



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CLAUDIVAN DOMINGOS DE FREITAS

**FILTROS ATIVOS: IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA A PARTIR DA PLATAFORMA
DSPACE**

FORTALEZA

2019

CLAUDIVAN DOMINGOS DE FREITAS

FILTROS ATIVOS: IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA A PARTIR DA PLATAFORMA DSPACE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- F936f Freitas, Claudivan Domingos de.
Filtros Ativos: Implementação Prática a Partir da Plataforma dSPACE / Claudivan Domingos de Freitas. – 2019.
86 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo Lima.
1. Filtro Ativo Shunt. 2. Teoria pq. 3. Compensação de Harmônicos de Corrente. 4. Qualidade de Energia.
I. Título.

CDD 621.3

CLAUDIVAN DOMINGOS DE FREITAS

FILTROS ATIVOS: IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA A PARTIR DA PLATAFORMA DSPACE

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Francisco Kleber de Araújo
Lima (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Carlos Gustavo Castelo Branco
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Eng. Me. Dante Victor Shimoda Pereira
BravuS Engenharia

Aos meus pais, que sempre me apoiaram e me deram todo o suporte necessário para que eu chegasse até aqui. Todo amor, carinho e conselhos que me deram foram essenciais para me motivar a continuar na árdua batalha travada.

AGRADECIMENTOS

Ao Senhor Deus que, por sua bondade e misericórdia, me deu a vida e me sustenta de forma maravilhosa e abundante. Todas as lutas e dificuldades enfrentadas durante a graduação só foram vencidas porque Ele me guardou e guiou. A Ele toda a glória.

Aos meus pais, Raimundo Batista e Maria Aurinete, meus primeiros professores e melhores amigos. Vocês sempre estão ao meu lado me ensinando e espero que por toda a minha vida eu possa honrá-los e retribuir tudo o que vocês têm feito por mim.

A Jéssica Rocha, por todo carinho, amor, amizade e companhia que me deu. Você sempre me alegrou quando estava triste, me incentivou quando estava com incertezas e sempre esteve ao meu lado para me apoiar. Faltam palavras para descrever toda a gratidão que tenho por você.

Aos meus irmãos Júnior e João, que cresceram comigo e sempre foram amigos em todas as horas. Às minhas irmãs Manoela, Cláudia e Paula por todo o incentivo. Vocês são muito especiais para mim.

Ao meu orientador, professor Dr. Kleber Lima, que me direcionou durante a realização desse trabalho.

Aos meus amigos Lucas Allan, André Lima, Artur Nogueira, Felipe Monteiro, Filipe Viana, Luís Eduardo, Magno César, Mateus Gondim, Philipe Romão, Yan Matias, Vitor Arantes e Yuri Maia. Vocês me receberam quando cheguei em Fortaleza e compartilharam comigo noites mal dormidas para poder estudar e fazer projetos, risos e uma verdadeira amizade.

A Ernande Eugênio, que desde o terceiro semestre acompanhou a mim e a meus amigos, nos repassando de sua experiência. Mesmo quando já não tinha nenhum vínculo com a Universidade Federal do Ceará, marcava horário para tirar dúvidas no laboratório pela boa vontade de ajudar. Esse trabalho teve enorme contribuição sua.

Aos técnicos Eliézer, Gleidson e Pedro, que sempre estiveram dispostos a ajudar.

A Dante Shimoda, Salomão Arruda, Guilherme Hertz, Higor de Paula, Bruno Luís, Janayna Kirley e a todos os colaboradores da Bravus Engenharia. Vocês me ensinaram coisas preciosas que serão fundamentais para o meu desenvolvimento profissional e mostraram que tenho muito mais a aprender.

Aos alunos de mestrado à época desse trabalho, Mauro Elves, Délcio Barreto e Shakil Ribeiro por estarem presentes e me ajudarem com o trabalho.

Ao Programa de Educação Tutorial - PET Engenharia Elétrica, por ter me recebido

no início do curso de graduação, sendo fundamental para o meu desenvolvimento como aluno, profissional e também pessoa.

À Tecsys júnior, que proporcionou uma experiência incrível de mercado de trabalho antes mesmo de sair da UFC.

Aos meu colegas de graduação e a todos que, direta ou indiretamente, estiveram ao meu lado. Meu sentimento é de gratidão por tudo que recebi, aprendi e vivi.

"Portanto, quer comais, quer bebais ou façais
outra coisa qualquer, fazei tudo para a glória de
Deus"

(1 Coríntios 10:31)

RESUMO

O constante crescimento de demanda de energia elétrica e as características não lineares das cargas têm tornado cada vez mais urgente a busca por qualidade de energia. Diversas consequências da operação de alguns equipamentos são prejudiciais à rede elétrica, causando distorções, como *offset* em corrente contínua, ruído, interharmônicos e harmônicos. Esta última, em particular atenção nesse trabalho, é alvo de normas que visam determinar limites para a sua quantidade existente em um sistema, estando os consumidores, em alguns casos, sujeitos a multas. Entre as soluções existentes para mitigação de harmônicos, pode-se citar os filtros passivo, *shunt* e híbrido. O filtro ativo *shunt* foi o escolhido nesse trabalho para se reduzir o conteúdo harmônico nas correntes de sistemas elétricos, compensando a corrente demandada pela carga para que as correntes da rede possam obedecer o padrão de comportamento sinusoidal e balanceado em um sistema trifásico. Para se controlar o conversor do filtro, é necessário obter as correntes de referência, o que foi feito por meio da aplicação da Teoria de potências instantâneas real e imaginária. Esse trabalho se propôs a, por meio de uma abordagem prática utilizando a plataforma dSPACE, implementar um filtro ativo de potência *shunt* utilizando-se da teoria de potência instantânea para reduzir os efeitos de harmônicos de corrente drenados da rede elétrica por uma carga não linear. Para uma primeira configuração de carga não linear utilizada contendo uma ponte retificadora trifásica, que possuía componentes resistivos no seu barramento CC, em paralelo com uma carga resistiva desbalanceada, foi possível reduzir o THD de corrente nas três fases, a, b e c de 17,04%, 15,77% e 14,97% para 6,42%, 5,99% e 5,99%, respectivamente. Para uma segunda carga contendo um transformador de potência e um retificador trifásico, que possuía uma carga RC em seu barramento CC, foi possível reduzir o THD de corrente nas três fases, a, b e c de 42,66%, 45,75% e 39,36% para 11,69%, 13,48% e 13,18%, respectivamente. Portanto, foi possível reduzir o nível de distorção harmônica de corrente para dois tipos diferentes de carga, melhorando, assim, a qualidade de energia das configurações de circuitos propostas.

Palavras-chave: Filtro Ativo *Shunt*. Teoria pq. Compensação de Harmônicos de Corrente. Qualidade de Energia.

ABSTRACT

The constant growth of electricity demand and the nonlinear characteristics of loads have made the search for power quality increasingly urgent. Several consequences of the operation of some equipment deteriorate the quality of the power grid, causing distortions such as direct current offset, noise, interharmonics and harmonics. The harmonics, which has particular attention in this paper, is the subject of rules that aim to determine limits to its quantity in a system, wich can make consumers pay fines when not observed. Harmonic mitigation solutions include passive, shunt and hybrid filters. The active filter shunt was the solution chosen in this work to reduce the harmonic currents of electrical systems, compensating the demanded current by the load in the way that the grid current can follow the sinusoidal and balanced behavior pattern in a three phase system. To control the filter converter, it is necessary to obtain the reference currents, which was done by applying the real and imaginary instantaneous power Theory. This work proposed, through a practical approach using the dSPACE platform, the implementation of an shunt active power filter using instantaneous power Theory to reduce the effects of harmonics current drained from the grid by a nonlinear load. At first it was used a nonlinear load configuration containing a three-phase rectifier bridge, which had resistive components on its DC bus, in parallel with an unbalanced resistive load. It was possible to reduce the current THD in the three phases, a, b and c from 17.04%, 15.77 % and 14.97 % to 6.42%, 5.99%, and 5.99%, respectively. Then, it was used a second load containing a power transformer and a three-phase rectifier, which had an RC load on its DC bus. It was possible to reduce the current THD in the three phases, a, b and c from 42.66%, 45.75% and 39.36 % to 11.69 %, 13.48 % and 13.18 %, respectively. Therefore, it was possible to reduce the level of harmonic current distortion for two different types of load, thus improving the power quality of the proposed circuit configurations.

Keywords: Active Filter Shunt. pq Theory. Harmonic Current Compensation. Energy Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Topologia geral filtro <i>shunt</i>	20
Figura 2 – Corrente e tensão de uma carga linear.	29
Figura 3 – Corrente distorcida quando a tensão é senoidal.	29
Figura 4 – Filtro passivo série conectado entre a rede elétrica e uma carga não linear.	30
Figura 5 – Filtro passivo paralelo conectado a um PCC.	31
Figura 6 – Filtro passivo paralelo de sintonia.	32
Figura 7 – Variação de impedância e reatâncias com a frequência.	33
Figura 8 – Filtro amortecido de 2 ^a ordem.	34
Figura 9 – Outros tipos de filtros passivos amortecidos: Primeira ordem a) e b), terceira ordem c) e C d).	35
Figura 10 – Filtro Ativo Série.	36
Figura 11 – Filtro híbrido com partes ativa e passiva em paralelo.	38
Figura 12 – Filtro híbrido <i>shunt</i> com partes ativa e passiva em série.	39
Figura 13 – Filtro híbrido com parte ativa em série e parte passiva em paralelo.	40
Figura 14 – Conversor VSI.	41
Figura 15 – Conversor CSI.	42
Figura 16 – Filtro ativo a três fios de conversor com seis chaves e barramento único.	43
Figura 17 – Filtro ativo a três fios de conversor com quatro chaves e dois capacitores no barramento.	44
Figura 18 – Filtro ativo a quatro fios de conversor com quatro braços.	45
Figura 19 – Filtro ativo a quatro fios de conversor com capacitor em derivação.	46
Figura 20 – Filtro ativo a quatro fios de conversor <i>Neutral Point Clamped</i>	47
Figura 21 – Filtro ativo a quatro fios de conversor com três ponte completas monofásicas.	48
Figura 22 – Filtro ativo a quatro fios de conversor com três ponte completas monofásicas.	48
Figura 23 – Diagrama básico da geração das correntes de referência.	57
Figura 24 – Formas de onda de corrente do filtro e PWM no controle por limites de corrente.	59
Figura 25 – Controle por Histerese e conexão do controle às chaves de potência do conversor do filtro.	59
Figura 26 – Bancada utilizada para validação dos conceitos apresentados.	62
Figura 27 – Conversor comercial utilizado para implementar o filtro ativo <i>shunt</i>	63
Figura 28 – Plataforma DS1103.	63

Figura 29 – Painel dSPACE.	64
Figura 30 – Sensor de corrente LV 25-p e sensor de corrente LAH 100-p.	64
Figura 31 – Diagrama básico do fluxo de dados entre o dSPACE e os demais sistemas e equipamentos da bancada.	65
Figura 32 – Esquema de ligação para a primeira configuração de carga.	66
Figura 33 – Esquema de ligação para a segunda configuração de carga.	66
Figura 34 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH1-CH3: Correntes da rede sem compensação do filtro ativo (10 A/Div).	67
Figura 35 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH2: Corrente de uma única fase da rede sem compensação do filtro ativo (10 A/Div).	68
Figura 36 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH1: Tensão de linha da rede (100V/Div). CH2: Corrente na fase b da rede sem compensação do filtro ativo (10 A/Div).	68
Figura 37 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Potências real, média e oscilante antes da operação do filtro ativo paralelo.	69
Figura 38 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Potência imaginária antes da operação do filtro ativo paralelo.	70
Figura 39 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH1-CH3: Correntes da rede com compensação do filtro ativo (10 A/Div).	71
Figura 40 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH1-CH3: correntes da rede. Mudança de comportamento da corrente com a atuação do filtro ativo (10 A/Div).	72
Figura 41 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Comparação entre a corrente da rede (amarelo), a corrente da carga (verde) e a corrente de compensação do filtro (roxo) - (10 A/Div).	72
Figura 42 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Potências real, média e oscilante durante a operação do filtro ativo paralelo.	73
Figura 43 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Potência imaginária durante a operação do filtro ativo paralelo.	73
Figura 44 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. CH1-CH3: Correntes de rede antes da compensação (6 A/Div).	75

Figura 45 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. Potências real, média e oscilante antes da operação do filtro ativo paralelo.	75
Figura 46 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. Potência imaginária antes da operação do filtro ativo paralelo.	76
Figura 47 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. Tensões da rede com distorção.	76
Figura 48 – Resultados experimentais para segunda configuração de carga. CH1-CH3: Correntes da rede com compensação do filtro ativo (6 A/Div).	77
Figura 49 – Resultados experimentais para segunda configuração de carga. CH1-CH3: correntes da rede. Mudança de comportamento da corrente com a atuação do filtro ativo (7 A/Div).	78
Figura 50 – Resultados experimentais para segunda configuração de carga. Comparação entre a corrente da rede (verde), a corrente da carga (amarelo) e corrente de compensação do filtro (roxo). (10 A/Div).	79
Figura 51 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. Potências real, média e oscilante durante a operação do filtro ativo paralelo.	80
Figura 52 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. Potências imaginária após a operação do filtro ativo paralelo.	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados técnicos do conversor comercial.	62
Tabela 2 – Dados técnicos dos sensores de tensão, LV 25-P, e de corrente, LAH 100-P.	64
Tabela 3 – Dados de placa do transformador.	65
Tabela 4 – Comparação entre os valores de TDH para a primeira carga.	74
Tabela 5 – Comparação entre os valores de TDH para a segunda carga.	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

FP_D	Fator de Potência de Deslocamento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI	<i>American National Standart Institute</i>
CC	Corrente Contínua
CSI	<i>Current Source Inverter</i>
DEE	Departamento de Engenharia Elétrica
DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
dSPACE	<i>Digital Signal Processing And Control Engineering</i>
FP	Fator de Potência
I/O	<i>Input/Output</i>
IEC	<i>International Electrotchincal Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LAPIS	Laboratório de Aplicações de Eletrônica de Potência e Integração a Sistemas de Energia
LEDs	<i>Light Emitter Diodes</i>
PCC	Ponto Comum de Conexão
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>
SEP	Sistem Elétrico de Potência
TDD	Taxa de Distorção de Demanda
TDH	Taxa de Distorção Harmônica
UFC	Universidade Federal do Ceará
VSI	<i>Voltage Source Inverter</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

$f(t)$	função periódica no domínio do tempo
i_s	corrente elétrica na fonte [A]
i_{la}, i_{lb}, i_{lc}	correntes elétricas de linha [A]
i_{sn}	corrente elétrica na fonte por fase, onde $n=a,b,c$ [A]
i_f	corrente elétrica no filtro [A]
i_{fn}	corrente elétrica no filtro por fase, onde $n=a,b,c$ [A]
i	corrente elétrica na carga [A]
i_n	corrente elétrica na carga por fase, onde $n=a,b,c$ [A]
i_{n1}	corrente elétrica fundamental na carga por fase, onde $n=a,b,c$ [A]
i_{nk}	corrente elétrica fundamental na carga por fase, onde $n=a,b,c$ e k representa a ordem da corrente [A].
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}, i_{sn}$	corrente elétrica das linhas a,b,c e neutro na fonte [A]
$i_{fa}, i_{fb}, i_{fc}, i_{fn}$	corrente elétrica a,b,c e neutro no filtro [A]
i_a, i_b, i_c, i_n	corrente elétrica de linha a,b,c e neutro na carga [A]
I_k	corrente elétrica eficaz de ordem k [A]
I_1	corrente elétrica eficaz fundamental [A]
$i(t)$	corrente elétrica instantânea [A]
$i_n(t)$	corrente elétrica instantânea, onde $n=a,b,c$ [A]
$i_{h\alpha}, i_{h\beta}$	correntes elétricas instantâneas de referência nas coordenadas $\alpha\beta$ [A]
i^*_a, i^*_b, i^*_c	corrente elétrica instantânea de referência nas coordenadas abc [A]
$v(t)$	tensão elétrica instantânea [V]
v_a, v_b, v_c	tensão elétrica do sistema a-b-c [V]
$v_n(t)$	tensão elétrica instantânea do sistema trifásico, onde $n=a,b,c$ [A]
V_{nk}	tensão eficaz da harmônica " k ", onde $n=a,b,c$ [V]
\dot{V}_{0k}	fator tensão de sequência zero de ordem " k " [V];
\dot{V}_{+k}	fator tensão de sequência positiva de ordem " k " [V];
\dot{V}_{-k}	fator tensão de sequência negativa de ordem " k " [V];

$\dot{V}_{ak}, \dot{V}_{bk}, \dot{V}_{ck}$	fasor tensão no sistema abc de ordem "k"[V];
v_0, v_α, v_β	tensões elétricas do sistema $\alpha\beta 0$ [V];
$p_0, \bar{p}_0, \tilde{p}_0$	potência, potência média e potência oscilante de sequência zero
p, \bar{p}, \tilde{p}	potência, potência média e potência oscilante reais
q, \bar{q}, \tilde{q}	potência, potência média e potência oscilante imaginárias
\bar{P}_{perdas}	potência ativa média de referência para compensação do capacitor do lado CC do conversor.
k	ordem do componente harmônico
a_0	componente média de uma função periódica no domínio do tempo
a_k, b_k	amplitude da componente de ordem k da série de Fourier
ω	frequência angular [rad/s]
ϕ	defasamento angular entre corrente e tensão fundamentais [°]
δ	ângulo da corrente instantânea
f	frequência elétrica [Hz]
f_0	frequência de sintonia [Hz]
L	indutância [H]
L_{fn}	indutância por fase, onde n=a,b,c [H]
$L_{fa}, L_{fb}, L_{fc}, L_{fn}$	indutância de linha nas fases a,b,c e neutro do conversor[H]
C	capacitância [F]
C_f	capacitância do barramento do conversor do filtro [F]
R_{fn}	Resistência por fase, onde n=a,b,c [Ω]

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Motivação	19
1.2	Objetivos	20
1.2.1	<i>Objetivos Específicos</i>	20
1.3	Revisão Bibliográfica	21
1.4	Estrutura do Trabalho	22
2	A QUALIDADE DE ENERGIA E OS FILTROS	24
2.1	Qualidade de Energia	24
2.1.1	<i>Harmônicos</i>	25
2.1.1.1	<i>Série de Fourier</i>	25
2.1.1.2	<i>Organizações e Normas Regulamentadoras</i>	26
2.1.1.3	<i>Índices de Qualidade</i>	27
2.2	Cargas Não Lineares	28
2.3	Filtros Passivos	30
2.3.1	<i>Filtro Passivo Série</i>	30
2.3.2	<i>Filtro Passivo Paralelo</i>	31
2.3.3	<i>Filtro Passivo Paralelo de Sintonia</i>	31
2.3.4	<i>Filtro Passivo Paralelo Amortecido</i>	33
2.4	Filtros Ativos	36
2.4.1	<i>Filtro Ativo Série</i>	36
2.4.2	<i>Filtro Ativo Shunt</i>	36
2.5	Filtros Híbridos	37
2.5.1	<i>Topologia com Filtros Ativo e Passivo em Paralelo</i>	37
2.5.2	<i>Topologia Shunt com Filtro Ativo e Filtro Passivo em Série</i>	38
2.5.3	<i>Topologia com Filtro Ativo em Série e Filtro Passivo em Paralelo</i>	39
2.6	Conclusão	40
3	FILTRO ATIVO SHUNT	41
3.1	Topologias	42
3.1.1	<i>Topologias a Três Fios</i>	43
3.1.2	<i>Topologias a Quatro Fios</i>	44

3.2	Princípio de Funcionamento	47
3.3	Conclusão	50
4	ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA OBTENÇÃO DAS CORREN- TES DE REFERÊNCIA E TÉCNICA DE CONTROLE DO FILTRO ATIVO PARALELO	51
4.1	Teoria PQ	52
4.1.1	<i>Componentes simétricas</i>	52
4.1.2	<i>Potências Ativa e Reativa Instantâneas nas Coordenadas $\alpha\beta 0$</i>	53
4.1.3	<i>Potências instantâneas em Função das Componentes Simétricas</i>	55
4.1.4	<i>Correntes de Referência de um Filtro Ativo Paralelo</i>	56
4.2	Técnica de Modulação por Banda de Histerese	58
4.3	Conclusão	59
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS	61
5.1	Bancada	61
5.2	Resultados Experimentais	65
5.2.0.1	<i>Primeira configuração de carga</i>	67
5.2.0.1.1	<i>Sem a atuação do filtro</i>	67
5.2.1	<i>Com a atuação do filtro ativo</i>	70
5.2.1.1	<i>Segunda Configuração de carga</i>	74
5.2.1.1.1	<i>Sem a atuação do filtro</i>	74
5.2.1.1.2	<i>Com atuação do filtro</i>	77
5.2.2	Conclusão	81
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	82
	REFERÊNCIAS	84

1 INTRODUÇÃO

O avanço tecnológico na área de eletrônica de potência tem tornado possível que as pessoas possam desfrutar de muitos benefícios provindos da aplicação de energia elétrica em vários setores de suas vidas além daqueles usufruídos por gerações anteriores. É notório o crescimento no uso de equipamentos eletrônicos em residências, comércios e, em escala ainda maior, indústrias. Nesse contexto, a eletrônica de potência é matéria de grande importância porque busca o processamento eficiente da energia, um tema de muita relevância tendo em vista o aumento da demanda de energia elétrica e os impactos ambientais existentes no processo de sua geração (ORTMANN, 2008).

