam cada uma por um filtro passa-alta com frequência de corte de 16Hz que permite apenas a passagem das componentes oscilantes da corrente da rede nos eixos de referências *d1* e *q1*. Após isto, essas correntes da rede no referencial síncrono *dq0* são transformadas para o referencial estacionário $\alpha\beta0$ para que cada eixo deste novo referencial passe pela entrada de um controlador PR sintonizado nas frequências harmônicas existentes no sistema, de modo que as saídas dos controladores PR no referencial estacionário $\alpha\beta0$ são transformadas para o referencial natural *abc* para produção das tensões de referência da ação de controle *feedback*.

Na ação de controle *feedback* também é realizado o controle da tensão do barramento CC. A tensão de referência e a tensão medida no barramento CC são comparadas e o erro passa pela entrada de um controlador PI com a finalidade de extinguir o erro em referências contínuas. A saída do controlador PI é somada as componentes oscilantes da corrente da rede de eixo em quadratura.

4.1.6.2 Ação de controle feedforward

A ação de controle *feedforward* é utilizada para compensar exclusivamente a quinta harmônica, uma vez que o filtro LC está sintonizado na sétima harmônica que o leva naturalmente a possuir uma baixa impedância em torno da sua frequência de sintonia. A finalidade deste controle é fazer com que o filtro LC também apresente baixa impedância para a quinta harmônica evitando sua circulação pela rede, de modo que essa estratégia de controla suprima a impedância natural do filtro LC para a quinta harmônica.

Para viabilizar esta ação de controle é necessário gerar componentes contínuas para o quinto harmônico através da sincronização do seu referencial na sequência negativa com valor de cinco vezes a frequência fundamental da rede elétrica para gerar uma componente contínua para componentes harmônicas de quinta ordem.

Ao aplicar a transformada de Laplace na impedância do FHP, Z_F , temos:

$$Z_F(s) = R_F + sL_F + \frac{1}{sC_F} \quad (17)$$

Substituindo em (17) a variável complexa s por $s + jw_5$, temos:

$$Z_F(s + jw_5) = R_F + (s + jw_5)L_F + \frac{1}{(s + jw_5)C_F} \quad (18)$$

Considera-se $s = 0$ para obtenção da impedância em regime permanente:

$$Z_{F5} = R_F + (jw_5)L_F + \frac{1}{(jw_5)C_F} \quad (19)$$

Assim sendo, em função da impedância do filtro obtemos a tensão referente as frequências harmônicas de quinta ordem:

$$v_{F5}^* = \left\{ R_F + j\left(w_5L_F - \frac{1}{w_5C_F}\right) \right\} i_{L5}, \quad (20)$$

em que i_{L5} corresponde à quinta componente harmônica das correntes das cargas não lineares.

A equação (20) pode também ser escrita na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} v_{d5}^* \\ v_{q5}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_F & \left(-w_5L_F + \frac{1}{w_5C_F}\right) \\ \left(w_5L_F - \frac{1}{w_5C_F}\right) & R_F \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{Ld5} \\ i_{Lq5} \end{bmatrix} \quad (21)$$

Na ação de controle *feedforward* as correntes da carga, $i_{L,abc}$, são medidas e transformadas do referencial natural *abc* para o referencial síncrono $dq5$ de quinto harmônico de corrente. Em seguida, é utilizado um filtro passa-baixa com frequência de corte de 16Hz que permite apenas a passagem da parte contínua do sinal nos eixos de referência $d5$ e $q5$. Após isto, através de (21) são obtidas as tensões de referência da ação de controle *feedforward* que são transformadas para o referencial natural *abc*.

Por fim, as tensões de referência da ação de controle *feedback* são subtraídas das tensões de referência da ação de controle *feedforward*, que somadas a tensão de referência do neutro fornecem ao conversor a tensão de referência final a ser sintetizada em cada uma das fases e no neutro.

Uma vez obtidas as tensões de referência finais nas fases e a tensão de referência do neutro, estas são normalizadas em relação a tensão medida no barramento CC para serem produzidos os ciclos de trabalho das chaves da unidade *top* que são obtidas através das seguintes equações:

$$D_{FHP_a} = V_{ref_final_a_norm} + 0,5 \cdot (1 - M_{DVR}) \quad (22)$$

$$D_{FHP_b} = V_{ref_final_b_norm} + 0,5 \cdot (1 - M_{DVR}) \quad (23)$$

$$D_{FHP_c} = V_{ref_final_c_norm} + 0,5 \cdot (1 - M_{DVR}) \quad (24)$$

$$D_{FHP_n} = V_{ref_n_norm} + 0,5 \cdot (1 - M_{DVR}), \quad (25)$$

em que:

- D_{FHP_i} - ciclo de trabalho das chaves semicondutoras da unidade *top*;
- $V_{ref_final_i_norm}$ - tensão de referência final normalizada da fase *i*;
- $V_{ref_n_norm}$ - tensão de referência normalizada do neutro;
- M_{DVR} - parcela da portadora utilizada pelo DVR, que pode possuir valores que variam de 0 até 1.

Posto que $(1 - M_{DVR})$ representa a parcela da portadora dedicada ao FHP, conclui-se que $0,5 \cdot (1 - M_{DVR})$ é o *offset* dado ao sinal de controle dentro da faixa da portadora dedicada ao FHP. Todos os ciclos de trabalho são saturados de modo a não ultrapassarem nem o limite superior nem o limite inferior da largura de banda dedicada ao FHP.

Os ciclos de trabalhos produzidos para cada uma das fases e para o neutro são utilizados na geração de pulsos de SPWM pela comparação dos sinais de referência com a portadora

triangular que possui frequência de chaveamento de 20 KHz, e caso a respectiva referência da unidade *top* seja maior que a portadora a chave está fechada, caso contrário está aberta.

Tanto a unidade *bottom* do DVR quanto a unidade *top* do FHP compartilham as chaves intermediárias do conversor de doze chaves utilizado como UPQC nesta dissertação. Os estados dessas chaves intermediárias são obtidos através da operação lógica ou-exclusivo (XOR) entre as respectivas chaves superiores (da unidade *top*) e inferiores (da unidade *bottom*) de cada braço do conversor. Todas as chaves de um mesmo braço não podem estar fechadas simultaneamente para não curto-circuitar o barramento CC.

4.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Foram realizadas simulações através do *Simulink/MATLAB*, desenvolvido pela companhia *MathWorks*, que é uma ferramenta utilizada para simulações e análise de sistemas dinâmicos, para comprovar a eficácia do UPQC de doze chaves estudado sob condições de afundamentos de tensão monofásicos e trifásicos na rede, bem como o comportamento da tensão no barramento CC durante cada um dos respectivos afundamentos de tensão simulados. Também foram simulados e analisados o comportamento das correntes da rede e das cargas não lineares monofásicas, ressaltando que a compensação de harmônicos de corrente da fonte não é primacial durante VTCD.

4.2.1 Parâmetros utilizados nas simulações

Na tabela 4 são apresentados os parâmetros das simulações de afundamentos de tensão e distorções harmônicas de corrente do UPQC de doze chaves com DVR e FHP, apresentado na figura 26, obtidos com base na montagem realizada no laboratório para a qualificação de doutorado de (GOMES, 2017).

O dimensionamento dos componentes do conversor é realizado de acordo com a potência da carga. As cargas utilizadas neste trabalho totalizam uma potência aparente trifásica de 10KVA e foi considerado um fator de potência unitário para efeitos de projeto.

O parte do conversor conectado em série entre a rede e a carga foi dimensionada para realizar a compensação de afundamentos de tensão trifásicos de até 40 % em relação ao valor nominal de tensão da rede, visto que esses demandam mais potência do conversor. Deste modo, a máxima potência trifásica que o DVR consegue injetar é dada por (26):

$$P_{DVR} = K \cdot P_L \quad (26)$$

em que:

- K - afundamento de tensão trifásico;
- P_L - potência trifásica da carga.

Realizando a substituição dos valores em (26), obtemos o valor da potência nominal do DVR:

$$P_{DVR} = 0,4 \cdot 10 = 4KVA, \quad (27)$$

deste modo determina-se que a potência nominal do DVR é de 4KVA de acordo com os critérios adotados em projeto.

O dimensionamento da máxima tensão do barramento CC do conversor de doze chaves é realizada em função da tensão nominal da rede elétrica e do índice de modulação M_{DVR} , através de (28):

$$V_{ccmax} = (2M_{DVR} + 1) \cdot \frac{2\sqrt{2}}{1,15} \cdot V_{FNrms} \quad (28)$$

Realizando a substituição dos valores em (28), obtemos:

$$V_{ccmax} = (2 \cdot 0,2 + 1) \cdot \frac{2\sqrt{2}}{1,15} \cdot 220 = 757,53V. \quad (29)$$

Como foi explicado no início deste capítulo, na parte do conversor conectado em paralelo com a rede foi utilizado um FHP que consiste de um FAPP em série com um filtro LC que permite uma redução na tensão do barramento CC, além de uma redução também na potência do conversor. A tensão do barramento CC pode ser reduzida a valores inferiores ao valor de pico da tensão de rede. Neste caso, como o conversor opera também como compensador série foi utilizada uma tensão de 500V.

O valor da capacitância do barramento CC é dada em função da oscilação máxima de tensão tolerável e obtido através de (30):

$$C_{cc} = \frac{P_{DVR}}{w_0 \cdot \varepsilon \cdot V_{ccmax}^2}, \quad (30)$$

em que:

- w_0 - frequência fundamental da rede elétrica;
- ε - oscilação máxima aceitável.

Realizando a substituição dos valores em (30), obtemos o valor da capacitância do barramento CC:

$$C_{cc} = \frac{4000}{377 \cdot 0,005 \cdot (757,53)^2} = 3,7mF. \quad (31)$$

Foi utilizada um capacitância de 4,7mF no barramento CC devido a disponibilidade de valores comerciais.

Para o dimensionamento do filtro LC do FHP que foi sintonizado no 7º harmônico, foi utilizado um capacitor de $61,2\mu\text{F}$ e devido a limitações dos componentes disponíveis no laboratório foi utilizada uma aproximação do sétimo harmônico com uma frequência de ressonância de 377Hz . Através de (32) é possível obter a indutância do filtro LC do FHP.

$$f_{rs} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{FHP} \cdot C_{FHP}}}, \quad (32)$$

em que:

- f_{rs} - frequência de ressonância;
- L_{FHP} - indutância do filtro LC do FHP;
- C_{FHP} - capacitância do filtro LC do FHP.