Apesar das vantagens proporcionadas pela utilização de equipamentos eletrônicos, os desafios para se utilizar a energia elétrica de forma eficiente tornaram-se maiores. Aparelhos que têm como característica a não linearidade drenam correntes distorcidas da rede elétrica. De acordo com Ortmann (2008), os distúrbios causados por essas correntes são ocasionados pelo surgimento de harmônicos, que possuem efeitos mais evidentes no comércio e na indústria que em instalações residenciais consideradas isoladamente.

Soluções para os problemas causados por harmônicos vêm sendo desenvolvidas ao longo dos anos. Algumas delas utilizam-se de transformadores, porém com custos econômicos elevados (KASSICK, 2008), e outras de filtros (WATEGAONKAR *et al.*, 2018). O presente trabalho foi desenvolvido visando aplicar de forma prática um filtro ativo para melhorar a qualidade da energia elétrica de um sistema trifásico a três condutores que possua carga não linear a ele conectado.

1.1 Motivação

A presença de harmônicos pode causar prejuízos, tanto econômicos quanto, em última instância, ambientais. Como exemplo, pode-se citar a necessidade de componentes mais robustos, como cabos elétricos, e conseqüentemente mais caros, para suportar a circulação de harmônicos na distribuição de energia. Além disso, polêmicas ambientais envolvendo a geração de energia e a sua crescente demanda tornam o tema "Processamento Eficiente de Energia" algo de grande relevância para estudos e aplicações.

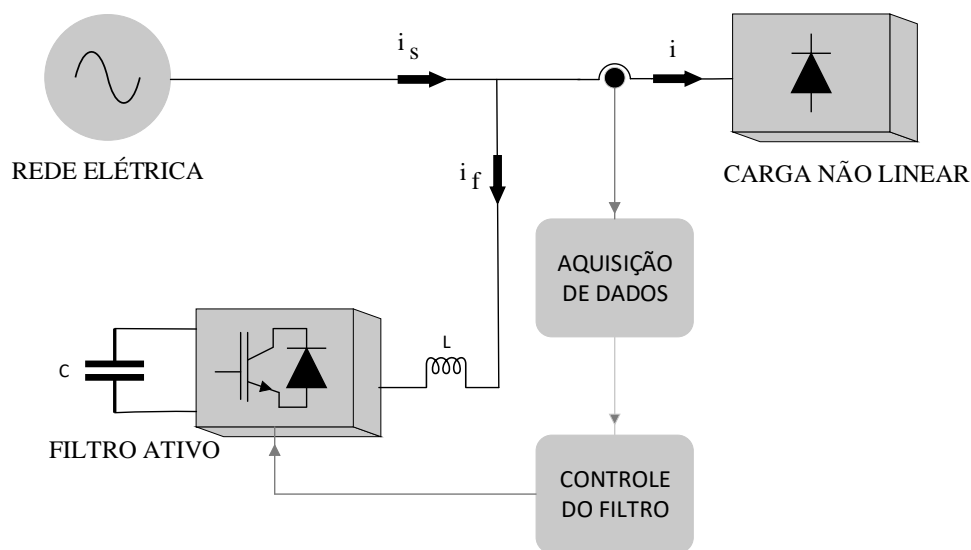
1.2 Objetivos

Visando solucionar o problema de harmônicos de corrente na distribuição de energia elétrica, este trabalho tem como objetivos:

- Apresentar um estudo sobre filtros ativos e estratégias e técnicas para o seu controle;
- Implementar de forma prática um filtro ativo *shunt* para uma carga não linear;
- Melhorar a qualidade de energia de um sistema elétrico com a utilização de um filtro ativo em paralelo.

A Figura 1 apresenta, de maneira geral, o filtro ativo, que é alvo de estudo desse trabalho, conectado em paralelo com a rede elétrica para filtrar as correntes harmônicas drenadas da rede elétrica pela carga não linear.

Figura 1 – Topologia geral filtro *shunt*.



Fonte: Adaptado de (WATANABE *et al.*, 2004).

1.2.1 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desse trabalho para a filtragem de harmônicos em sistemas elétricos são:

- Estudo de filtros ativos;
- Aplicação de filtro ativo *shunt* para redução de harmônicos em sistemas elétricos;
- Estudo da Teoria pq para controle do filtro ativo *shunt*;

- Validação do filtro *shunt* por meio da plataforma *Digital Signal Processing And Control Engineering* (dSPACE).

1.3 Revisão Bibliográfica

A possibilidade de aplicação de diferentes tipos de filtros em sistemas de energia tem levado a trabalhos que fazem comparações entre os seus desempenhos. Em Aswal e Pal (2018), os filtros passivo e ativo são comparados considerando o mesmo objetivo para ambos, atenuação de harmônicos presentes em um sistema e, sob as mesmas condições, carga RL e um retificador trifásico não controlado, os resultados encontrados mostraram que o filtro ativo foi mais efetivo, reduzindo a Taxa de Distorção Harmônica (TDH) de 20,41% para 2,88%. Em Kedra (2014) também são feitas comparações, porém, entre um filtro ativo e dois filtros híbridos. Os resultados obtidos por todas as topologias propostas alcançaram o objetivo de mitigar as correntes harmônicas. Após uma análise de potência processada e possíveis custos envolvidos, o dispositivo que pareceu mais vantajoso foi o filtro híbrido com sua parte passiva em paralelo, apesar de o filtro ativo possuir algumas outras vantagens, como o seu controle. Pelo fato de os dispositivos apresentarem resultados semelhantes, uma análise específica para cada projeto se faz necessária para determinar o melhor filtro a ser adotado. Esses trabalhos mostram que há possibilidades variadas para se implementar filtros (passivos, ativos ou híbridos) e que eles são eficientes em reduzir harmônicos.

Em Wategaonkar *et al.* (2018) é feito um trabalho para reduzir harmônicos num sistema elétrico apoiando-se na teoria de potência instantânea para a estratégia de controle. As correntes de compensação são geradas por meio da modulação por histerese e a simulação é feita no *Simulink/Matlab*. A abordagem feita para o filtro apresentou-se satisfatória, reduzindo a TDH, mostrando que sua aplicação nos dias atuais pode beneficiar o Sistema Elétrico de Potência (SEP). A utilização da teoria de potência instantânea para realizar o controle dos filtros há anos é aplicada e atualmente continua a ser uma das mais utilizadas devido à sua eficiência.

Em Lo *et al.* (2017) o controle digital de um filtro ativo *shunt* é feito utilizando um *Digital Signal Processor* (DSP). Os sinais envolvidos na implementação digital são processados em tempo discreto. Essa forma de implementação tem muitas vantagens, principalmente maior robustez em relação a interferências eletromagnéticas e versatilidade para pôr em prática de técnicas de controle complexas. A utilização de plataformas digitais passa a ser a tendência para o controle de filtros, principalmente com o avanço da tecnologia para estes dispositivos, como

melhor processamento dos sinais, maior capacidade de armazenamento de dados e praticidade de aplicação.

Em Silva *et al.* (2017) um filtro ativo paralelo é implementado utilizando um dSPACE. O controle do filtro é feito nesse sistema como uma forma de testá-lo sob condições que possam se aproximar da realidade. O sistema funcionou de acordo com o esperado, apresentando compensação de reativos e redução de harmônicos. Muitas outras aplicações utilizando o dSPACE podem ser encontradas, como em (FONSECA, 2019). Em Benchouia *et al.* (2015), uma implementação de um controlador adaptativo *Fuzzy* é feita nesse dispositivo, que se mostra muito eficaz. Com o controlador *Fuzzy*, o sistema é capaz de se adaptar às variações do sistema e buscar solucionar os problemas. O dSPACE é um dispositivo que vem sendo utilizado para dar agilidade na implementação de estudos teóricos, mostrando-se de grande utilidade.

O filtro implementado neste trabalho utilizará a plataforma dSPACE e será conectado à rede em paralelo. A teoria de potência instantânea será utilizada nessa aplicação.

1.4 Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido em 5 capítulos. No Capítulo 2 é feita uma breve explanação sobre o tema qualidade de energia, e, por consequência, harmônicos de corrente, mostrando a importância do assunto e a necessidade de se buscar equipamentos que melhorem o processamento de energia. Como solução para isso, são apresentados os filtros e suas modalidades: passiva, ativa e híbrida. As vantagens e desvantagens da utilização desses filtros são ponderadas.

O capítulo 3 dá maior ênfase no filtro ativo *shunt*, que será implementado em um experimento prático. Sua topologia, incluindo todos os componentes, princípio de funcionamento e operação são detalhados.

O capítulo 4 apresenta a estratégia de controle utilizada. Dentre as estratégias de controle existentes, o trabalho faz uma abordagem do ponto de vista da teoria de potências ativa e reativa instantâneas, que tem se mostrado eficiente e muito utilizada para controle de filtros ativos *shunt*. A técnica de modulação utilizada para o conversor é a modulação por banda histerese, que apresenta rapidez na modulação.

No Capítulo 5, são especificados os parâmetros e componentes do sistema a ser utilizado em experimento de bancada. Os resultados experimentais coletados utilizando o *Dspace* são apresentados e analisados do ponto de vista da compensação de harmônicos e da qualidade de energia da rede elétrica.

O Capítulo 6 desenvolve uma discussão final sobre o trabalho e os resultados obtidos experimentalmente, bem como propõe trabalhos futuros que podem contribuir com o que é apresentado nesse trabalho.

2 A QUALIDADE DE ENERGIA E OS FILTROS

Os principais tópicos desenvolvidos nesse capítulo são:

- Qualidade de energia elétrica;
- Cargas não lineares e seus aspectos gerais, uma vez que, quando utilizadas, drenam correntes harmônicas, algo preocupante do ponto de vista da qualidade de energia;
- Filtros, que mitigam os efeitos dos harmônicos, serão estudados de maneira geral.

2.1 Qualidade de Energia

Questões envolvendo o tema qualidade de energia tem sido motivo de preocupação entre estudiosos, concessionárias de energia, empresários, dentre outros, devido o aumento expressivo de cargas não lineares e a grande quantidade de equipamentos sensíveis conectados à rede elétrica (ORTMANN, 2008). A literatura tem definido qualidade de energia elétrica como "a condição do sinal elétrico de tensão e corrente que permite que equipamentos, processos, instalações e sistemas elétricos operem de forma satisfatória, sem prejuízos de desempenho e de vida útil"(LEÃO *et al.*, 2014, p. 4).

As cargas elétricas são acionadas por energia elétrica, que deve atender o padrão de qualidade de acordo com o estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), agência reguladora do setor elétrico (ANEEL, 2018). As características de tensão que são necessárias para o atendimento desse padrão são: forma de onda alternada senoidal, frequência fixa e amplitude conforme a modalidade de atendimento ao cliente, baixa, média ou alta tensão. Quanto à corrente, sua forma de onda deve seguir a da tensão, mantendo o deslocamento angular em relação a ela dentro de faixas padronizadas (LEÃO *et al.*, 2014). Se a alimentação das cargas é diferente da esperada, os equipamentos elétricos podem operar inadequadamente ou falhar.

Deve-se dar considerável atenção aos fenômenos elétricos que causam distorção das formas de onda de tensão e corrente, um fator de importância, pois sua existência implica em redução da qualidade de energia. Entre os principais tipos de distorção, pode-se citar: *Offset CC*, ruído, interharmônicos e harmônicos.

2.1.1 Harmônicos

Um dos principais distúrbios que degradam a qualidade de energia elétrica é a distorção da corrente causada por harmônicos. A causa dessa distorção é a sobreposição de um conjunto de ondas senoidais, onde estão presentes a componente fundamental, que possui frequência de 60 Hz no Brasil, e as denominadas harmônicas, que possuem frequências múltiplas inteiras em relação à fundamental (ORTMANN, 2008). A circulação de correntes harmônicas promove alguns efeitos indesejados, como:

- Aumento da temperatura e perdas em equipamentos elétricos;
- Atuação indevida de equipamentos de proteção;
- Distorção da corrente e da tensão elétrica.

2.1.1.1 Série de Fourier

Uma ferramenta matemática que é muito útil na análise de harmônicos é a série de Fourier. Ela permite o estabelecimento de uma relação entre uma função contínua no domínio do tempo e uma função discreta no domínio da frequência. Uma função periódica senoidal $f(t)$ pode ser definida por um somatório de senos e cossenos com amplitudes e frequências diferentes, como apresentado em (2.1),

$$f(t) = f(t + k \cdot T) = a_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega_1 t) + b_k \sin(k\omega_1 t)], k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad (2.1)$$

em que:

- $f(t)$ função senoidal periódica;
- a_0 valor médio de $f(t)$;
- a_k, b_k amplitude da componente de ordem k ;
- ω_1 frequência angular fundamental de $f(t)$;
- k ordem do componente harmônico.

O valor médio (a_0), e as amplitudes das ondas cossenoidais (a_k) e senoidais (b_k) podem ser dados, respectivamente, por:

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad (2.2)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \cos(k\omega_1 t) dt, \quad k = 1, 2, \dots, \infty, \quad (2.3)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cdot \sin(k\omega_1 t) dt, \quad k = 1, 2, \dots, \infty. \quad (2.4)$$

O que pode ser observado a partir de (2.1) a (2.4) é que formas de ondas distorcidas e periódicas podem ser analisadas à luz de suas componentes vistas separadamente. Essas componentes possuem diferentes frequências e amplitudes o que acaba provocando distorções em sua forma de onda. Isso é o caso de uma corrente que possui conteúdo harmônico e não mais apresenta a forma senoidal.

2.1.1.2 Organizações e Normas Regulamentadoras

Em face aos problemas causados por harmônicos no SEP, diversas organizações compostas por profissionais competentes da área de Engenharia Elétrica, a nível nacional e internacional, estabeleceram procedimentos, critérios e normas a respeito do nível de harmônicos na rede elétrica. Entre essas organizações, pode-se citar a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), o *American National Standart Institute* (ANSI) e a *International Electrotchincal Commission* (IEC).

A norma IEEE 519:2014 trata de limites de harmônicos, de acordo com a sua frequência, que podem ser injetados no Ponto Comum de Conexão (PCC), sendo este o ponto de entrega de energia pela concessionária. Estes limites foram estabelecidos principalmente com o objetivo de limitar a distorção de tensão. (IEEE 519 Working Group and others, 2014).

As normas IEC 61000-3-2:2009 e IEC 61000-3-4 (1998) definem os limites de componentes harmônicos em equipamentos conectados em baixa tensão (220/380 V, 230/400 V e 240/415 V) com correntes inferiores a 16 A e superiores a 16 A, respectivamente (International Electrotechnical Commission and others, 2009; International Electrotechnical Commission and others, 1998).

No Brasil, A ANEEL propõe valores para distorção harmônica no sistema de distribuição no módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) (ANEEL, 2018), enquanto a ABNT fala na NBR 5410:2004 sobre determinados procedimentos a serem tomados no dimensionamento de instalações elétricas de baixa tensão quando existem específicas porcentagens de harmônicos presentes (ABNT, 2004).

2.1.1.3 Índices de Qualidade

Alguns índices e fatores de desempenho são utilizados com o objetivo de obter-se quantitativos que permitam a avaliação de um sistema (ORTMANN, 2008). Um desses índices é a TDH de corrente, que é definido como

$$TDH_i = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \frac{I_k^2}{I_1^2}}, \quad (2.5)$$

em que:

- I_k corrente eficaz de ordem k ;
- I_1 corrente eficaz fundamental;
- k ordem do componente harmônico.

A equação (2.5) mostra que, quanto maior for o conteúdo harmônico maior será a TDH, indicando a situação de uma instalação elétrica. A partir desse valor quantificado, é possível se ter ideia de quais providências devem ser tomadas para melhorar a qualidade da energia elétrica. Na norma IEEE 519:2014 é apresentado o índice Taxa de Distorção de Demanda (TDD). Ele assemelha-se à TDH no seu cálculo, porém, considera a raiz quadrada da razão entre o somatório das correntes harmônicas e a corrente demandada pelo sistema elétrico. Para correntes abaixo de 20 A, a TDD deve ser no máximo 5% e para correntes entre 20 e 50 A, 8 % (IEEE 519 Working Group and others, 2014).

Outro índice é o Fator de Potência de Deslocamento (FP_D) que, de acordo com a teoria clássica da potência, é definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente

$$FP_D = \cos(\phi_1) = \frac{P}{S}, \quad (2.6)$$

em que:

- FP_D Fator de Potência de Deslocamento;
- ϕ defasamento angular entre corrente e tensão fundamentais;
- P Potência ativa;
- S Potência aparente;

O FP_D considera somente o defasamento entre corrente e tensão do circuito. Entretanto, deve-se considerar o efeito causado pelas correntes harmônicas, calculando o Fator de

Potência (FP), definido como

$$FP = \frac{\cos(\phi_1)}{\sqrt{1 + TDH_i^2}}, \quad (2.7)$$

Através da equação (2.7), observa-se que quando o FP é 1 ou próximo disso, a maior parte da potência fornecida pela fonte será de potência útil. A ANEEL determina que o FP deve estar entre 1,00 e 0,92 capacitivo no período de seis horas consecutivas entre 23h30min e 6h30min, a definir pela concessionária, e, no período complementar, entre 0,92 e 1,00 indutivo, podendo o consumidor ser multado caso não obedeça esse requisito (ANEEL, 2010). Além disso, é possível observar que alguns soluções aplicadas na indústria reduzem apenas o FP_D , podendo o FP não se encaixar nos padrões devido os componentes harmônicos que quantificam o índice TDH_i

2.2 Cargas Não Lineares

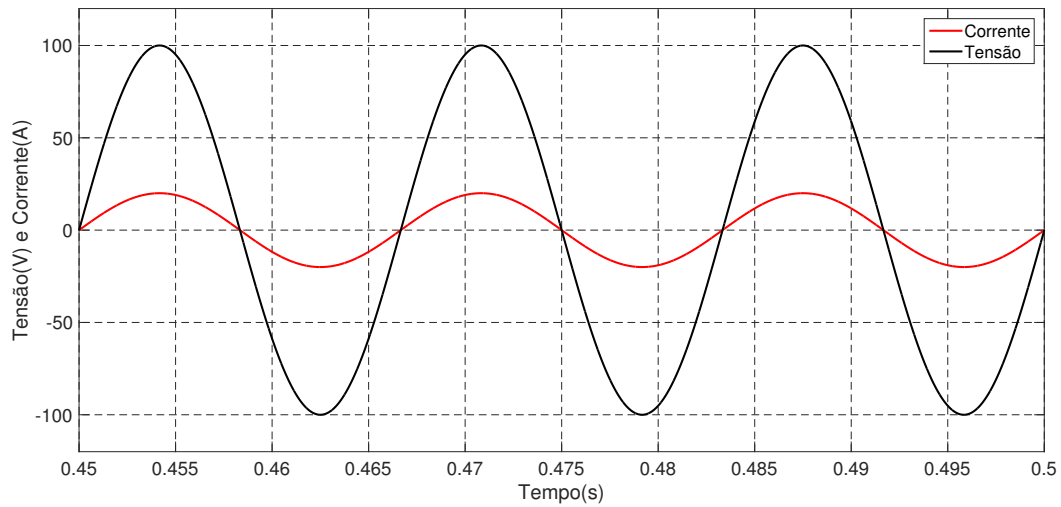
Os equipamentos elétricos nas instalações de consumidores juntamente com a eletricidade fornecida pelas concessionárias são capazes de influenciar determinadas características da energia elétrica. As cargas não lineares são responsáveis por um número considerável de perturbações elétricas no SEP.

As chamadas cargas lineares drenam correntes que seguem a forma de onda da tensão aplicada por uma fonte. Isso significa que se um tensão senoidal for aplicada a esse tipo de carga, sua corrente também será senoidal, assim como apresentado na Figura 2. As cargas não lineares, por outro lado, têm como característica correntes distorcidas mesmo quando energizadas por uma fonte de tensão não distorcida (LEÃO *et al.*, 2014), como ilustrado na Figura 3.

A utilização de cargas não lineares leva o SEP a situações delicadas com respeito à qualidade de energia, uma vez que se tem aumentado o número de equipamentos com essa característica, principalmente em indústrias. Dos problemas causados entre a interação do sistema elétrico com as cargas não lineares, pode-se citar: correntes harmônicas, correntes reativas, desbalanceamento de corrente e flutuação de tensão (LEÃO *et al.*, 2014).

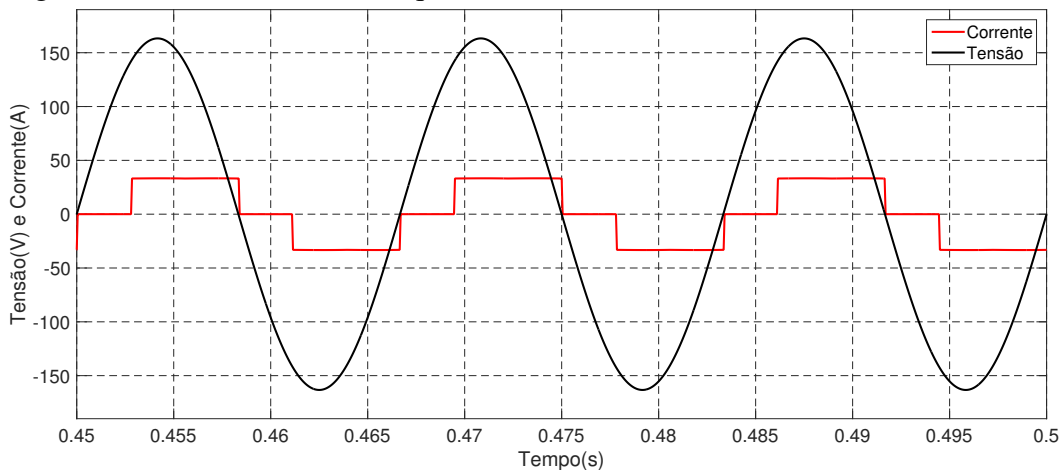
De acordo com Ortmann (2008), de maneira geral, as cargas não lineares podem ser agrupadas nas seguintes categorias: dispositivos saturáveis, dispositivos a arco e conversores trifásicos.

Figura 2 – Corrente e tensão de uma carga linear.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 3 – Corrente distorcida quando a tensão é senoidal.



Fonte: Próprio Autor.

Na primeira categoria pode-se citar os transformadores e motores, que em determinados momentos de seu funcionamento podem operar fora da linearidade, produzindo harmônicos. Embora os transformadores não produzam tantos harmônicos como outros equipamentos, sua presença massiva no SEP produz efeitos relevantes.

Os dispositivos a arco, como fornos e soldadores a arco, podem drenar correntes altíssimas em um curto período de tempo. A sua relação tensão-corrente é não linear, pois correntes de milhares de amperes fluem através de uma impedância consideravelmente baixa enquanto a tensão decai.

Os conversores trifásicos, para cumprirem seus objetivos, distorcem a corrente elétrica, também produzindo componentes harmônicos. Eles influenciam pelo chaveamento de suas chaves de potência, que geralmente operam em altas frequências e também injetam harmônicos em níveis diferentes de acordo com a característica da carga.

O efeito prejudicial mais direto ao SEP por parte das cargas não lineares no quesito qualidade de energia é a distorção da corrente elétrica e o indireto é a distorção de tensão. Dessa forma, a qualidade de corrente é definida nos termos de a carga operar sem perturbar ou reduzir a eficiência do sistema (LEÃO *et al.*, 2014).

Muitas propostas para mitigar os efeitos dos harmônicos no sistema elétrico têm sido levantadas. Entre elas existem os filtros de potência, que tem a função de compensar os harmônicos da carga. Existem três tipos básicos de filtros: passivo, ativo e híbrido. Sua aplicação irá depender de fatores como custo econômico, características da carga, espaço físico disponível para sua alocação, etc.

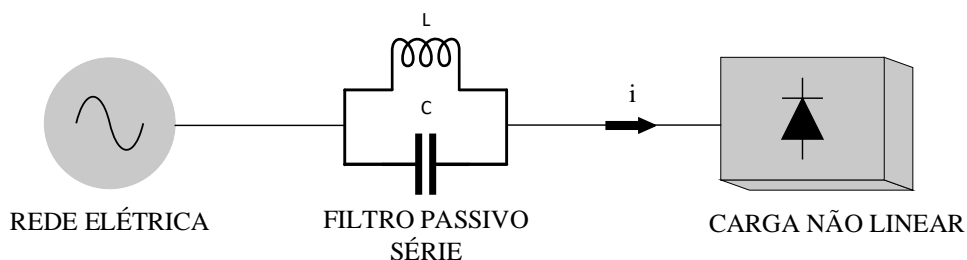
2.3 Filtros Passivos

Os filtros passivos são compostos basicamente de resistores, indutores e capacitores e os seus circuitos são os mais usuais em aplicações envolvendo a mitigação de harmônicos (MORAIS, 2011). Eles podem ser classificados em dois esquemas possíveis, que dizem respeito ao modo de conexão à rede elétrica: série ou paralelo.

2.3.1 Filtro Passivo Série

O filtro passivo série, como o da Figura 4, bloqueia frequências específicas ou uma faixa de frequências que são indesejáveis para um equipamento ou para a rede elétrica. Ele é formado por uma bobina e um capacitor em paralelo, funcionando como uma bobina de bloqueio. Apresenta custo elevado pelo fato de que toda a corrente do sistema no ponto de sua instalação (o PCC) passar por ele, tornando necessário que os componentes passivos sejam mais robustos.

Figura 4 – Filtro passivo série conectado entre a rede elétrica e uma carga não linear.

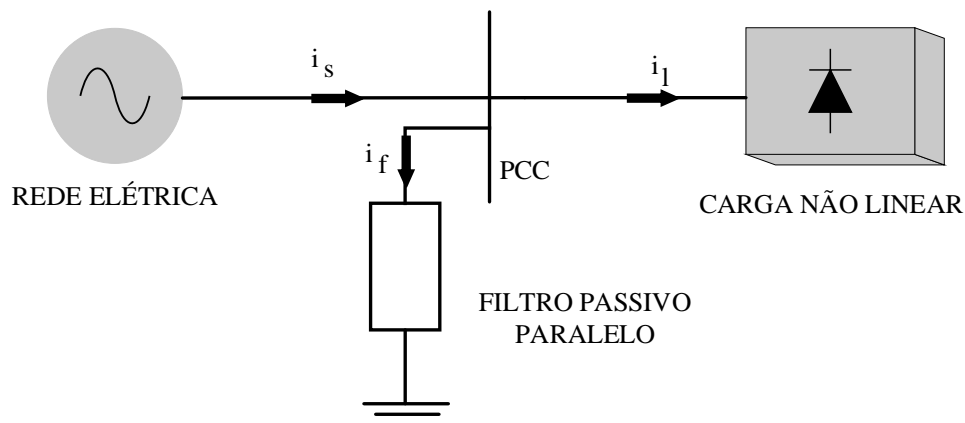


Fonte: Próprio Autor.

2.3.2 Filtro Passivo Paralelo

O circuito mais utilizado é o da configuração do filtro passivo paralelo, mostrado genericamente na Figura 5, que fornece um caminho de baixa impedância para correntes harmônicas, evitando que elas circulem por determinada parte o sistema elétrico. Além de mitigar a circulação de correntes harmônicas na rede elétrica, o filtro passivo paralelo também beneficia os demais componentes que são afetados, como cabos, transformadores e capacitores. De acordo com Leão *et al.* (2014), o filtro passivo paralelo também ajuda a diminuir a distorção de tensão no seu barramento terminal de conexão, pois ao diminuir as correntes harmônicas que fluem nas impedâncias dos cabos, haverá menor queda de tensão. Existem dois tipos de filtros passivos paralelos: sintonizados e amortecidos. Uma característica comum desses dois tipos de filtro é a sua capacidade de operar como compensadores de potência reativa na frequência fundamental, pois, para frequências abaixo da ressonância, apresentam circuito capacitivo.

Figura 5 – Filtro passivo paralelo conectado a um PCC.



Fonte: Próprio Autor.

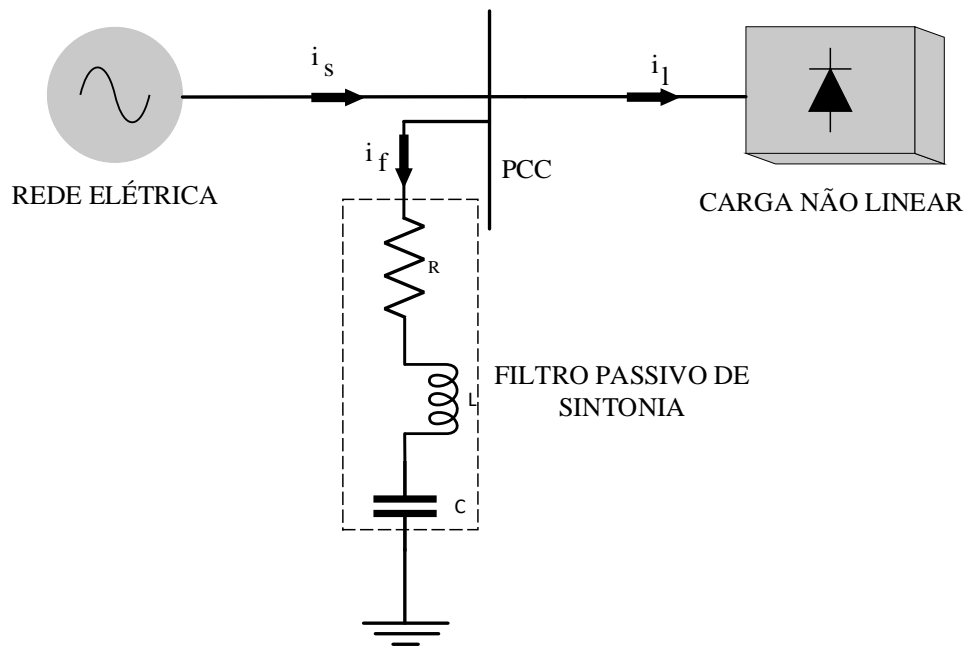
2.3.3 Filtro Passivo Paralelo de Sintonia

O filtro paralelo sintonizado da Figura 6 é um circuito RLC série que, para uma dada frequência de sintonia, apresenta baixa impedância. É mais conhecido por filtro passa baixa ou passa-banda e é o mais indicado quando se deseja eliminar uma harmônica específica.

Na frequência de sintonia, que pode ser calculada por (2.8), a impedância do filtro pode ser resumida a apenas o seu resistor. Para frequências maiores que a de sintonia, a impedância do filtro é indutiva, pois, de acordo com (2.9) e (2.10) das reatâncias capacitiva e

indutiva, respectivamente, o capacitor diminui sua impedância até tornar-se um curto-circuito e o indutor tem sua impedância aumentada até tornar-se um circuito aberto. Para frequências menores que a de sintonia, a impedância do filtro é capacitiva, pois, de acordo com (2.9) e (2.10), o indutor diminui sua impedância até tornar-se um curto-circuito e o capacitor tem sua impedância aumentada até tornar-se um circuito aberto (LEÃO *et al.*, 2014). A variação da impedância e da reatância capacitiva ou indutiva para frequências maiores que a de sintonia, onde $|X_C| > |X_L|$, e para frequências menores que a de sintonia, onde $|X_L| > |X_C|$, é apresentada na Figura 7.

Figura 6 – Filtro passivo paralelo de sintonia.



Fonte: Próprio Autor.

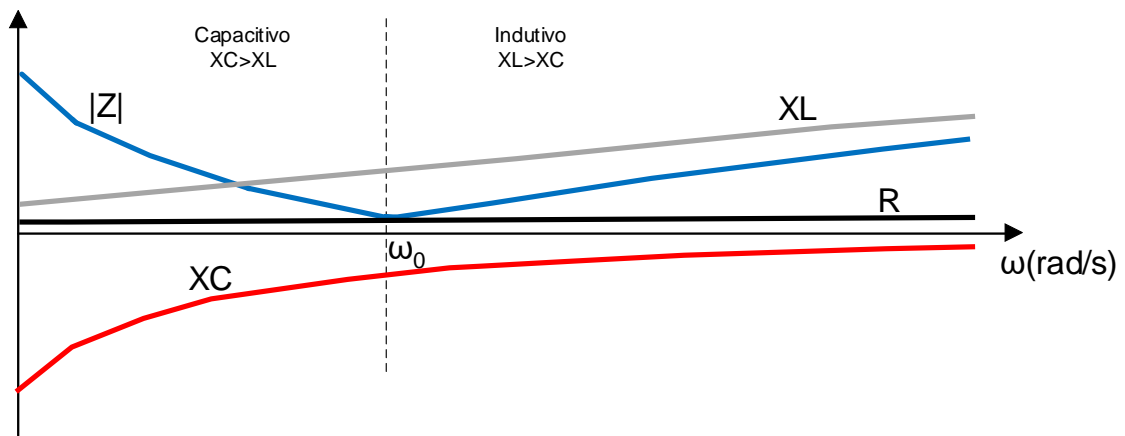
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (2.8)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}, \quad (2.9)$$

$$X_L = 2\pi fL, \quad (2.10)$$

em que:

Figura 7 – Variação de impedância e reatâncias com a frequência.



Fonte: Adaptado de (LEÃO *et al.*, 2014).

- f frequência;
- f_0 frequência de sintonia;
- f_n frequência de sintonia;
- L indutância;
- C capacitância;

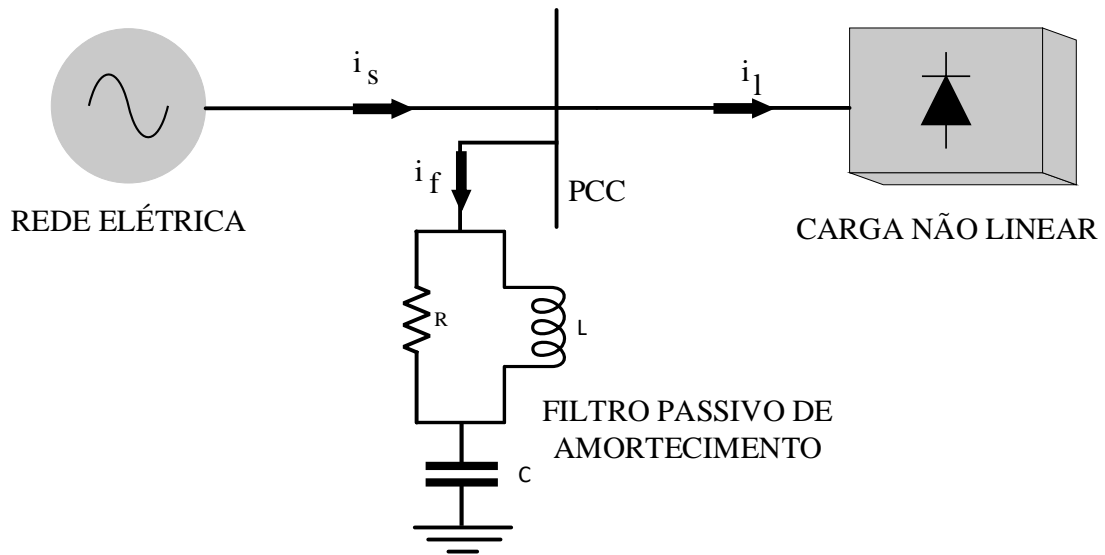
A aplicação mais comum dos filtro *shunt* ressonante é na filtragem de harmônicos de baixa ordem de frequência, pois eles têm maiores amplitudes no espectro. Uma desvantagem desse filtro é o alto valor de ressonância paralela com a rede para frequências abaixo da de sintonia (LEÃO *et al.*, 2014).

2.3.4 Filtro Passivo Paralelo Amortecido

O filtro passivo paralelo amortecido mais usado comercialmente é o de 2ª ordem, como o que está indicado na Figura 8. Ele é um circuito que tem um capacitor em série com um resistor paralelo a um indutor e fornece um caminho de baixa impedância para uma ampla faixa de correntes. É usado para eliminar harmônicos maiores que a frequência de sintonia, tipicamente de 7ª ou 11ª ordens e maiores. Devido o fato de o resistor do circuito consumir considerável potência da fundamental, esse filtro não é aplicado para eliminar harmônicos menores ou iguais à 5ª ordem (LEÃO *et al.*, 2014).

Além o filtro amortecido de 2ª ordem, existem os de 1ª e 3ª ordem e o tipo C. O filtro de 1ª ordem, como apresentado na Figura 9 a) e b), apresenta apenas um componente

Figura 8 – Filtro amortecido de 2ª ordem.



Fonte: Próprio Autor.

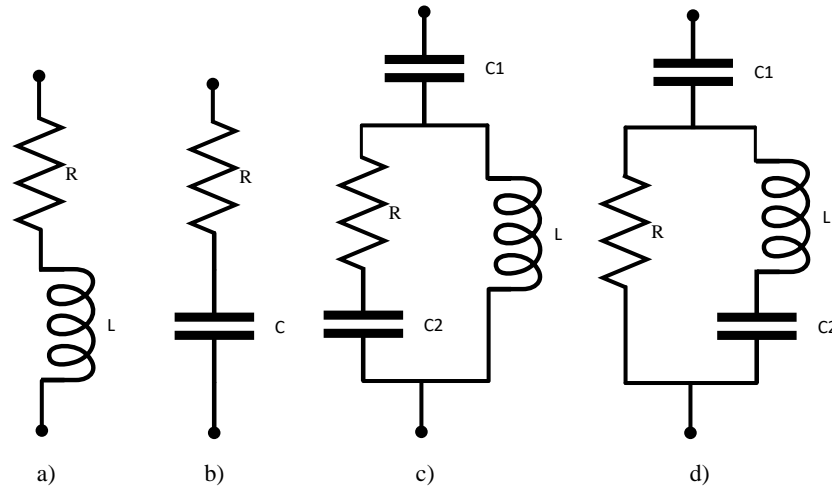
armazenador de energia, indutor ou capacitor, e é mais utilizado na eletrônica básica e em conversores de potência. Eles podem atuar como filtros passa-baixa ou passa-alta e quando mais de um filtro desse tipo é combinado em cascata, pode operar como passa-banda. Como vantagem desses filtros, pode-se citar a complexidade baixa em projetá-los, menor volume físico e custo (LEÃO *et al.*, 2014).

O filtro de 3ª ordem, indicado na Figura 9 c), é mais complexo que o filtro de 2ª ordem por apresentar um segundo capacitor em série com o resistor do circuito, o que ajuda a reduzir as perdas na frequência fundamental. Ele deve ser aplicado na mitigação de harmônicos de baixa frequência devido a sua complexidade e, conseqüentemente, alto custo, sendo o filtro de 2ª ordem preferível para se trabalhar em altas frequências. O filtro tipo C da Figura 9 d) é muito utilizado em aplicações industriais e possui desempenho situado entre os apresentados pelos filtros de 2ª e 3ª ordem. A principal vantagem apresentada por esse filtro está na redução de perdas na frequência fundamental (LEÃO *et al.*, 2014).

A atuação em conjunto de filtro passivos amortecidos e sintonizados pode ser interessante, dependendo da aplicação, para mitigar harmônicos de uma carga não linear, como no caso de uma indústria que possua uma ampla faixa de frequências indesejadas. Nessa situação, os filtros sintonizados atuam para as harmônicos de maior amplitude, como os de 5ª, 7ª e 11ª ordens e os filtros amortecidos seriam utilizados para frequências mais altas, como as de 13ª ordem em diante (MORAIS, 2011).

De forma geral, as principais vantagens dos filtro passivos são sua robustez, facilidade

Figura 9 – Outros tipos de filtros passivos amortecidos: Primeira ordem a) e b), terceira ordem c) e C d).



Fonte: Adaptado de (LEÃO *et al.*, 2014).

de instalação e boa eficiência. Entretanto, como desvantagens, pode-se citar a compensação fixa, ou seja, esses filtros não podem adaptar-se a mudanças da carga, além de possuírem grande volume físico devido os componentes passivos (indutores e capacitores) e problemas de ressonância. Para resolver esses problemas, passou-se a estudar e desenvolver os filtros ativos.

2.4 Filtros Ativos

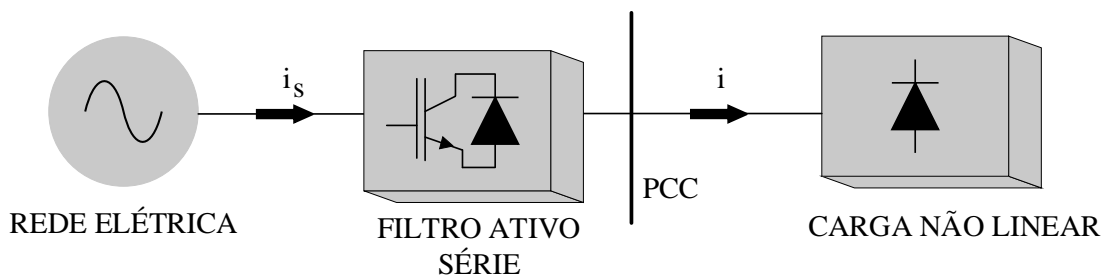
Os filtros ativos podem ser conectados em série ou em paralelo à rede elétrica. Eles são usados para compensação de tensão e corrente e uma característica sua é que, diferentemente dos filtros passivos, eles são auto-sintonizáveis e seletivos na execução da filtragem (MORAIS, 2014). Além da mitigação de harmônicos, existem outros benefícios que podem ser obtidos com a utilização de filtros ativos (LIMONGI, 2006), como:

- Regulação de tensão em sistemas trifásicos;
- Compensação de potência reativa;
- Redução da corrente de neutro;
- Correntes e tensões balanceadas.