Realizando a substituição dos valores em (32), obtemos o valor da indutância do FHP:

$$377 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{FHP} \cdot 61,2 \cdot 10^{-6}}} \quad (33)$$

Isolando L_{FHP} em (33), obtemos a indutância do filtro LC do FHP:

$$L_{FHP} = 2,91\text{mH} \quad (34)$$

Já o filtro de saída do DVR foi escolhido de forma que todo o *ripple* ocasionado pelo chaveamento do conversor não fosse transferido para a rede. Foi utilizada uma frequência de 1300Hz por atenuar praticamente todo o *ripple* de chaveamento e não interferir na injeção de fundamental. O capacitor utilizado foi de $30\mu\text{F}$. Através de (35) é possível obter a indutância do filtro de saída do DVR.

$$f_{rs} = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{DVR} \cdot C_{DVR}}}, \quad (35)$$

em que:

- f_{rs} - frequência de ressonância;
- L_{DVR} - indutância do filtro de saída do DVR;
- C_{DVR} - capacitância do filtro de saída do DVR.

Realizando a substituição dos valores em (35), obtemos o valor da indutância do FHP:

$$1300 = \frac{1}{2\pi \cdot \sqrt{L_{DVR} \cdot 30 \cdot 10^{-6}}} \quad (36)$$

Tabela 4 – Parâmetros utilizados na simulação do UPQC de doze chaves.

Grandeza	Símbolo	Valor
Tensão eficaz de linha da rede	V_s	380V
Frequência da rede	f_s	60Hz
Tensão no barramento CC	V_{cc}	500V
Capacitor do barramento CC	C_{cc}	4700 μ F
Indutor do FHP	L_{FHP}	2,91mH
Capacitor do FHP	C_{FHP}	61,2 μ F
Indutor do DVR	L_{DVR}	0,5mH
Capacitor do DVR	C_{DVR}	30 μ F
Indutância da carga	L_l	3mH
Resistência da carga CC	R_l	30 Ω
Capacitância da carga	C_l	40 μ F
Relação de espiras dos trafos de injeção	n	1:1,86

Fonte: próprio autor.

Isolando L_{DVR} em (36) obtemos a indutância do filtro de saída do DVR:

$$L_{DVR} = 0,5mH \quad (37)$$

4.2.2 Simulações de afundamentos de tensão

De acordo com (MERTENS et al., 2007) 60 % dos afundamentos de tensão possuem duração inferior a cinco ciclos da fundamental. Neste trabalho todos os afundamentos de tensão foram simulados com a duração de 0,1s que corresponde a seis ciclos da fundamental.

Geralmente, os afundamentos de tensão com origem na própria instalação são ocasionados pela partida de grandes motores, sobrecargas ou por problemas internos que possam ocorrer nestas mesmas instalações.

Já o motivo mais comum dos afundamentos de tensão com origem externa à instalação em que está se tratando são os curto-circuitos que ocorrem a montante desta instalação elétrica, visto que estes originam perturbações na tensão de alimentação de todas as instalações elétricas que são atendidas pela linha de transmissão em que ocorreu o defeito. Podemos citar como exemplo um curto-circuito fase-terra na linha de média tensão da concessionária de distribuição de energia elétrica ocasionado pelo contato de um galho de árvore com uma das fases que causa um afundamento de tensão na fase defeituosa para todos os consumidores que estão ligados neste circuito até que a causa do defeito seja extinta ou que ocorra a atuação da proteção na abertura deste circuito.

De acordo com estudo realizado por (KINDERMANN, 2007) os principais tipos de curto-circuitos no sistema de energia elétrica são:

- Curto-circuito monofásico - aproximadamente 63 %;

- Curto-circuito bifásico - aproximadamente 15 %;
- Curto-circuito bifásico à terra - aproximadamente 16 %;
- Curto-circuito trifásico - aproximadamente 6 %.

Nas subsubseções a seguir foram simulados através da ferramenta computacional *Simulink/MATLAB* afundamentos de tensão monofásicos e afundamentos de tensão trifásicos. Através dos resultados das simulações foram avaliados o comportamento da tensão na rede e na carga sensível antes, durante e após o afundamento de tensão para cada caso simulado para comprovar a eficácia do UPQC de doze chaves, apresentado na figura 26, na supressão de afundamentos de tensão em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios.

Nas simulações de afundamentos de tensão realizadas neste trabalho foram utilizados índices de modulação de 0,8 para a parte do conversor conectada em série entre a rede e a carga e de 0,2 para a parte do conversor conectada em paralelo com a rede.

4.2.2.1 Simulações de afundamentos de tensão monofásicos

Os afundamentos de tensão monofásicos sentidos pelas cargas dos consumidores são na maioria das vezes ocasionados por curto-circuitos monofásicos ocorridos no sistema de transmissão e/ou distribuição responsáveis pela tensão de suprimento destes consumidores, pela partida de grandes cargas monofásicas internas à própria instalação ou por sobrecargas originadas por cargas monofásicas.

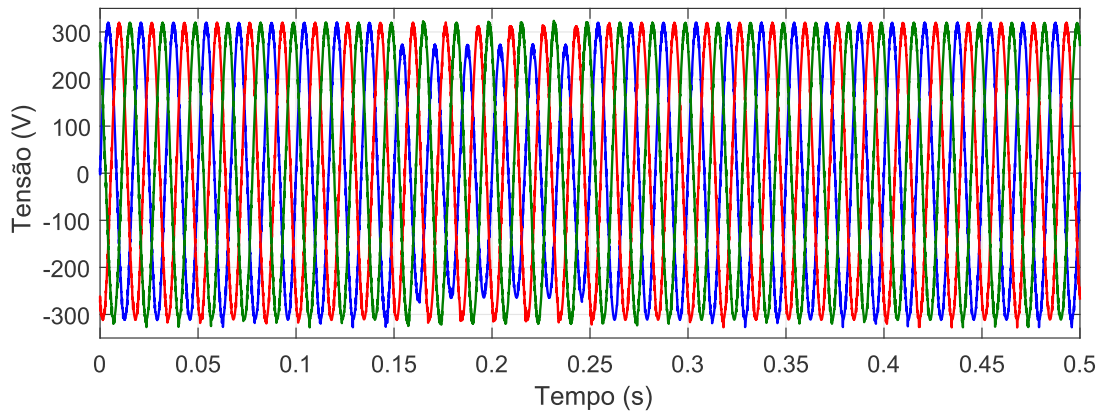
Os curto-circuitos bifásicos à terra, e principalmente, os monofásicos apresentam as maiores taxas de ocorrência dentre todas as faltas e produzem afundamentos de tensão geralmente menos severos, porém assimétricos. Esses afundamentos de tensão provocam o surgimento de tensões de sequência zero. Com isso é necessário que a parte do conversor do UPQC de doze chaves conectada em série entre a rede e a carga também possua a capacidade de injetar tensões de sequência zero para mitigar o desequilíbrio de tensão.

Nesta subsubseção foram simulados afundamentos de tensão monofásicos de 15 % e 30 %.

Primeiramente foi simulado um afundamento de tensão monofásico de 15 % em relação ao valor nominal de tensão da rede durante um período de 0,1s. Os resultados de simulações obtidos através da ferramenta computacional *Simulink/MATLAB* são originados em função da tensão de pico por fase. A amplitude da tensão de pico por fase é de aproximadamente 310,27V, durante o afundamento de tensão de 15 % a amplitude da tensão de pico em uma das fases cai para aproximadamente 263,73V. Na figura 30 é mostrado que a tensão da rede em uma das fases cai em 15 % do seu valor nominal no período de 0,15 a 0,25s. Entretanto, conforme resultado de simulação na tensão da carga apresentado na figura 31 é percebido que as tensões na carga durante a perturbação permanecem dentro de valores aceitáveis pela curva ITIC apresentada na

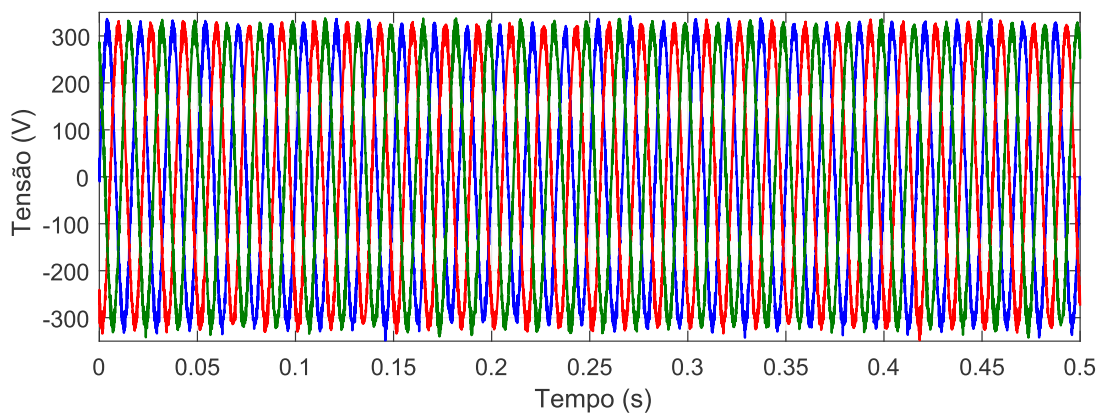
figura 4. Na figura 32 é apresentado o comportamento da tensão no barramento CC durante o afundamento de tensão monofásico de 15 %, onde é notado que durante a perturbação a tensão do barramento CC cai em menos de 1V e retoma o valor de referência após o fim do distúrbio. Também são apresentados o comportamento das correntes das cargas não lineares e da rede nas figura 34 e 33, respectivamente, antes, durante e após o afundamento de tensão. Em que é notado que as correntes da rede e das cargas não lineares voltam a assumir os seus valores nominais imediatamente após a extinção do afundamento de tensão.

Figura 30 – Afundamento de tensão monofásico de 15 %: tensão na rede elétrica.



Fonte: próprio autor.

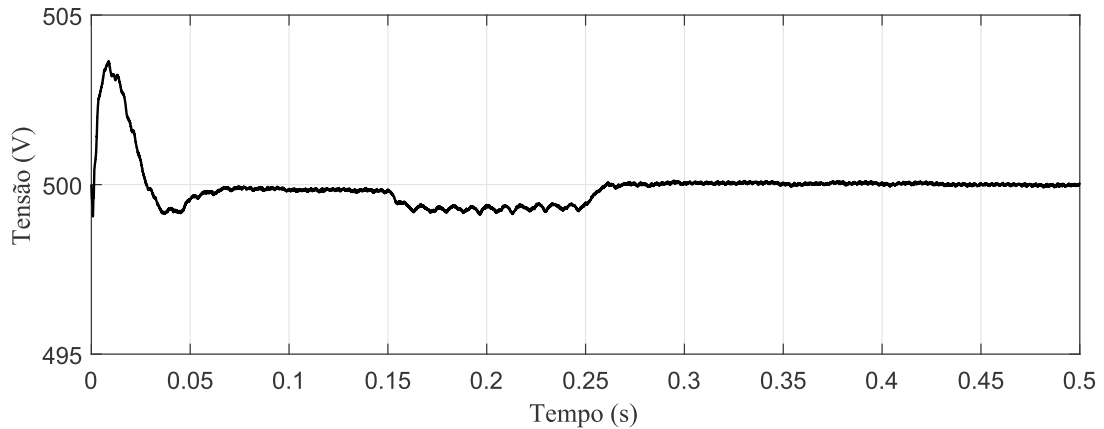
Figura 31 – Afundamento de tensão monofásico de 15 %: tensão na carga.