2.4.1 Filtro Ativo Série

Uma das configurações do filtro ativo é a apresentada na Figura 10, onde ele é conectado em série com a rede. Ele é apropriado para reduzir as distorções da tensão, atuando como uma fonte de tensão controlada. A tensão produzida pelo filtro ativo série funciona como tensão de compensação, de modo que a tensão da carga possa ser senoidal (MORAIS, 2014). É aplicado principalmente em locais que possuem cargas críticas e sensíveis, não admitindo bruscas variações na tensão elétrica.

Figura 10 – Filtro Ativo Série.



Fonte: Próprio Autor.

2.4.2 Filtro Ativo Shunt

O filtro ativo *Shunt* é apresentado na Figura 1, onde ele é conectado em paralelo com a carga no PCC. O principal objetivo do filtro ativo é a compensação de corrente de tal forma

que a corrente drenada pela rede seja senoidal. O filtro ativo paralelo será abordado com mais ênfase no Capítulo 3.

2.5 Filtros Híbridos

O filtro híbrido é basicamente uma combinação entre os filtros ativo e passivo que possibilita utilizar as vantagens desses dois tipos e ao mesmo tempo elimina algumas desvantagens que ocorrem quando eles atuam separadamente. Em um filtro híbrido, geralmente a sua parte ativa é usada para filtrar harmônicos de alta ordem, enquanto aqueles de ordem mais baixa são filtrados pela parte passiva projetada para frequência particular (JAIN *et al.*, 2007).

A escolha por filtros híbridos visa obter melhor desempenho de filtragem e redução de custos em comparação com os filtros ativos. A literatura apresenta diferentes topologias de filtros híbridos, sendo a escolha por uma delas determinada por fatores como tipo e potência da carga, custo e nível de compensação requeridos (MORAIS, 2014). A seguir serão apresentadas três topologias de filtros híbridos.

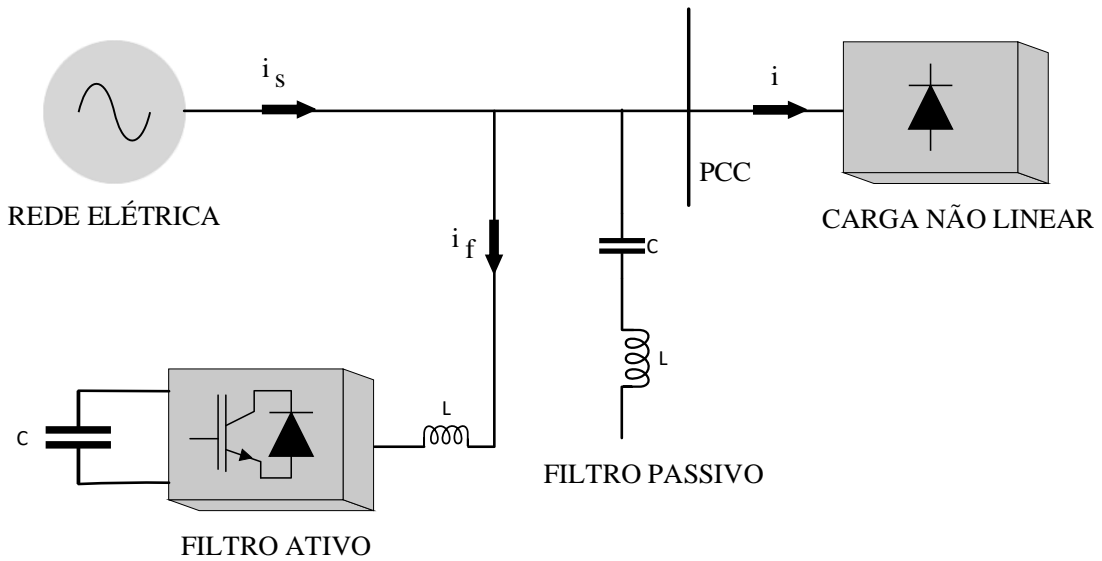
2.5.1 Topologia com Filtros Ativo e Passivo em Paralelo

O filtro da Figura 11, nomeado por Jain *et al.* (2007) como filtro ativo de potência paralelo, possui uma disposição em paralelo com a carga tanto para o filtro ativo quanto para o passivo.

Em Jain *et al.* (2007), o filtro ativo é utilizado para compensar harmônicos de corrente de alta ordem (acima da 11^a ordem) e o filtro passivo os de baixa ordem (5^a e 7^a ordem). De forma diferente, essa topologia é dita em Peng (2001) como sendo melhor aplicada com o filtro ativo mitigando harmônicas de baixa frequência e o filtro passivo reduzindo os efeitos das harmônicas de alta frequência. Essa configuração é justificada pela limitação de resposta da parte ativa para altas frequências unida às perdas de potência por chaveamento. Além disso, a parte passiva acaba sendo de dimensões físicas menores, pois estará submetida a harmônicas de amplitudes menores (MORAIS, 2014).

Pode-se perceber que em Peng (2001) a preocupação maior em reduzir os custos do filtro híbrido reduzindo as dimensões de sua parte passiva. Já no caso de Jain *et al.* (2007), o objetivo é reduzir perdas e custos na parte ativa do filtro, fazendo-o processar harmônicos de alta frequência (MORAIS, 2014).

Figura 11 – Filtro híbrido com partes ativa e passiva em paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

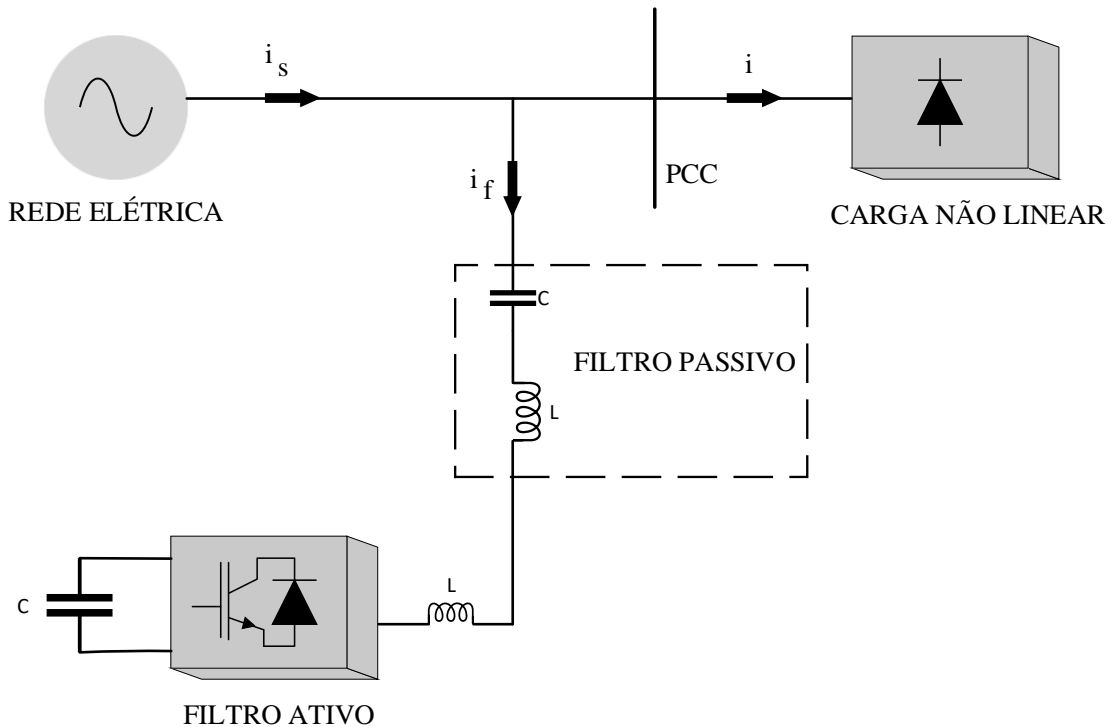
2.5.2 Topologia Shunt com Filtro Ativo e Filtro Passivo em Série

Na topologia apresentada na Figura 12, o filtro ativo é conectado em série com o filtro passivo, que é conectado à rede em paralelo com a carga não linear. O filtro ativo injeta corrente harmônica com oposição de fase à respectiva corrente harmônica drenada pela carga. Isso faz com que apenas corrente fundamental circule pela rede elétrica (MORAIS, 2014).

Com essa topologia, é possível aplicar uma tensão reduzida nos terminais do filtro ativo, levando, conseqüentemente, a uma menor potência nominal em termos de projeto. Em Akagi (2006) é determinada a capacitância e a indutância do filtro passivo sintonizado para a 7^a harmônica e são apresentados três motivos para a sintonização nessa frequência específica:

- Menos caro e volumoso do que se fosse sintonizado para a 5^a harmônica;
- Quando sintonizado para a 7^a harmônica, possui menor impedância que a de 5^a ordem para as harmônicas 11^a e 13^a, que possuem níveis de amplitude consideráveis;
- O desempenho e filtragem da 5^a harmônica podem ser melhorados com o controle do filtro ativo.

Figura 12 – Filtro híbrido *shunt* com partes ativa e passiva em série.



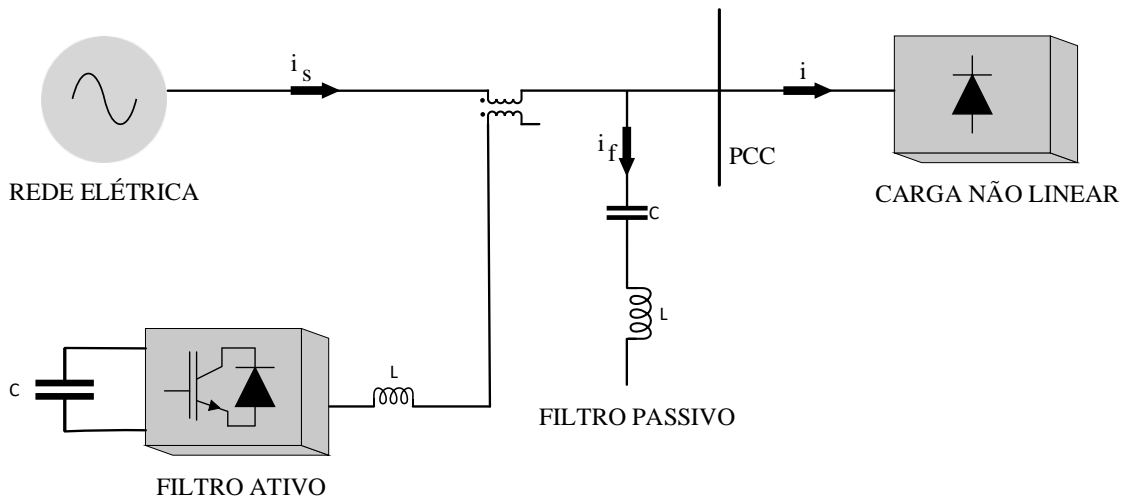
Fonte: Próprio Autor.

2.5.3 Topologia com Filtro Ativo em Série e Filtro Passivo em Paralelo

A topologia apresentada na Figura 13 é conhecida como filtro híbrido série (JAIN *et al.*, 2007). Nela, o filtro ativo é conectado em série com a carga, enquanto o filtro passivo é conectado a jusante do filtro ativo em paralelo com a carga. A ação do filtro ativo permite isolar os harmônicos existentes entre a rede elétrica e a carga e possibilita a operação do filtro passivo sem riscos de entrar em ressonância com a rede.

Devido a operação em série do filtro ativo, que compensa harmônicos de tensão, o desempenho do filtro passivo melhora, pois ele trabalha apenas com tensões senoidais. Além disso, durante a sua operação, o filtro passivo corre menos riscos de sobre aquecer por excesso de tensão. O caminho de baixa impedância da malha malha passiva permite que o filtro ativo processe menos corrente eficaz, podendo operar a baixas potências nominais em relação à carga (entre 5 e 10% da potência total da carga não linear) (MORAIS, 2014).

Figura 13 – Filtro híbrido com parte ativa em série e parte passiva em paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

2.6 Conclusão

A qualidade de energia é uma questão de grande importância nos dias atuais. A busca para manter padrões de tensão e corrente definidos em normas visam economia financeira e reduzir impactos ambientais decorrentes da produção de energia elétrica.

Com o aumento significativo de cargas não lineares, principalmente em indústrias, as componentes tensão e corrente são afetadas por fenômenos elétricos, principalmente as chamadas componentes harmônicas, que se somam à componente fundamental e provocam distorções. Dessa forma, fazem-se necessários equipamentos elétricos capazes de compensar corrente e tensão e que garantam o funcionamento da carga e também a qualidade da energia elétrica.

Entre esses equipamentos, pode-se citar os filtros elétricos de potência passivo, ativo e híbrido. Todos apresentam vantagens e desvantagens, sendo a escolha de um deles para aplicação em alguma situação específica dependente de recursos financeiros, espaço e eficiência.

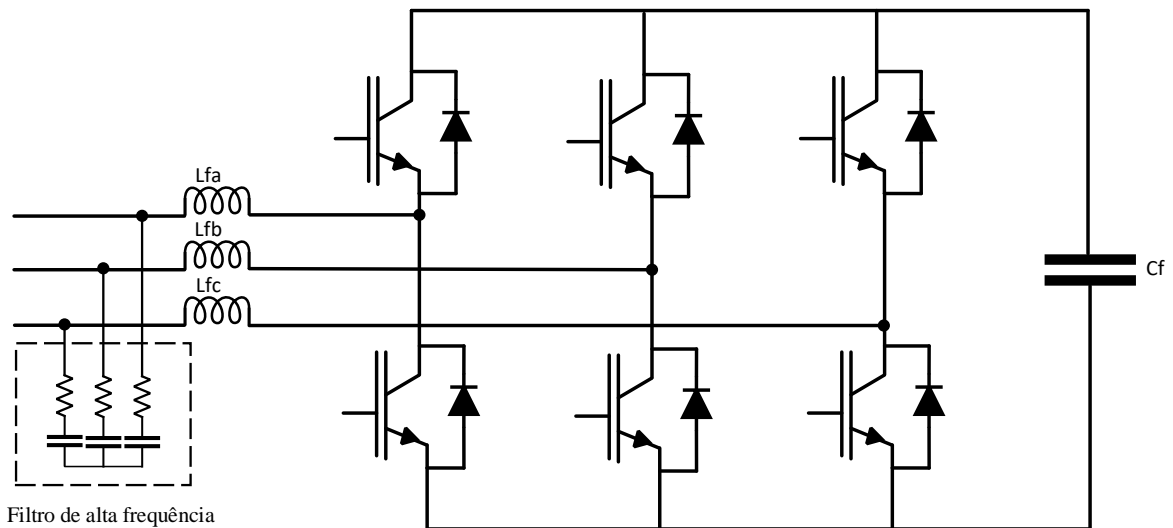
O filtro ativo é uma solução plausível para solucionar o problema de harmônicos de corrente na rede elétrica. Ele não apresenta algumas desvantagens apresentadas pelos filtros passivos, como sintonização em frequências específicas e ressonância, além de não possuir o nível de complexidade apresentado pelos filtros híbridos. Devido isso, doravante o filtro ativo *shunt* será o alvo de estudo desse trabalho

3 FILTRO ATIVO *SHUNT*

Os filtros ativos são aplicados como solução para mitigar harmônicos de corrente no sistema elétrico. Eles podem ser classificados de acordo com os diversos critérios e características que apresentam. Uma primeira divisão classifica os filtros ativos em série ou paralelo (comumente referenciado como *shunt*), segundo a sua forma de conexão com a rede elétrica. Outra forma de classificar os filtros ativos leva em consideração a topologia da própria rede onde ele será conectado, podendo eles serem monofásico ou trifásicos, onde esta última configuração ainda apresenta a subdivisão a três e a quatro fios (ORTMANN, 2008).

Uma forma de classificar os filtros ativos *shunt* (e também os filtros ativos série) é com respeito ao circuito de potência empregado. Os conversores que são normalmente utilizados são bidirecionais com inversor fonte de tensão (*Voltage Source Inverter (VSI)*), como o da Figura 14, ou com inversor de fonte de corrente (*Current Source Inverter (CSI)*), a exemplo do apresentado na Figura 15, que diferem quanto à natureza da energia armazenada no barramento CC e o tipo da chave de potência (ORTMANN, 2008).

Figura 14 – Conversor VSI.

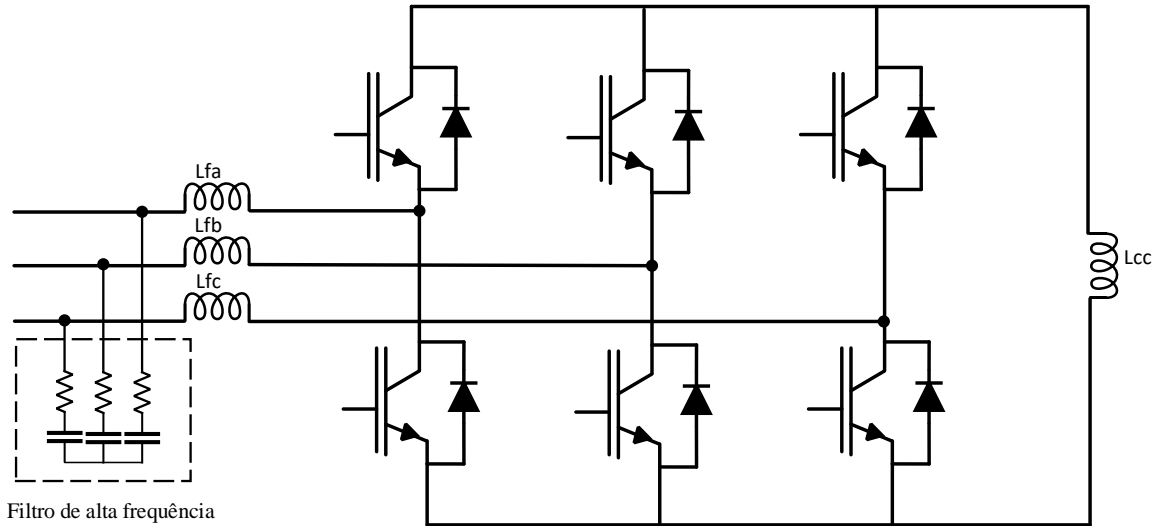


Fonte: Adaptado de (ORTMANN, 2008).

Na configuração de conversor VSI, o barramento Corrente Contínua (CC) funciona como uma fonte de tensão onde a energia é armazenada no capacitor C_f . De acordo com o chaveamento das chaves de potência, a corrente é entregue ou drenada da rede através dos indutores de linha L_{fa} , L_{fb} e L_{fc} . Ao se trabalhar com esse tipo de conversor deve-se sempre garantir que a tensão no barramento CC seja sempre superior à tensão de pico da rede para

garantir o funcionamento das chaves de potência.

Figura 15 – Conversor CSI.



Fonte: Adaptado de (ORTMANN, 2008).

A diferença física apresentada no conversor CSI em relação ao VSI é o indutor L_{cc} no barramento CC funcionando como fonte de corrente no lugar do capacitor. As chaves de potência, de acordo com a sua operação, permitem que a corrente seja drenada ou entregue à rede. A corrente que passa através do indutor do barramento deve ser maior que a corrente de pico da rede.

De acordo com Ortmann (2008), o fato de, no conversor CSI, muitas chaves de potência conduzirem simultaneamente, aliado aos valores altos de corrente que passam pelo indutor do barramento CC, acarretar em perdas consideráveis de potência, torna o conversor VSI mais atrativo para aplicações em filtros por apresentar menos perdas, volume, peso e custo inicial.

Com a compensação de corrente de um sistema trifásico em vista, optou-se por dar maior atenção aos filtros ativos *shunt* com conversor VSI, que são apropriados para esse tipo de aplicação. A seguir serão apresentadas algumas topologias de filtros que possuem essas características

3.1 Topologias

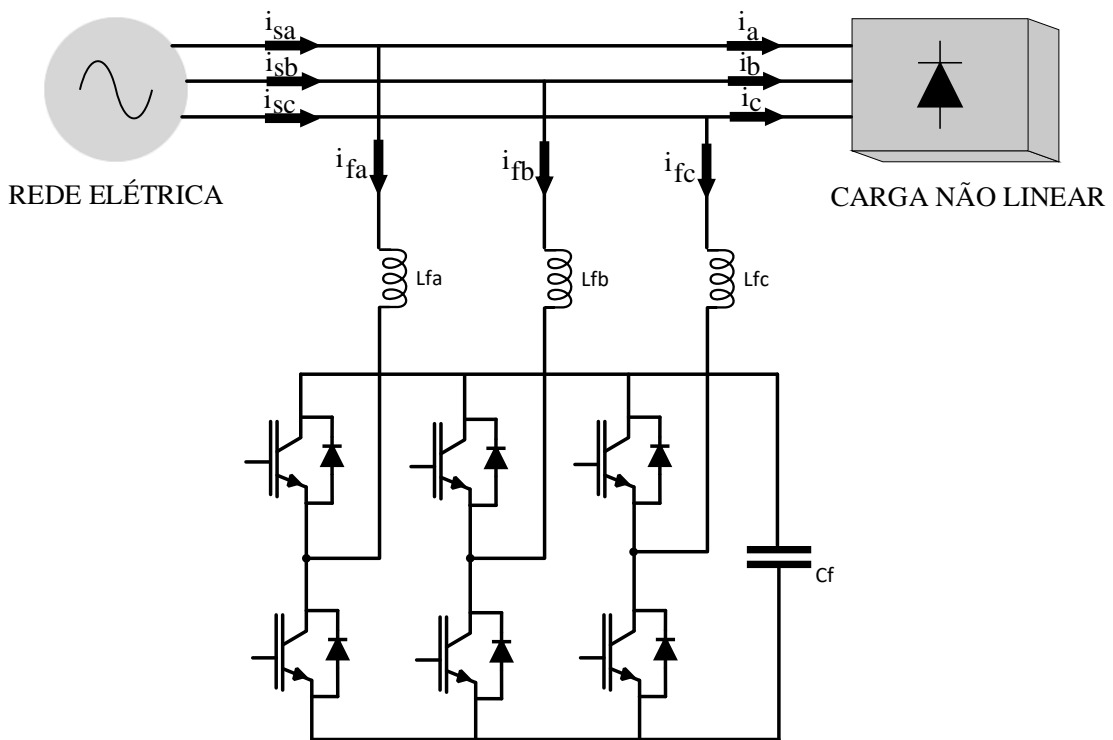
Existem diversas topologias que podem ser aplicadas em filtros ativos *shunt* trifásicos, tanto a três quanto a quatro fios. Os filtros ativos a três fios são principalmente utilizados em

sistemas de transmissão, distribuição e na presença de cargas trifásicas a três fios. Os filtros ativos a quatro fios, por outro lado, são mais utilizados em aplicações na indústria e no comércio, pois nesses lugares há a presença de cargas monofásicas que são supridas com o condutor neutro (MELO, 2010).

3.1.1 Topologias a Três Fios

A topologia mais utilizada em sistemas a três fios está mostrada na Figura 16 com filtro ativo paralelo e um inversor trifásico em ponte completa. Ela é implementada com seis chaves distribuídas em três braços inversores. Apenas um barramento CC é necessário para essa configuração e, conseqüentemente, apenas um controlador de tensão para regular o nível de tensão sobre o capacitor.

Figura 16 – Filtro ativo a três fios de conversor com seis chaves e barramento único.

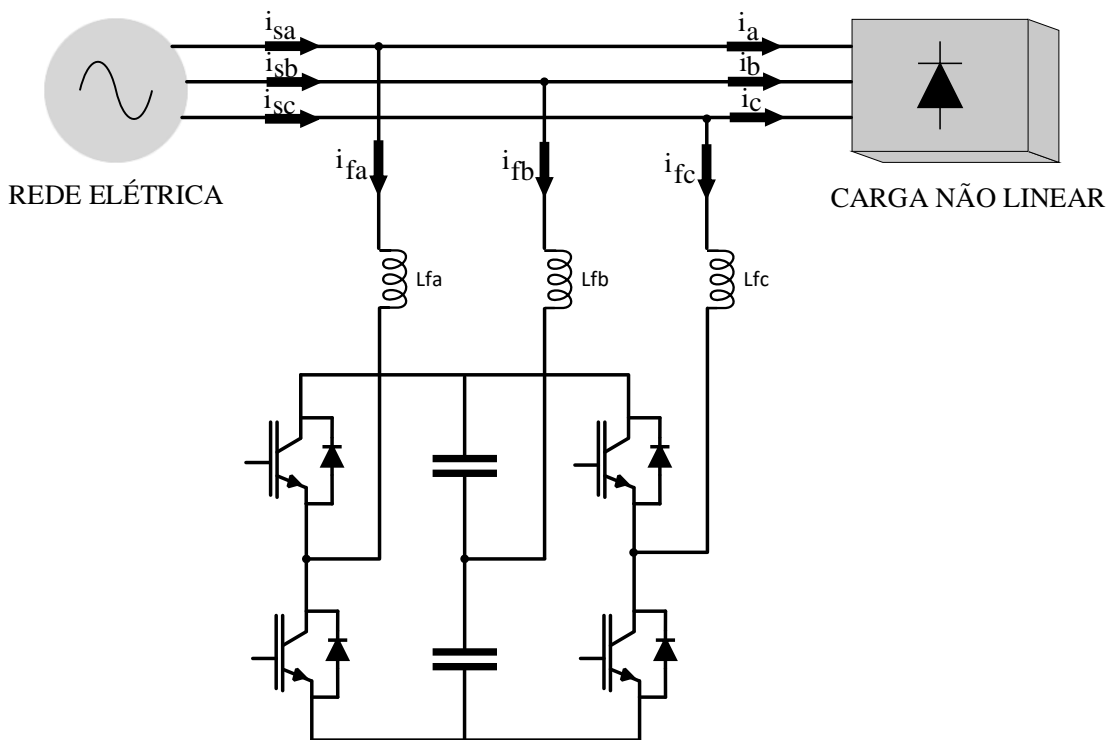


Fonte: Adaptado de (MELO, 2010).

Outra configuração é a apresentada na Figura 17, pertencente a um grupo de filtros ativos conhecidos como filtros ativos trifásicos de partes reduzidas (EMADI *et al.*, 2005). Ela possui três braços à semelhança a topologia da Figura 16, porém, com as chaves do braço central substituídas por dois capacitores, que funcionam como barramento CC. A vantagem desse filtro

é que são utilizadas menos chaves, reduzindo custos, mas o controle torna-se mais complexo pelo motivo de que a corrente em uma das fases ser controlada a partir dos valores de corrente das outras duas fases devido a simetria existente entre elas (EMADI *et al.*, 2005).

Figura 17 – Filtro ativo a três fios de conversor com quatro chaves e dois capacitores no barramento.



Fonte: Adaptado de (EMADI *et al.*, 2005).

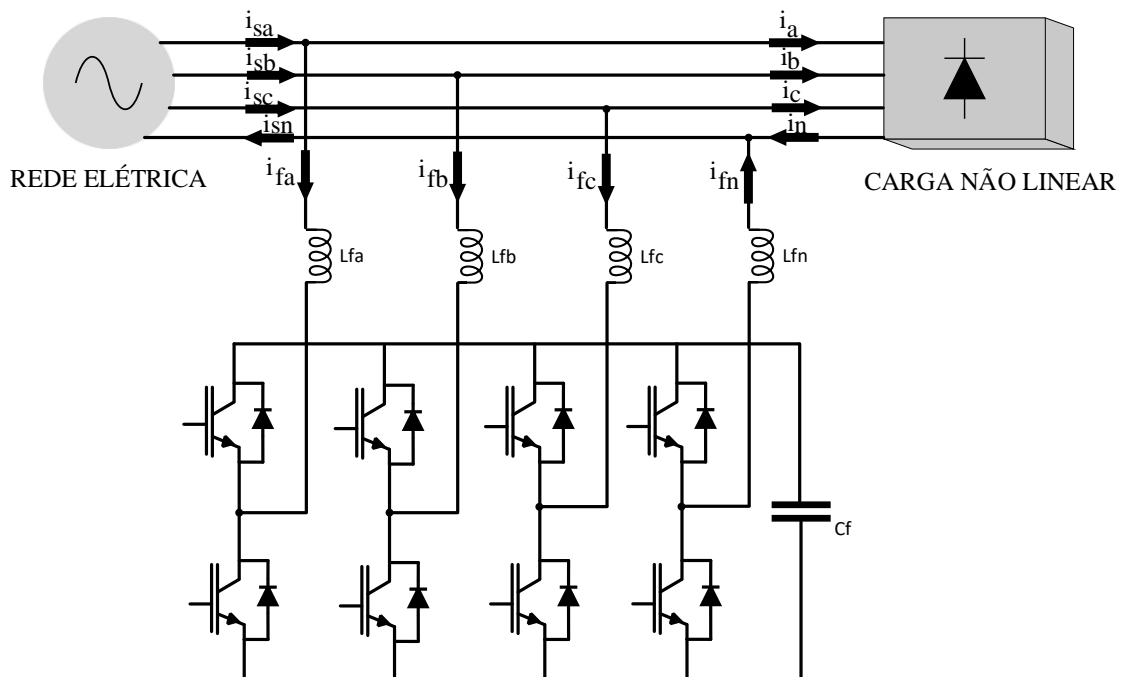
3.1.2 Topologias a Quatro Fios

Para aplicações em sistemas a quatro fios, quatro são as topologias principais de conversores: quatro braços, capacitor em derivação, *neutral point clamped* e três pontes completas monofásicas (MELO, 2010). A Figura 18 mostra o filtro ativo trifásico com neutro e conversor com quatro braços, sendo três conectados às fases e um ao neutro, portanto, oito chaves, e um barramento CC simples. Um grande atrativo dessa topologia é a possibilidade de se controlar a corrente de neutro, porém, possui duas chaves de potência a mais que a topologia do capacitor em derivação. A sua capacitância e o nível de tensão no barramento CC são menores quando comparadas aos valores apresentados pela configuração do capacitor em derivação (CAMPANHOL, 2012).

O filtro que possui o conversor com o capacitor em derivação é mostrado na Figura

19. Ele é implementado utilizando três braços no conversor, dois capacitores formando o barramento CC com um ponto central de conexão do condutor neutro entre os capacitores e totalizando um total de seis chaves de potência. Nessa configuração as componentes de sequência zero da corrente da carga circula pelos capacitores do barramento, o que implica desbalanço de tensão entre os capacitores. Esse desbalanço deve ser compensado pelos controladores de tensão. Apesar de apresentar duas chaves a menos que a configuração de quatro braços, os seus capacitores devem ser mais robustos e possuírem maior capacitância para reduzir a ondulação provada pela corrente do neutro (CAMPANHOL, 2012). Essa topologia é melhor aplicada em potências mais baixas, pois a corrente do neutro passa pelos capacitores do barramento (MELO, 2010).

Figura 18 – Filtro ativo a quatro fios de conversor com quatro braços.

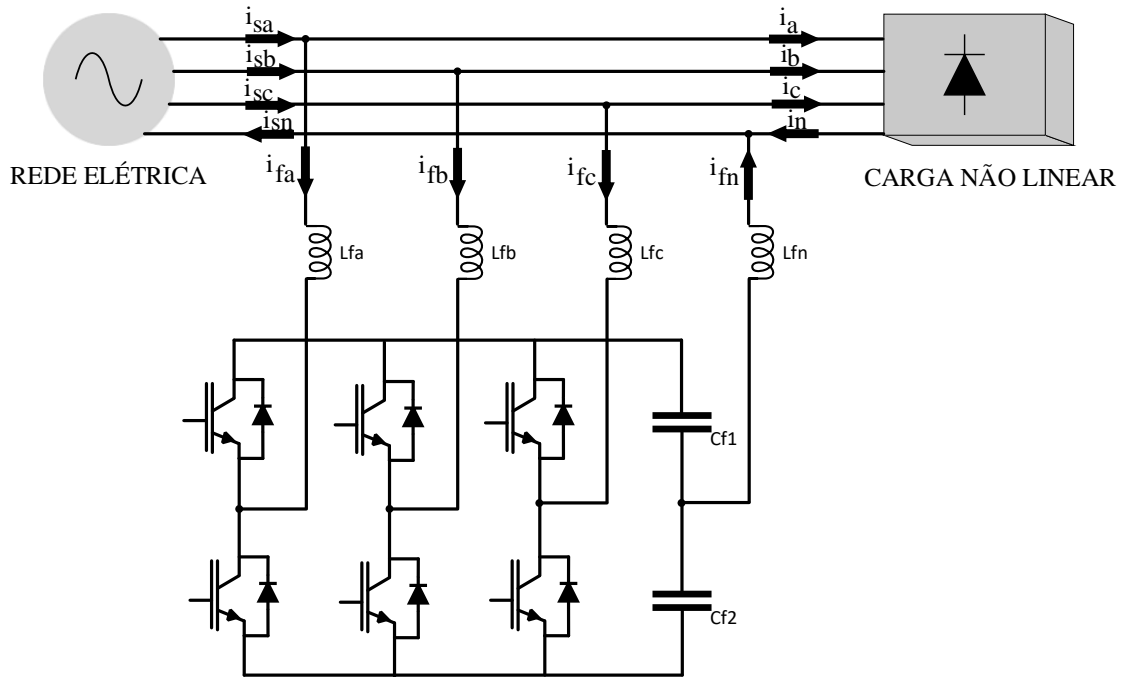


Fonte: Adaptado de (CAMPANHOL, 2012).

Já a Figura 20 mostra a topologia de conversor multinível *Neutral Point Clamped*. Essa configuração utiliza doze chaves, mais seis diodos e dois capacitores no barramento CC com o ponto central para o neutro. Ela é bem semelhante à topologia do capacitor em derivação, necessitando de controle de desequilíbrio de tensão no barramento, porém, seu custo é mais elevado devido o maior número de chaves e diodos necessários para implementação. A sua vantagem é que pode ser utilizado em sistemas de média e alta potência (CAMPANHOL, 2012).

A topologia com três pontes completas monofásicas, Figura 21, é implementada

Figura 19 – Filtro ativo a quatro fios de conversor com capacitor em derivação.



Fonte: Adaptado de (CAMPANHOL, 2012).

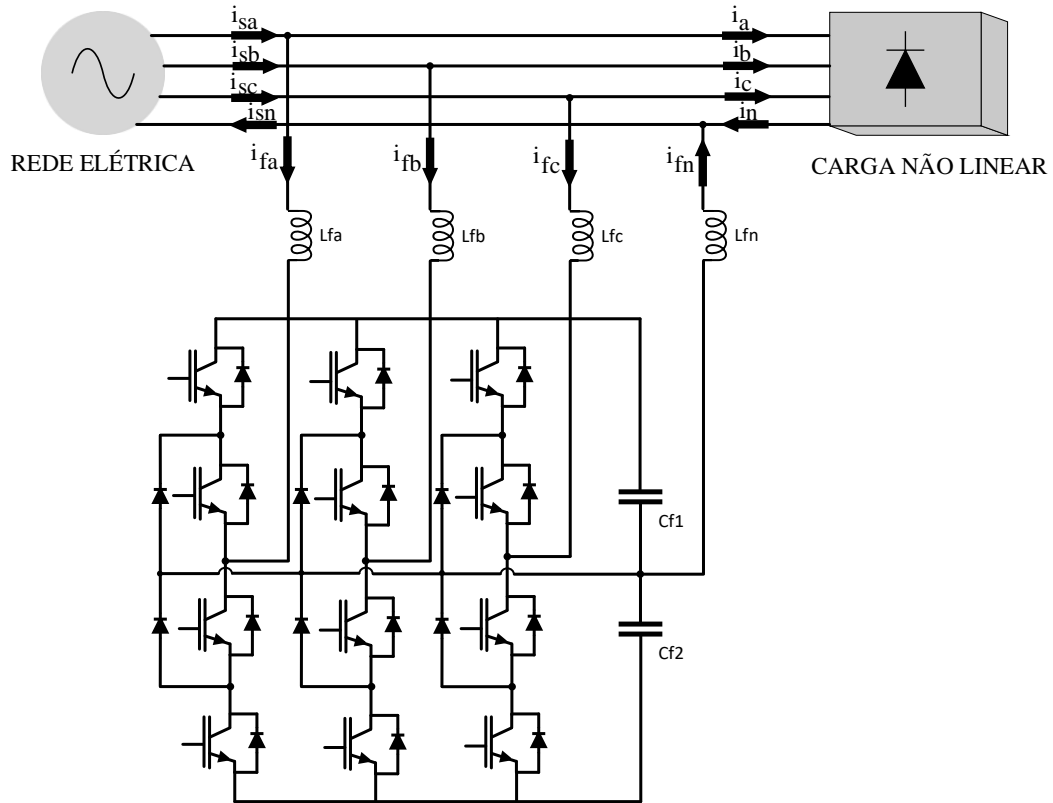
utilizando três conversores de ponte completa em cada fase da rede elétrica, somando um total de doze chaves de potência. O acoplamento dos três conversores à rede é feito por meio de transformadores de isolamento, que são necessários para que não ocorra curto-circuito no barramento CC, pois este é compartilhado por todos os conversores dessa topologia (CAMPANHOL, 2012). A vantagem de se utilizar três conversores monofásicos e a regulação independente de cada fase, mesmo que isso signifique o aumento de semicondutores (MELO, 2010). Campanhol (2012) elenca alguns pontos que, entre os conversores a quatro fios, são vantajosos para essa topologia:

- Redução da tensão no barramento CC por um fator de 2 quando comparada à topologia do capacitor em derivação e por um fator de $\sqrt{3}$ quando comparada à de quatro braços;
- Utiliza apenas um banco de capacitores e, conseqüentemente, apenas um controlador de tensão do barramento;
- isolamento entre o filtro e a rede elétrica;
- Possibilidade de manutenção independente dos conversores.

Portanto, no que diz respeito às topologias trifásicas a quatro fios, tanto a abordagem com capacitores em derivação quanto a de quatro braços utilizam menos chaves que a aplicação com três módulos monofásicos, implicando em redução no custo. A topologia o *Neutral Point Clamped* apresenta mais dispositivos que a de quatro braços, porém, pode ser aplicada em plantas

com maior potência.

Figura 20 – Filtro ativo a quatro fios de conversor *Neutral Point Clamped*.



Fonte: Adaptado de (CAMPANHOL, 2012).

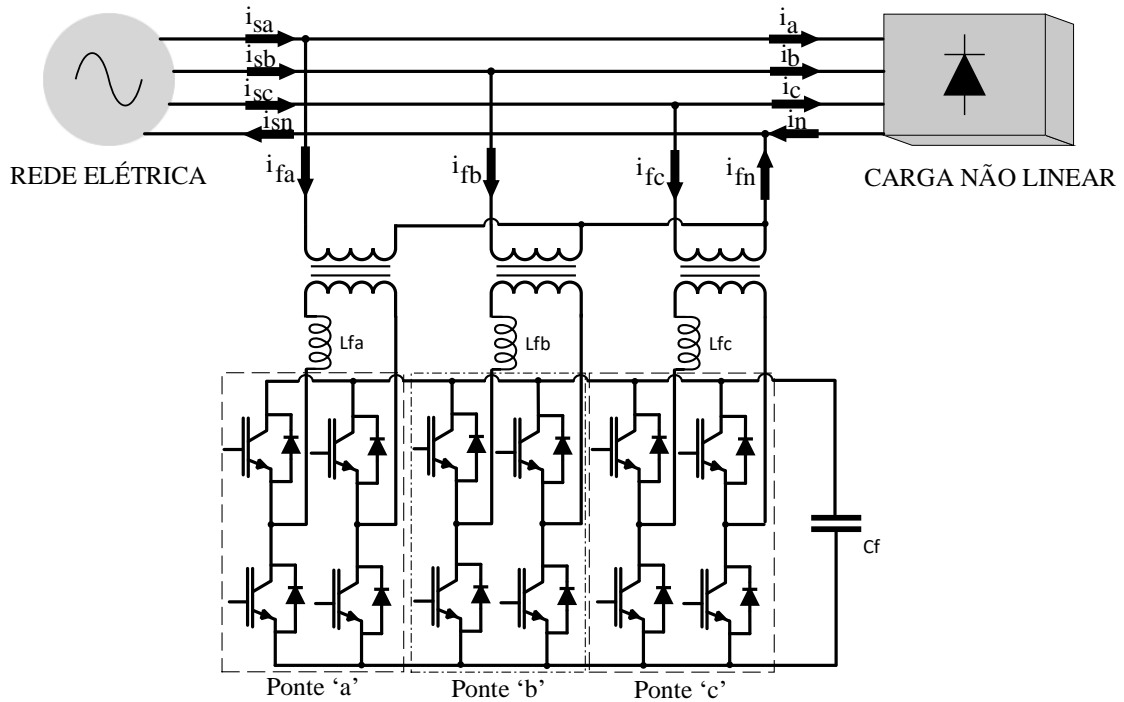
3.2 Princípio de Funcionamento

Objetivo principal desse trabalho é a compensação de correntes harmônicas resultantes da operação de uma carga não linear trifásica conectada a um sistema de alimentação a três fios. De acordo com essa configuração de sistema elétrico e com base nas topologias de filtros apresentadas, optou-se pelo filtro paralelo da Figura 16, que possui uma estrutura de potência composta por um conversor VSI.