Fonte: próprio autor.

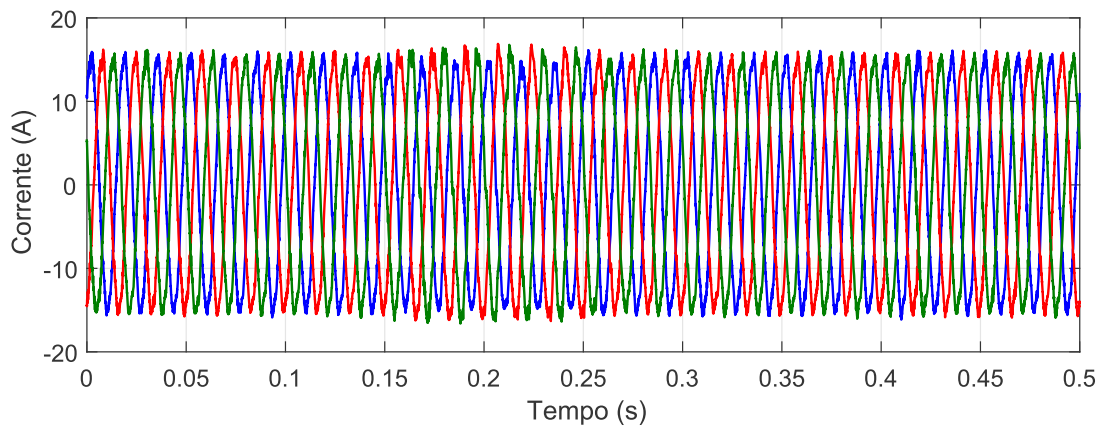
Em seguida, foi simulado um afundamento de tensão monofásico mais severo que o anterior com queda de 30 % da amplitude do valor nominal de tensão. A amplitude da tensão de pico por fase é de aproximadamente 310,27V em regime permanente e durante o afundamento de tensão de 30 % a amplitude da tensão de pico em uma das fases da rede cai para aproximadamente 217,19V, durante o período de 0,15 a 0,25s, conforme apresentado na figura 35. Através do resultado da simulação apresentado na figura 36 é comprovado durante o período de perturbação

Figura 32 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico de 15 %.



Fonte: próprio autor.

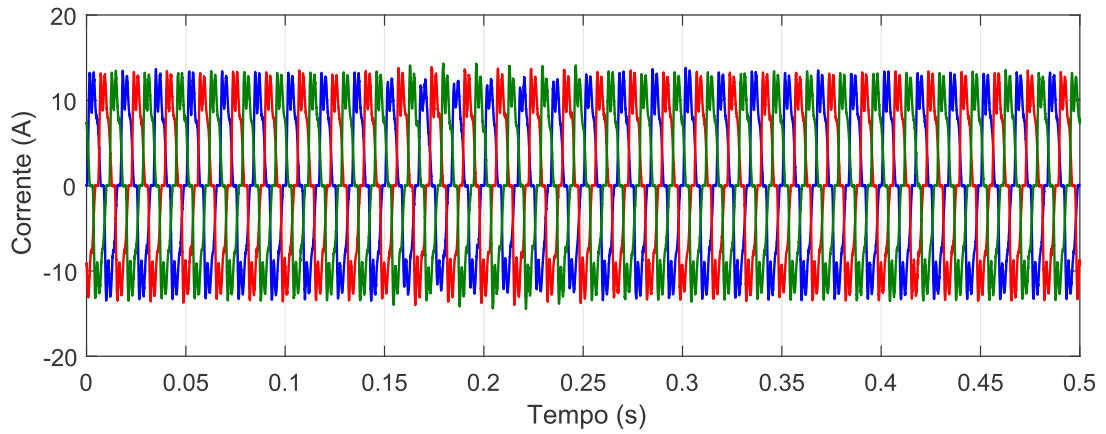
Figura 33 – Corrente na rede: afundamento de tensão monofásico de 15 %.



Fonte: próprio autor.

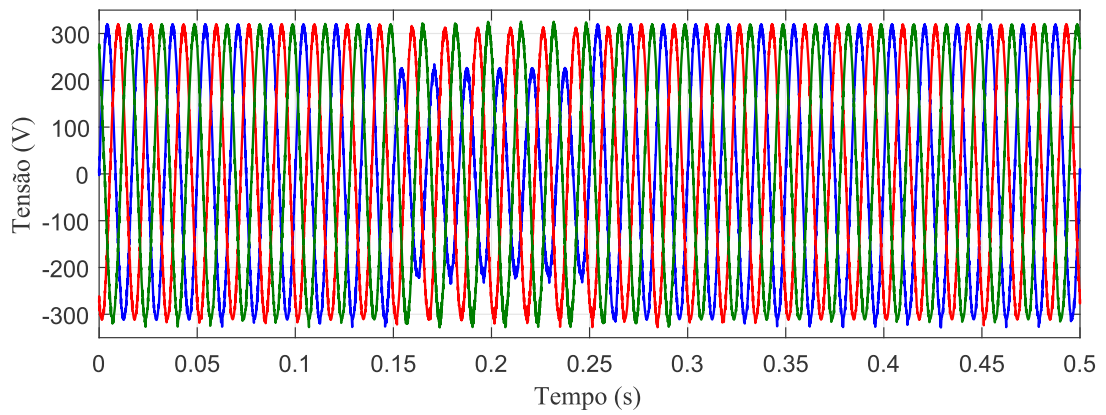
que as tensões na carga são mantidas dentro dos limites aceitáveis pela curva ITIC. O resultado de simulação do barramento CC é apresentado na figura 37, onde o mesmo mostrou-se capaz de atender as solicitações do conversor durante o período demandado que foi de 0,1s. Também são apresentados o comportamento das correntes das cargas não lineares e da rede nas figura 39 e 38, respectivamente, antes, durante e após o afundamento de tensão. Em que é notado que as correntes da rede e das cargas não lineares voltam a assumir os seus valores nominais após aproximadamente 0,03s da extinção do afundamento de tensão.

Figura 34 – Corrente na carga: afundamento de tensão monofásico de 15 %.



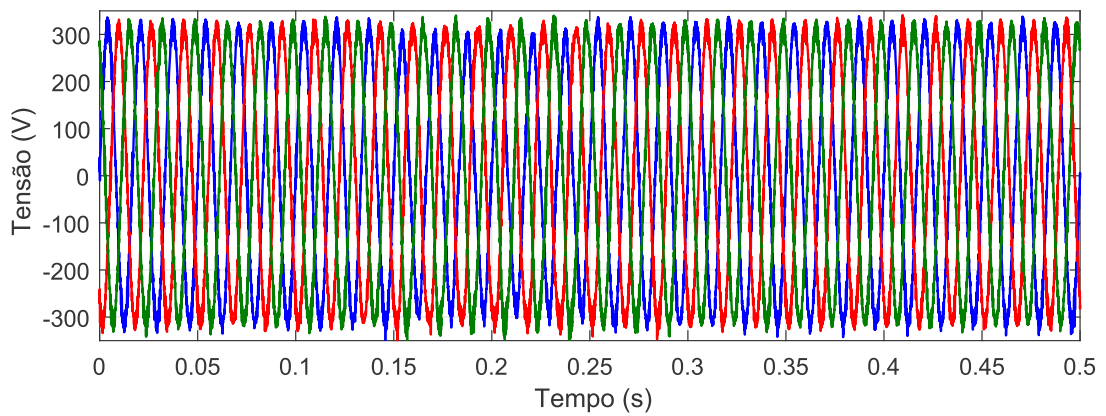
Fonte: próprio autor.

Figura 35 – Afundamento de tensão monofásico de 30 %: tensão na rede elétrica.



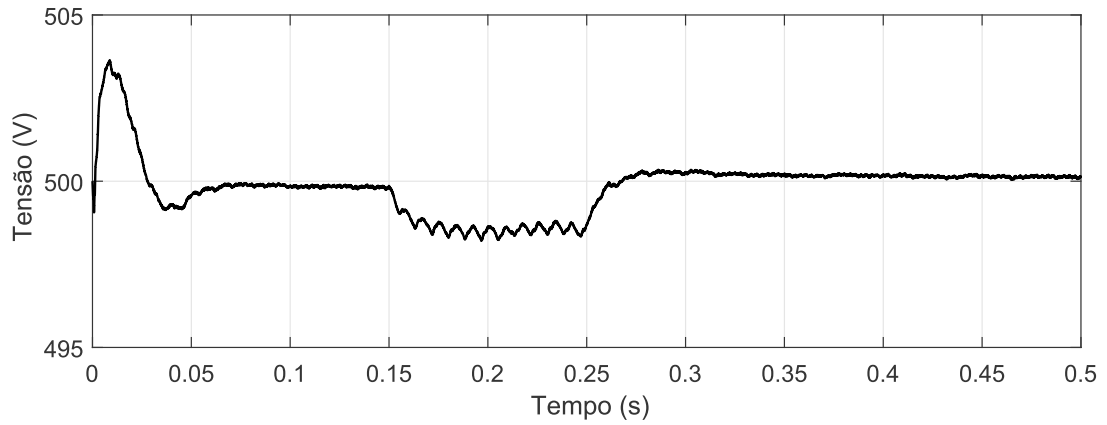
Fonte: próprio autor.

Figura 36 – Afundamento de tensão monofásico de 30 %: tensão na carga.



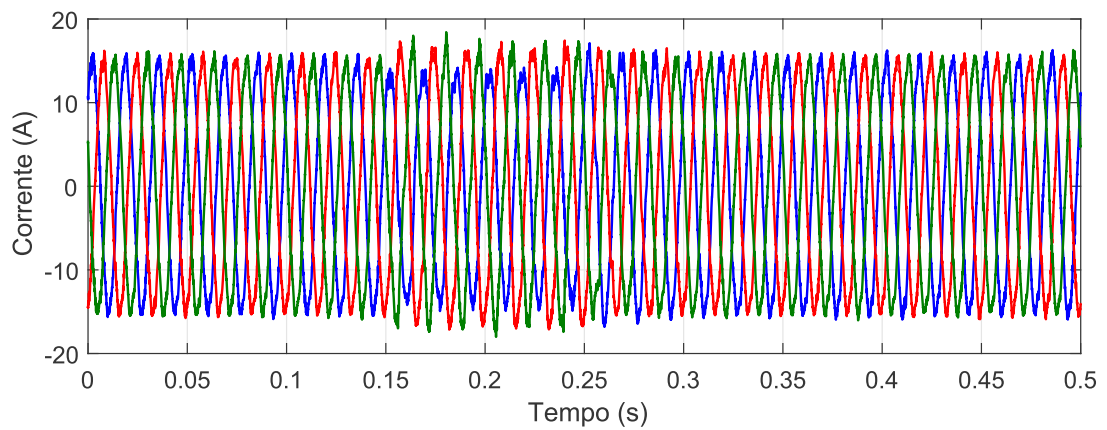
Fonte: próprio autor.