A representação geral do sistema elétrico em que estão conectados a carga não linear e o filtro ativo paralelo é a da Figura 22. É importante ressaltar que, apesar de a Figura 22 apresentar uma estrutura unifilar, ele representa um diagrama trifásico e, portanto, a análise é feita para as três fases.

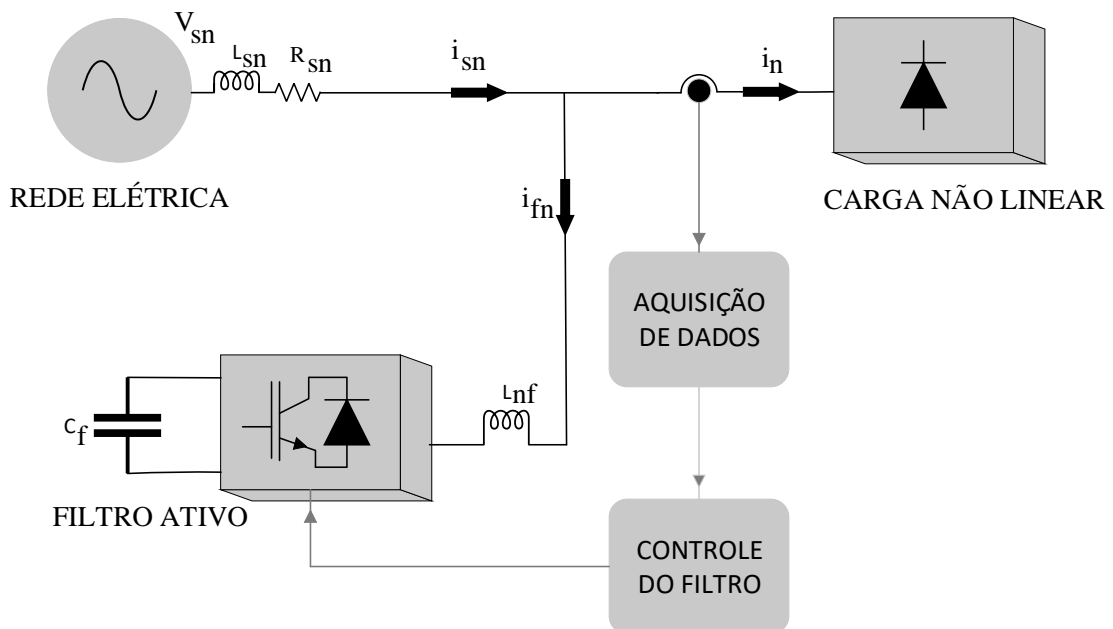
Na Figura 22 existem os três sistemas principais que devem ser destacados: a rede elétrica, o filtro ativo e a carga não linear. A rede é representada por uma fonte de tensão V_{sn} ,

Figura 21 – Filtro ativo a quatro fios de conversor com três ponte completas monofásicas.



Fonte: Adaptado de (CAMPANHOL, 2012).

Figura 22 – Filtro ativo a quatro fios de conversor com três ponte completas monofásicas.



Fonte: Adaptado de (WATANABE *et al.*, 2004).

uma indutância L_{sn} e uma resistência R_{sn} equivalentes por fase, suprindo uma corrente i_{sn} . A carga trifásica não linear representa uma estrutura geral de carga que drena da rede uma corrente i_n , podendo estar distorcida e/ou desbalanceada. O filtro ativo com a estrutura VSI, o sistema de

aquisição de dados e o controle drena da rede uma corrente i_{fn} . O subscrito "n" nas componentes do diagrama representa cada fase do sistema, ou seja, $n=a,b,c$.

A operação do filtro ativo paralelo resume-se na injeção/drenagem de correntes da rede com objetivo de garantir que a corrente suprida pela fonte seja senoidal. De acordo com a Figura 22 é possível equacionar as correntes do circuito, conforme (3.1).

$$i_{sn} = i_{fn} + i_n, \quad (3.1)$$

Onde:

i_{sn} corrente elétrica na fonte por fase, onde $n=a,b,c$ [A];

i_{fn} corrente elétrica no filtro por fase, onde $n=a,b,c$ [A];

i_n corrente elétrica na carga por fase, onde $n=a,b,c$ [A].

Como mostrado na subseção 2.1.1, a corrente da carga pode ser matematicamente representada pela soma de uma componente fundamental e diversas frequências harmônicas. Dessa forma, a corrente da carga é dada por:

$$i_n = i_{n1} + i_{nk}, \quad (3.2)$$

em que:

i_n corrente elétrica na carga por fase, onde $n=a,b,c$ [A];

i_{n1} corrente elétrica fundamental na carga por fase, onde $n=a,b,c$ [A];

i_{nk} corrente elétrica fundamental na carga por fase, onde $n=a,b,c$ e k representa a ordem da corrente [A].

O desejável é que a corrente da fonte seja puramente senoidal, o que implica em

$$i_{sn} = i_{n1}. \quad (3.3)$$

Substituindo as equações (3.2) e (3.3) em (3.1), obtêm-se a igualdade apresentada em (3.4).

$$i_{fn} = -i_{nk}. \quad (3.4)$$

Dessa forma, pode-se perceber que a corrente drenada da rede pelo filtro deve corresponder à soma das correntes harmônicas da carga, que é a parcela indesejada, mas com oposição de fase. O filtro ativo paralelo opera como uma fonte de corrente controlada, porém, não ideal. É necessário que uma estratégia de controle seja aplicada para se determinar as correntes de referência e uma técnica de controle utilizada para minimizar os erros em regime permanente. Além disso, como já foi mencionado anteriormente, a tensão no capacitor C_f do filtro deve ser

maior que o pico de tensão da rede e, portanto, faz-se necessário o seu monitoramento e uma técnica de controle para controlá-la.

3.3 Conclusão

Existem várias topologias de filtros ativos paralelos e que podem ser aplicadas tanto em sistemas a três quanto a quatro fios, de acordo com a aplicação necessária. Os conversores utilizados em seu sistema de potência são em sua grande maioria do tipo VSI, que apresenta vantagens mais atrativas em relação à configuração CSI, como custo inicial, perdas e volume.

O princípio de funcionamento do filtro ativo paralelo baseia-se na drenagem de corrente da rede em oposição de fase da corrente indesejável da carga, possibilitando que a corrente da fonte seja, em questões ideais, puramente senoidal.

Trabalhando dessa forma, o filtro funciona como uma fonte de corrente, mas de acordo com o que foi exposto, necessita de uma estratégia de controle. A estratégia e controle do filtro pode ser vista como a composição de uma estratégia de definição das correntes de referência seguida de uma técnica de controle.

4 ESTRATÉGIA DE CONTROLE PARA OBTENÇÃO DAS CORRENTES DE REFERÊNCIA E TÉCNICA DE CONTROLE DO FILTRO ATIVO PARALELO

Como apresentado no Capítulo 3, o filtro ativo paralelo de potência é utilizado para mitigar harmônicos de corrente, drenando da rede correntes que correspondem às correntes indesejadas supridas à carga, porém, em oposição de fase. Ele funciona como fonte de corrente não ideal, o que faz necessário lançar mão de estratégias e técnicas que possibilitem o seu controle a fim de garantir resultados satisfatórios em regime permanente do seu funcionamento.

Do ponto de vista da teoria clássica de potência, a potência reativa é indesejável, pois corresponde à parcela da potência que não é convertida em trabalho útil. Dessa forma, diversos trabalhos e estudos foram desenvolvidos com o objetivo de reduzir seus efeitos. Entretanto, a partir de análises bem detalhadas, é possível demonstrar que essa teoria é válida somente para casos específicos, como para sistemas monofásicos operando em regime permanente e sem distorção e em sistemas trifásicos, que além dessas mesmas condições, estejam balanceados. O cerne do problema da teoria clássica de potência está no fato de que ela foi desenvolvida para sistemas monofásicos e foi expandida para sistemas trifásicos considerando que eles fossem compostos por três sistemas monofásicos independentes, ignorando o acoplamento entre fases. Outro problema é a relação direta e única de reativos com os componentes capacitores e indutores, mas pode-se observar a existência de potência reativa em circuitos devido a operação de tiristores, por exemplo, (WATANABE *et al.*, 1998).

Além disso, a teoria convencional de potência foi desenvolvida com base em fasores e valores eficazes, o que possibilita a análise dos sistemas em apenas uma frequência. Entretanto, como já foi apresentado nos capítulos 2 e 3, uma análise de correntes em diferentes frequências que compõem a corrente suprida à carga faz-se necessária para que as correntes de referência de controle do filtro possam ser obtidas.

Dessa forma, Akagi (1983) propôs a teoria das Potências Ativa e Reativa Instantâneas, doravante chamada de Teoria *pq*, com o objetivo de estabelecer uma teoria básica de controle de filtros ativos. Foi demonstrado que ela é mais geral que a teoria clássica de potência, sendo essa uma particularidade, e permite, além do controle de filtros ativos, o correto entendimento de sistemas balanceados ou não, com ou sem distorção (WATANABE *et al.*, 1998).

Juntamente com a Teoria *pq* para determinação das correntes de referência, será apresentada a modulação por banda de histerese para as chaves de potência do conversor do filtro.

4.1 Teoria PQ

A Teoria pq é válida para sistemas trifásicos equilibrados e desequilibrados, permitindo a análise das potências ativa e reativa instantânea, ou seja, no domínio do tempo. Sua utilização tem sido amplamente difundida devido à sua generalidade, que permite explicar fenômenos que somente com a teoria clássica de potência não eram possíveis, pois esta é uma particularidade sua.

4.1.1 Componentes simétricas

Em um sistema trifásico podem existir formas de onda de tensão e/ou corrente balanceadas, desbalanceadas e desbalanceadas e distorcidas. De forma geral, as correntes e as tensões de um sistema trifásico desbalanceado podem ser definidas por (4.1) e (4.2).

$$v_n(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2}V_{nk} \text{sen}(\omega_k t + \phi_{nk}), \quad n = (a, b, c), \quad (4.1)$$

$$i_n(t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2}V_{nk} \text{sen}(\omega_k t + \delta_{nk}), \quad n = (a, b, c). \quad (4.2)$$

Um sistema elétrico desbalanceado pode ser expresso por um conjunto de sistemas balanceados, chamados de componentes simétricas. No caso de um sistema trifásico, ele pode ser decomposto em três sistemas equilibrados. Aplicando-se a transformação em componentes simétricas do sistema a-b-c (FORTESCUE, 1918) para cada harmônico de tensão das fases, o que também pode ser feito para os de corrente, determina-se as componentes de sequência positiva, negativa e zero:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{0k} \\ \dot{V}_{+k} \\ \dot{V}_{-k} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{ak} \\ \dot{V}_{bk} \\ \dot{V}_{ck} \end{bmatrix}, \quad (4.3)$$

em que:

\dot{V}_{0k} fasor tensão de sequência zero de ordem "k" [V];

\dot{V}_{+k} fasor tensão de sequência positiva de ordem "k" [V];

\dot{V}_{-k} fasor tensão de sequência negativa de ordem "k" [V];

$\dot{V}_{ak}, \dot{V}_{bk}, \dot{V}_{ck}$ fasor tensão no sistema abc de ordem "k" [V];

α operador complexo, $\alpha = 1 \angle 120^\circ = e^{j\frac{2\pi}{3}}$.

A transformada inversa de (4.3) é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{ak} \\ \dot{V}_{bk} \\ \dot{V}_{ck} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{0k} \\ \dot{V}_{+k} \\ \dot{V}_{-k} \end{bmatrix}. \quad (4.4)$$

A partir dessas tensões encontradas pela aplicação da transformação de componentes simétricas é possível encontrar as tensões no domínio do tempo. Reescrevendo as tensões para a k -ésima componente harmônica, tem-se:

$$\begin{cases} v_{ak}(t) = \sqrt{2}V_{0k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{0k}) + \sqrt{2}V_{+k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{+k}) + \sqrt{2}V_{-k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{-k}) \\ v_{bk}(t) = \sqrt{2}V_{0k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{0k}) + \sqrt{2}V_{+k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{+k} - \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}V_{-k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{-k} + \frac{2\pi}{3}) \\ v_{ck}(t) = \sqrt{2}V_{0k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{0k}) + \sqrt{2}V_{+k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{+k} + \frac{2\pi}{3}) + \sqrt{2}V_{-k}\text{sen}(\omega_k t + \phi_{-k} - \frac{2\pi}{3}) \end{cases}. \quad (4.5)$$

Expressões similares às de (4.5) podem ser desenvolvidas para as correntes (WATANABE *et al.*, 1998).

4.1.2 Potências Ativa e Reativa Instantâneas nas Coordenadas $\alpha\beta 0$

A transformada que leva um sistema nas coordenadas abc para as coordenadas $\alpha\beta 0$, também conhecida como transformada de Clarke em homenagem à sua idealizadora, a engenheira Edith Clarke, é uma transformação algébrica linear de correntes e tensões de um sistema trifásico de referência estacionária em um sistema com coordenadas ortogonais entre si igualmente estacionário. Tem sido utilizada principalmente pelo fato de simplificar bastante os cálculos matemáticos de diversas plantas do sistema elétrico. As transformações direta e inversa das tensões v_a, v_b, v_c para v_α, v_β, v_0 são, respectivamente (o mesmo procedimento a seguir pode ser feito para das correntes i_a, i_b, i_c para i_α, i_β, i_0):

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad (4.6)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix}, \quad (4.7)$$

em que:

v_0, v_α, v_β tensões elétricas do sistema $\alpha\beta 0$ [V];

v_a, v_b, v_c tensões elétricas do sistema abc [V].

De acordo com Watanabe *et al.* (1998), as potências real p , imaginária q e de sequência zero são dadas por:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}, \quad (4.8)$$

em que:

p_0 potência de sequência zero;

p potência real;

q potência imaginária.

Ao se observar a equação (4.9), percebe-se que a potência ativa trifásica instantânea é igual à soma das potências real e de sequência zero, que normalmente é indesejada nos sistemas. Portanto, o significado da potência imaginária é que ela corresponde a uma potência existente nas fases individualmente, mas que no conjunto trifásico não contribui para a transferência de energia entre a fonte e a carga e nenhum instante (WATANABE *et al.*, 1998).

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0. \quad (4.9)$$

As correntes instantâneas que produzem as potências real e imaginária podem ser, então, obtidas por (4.10). A matemática para encontrar essas correntes no sistema a-b-c torna-se trivial a partir das matrizes de transformação apresentadas.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}. \quad (4.10)$$

A partir da equação (4.8), é interessante notar que a potência imaginária q não depende das correntes ou tensões de sequência zero. Além disso, considerando o caso mais

geral de desequilíbrios e presença de harmônicos em um sistema, as potências instantâneas real, imaginária e de sequência zero possuirão, cada uma, componentes médios e oscilantes:

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0, \quad (4.11)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p}, \quad (4.12)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q}, \quad (4.13)$$

em que:

$p_0, \bar{p}_0, \tilde{p}_0$ potência, potência média e potência oscilante de sequência zero;

p, \bar{p}, \tilde{p} potência, potência média e potência oscilante reais;

q, \bar{q}, \tilde{q} potência, potência média e potência oscilante imaginárias.

4.1.3 Potências instantâneas em Função das Componentes Simétricas

Ao transformar as equações de tensão apresentadas em (4.5) e suas respectivas correntes para o eixo $\alpha - \beta - 0$, encontra-se:

$$\begin{cases} v_\alpha = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{+k} \text{sen}(\omega_k t + \phi_{+k}) + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-k} \text{sen}(\omega_k t + \phi_{-k}) \\ v_\beta = \sum_{k=1}^{\infty} -\sqrt{3}V_{+k} \text{cos}(\omega_k t + \phi_{+k}) + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-k} \text{cos}(\omega_k t + \phi_{-k}) \\ v_0 = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{6}V_{0k} \text{sen}(\omega_k t + \phi_{0k}), \end{cases} \quad (4.14)$$

$$\begin{cases} i_\alpha = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{+k} \text{sen}(\omega_k t + \delta_{+k}) + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-k} \text{sen}(\omega_k t + \delta_{-k}) \\ i_\beta = \sum_{k=1}^{\infty} -\sqrt{3}V_{+k} \text{cos}(\omega_k t + \delta_{+k}) + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-k} \text{cos}(\omega_k t + \delta_{-k}) \\ i_0 = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{6}V_{0k} \text{sen}(\omega_k t + \delta_{0k}). \end{cases} \quad (4.15)$$

As tensões e correntes das coordenadas $\alpha - \beta$ recebem influência unicamente das componentes de sequência positiva e negativa, enquanto a componente instantânea de sequência zero só depende da componente simétrica de sequência zero. Assim, as potências real, imaginária e de sequência zero, apresentadas separadamente em termos de suas potências médias e oscilantes, são:

$$\bar{p} = \sum_{k=1}^{\infty} 3V_{+k}I_{+k} \text{cos}(\phi_{+k} - \delta_{+k}) + \sum_{k=1}^{\infty} 3V_{-k}I_{-k} \text{cos}(\phi_{-k} - \delta_{-k}), \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned}
\tilde{p} = & \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} 3V_{+j}I_{+k} \cos((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{+j} - \delta_{+k})] + \\
& \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} 3V_{-j}I_{-k} \cos((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{-j} - \delta_{-k})] + \\
& \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} -3V_{+j}I_{-k} \cos((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{+j} - \delta_{-k})] + \\
& \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} -3V_{-j}I_{+k} \cos((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{-j} - \delta_{+k})],
\end{aligned} \tag{4.17}$$

$$\bar{q} = \sum_{k=1}^{\infty} 3V_{+k}I_{+k} \sin(\phi_{+k} - \delta_{+k}) + \sum_{k=1}^{\infty} -3V_{-k}I_{-k} \sin(\phi_{-k} - \delta_{-k}), \tag{4.18}$$

$$\begin{aligned}
\tilde{q} = & \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} 3V_{+j}I_{+k} \sin((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{+j} - \delta_{+k})] + \\
& \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} -3V_{-j}I_{-k} \sin((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{-j} - \delta_{-k})] + \\
& \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} -3V_{+j}I_{-k} \sin((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{+j} - \delta_{-k})] + \\
& \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} 3V_{-j}I_{+k} \sin((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{-j} - \delta_{+k})],
\end{aligned} \tag{4.19}$$

$$\bar{p}_0 = \sum_{k=1}^{\infty} 3V_{0j}I_{0k} \cos(\phi_{0k} - \delta_{0k}), \tag{4.20}$$

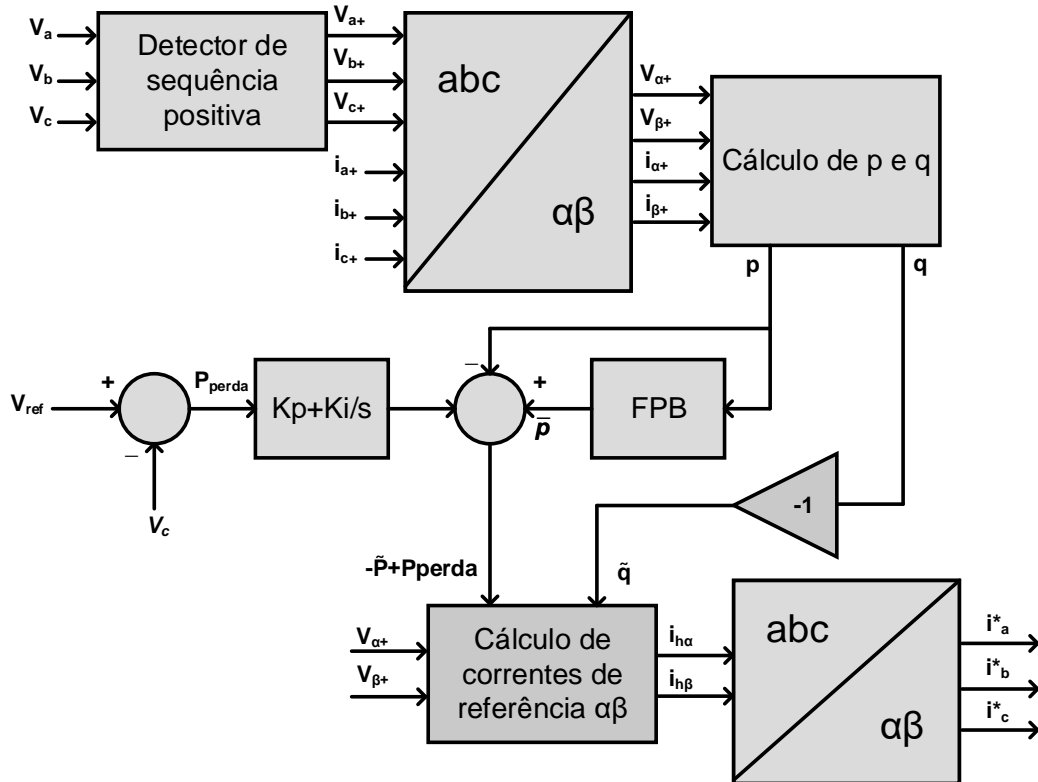
$$\begin{aligned}
\tilde{p}_0 = & \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} 3V_{0j}I_{0k} \cos((\omega_j - \omega_k)t + \phi_{0j} - \delta_{0k})] + \\
& \sum_{j=1}^{\infty} [\sum_{k=1}^{\infty} -3V_{0j}I_{0k} \cos((\omega_j + \omega_k)t + \phi_{0j} + \delta_{0k})].
\end{aligned} \tag{4.21}$$

Percebe-se que a presença de harmônicos promove o aparecimento das potências real e imaginária oscilantes, conforme (4.17) e (4.19). Além disso, a potência de sequência zero média é boa do ponto de vista de transferência de energia, porém, ela está diretamente acoplada com a potência de sequência zero oscilante, ou seja, não há como ter uma desacoplada da outra. Isso faz com que a potência instantânea de sequência zero seja indesejável.