Figura 37 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão monofásico de 30 %.



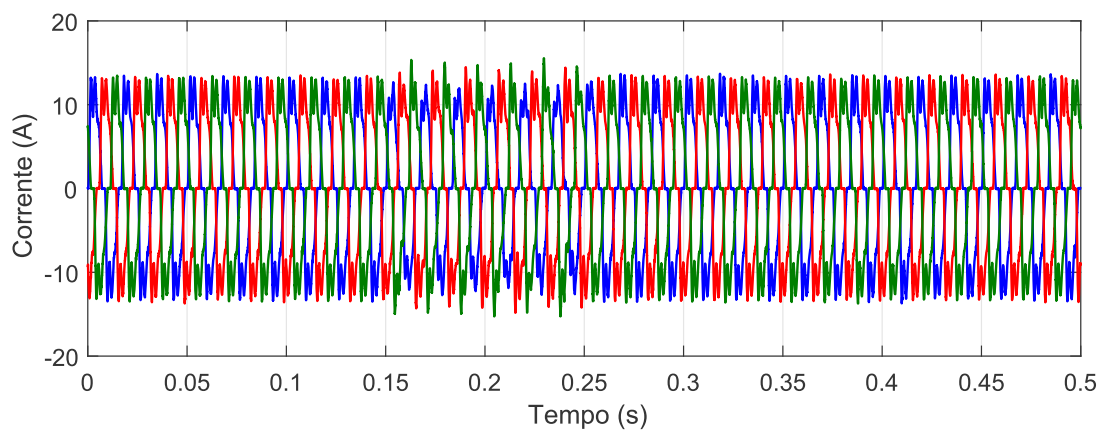
Fonte: próprio autor.

Figura 38 – Corrente na rede: afundamento de tensão monofásico de 30 %.



Fonte: próprio autor.

Figura 39 – Corrente na carga: afundamento de tensão monofásico de 30 %.



Fonte: próprio autor.

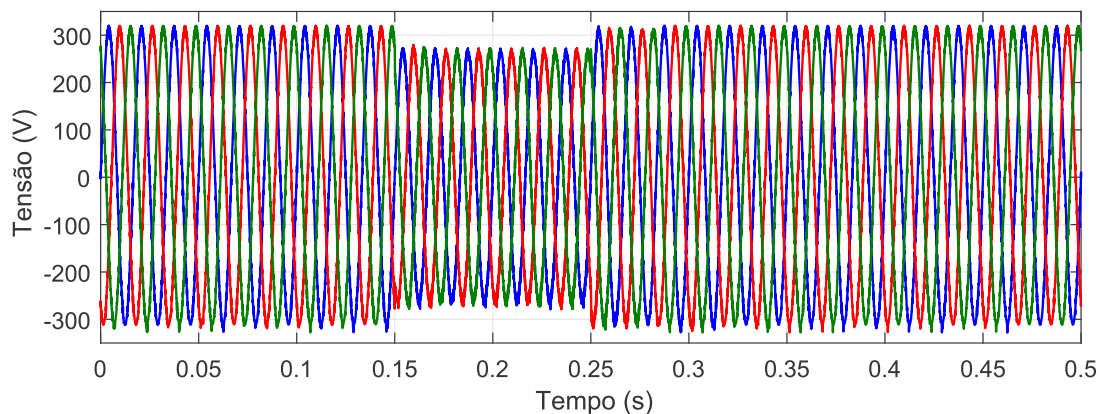
4.2.2.2 Simulações de afundamentos de tensão trifásicos

Os afundamentos de tensão trifásicos são geralmente ocasionados por curto-circuitos trifásicos ocorridos a montante da instalação elétrica na transmissão e/ou distribuição, pela partida de grandes motores trifásicos internos à própria instalação ou sobrecargas produzidas por cargas trifásicas, não provocando desequilíbrio no sistema elétrico uma vez que as tensões e correntes do sistema estão equilibradas. No caso dos curto-circuitos trifásicos, são o tipo de falta que ocorre no sistema elétrico com menor incidência, porém são geralmente as mais severas.

Nesta subsubseção foram simulados afundamentos de tensão trifásicos de 15 % e 30 % com a finalidade de comprovar a eficácia do compensador série do UPQC de doze chaves frente a afundamentos de tensão mais severos.

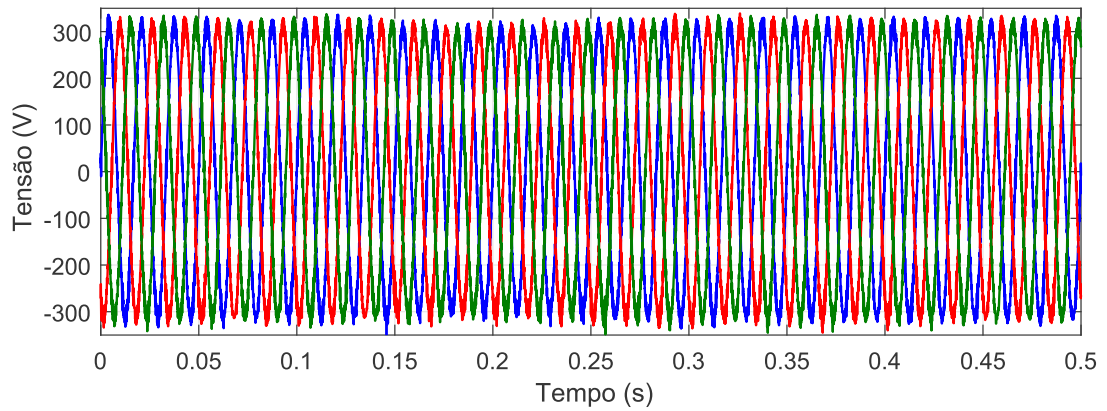
Primeiro foi simulado um afundamento de tensão trifásico de 15 % na tensão nominal da rede durante seis ciclos da fundamental. Em regime permanente o valor da tensão de pico nominal por fase é de aproximadamente 310,27V e durante o afundamento de tensão esse valor cai para aproximadamente 263,27V, após a extinção do afundamento o valor da tensão é restabelecido para o valor nominal, conforme apresentado na figura 40. Através do resultado de simulação das tensões na carga, apresentado na figura 41, é notado que as cargas sensíveis não foram danificadas devido ao afundamento de tensão de acordo com os limites aceitáveis pela curva ITIC. O resultado da simulação do comportamento do barramento CC para este afundamento de tensão é apresentado na figura 42, onde percebe-se que a tensão do barramento CC durante o afundamento decai em aproximadamente 6V e após o fim do transitório a tensão vai sendo restabelecida para seu valor de referência. Também são apresentados o comportamento das correntes das cargas não lineares e da rede nas figura 44 e 43, respectivamente, antes, durante e após o afundamento de tensão. Em que é notado que as correntes da rede e das cargas não lineares voltam a assumir os seus valores nominais após aproximadamente 0,05s da extinção do afundamento de tensão.

Figura 40 – Afundamento de tensão trifásico de 15 %: tensão na rede elétrica.



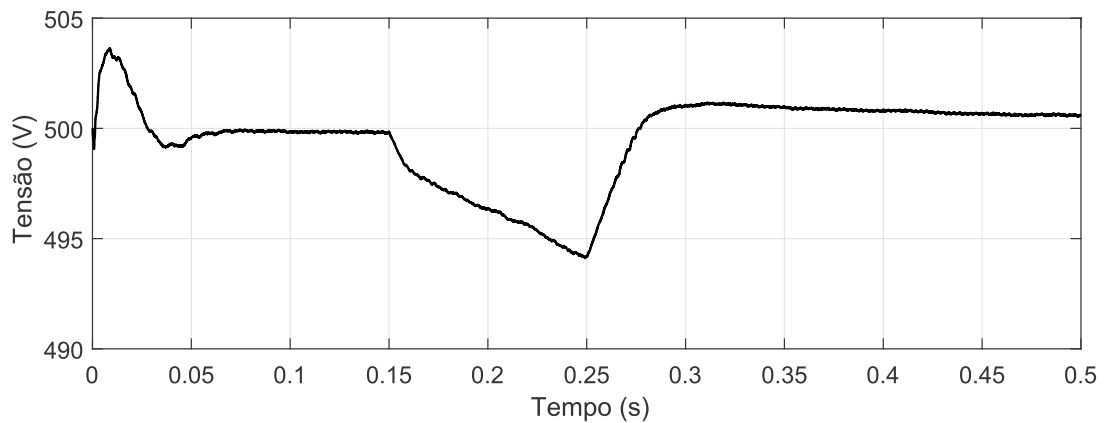
Fonte: próprio autor.

Figura 41 – Afundamento de tensão trifásico de 15 %: tensão na carga.



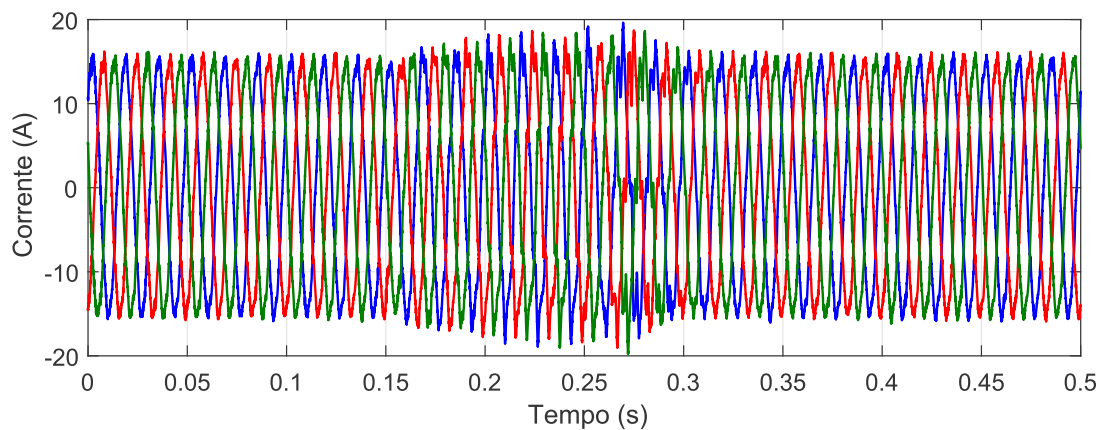
Fonte: próprio autor.

Figura 42 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão trifásico de 15 %.



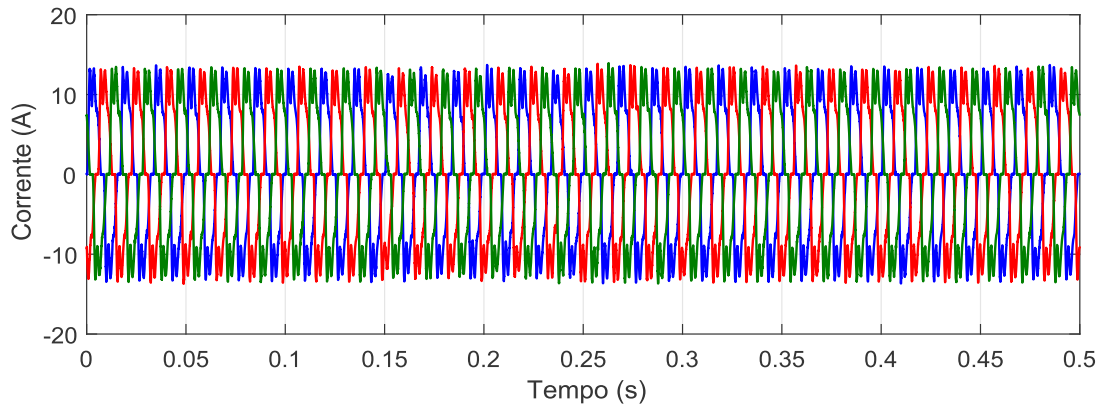
Fonte: próprio autor.

Figura 43 – Corrente na rede: afundamento de tensão trifásico de 15 %.



Fonte: próprio autor.

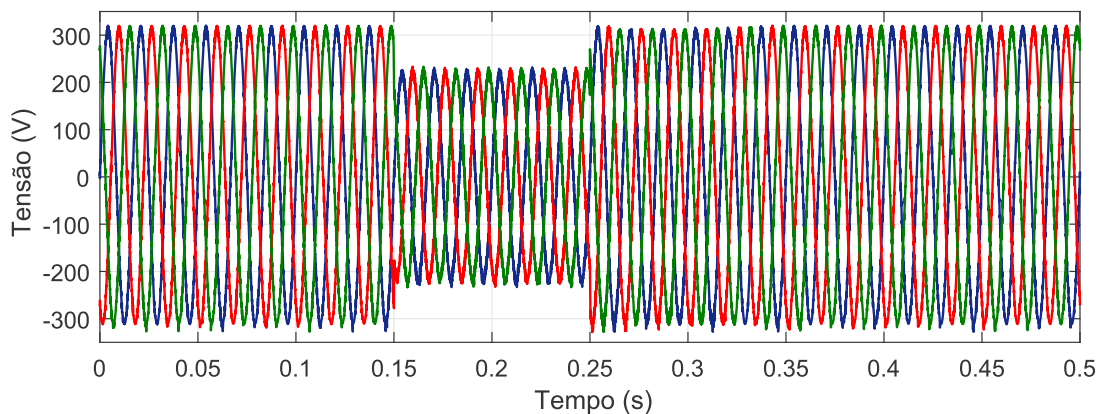
Figura 44 – Corrente na carga: afundamento de tensão trifásico de 15 %.



Fonte: próprio autor.

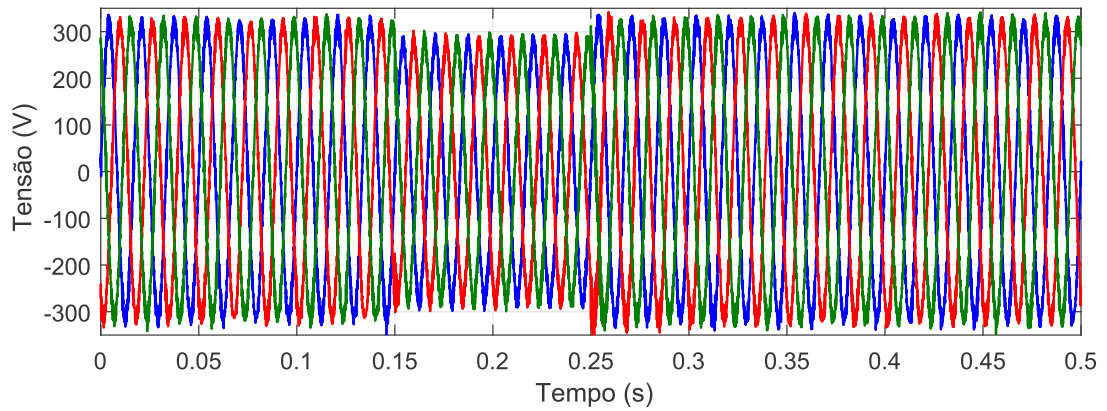
Segundo foi simulado um afundamento de tensão ainda mais severo que o anterior com magnitude de 30 % do valor nominal da tensão da rede, onde a tensão nominal de pico por fase cai da amplitude de 310,27V para 217,19V durante o período transitório, conforme apresentado na figura 45. Através do resultado de simulação das tensões na carga apresentado na figura 46 conclui-se que as cargas sensíveis não sentiram o afundamento de tensão de acordo com o estabelecido na curva ITIC. O comportamento do barramento CC é apresentado na figura 47, onde mostra que o barramento CC atende a demanda do conversor no período solicitado que é de 0,15 a 0,25s. Também são apresentados o comportamento das correntes das cargas não lineares e da rede nas figura 49 e 48, respectivamente, antes, durante e após o afundamento de tensão. Em que é notado que as correntes da rede e das cargas não lineares voltam a assumir os seus valores nominais após aproximadamente 0,1s da extinção do afundamento de tensão, devido ao tempo do barramento CC voltar a sua tensão de referência.

Figura 45 – Afundamento de tensão trifásico de 30 %: tensão na rede elétrica.



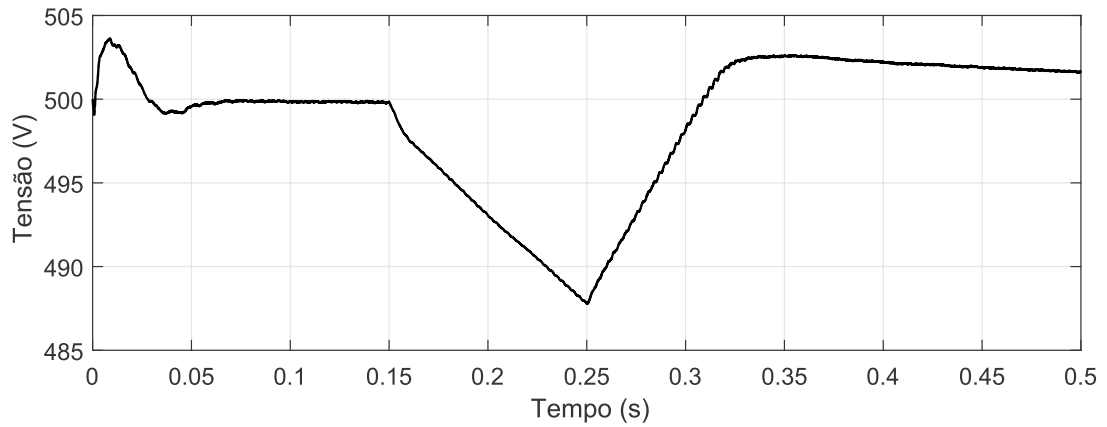
Fonte: próprio autor.

Figura 46 – Afundamento de tensão trifásico de 30 %: tensão na carga.



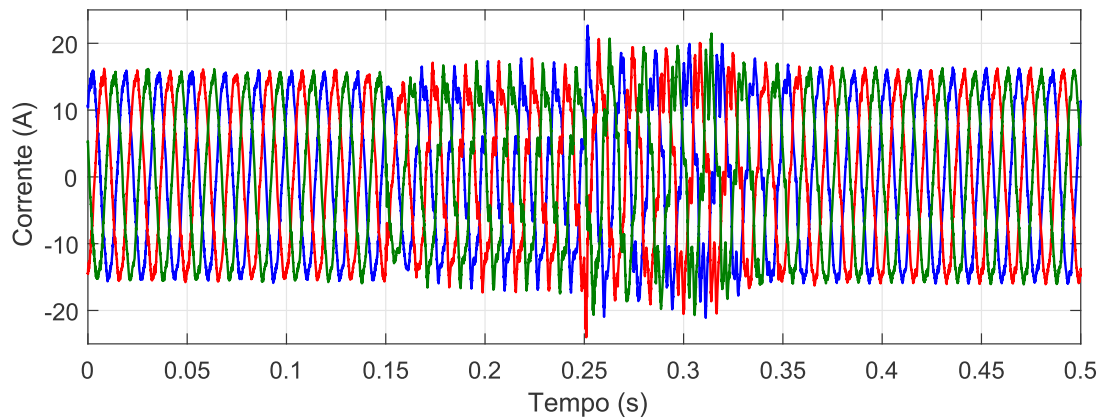
Fonte: próprio autor.

Figura 47 – Tensão no barramento CC durante afundamento de tensão trifásico de 30 %.



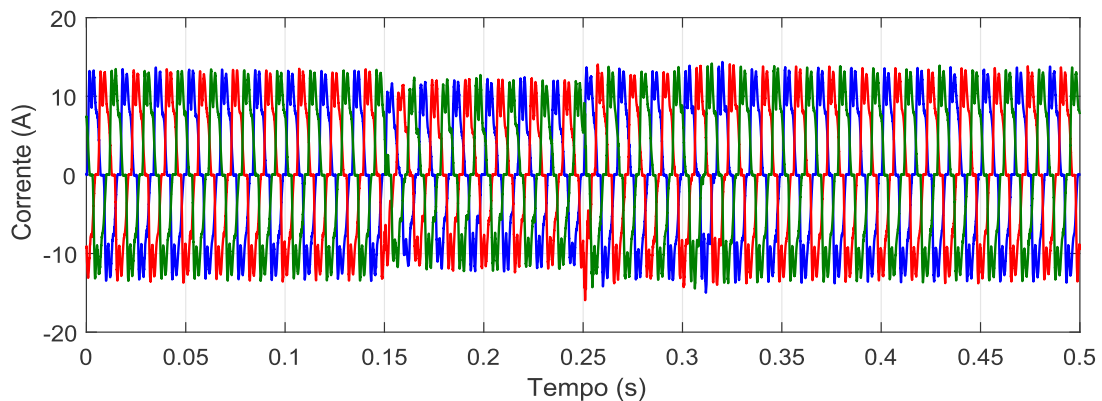
Fonte: próprio autor.

Figura 48 – Corrente na rede: afundamento de tensão trifásico de 30 %.



Fonte: próprio autor.

Figura 49 – Corrente na carga: afundamento de tensão trifásico de 30 %.



Fonte: próprio autor.

4.2.2.3 Análise do Barramento CC

Já foram analisados o comportamento do barramento CC durante os afundamentos de tensão monofásicos de 15 % e 30 % e trifásicos de 15 % e 30 % apresentados, respectivamente, nas figuras 32, 37, 42 e 47. Sendo verificado que mesmo com a capacidade de circulação das correntes fundamentais na estrutura do FHP ser reduzida devido ao fato do FPP está sintonizado no sétimo componente harmônico e apesar da estrutura com FHP limitar a taxa de carregamento do barramento CC, o mesmo mostrou-se capaz de atender as solicitações do conversor durante o período de afundamento de tensão simulado que foi de seis ciclos da fundamental em todos os casos.