4.1.4 Correntes de Referência de um Filtro Ativo Paralelo

Uma parte muito importante para a mitigação de harmônicos e que foi representada na Figura 1 é o controle do filtro ativo paralelo. É grande desafio, após realizar a aquisição de

Figura 23 – Diagrama básico da geração das correntes de referência.



Fonte: Adaptado de (LIMA *et al.*, 2012).

dados de tensão e corrente, a determinação instantânea das correntes de referência do controlador. A Figura 23 apresenta, de forma básica, o diagrama da geração das correntes de referência, assumindo-se que o cálculo instantâneo é feito a partir da Teoria pq.

As tensões trifásicas e as correntes de cargas são obtidas pelo sistema de aquisição de dados. Antes de efetuar o cálculo da transformada de Clarke, a ação do detector de sequência positiva de tensão é muito importante. As tensões utilizadas no controle são de sequência positiva, pois dessa forma é possível garantir que todas as correntes indesejáveis serão consideradas nos cálculos para compensação. Como o objetivo do filtro paralelo é compensar as correntes, essa técnica se torna válida. Se for desejável compensar os harmônicos de tensão, um filtro série deverá ser utilizado.

Em seguida, aos valores de tensão e corrente é aplicada a transformação para o sistema $\alpha\beta 0$, possibilitando o cálculo das potências instantâneas. Considerando o caso em que a carga é desbalanceada e que possui componentes harmônicos que a distorcem, no sistema haverá componentes de tensão de sequência positiva, negativa e zero, porém a planta é a três fios, logo, sem neutro, o que implica que não haverá componente de corrente de sequência zero. Dessa forma, existirá apenas potência instantânea ativa e imaginária, que são obtidas, tendo as tensões

e as correntes de posse, respectivamente, por (4.12) e (4.13).

É necessário que a potência negativa tenha uma inversão de fase e que a componente oscilante de p seja defasada de 180° e separada, o que é feito através de um filtro passa baixa projetados especificamente com essa finalidade à vista. Conhecendo as duas parcelas de potência, \tilde{p} e q , é possível calcular as correntes de referência nas coordenadas $\alpha\beta$ através de (4.22) e em seguida as correntes de referência i_a^*, i_b^*, i_c^* nas coordenadas abc por meio da transformação inversa de (4.7).

É importante ressaltar que em projetos de filtros ativos deseja-se o controle de potência ativa média \bar{p} porque é necessário controlar a tensão no capacitor do lado CC do conversor. Esse controle é feito pelo controlador proporcional-integral apresentado no diagrama da Figura 23 e deve ser feito durante a iniciação e todo o processo de operação do filtro para que o capacitor não descarregue e o chaveamento das chaves de potência ocorram normalmente. Por esse motivo existe o termo \bar{p}_{perda} , que deve ser compensado pela filtro, adicionado a (4.22).

$$\begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha+}^2 + v_{\beta+}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha+} & v_{\beta+} \\ v_{\beta+} & -v_{\alpha+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} + \bar{p}_{perda} \\ -\tilde{q} \end{bmatrix}, \quad (4.22)$$

onde:

$i_{h\alpha}, i_{h\beta}$ correntes elétricas instantâneas de referência nas coordenadas $\alpha\beta$ [A];

\bar{p}_{perdas} potência ativa média de referência para compensação do capacitor.

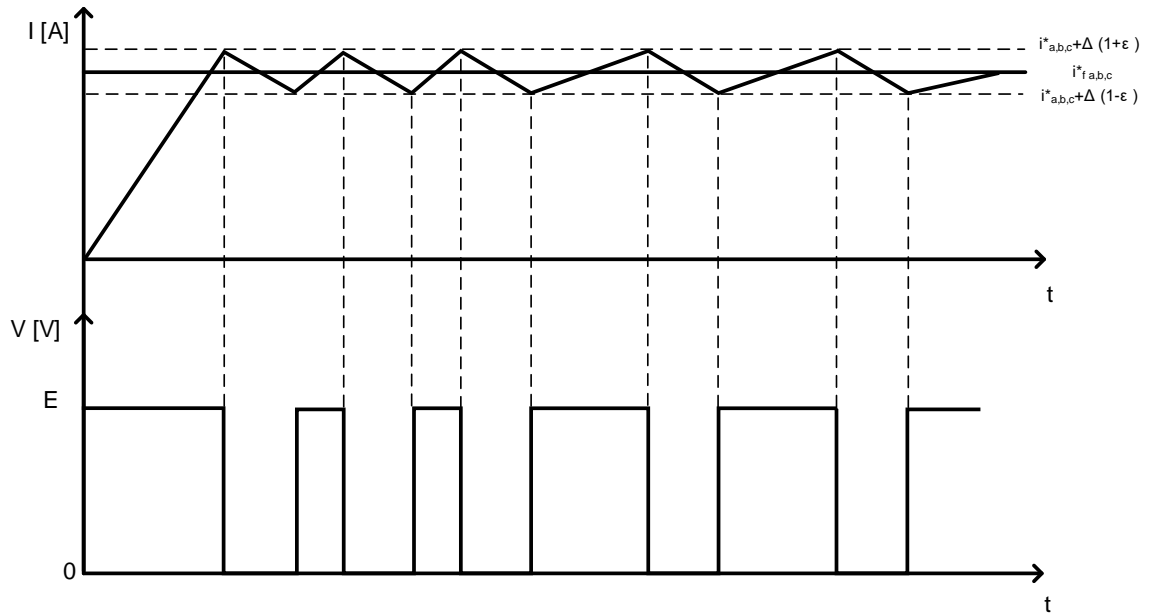
4.2 Técnica de Modulação por Banda de Histerese

De posse das correntes de referência, é necessário enviar os sinais de PWM para as chaves de potência realizarem a comutação e garantirem o correto funcionamento do filtro. A modulação que será abordada nesse trabalho para gerar o sinal PWM será a modulação por banda de histerese, que é usada principalmente quando se deseja controlar corrente e se possui filtro indutivo de linha como no caso deste trabalho, pois ela apresenta rápida resposta na sintetização do sinal PWM e é de simples entendimento e implementação.

Na modulação por banda de histerese, são definidos os limites máximos e mínimo de corrente, fazendo com que o chaveamento opere em função de esses valores serem atingidos, como apresentado na Figura 24. O valor da corrente, portanto, deve sempre ser mantida entre esses valores extremos estabelecidos para que os sinais adequados sejam enviados às chaves para gerar o *Pulse Width Modulation* (PWM) e para que o conversor opere como uma fonte de

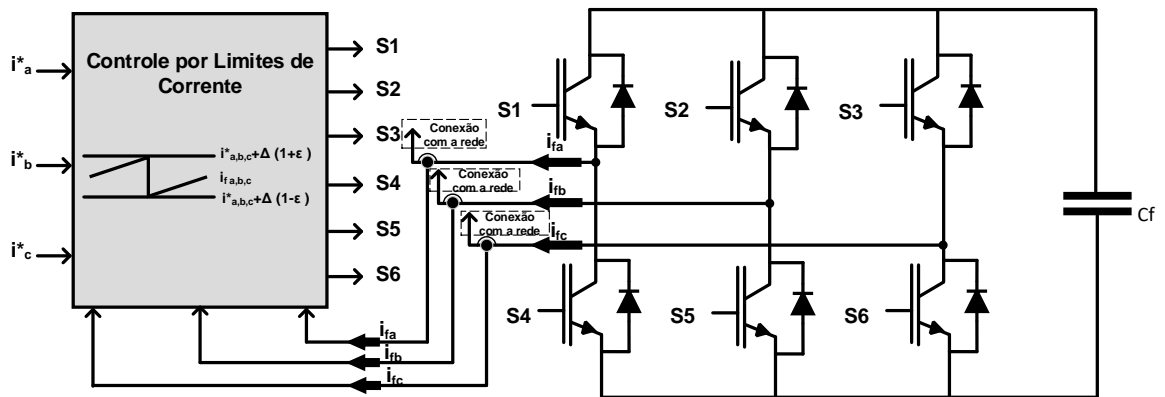
corrente (POMILIO, 1995). O esquema apresentado na Figura 25 mostra de forma genérica o controle por histerese e a conexão do controle às chaves de potência do conversor.

Figura 24 – Formas de onda de corrente do filtro e PWM no controle por limites de corrente.



Fonte: Adaptado de (POMILIO, 1995).

Figura 25 – Controle por Histerese e conexão do controle às chaves de potência do conversor do filtro.



Fonte: Próprio Autor.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foram apresentadas a estratégia de controle para gerar as correntes de referência e a técnica de controle para enviar os sinais às chaves de potência do conversor

do filtro ativo paralelo. Esses componentes do controle são de extrema importância, pois visam garantir que em regime permanente os harmônicos de corrente serão mitigados.

A teoria de potência instantânea é uma estratégia de controle bem consolidada. Ela apresenta conceitos bem mais abrangentes que a teoria clássica de potência, sendo essa uma particularidade. A Teoria pq permite que correntes de referência sejam calculadas com objetivo de controlar o filtro ativo. Assim, a depender da aplicação, o desbalanço e a distorção causadas no sistema por conta de correntes indesejadas podem ser amenizados separadamente ou em conjunto.

Uma vez que as correntes de referência são geradas, é necessário que haja uma técnica de controle para comandar o chaveamento das chaves do conversor. A técnica apresentada foi a modulação por banda de histerese. Ela será utilizada nesse trabalho por ser bastante aplicável no controle de corrente e devido a existência do filtro de linha do conversor, ser rápida na sintetização do sinal PWM e mostra-se simples em seu entendimento e implementação, porém, para o objetivo desse trabalho, bem efetiva.

5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Uma vez definido todo o conteúdo teórico, é de suma importância que, de alguma forma, ele seja validado. Foi visto que o objetivo do presente trabalho é mitigar o efeito de harmônicos de corrente em um sistema elétrico a três fios com carga não linear, com estratégia de controle baseada na Teoria pq e com modulação por banda de histerese.

Um das formas de realizar a validação é por meio de simulações. Elas possuem grande flexibilidade, pois todo o processamento e componentes são digitais, não havendo necessidade, por exemplo, de se preocupar, à primeiro momento, com a proteção do circuito. Outra forma, que é feita após a simulação, é a parte experimental. Nesse estágio, componentes reais, como carga, filtros, conversores, etc., são projetados e construídos para observar na prática se tudo funciona como o esperado de acordo com a simulação.

Devido a grande quantidade de trabalhos feitos que se utilizam apenas de simulação para validar os conceitos abordados, neste trabalho a abordagem será mais prática, sendo apresentados apenas os resultados experimentais obtidos em bancada. A forma de avaliar a melhora que a ação do filtro ativo paralelo promove na corrente da rede será pela apresentação de formas de onda e também por meio da TDH_i . Como uma ideia de valor ideal de distorção harmônica, será considerado o de 5% que a IEEE 519:2014 recomenda para a TDD de instalações com correntes menores que 20 A (IEEE 519 Working Group and others, 2014). Embora a TDD seja diferente da TDH_i , como falado anteriormente, o valor de distorção recomendado serve como parâmetro para a análise feita nesse capítulo.

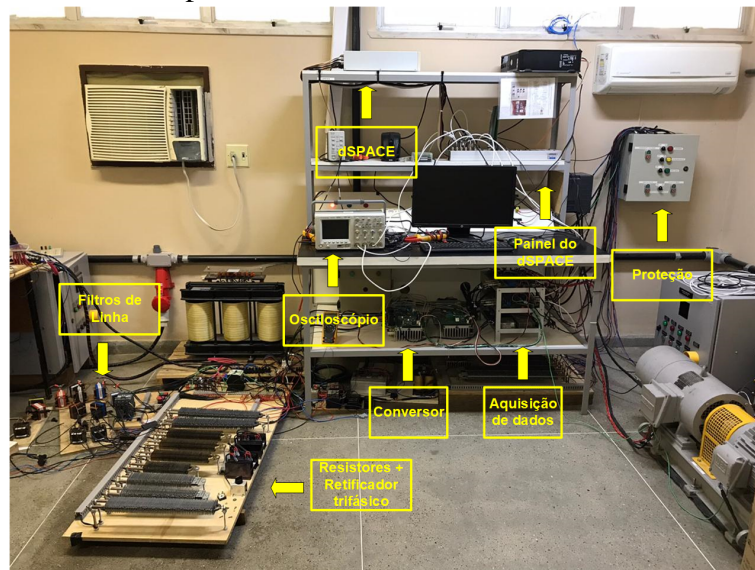
5.1 Bancada

A Figura 26 apresenta, de maneira geral, a bancada utilizada para a realização de todo o experimento. Ela está localizada no Laboratório de Aplicações de Eletrônica de Potência e Integração a Sistemas de Energia (LAPIS), no Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Ceará (UFC).

Na bancada constam a carga não linear, que possui componentes resistivos, capacitivos, uma ponte retificadora trifásica de onda completa e um transformador. O conversor utilizado para implementar o filtro ativo é comercial, como mostra a Figura 27, e os seus dados técnicos são apresentados na Tabela 1. Para reduzir os efeitos de chaveamento do conversor, foi utilizado um filtro de linha com uma indutância de 3 mH.

A plataforma dSPACE 1103, de referência DS1103, que é apresentada na Figura 28, do fabricante dSPACE, mas que saiu de linha, foi utilizada para realizar o controle do conversor. Ela é versátil para aplicações de protótipos, possuindo poderoso processamento e conjunto de portas *Input/Output* (I/O) que são vitais para aplicações envolvendo considerável número de atuadores e sensores. Possui *interface* de tempo real e é totalmente programável no ambiente de diagrama de blocos do *Simulink*, onde todas as portas I/O podem ser programadas graficamente. A escolha dessa plataforma se deve ao fato de ela possibilitar rapidez na implementação de novas propostas de tecnologia em um ambiente real, algo desejado para implementação desse trabalho. A plataforma trabalha em conjunto com um painel, mostrado na Figura 29, que permite uma melhor conexão com o sistema de aquisição de dados do sistema elétrico e indica a situação da plataforma por meio de um conjunto de *Light Emitter Diodes* (LEDs).

Figura 26 – Bancada utilizada para validação dos conceitos apresentados.



Fonte: Próprio Autor.

Tabela 1 – Dados técnicos do conversor comercial.

Item	Dados
Fabricante	Supplier Indústria e Comércio Eletro Eletrônicos LTDA
Modelo	Conjunto inversor 4 braços + <i>interface</i> com fibra ótica
Tensão máxima de barramento	$600 V_{cc} + 10\%$
Frequência máxima de chaveamento	50 kHz
Potência Nominal	4,5 kVA
Tensão de saída	$0-380 V_{rms}$
Corrente máxima de saída	12 A

Fonte: Próprio autor.

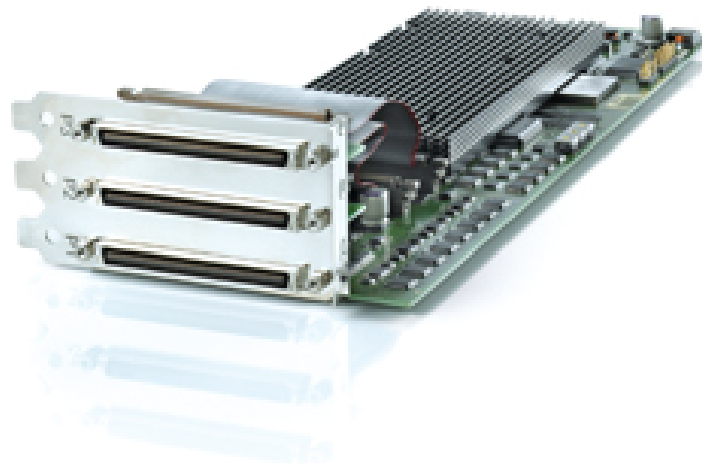
Figura 27 – Conversor comercial utilizado para implementar o filtro ativo *shunt*.



Fonte: (SUPPLIER, 2019).

Todos os dados de corrente e tensão da rede foram possíveis de mensurar por conta dos circuitos de aquisição de dados, que são compostos pelo sensor de tensão LAV 25-P e pelo sensor de corrente LAH 100-P, que são apresentados na Figura 30, e alguns de seus dados técnicos disponíveis em suas folhas de dados no site do fabricante descritos da Tabela 2. Os dados adquiridos pelo sistema de aquisição são enviados ao dSPACE, que opera o controle do conversor, aplicando a estratégia de obtenção das correntes de referência baseada na Teoria pq e enviando os sinais de PWM para o conversor. As formas de onda do sistema elétrico podem ser vistas em tempo real pelo *software ControlDesk*. Um diagrama básico do fluxo de dados do dSPACE e os outros sistemas e equipamentos da bancada pode ser visto na Figura 31.

Figura 28 – Plataforma DS1103.



Fonte: (ASES, 2019).

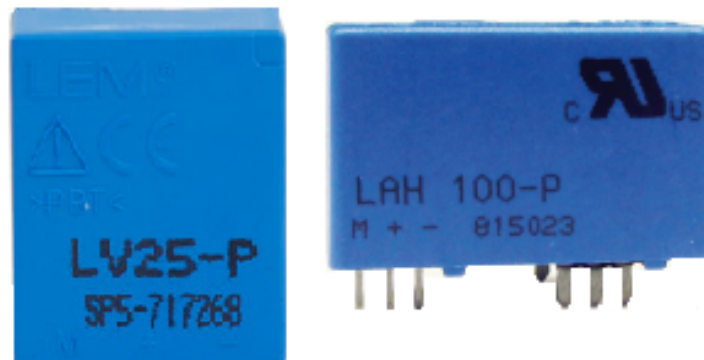
Figura 29 – Painel dSPACE.



Fonte: (DPACE, 2019).

Os sinais das formas de onda de corrente e tensão apresentados nesse capítulo foram obtidos e depois apresentados no osciloscópio TSO5014A da Agilent Technologies. Por fim, há o sistema de proteção composto por disjuntores termomagnéticos, contadoras, sinalizadores e botoeiras, responsável por seccionar a alimentação da bancada caso ocorra problemas com sobrecorrentes que causam aquecimento além do esperado ou com curto-circuito.

Figura 30 – Sensor de corrente LV 25-p e sensor de corrente LAH 100-p.



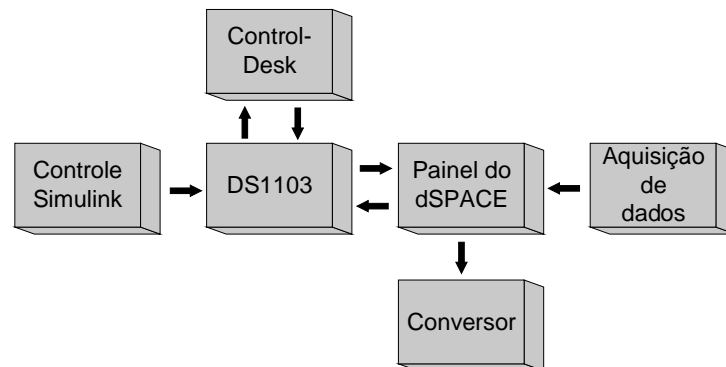
Fonte: (LEM, 2019).

Tabela 2 – Dados técnicos dos sensores de tensão, LV 25-P, e de corrente, LAH 100-P.

Item	LV 25-P	LAH 100-P
Fabricante	LEM	LEM
Corrente nominal	10 mA	100 A
Alcance de tensão no primário	10 - 500 V	-
Alcance de corrente no primário	0 - ± 14 mA	0 - ± 160 A
Corrente nominal do secundário	25 mA	50 mA
Relação de transformação	2500 : 1000 V	2000 : 1 A

Fonte: Próprio autor.

Figura 31 – Diagrama básico do fluxo de dados entre o dSPACE e os demais sistemas e equipamentos da bancada.