4.2.3 Simulações de distorções harmônicas de corrente

Devido a compensação de harmônicos de corrente não serem primordiais frente a distúrbios na tensão da rede, os resultados das simulações desta subseção foram obtidos com a ausência de afundamento da tensão da rede.

Nas subsubseções a seguir foram realizadas simulações através da ferramenta computacional *Simulink*/MATLAB para avaliar a eficácia da parte do UPQC de doze chaves, apresentado na figura 26, que é conectada em paralelo com a rede com a finalidade de realizar supressão de harmônicos de corrente da fonte originados por cargas não lineares monofásicas balanceadas (sistema equilibrado) ou pela conexão de cargas não lineares monofásicas desbalanceadas que ocasiona um desequilíbrio no sistema elétrico.

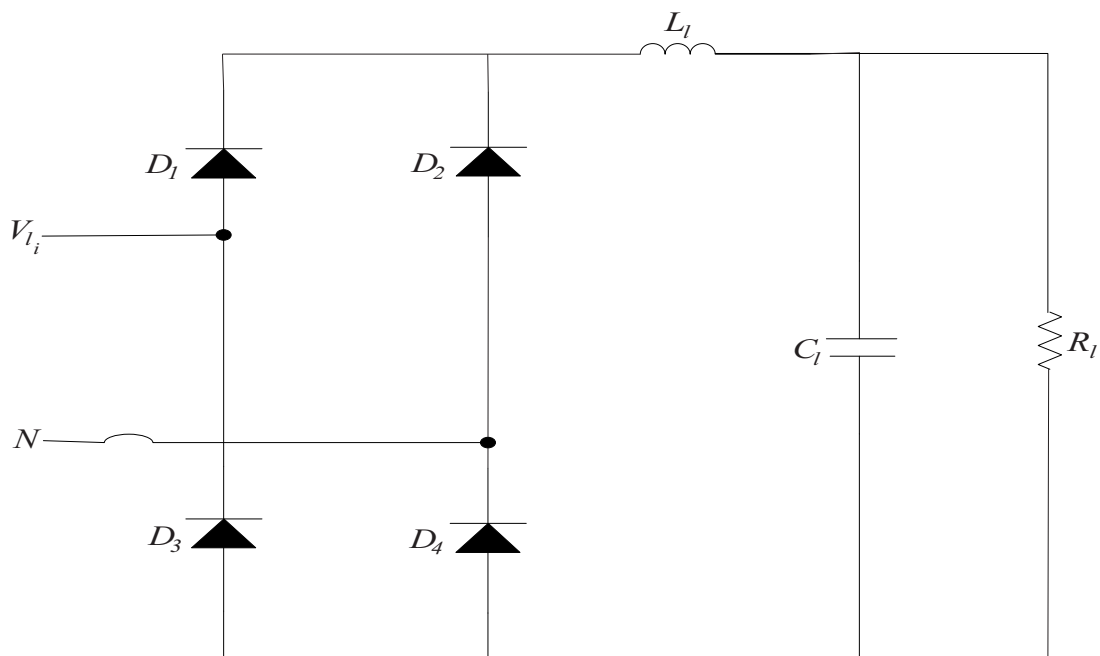
Algumas dos principais tipos de cargas não lineares são: soft starters, inversores de frequência, retificadores e fornos a arco.

Conforme apresentado na figura 50, nesta simulação foram utilizados, em cada uma das fases como carga não linear, um retificador monofásico em ponte completa a diodos com filtro indutivo-capacitivo (LC) na saída e carga resistiva CC.

No filtro indutivo-capacitivo inserido após a ponte retificadora, é utilizado um indutor com uma indutância de 3mH com o intuito de reduzir os picos de corrente e também é utilizado um capacitor com uma capacitância $40\mu\text{ F}$ em paralelo com a carga para reduzir a ondulação de tensão.

Nas simulações de distorções harmônicas de corrente realizadas neste trabalho foram utilizados índices de modulação de 0,1 para o compensador série e de 0,9 para o FHP no caso em que são utilizadas cargas não lineares monofásicas balanceadas e no caso em que são utilizadas cargas não lineares monofásicas desbalanceadas foram utilizados índices de modulação de 0,2 para a parte do conversor conectada em série entre a rede e a carga e de 0,8 para a parte do conversor conectada em paralelo com a rede.

Figura 50 – Circuito completo do retificador.



Fonte: próprio autor.

4.2.3.1 Distorções Harmônicas de correntes de cargas não lineares monofásicas balanceadas

Nesta subsubseção são apresentados os resultados das simulações do comportamento das correntes da rede e das cargas não lineares monofásicas balanceadas para comprovar a eficácia do UPQC de doze chaves na compensação de harmônicos de corrente da fonte em um sistema trifásico equilibrado a quatro fios.

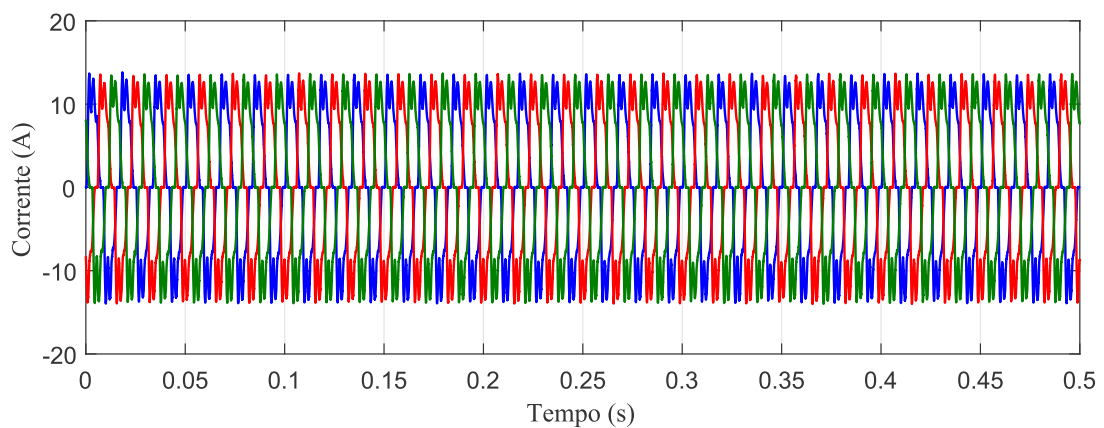
Os resultados das simulações das correntes das cargas e da rede são apresentados nas figuras 51 e 52, respectivamente.

Na tabela 5 são apresentados os resultados do THD da corrente da rede e da carga para cada uma das fases. É importante salientar que todas as fases possuem a mesma resistência de

carga CC para simular um sistema elétrico balanceado. De acordo com os valores apresentados na tabela 5 é possível notar que houve uma grande redução dos harmônicos de corrente da rede nas fases a, b e c para dentro dos limites aceitáveis pela norma IEEE 519-1992 que é de 5 %. Portanto, foi constatada a eficácia da parte do UPQC de doze chaves conectada em paralelo com a rede com a finalidade de realizar a supressão dos harmônicos de corrente da fonte originados pelas cargas não lineares monofásicas balanceadas conforme apresentado nas figuras 52 e 51, respectivamente.

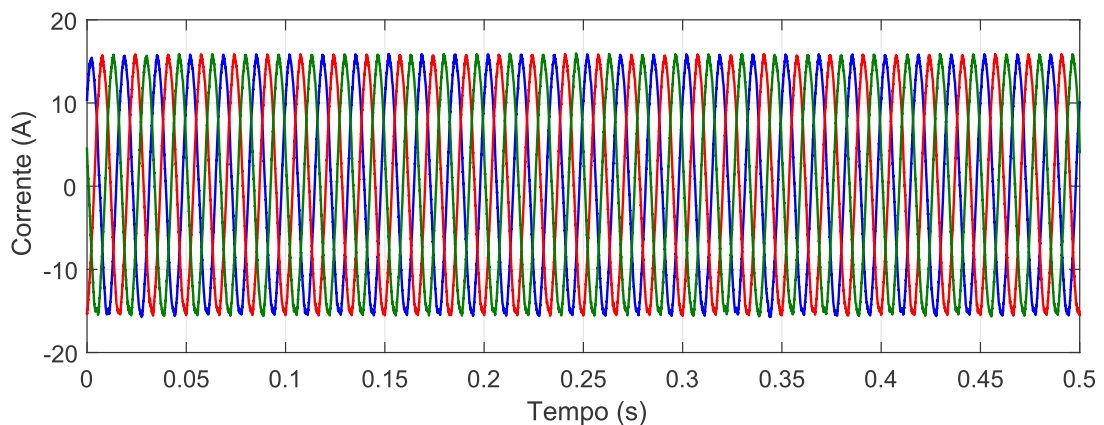
Nas figuras 53 e 54 são apresentados, respectivamente, o comportamento da tensão nas cargas não lineares e da tensão da rede na simulação de compensação de distorções harmônicas na corrente da rede do sistema elétrico balanceado em questão.

Figura 51 – Corrente das cargas não lineares monofásicas balanceadas.



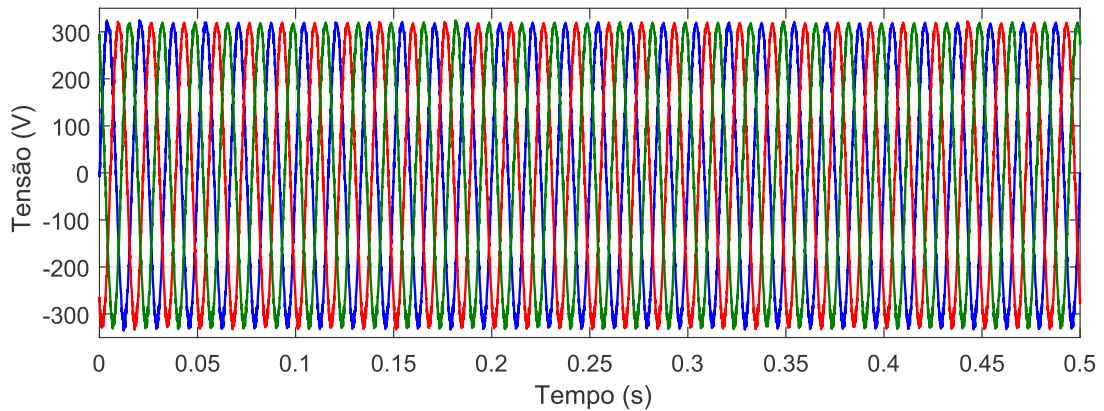
Fonte: próprio autor.

Figura 52 – Corrente da rede com cargas não lineares monofásicas balanceadas.



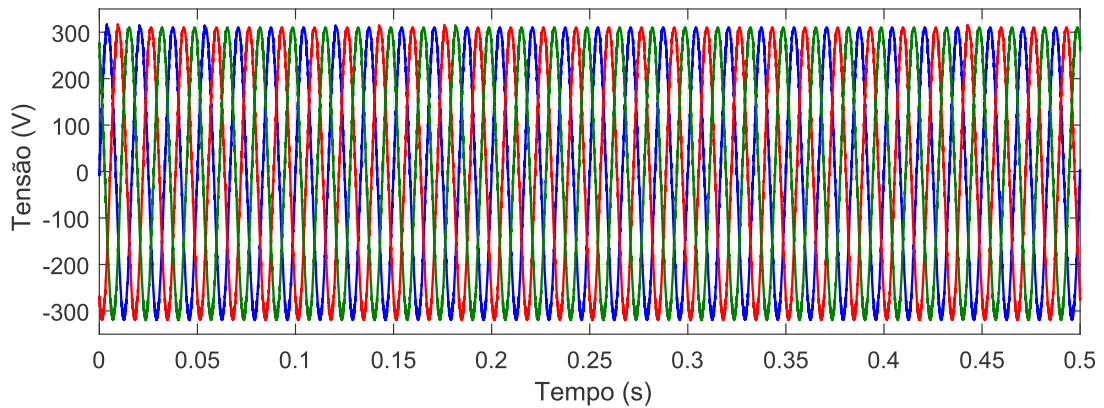
Fonte: próprio autor.

Figura 53 – Tensão nas cargas não lineares monofásicas balanceadas.



Fonte: próprio autor.

Figura 54 – Tensão na rede com cargas não lineares monofásicas balanceadas.



Fonte: próprio autor.

Tabela 5 – Resultados do THD das correntes da carga e da rede em um sistema balanceado.

	Fase	Resistência da carga	THD da corrente
Carga	a	30Ω	26,33 %
	b	30Ω	26,08 %
	c	30Ω	26,16 %
Rede	a	30Ω	2,07 %
	b	30Ω	2,05 %
	c	30Ω	2,01 %

Fonte: próprio autor.

4.2.3.2 Distorções harmônicas de corrente de cargas não lineares monofásicas desbalanceadas

Nesta subsubseção são apresentados os resultados das simulações do comportamento das correntes da rede e das cargas não lineares monofásicas desbalanceadas para comprovar a eficácia do UPQC de doze chaves na compensação de harmônicos de corrente da fonte em um

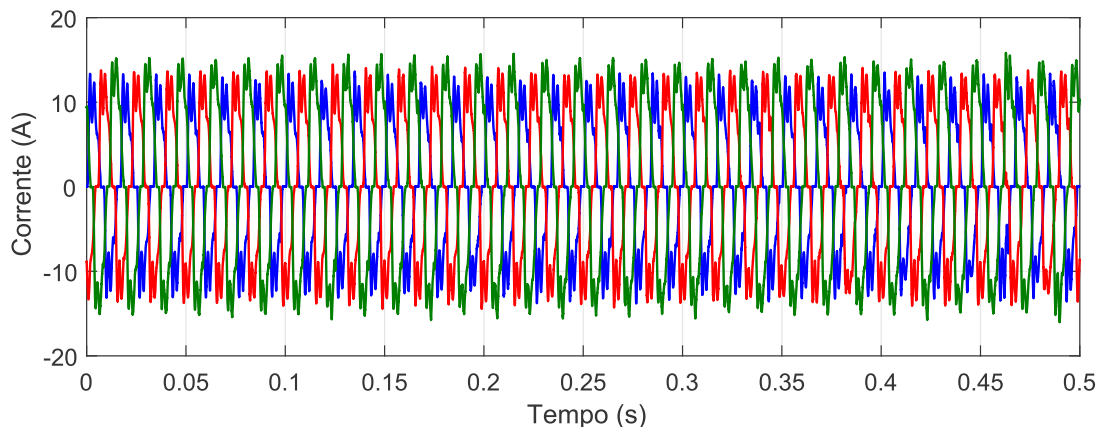
sistema trifásico desequilibrado a quatro fios.

Os resultados das simulações das correntes das cargas e da rede são apresentados nas figuras 55 e 56, respectivamente.

Na tabela 6 são apresentados os resultados do THD da corrente da rede e da carga para cada uma das fases. É importante salientar que as fases possuem resistência de carga CC distintas para simular um sistema elétrico desbalanceado. De acordo com os valores apresentados na tabela 6 é possível notar que houve uma redução significativa dos harmônicos de corrente da rede nas fases a, b e c para dentro dos limites aceitáveis pela norma IEEE 519-1992 que é de 5%. Logo, é constatada a eficácia da parte do UPQC de doze chaves conectada em paralelo com a rede com a finalidade de realizar a supressão dos harmônicos de corrente da fonte originados pelas cargas não lineares monofásicas desbalanceadas conforme apresentado nas figuras 56 e 55, respectivamente.

Nas figuras 57 e 58 são apresentados, respectivamente, o comportamento da tensão nas cargas não lineares e da tensão da rede na simulação de compensação de distorções harmônicas na corrente da rede do sistema elétrico desbalanceado em questão.

Figura 55 – Corrente das cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.



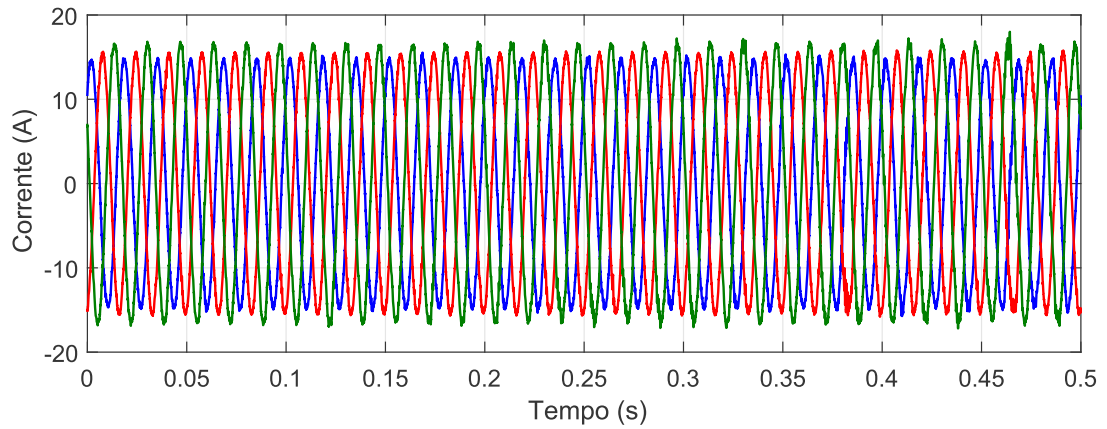
Fonte: próprio autor.

Tabela 6 – Resultados do THD das correntes da carga e da rede em um sistema desbalanceado.

	Fase	Resistência da carga	THD da corrente
Carga	a	35Ω	31,48 %
	b	30Ω	26,73 %
	c	25Ω	21,28 %
Rede	a	35Ω	2,22 %
	b	30Ω	2,20 %
	c	25Ω	2,76 %

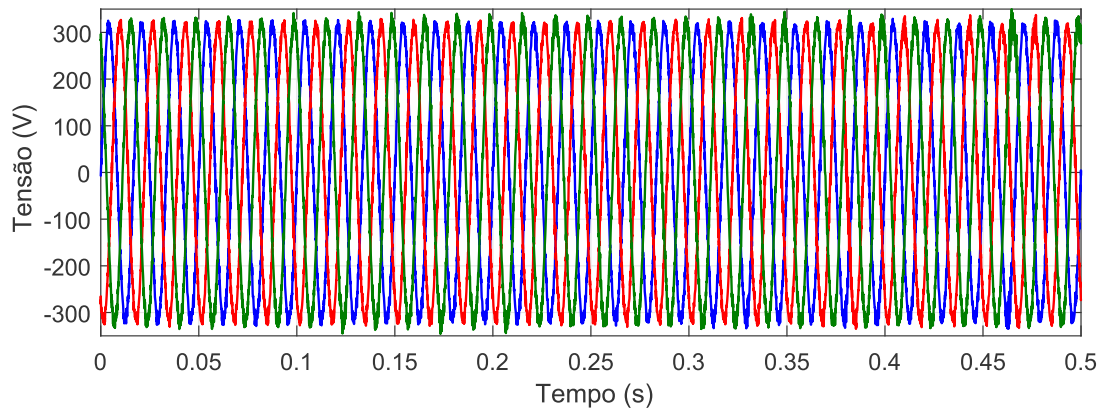
Fonte: próprio autor.

Figura 56 – Corrente da rede com cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.



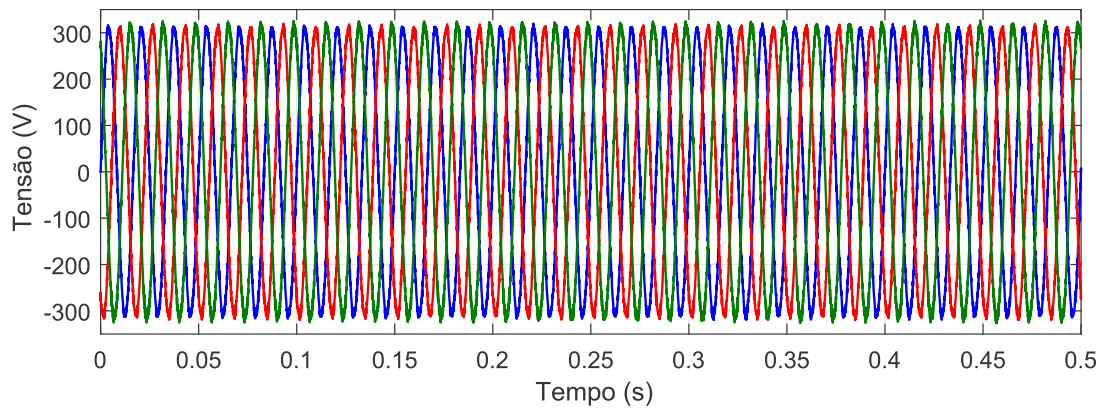
Fonte: próprio autor.

Figura 57 – Tensão nas cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.



Fonte: próprio autor.

Figura 58 – Tensão na rede com cargas não lineares monofásicas desbalanceadas.



Fonte: próprio autor.

4.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo é estudada uma topologia alternativa de conversor de doze chaves como UPQC baseada no conversor de nove chaves com a adição de um quarto braço para a conexão do neutro da carga do FHP e do filtro de saída do DVR com o intuito de fornecer um caminho para a circulação das correntes de sequência zero. Deste modo, é possível desacoplar as fases uma das outras e realizar a compensação de componentes de sequência zero de acordo com a necessidade de cada fase em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios.

É apresentada a técnica de geração das tensões de referência do neutro e das fases, pois devido a adaptação feita na topologia do conversor de nove chaves com a adição de mais um braço ao conversor torna-se necessário a utilização de uma técnica adaptada para conversores de quatro braços para geração das tensões de referências finais a serem sintetizadas pelos controles do conversor.

Foram apresentadas as técnicas de controle do DVR e do FHP. A técnica de controle do DVR é responsável pela supressão de afundamentos de tensão em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios, enquanto que a técnica de controle do FHP é responsável pela mitigação dos harmônicos de corrente da fonte originados por cargas não lineares monofásicas desbalanceadas e também pelo controle da tensão do barramento CC. As peculiaridades do controle de tensão e corrente deste conversor foram apresentadas detalhadamente no decorrer deste capítulo.

Foram realizadas simulações do UPQC de doze chaves com DVR e FHP através da ferramenta computacional *simulink/MATLAB* em que foram analisados os comportamentos das tensões da rede e da carga perante afundamentos de tensão monofásicos e trifásicos de 15 % e 30 %, onde constatou-se que a tensão nas cargas sensíveis estavam dentro dos valores aceitáveis na curva ITIC. Durante os afundamentos de tensão simulados também foi verificado que o barramento CC atendeu as solicitações do conversor no período demandado. E por fim, foram simulados o comportamento da corrente da rede e das cargas não lineares monofásicas balanceadas ou desbalanceadas onde constatou-se que o conversor conseguiu reduzir os valores de THD da corrente da rede para limites aceitáveis pela norma IEEE 519-1992.

5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No capítulo um é feita uma introdução ao tema estudado nesta dissertação, onde foram apresentadas a motivação e o objetivo do trabalho.

Já no capítulo dois é feita uma revisão bibliográfica sobre os principais temas relacionados à QEE direcionados a este trabalho. Foram apresentados os principais problemas relativos ao tema, normas e procedimentos estabelecendo os limites aceitáveis dos problemas relacionados à QEE abordados nesta dissertação e formas de compensar afundamentos de tensão e distorções harmônicas de corrente da fonte.

No capítulo três deste trabalho foi feita uma análise da viabilidade da substituição da tradicional topologia de conversor na configuração *back-to-back* pela topologia alternativa do conversor de nove chaves. Foram apresentadas as restrições, princípio de funcionamento e modulação do conversor de nove chaves mostrando seu bom desempenho principalmente quando operando como condicionador de energia série-paralelo.

Ainda no capítulo três foram apresentadas as principais topologias de conversores aplicáveis a sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios que são as topologias com barramento CC dividido e a com adição de um quarto braço. A topologia com barramento CC dividido possui a vantagem de possuir um menor número de chaves, porém necessita de uma maior tensão no barramento CC e de uma estratégia de controle específica para compensar o desbalanço de tensão nos capacitores do barramento CC. A topologia com a adição de um quarto braço possui a desvantagem de possuir mais chaves semicondutoras pelo fato do conversor possuir um braço adicional, contudo essa desvantagem pode ser compensada pelo bom desempenho desta configuração, desacoplamento do lado CC do lado CA e por exigir uma menor tensão no barramento CC. Foram mostradas essas estruturas sendo aplicadas como DVR e FHP em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios e foi demonstrado que essas configurações possuem a capacidade de realizar compensações na tensão e corrente em sistemas desequilibrados porque em sua topologia há um caminho para a circulação das correntes de sequência zero e por ter um sistema de controle que permita que o conversor injete sinais de amplitudes distintas de acordo com a necessidade de cada uma das fases.

No capítulo quatro foi proposta uma topologia de UPQC com adição de um quarto braço ao conversor de nove chaves com o objetivo de prover um caminho para a circulação das correntes de neutro, desacoplando as fases uma das outras, que aliada a um sistema de controle adequado permite que o conversor injete tensões de sequência zero e realize a supressão de afundamentos de tensão desequilibrados, além de realizar a compensação de harmônicos de corrente da fonte originados por cargas não lineares monofásicas desbalanceadas. Foi apresentado como é realizada a geração das tensões de referências finais de fase e do neutro a serem sintetizadas pelo conversor. Foi demonstrado o sistema de controle do DVR e FHP adaptados a sistemas

trifásicos desequilibrados a quatro fios que desacoplam as fases e permitem a compensação de perturbações na tensão e corrente, respectivamente, em sistemas desequilibrados.

Ainda no capítulo quatro foram realizadas simulações através da ferramenta computacional *Simulink* para verificar o comportamento do conversor de doze chaves perante harmônicos de corrente e perturbações na tensão. Os resultados foram apresentados e foi possível verificar que esta estrutura possui bons resultados na compensação de harmônicos de corrente da fonte atendendo ao estabelecido na norma IEEE 519-1992 e afundamentos de tensão nas cargas sensíveis atendendo aos parâmetros estabelecidos na curva ITIC.

Através dos resultados das simulações foi possível comprovar a eficácia do conversor de doze chaves quando utilizado como UPQC tanto na compensação de afundamentos de tensão nas cargas sensíveis quanto na compensação de harmônicos de corrente da fonte nos casos simulados.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros pode-se citar:

- Propor outras topologias de UPQC aplicáveis em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios;
- Desenvolvimento de um sistema de controle para supressão de harmônicos de tensão.

REFERÊNCIAS

- AKAGI, H. Active harmonic filters. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, v. 93, n. 12, p. 2128–2141, 2005.
- AKAGI, H.; SRIANTHUMRONG, S.; TAMAI, Y. Comparisons in circuit configuration and filtering performance between hybrid and pure shunt active filters. In: IEEE. *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 1195–1202.
- ANDRETA, A. G. et al. Estratégia híbrida de controle para inversores trifásicos conectados à rede baseada em controladores deadbeat e proporcional+ ressonante. 2014.
- AREDES, M. *Active power line conditioners, Dr.-Ing.* Tese (Doutorado) — Thesis, Technische Universität Berlin, 1996.
- BOLLEN, M. H. Understanding power quality problems. *Piscataway, NJ, USA: IEEE*, v. 1, p. 1–35, 2000.
- BRONZEADO, H.; RAMOS, A.; OLIVEIRA, J. de. Uma proposta de nomenclatura nacional de termos e definições associados à qualidade da energia elétrica. *Seminário Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica–SBQEE, II*, 1997.
- BRUMSICKLE, W. E. et al. Dynamic sag correctors: cost-effective industrial power line conditioning. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 37, n. 1, p. 212–217, 2001.
- CABRAL, R. J. Análise numérica de curto circuito utilizando componentes simétricas e componentes de fases para obter índices de afundamentos de tensão. 2010.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, H. W. Electrical power systems quality. *New York, NY: McGraw-Hill*, c1996, 1996.
- EDUCAÇÃO, P. *Conservação de Energia-Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações*. [S.l.]: Universidade Federal de Itajubá/Eletróbrás–FUPAI, 2006.
- FUJITA, H.; AKAGI, H. The unified power quality conditioner: the integration of series-and shunt-active filters. *IEEE transactions on power electronics*, IEEE, v. 13, n. 2, p. 315–322, 1998.
- GILLESKIE, R. Utility expertise in providing power quality and other engineering services. In: *Proceedings of the National Science Foundation Conference on Unbundled Power Quality Services in the Power Industry*. [S.l.: s.n.], 1996. p. 21–27.
- GOMES, M. D. B. Condicionador de energia de oito chaves para compensações de harmônicos de corrente e variações de tensão. Universidade Federal de Pernambuco, 2014.
- GOMES, M. D. B. Topologias do conversor nove chaves aplicadas a redes elétricas desbalanceadas a quatro fios. Universidade Federal de Pernambuco, 2017.
- GOMEZ, J.; MARCOS, M. Effect of distribution system protection on voltage sags. *IEEE Power Engineering Review*, IEEE, v. 20, n. 5, p. 66–68, 2000.

- GRUZS, T. M. A survey of neutral currents in three-phase computer power systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 26, n. 4, p. 719–725, 1990.
- GYUGYI, S. Active power filters. *Proceedings of the IEEE*, IEEE, p. 529–535, 1976.
- KINDERMANN, G. *Curto-Circuito*. [S.l.]: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.
- KOMINAMI, T.; FUJIMOTO, Y. A novel nine-switch inverter for independent control of two three-phase loads. In: IEEE. *Industry Applications Conference, 2007. 42nd IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2007 IEEE*. [S.l.], 2007. p. 2346–2350.
- LIMONGI, L. et al. Dual hybrid power filter based on a nine-switch inverter. *Electric Power Systems Research*, Elsevier, v. 117, p. 154–162, 2014.
- LIU, C. et al. A novel three-phase three-leg ac/ac converter using nine igbts. *IEEE Transactions on Power Electronics*, IEEE, v. 24, n. 5, p. 1151–1160, 2009.
- MERTENS, E. et al. Evaluation and trends of power quality indices in distribution system. In: IEEE. *Electrical Power Quality and Utilisation, 2007. EPQU 2007. 9th International Conference on*. [S.l.], 2007. p. 1–6.
- MORAN, S. A line voltage regulator/conditioner for harmonic-sensitive load isolation. In: IEEE. *Industry Applications Society Annual Meeting, 1989., Conference Record of the 1989 IEEE*. [S.l.], 1989. p. 947–951.
- OGATA, L. K. Engenharia de controle moderno. 4^a edição, *Pearson Prentice Hall*, 2003.
- PO-NGAM, S. The simplified control of three-phase four-leg shunt active power filter for harmonics mitigation, load balancing and reactive power compensation. In: IEEE. *Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), 2014 11th International Conference on*. [S.l.], 2014. p. 1–6.
- POTDAR, R.; CHOWHAN, C. Comparison of topologies of shunt active power filter implemented on three phase four-wire system. *International Journal of Soft Computing and Engineering (IJSCE) ISSN*, p. 2231–2307, 2011.
- QUINN, C. A.; MOHAN, N.; MEHTA, H. A four-wire, current-controlled converter provides harmonic neutralization in three-phase, four-wire systems. In: IEEE. *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 1993. APEC'93. Conference Proceedings 1993., Eighth Annual*. [S.l.], 1993. p. 841–846.
- SILVA, S. A. d. O. d. *Sistemas de Energia Ininterrupta Line Interactive Trifásicos com Compensação Ativa de Potência Série e Paralela*. Tese (Doutorado) — Tese de Doutorado, 2001.
- SILVA, S. M. Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão. *Belo Horizonte*, 1999.
- SRIANTHUMRONG, S.; AKAGI, H. A medium-voltage transformerless ac/dc power conversion system consisting of a diode rectifier and a shunt hybrid filter. In: IEEE. *Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*. [S.l.], 2002. v. 1, p. 78–85.
- STUMP, M. D.; KEANE, G. J.; LEONG, F. K. The role of custom power products in enhancing power quality at industrial facilities. In: IEEE. *Energy Management and Power Delivery, 1998. Proceedings of EMPD'98. 1998 International Conference on*. [S.l.], 1998. v. 2, p. 507–517.

VILATHGAMUWA, D.; WIJEKON, H. Mitigating zero sequence effects in dynamic voltage restorers. In: IEEE. *Power Electronics Specialists Conference, 2007. PESC 2007. IEEE*. [S.l.], 2007. p. 3079–3085.

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*, IEEE, v. 27, n. 3, p. 1177–1190, 2012.

ZMOOD, D. N.; HOLMES, D. G.; BODE, G. H. Frequency-domain analysis of three-phase linear current regulators. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IEEE, v. 37, n. 2, p. 601–610, 2001.