Fonte: Próprio autor.

5.2 Resultados Experimentais

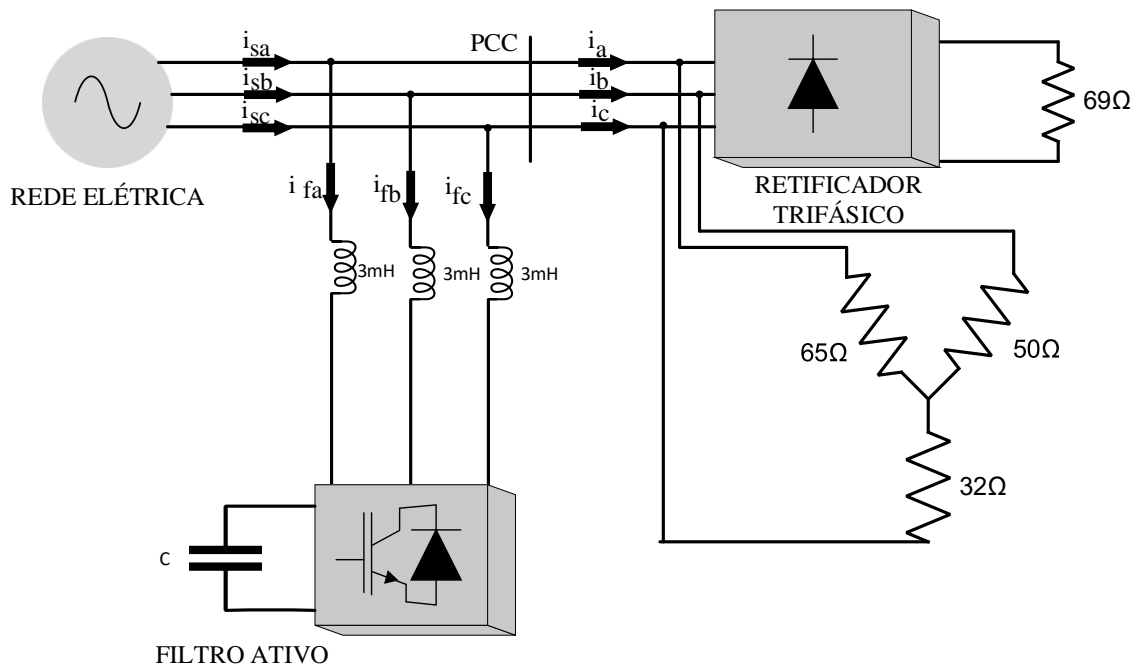
Foram montadas duas configurações de carga a fim de se observar o funcionamento do filtro em condições diferentes. Na primeira foi utilizada uma associação de resistores em série, totalizando 69Ω , conectada à jusante de um retificador trifásico de onda completa, em paralelo com resistores desbalanceados de 65 , 50 e 32Ω , como mostra a Figura 32. Na segunda configuração, apresentada na Figura 33, foram utilizados o transformador, que tem os dados de placa apresentados na Tabela 3 à jusante de uma carga com retificador trifásico, um conjunto capacitivo de $320 \mu F$ e uma associação resistiva de 69Ω . A frequência de chaveamento utilizada para as chaves de potência do conversor foi de 24 kHz .

Tabela 3 – Dados de placa do transformador.

Item	Dados
Enrolamento de alta tensão	220V
Enrolamento de baixa tensão	110V
Frequência	60 Hz
Potência	5kVA
Impedância	2,2%
Ligação	Y-Y

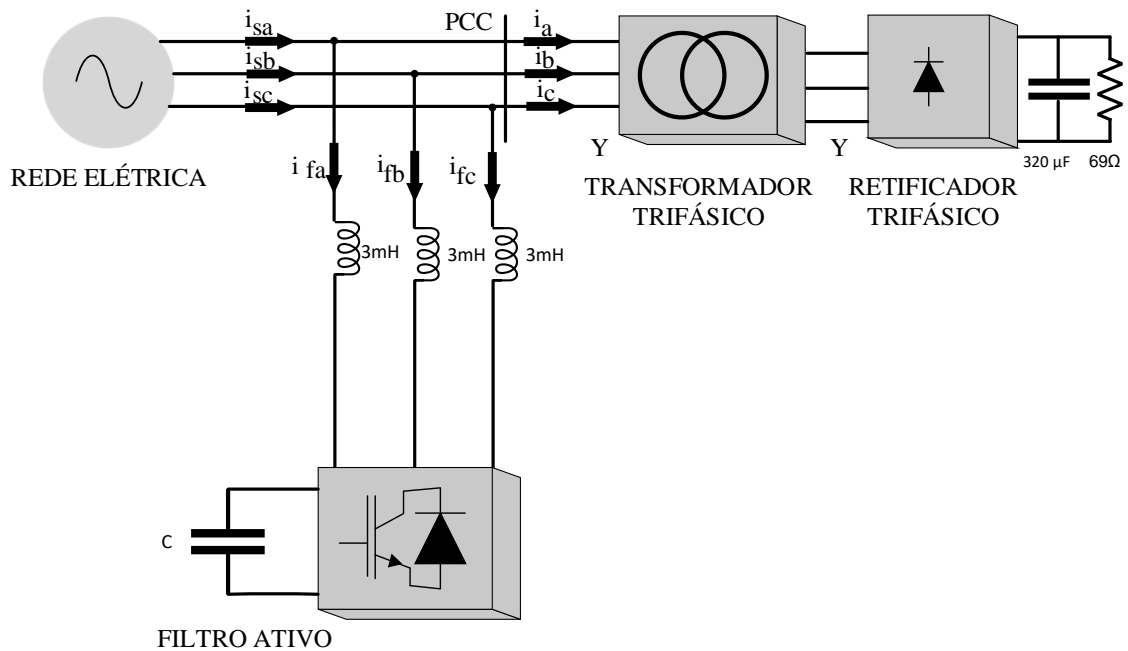
Fonte: Próprio autor.

Figura 32 – Esquema de ligação para a primeira configuração de carga.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 33 – Esquema de ligação para a segunda configuração de carga.



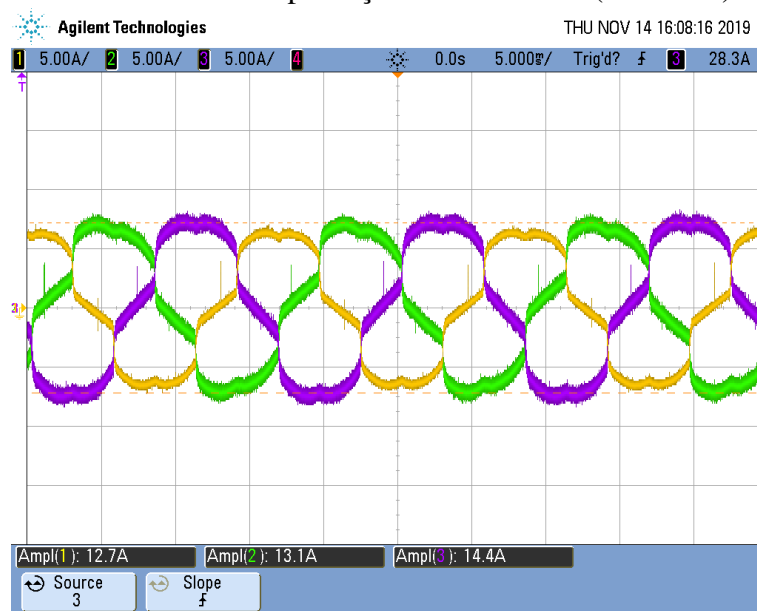
Fonte: Próprio Autor.

5.2.0.1 Primeira configuração de carga

5.2.0.1.1 Sem a atuação do filtro

Primeiramente buscou-se observar a condição em que se apresentava a corrente da rede somente com a carga conectada a ela. Uma vez que existe uma parcela de carga desbalanceada e uma parcela de carga conectada a retificadores, esperava-se que as formas de onda das correntes apresentassem magnitudes diferentes e também distorção. A Figura 34 apresentam as formas de onda das correntes trifásicas. Pode-se perceber que existe o desbalanceamento de corrente, pois elas apresentam valores máximos de 14,4, 13,1 e 12,7 A para as fases a,b, e c, respectivamente. Além disso, o formato das ondas não é senoidal devido a presença de harmônicos.

Figura 34 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH1-CH3: Correntes da rede sem compensação do filtro ativo (10 A/Div).



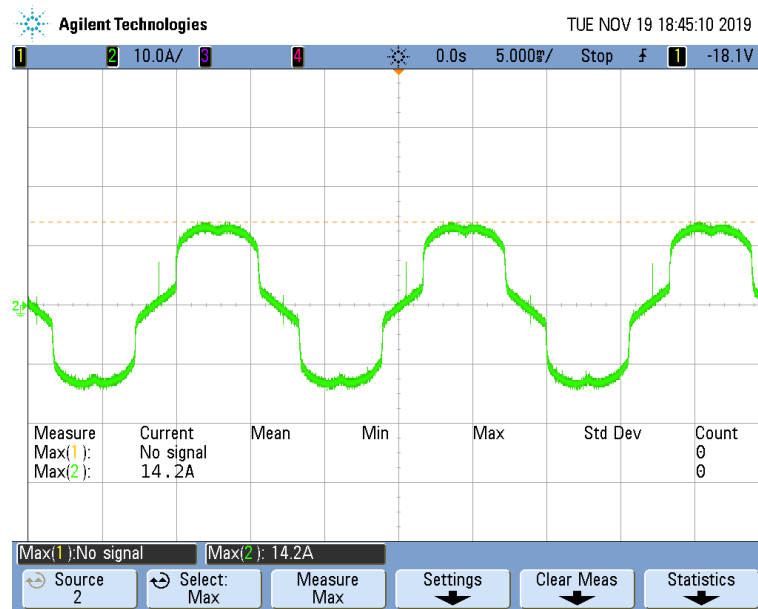
Fonte: Próprio Autor.

A figura 35 apresenta de forma mais detalhada a corrente apenas em uma fase da rede. Ela apresenta distorções nas cristas e nos vales e também próximo da região de magnitude igual a zero.

Na Figura 36 é feita a comparação entre a tensão e a corrente da rede. Observa-se que a tensão é senoidal, enquanto a corrente possui uma forma diferente com distorção. De forma ideal, deseja-se que a corrente siga o comportamento da tensão, porém ela possui distorções

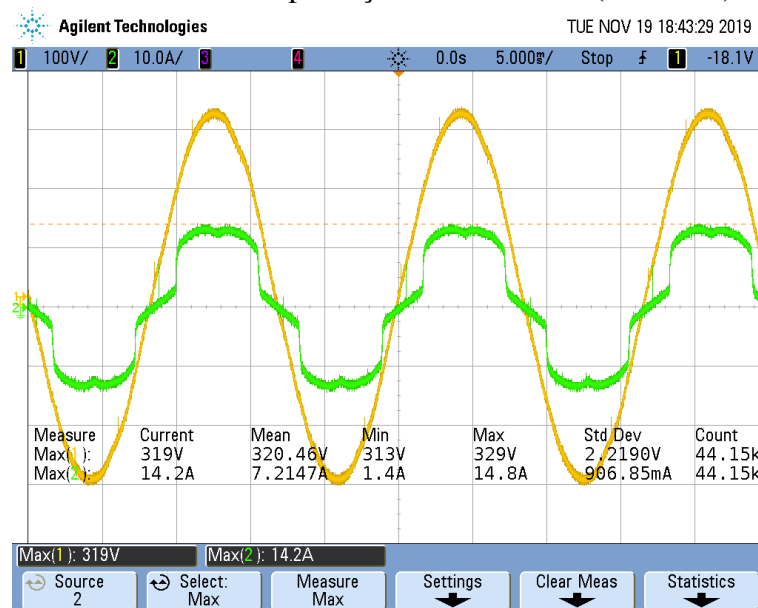
harmônicas que a descaracteriza da forma ideal.

Figura 35 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH2: Corrente de uma única fase da rede sem compensação do filtro ativo (10 A/Div).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 36 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH1: Tensão de linha da rede (100V/Div). CH2: Corrente na fase b da rede sem compensação do filtro ativo (10 A/Div).



Fonte: Próprio Autor.

De posse dos valores de corrente e tensão captados por meio do sistema de aquisição,

obteve-se, a partir dos dados amostrados fornecidos pela plataforma dSPACE, as formas de ondas das potências real, real média e real oscilante, que são apresentadas na Figura 37, além da potência imaginária apresentada na Figura 38. É possível observar que a parcela oscilante da potência real chega a valores próximos de 1 kW. Essa potência, como esclarecido na seção 4.1, possui muito conteúdo harmônico de corrente em sua composição. A potência imaginária, por sua vez, chega a valores próximos de 3 kVAi (volt-ampere imaginário).

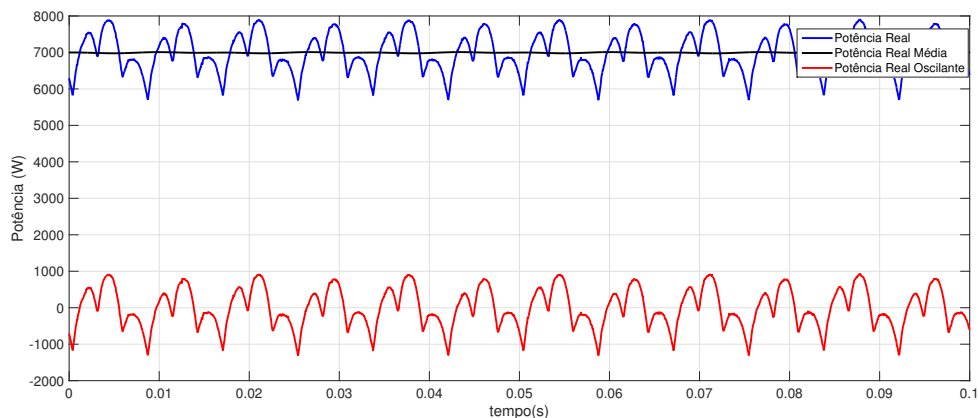
A partir dos dados obtidos pelo sistema de aquisição, foi possível calcular a distorção total de corrente da rede, de acordo com (2.5). Os valores obtidos foram bem acima dos 5 % desejados.

$$TDH_{ia} = 17,04\%,$$

$$TDH_{ib} = 15,77\%,$$

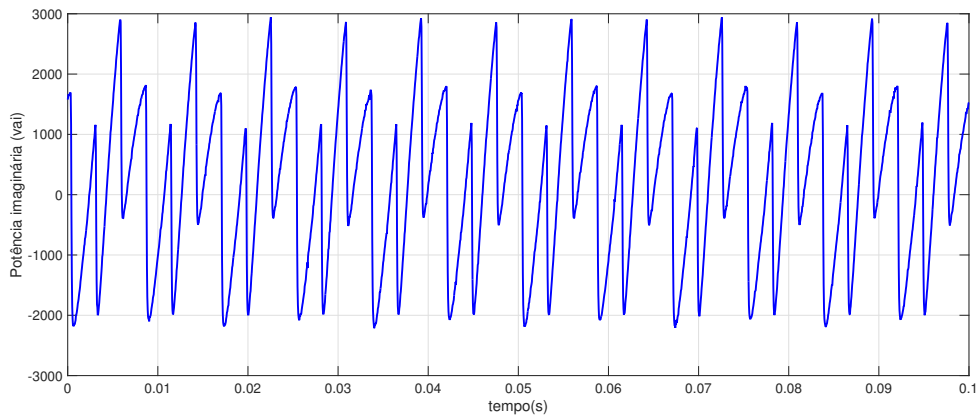
$$TDH_{ic} = 14,97\%.$$

Figura 37 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Potências real, média e oscilante antes da operação do filtro ativo paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 38 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Potência imaginária antes da operação do filtro ativo paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

5.2.1 Com a atuação do filtro ativo

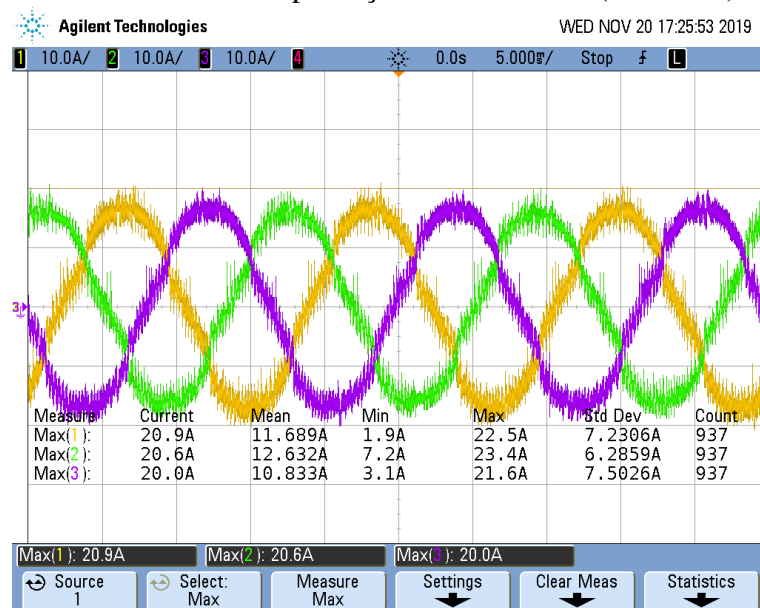
O mesmo procedimento realizado anteriormente foi repetido, porém, com a atuação do filtro ativo de potência. O esperado seria que a distorção de corrente fosse reduzida. A Figura 39 mostra a corrente da rede. As magnitudes das correntes aumentaram devido a operação do filtro, porém, pode-se perceber que seus valores são praticamente iguais, demonstrando que o filtro ativo compensou o desbalanceamento de corrente. A forma assemelha-se mais com uma senoide, entretanto, ainda assim é possível observar a existência de distorção, parte por conta das correntes de altas frequências causadas pelo próprio chaveamento das chaves de potência. Esse efeito pode ser reduzido ajustando-se o filtro de linha.

A Figura 40 mostra o momento de transição entre da forma de onda da corrente a partir do momento em que o filtro ativo entra em operação. Claramente observa-se que o seu comportamento antes do tempo apontado pela seta em vermelho é não senoidal e há diferenças visíveis de amplitude, que são corrigidas a partir do tempo em que o filtro começa a operar, passando a se comportar de maneira senoidal e balanceada.

É importante salientar que o objetivo é eliminar as componentes harmônicas de corrente da rede, que deve ser o mais próximo possível do padrão estabelecido por norma. A corrente da carga, por outro lado, permanece com os componentes harmônicos, pois seu comportamento é uma consequência da natureza da própria carga, que demanda que assim seja para que ela possa operar corretamente. A Figura 41 põe juntas as formas de onda de corrente da rede, da carga e de compensação gerada pelo filtro. A corrente da rede (em verde) tem comportamento mais próximo ao de uma senoide, a corrente da carga (em amarelo) tem o mesmo

aspecto da forma de onda da Figura 35, o que era de se esperar, pois a corrente da carga deve permanecer a mesma. Por fim, a corrente de compensação (em roxo) produzida pelo filtro possui um aspecto bem particular, que pode variar conforme a carga. Ao somar a corrente da carga com a corrente de compensação do filtro obtêm-se como resultado a corrente da rede, de acordo com (3.1).

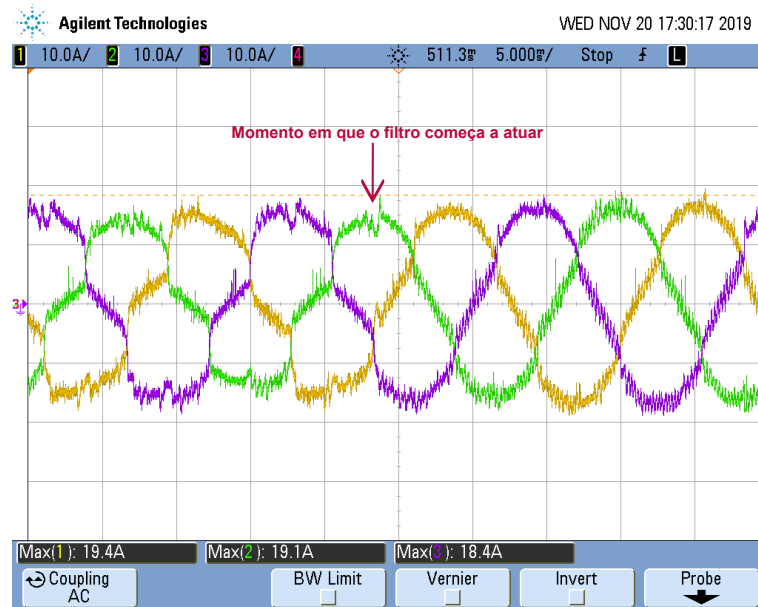
Figura 39 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH1-CH3: Correntes da rede com compensação do filtro ativo (10 A/Div).



Fonte: Próprio Autor.

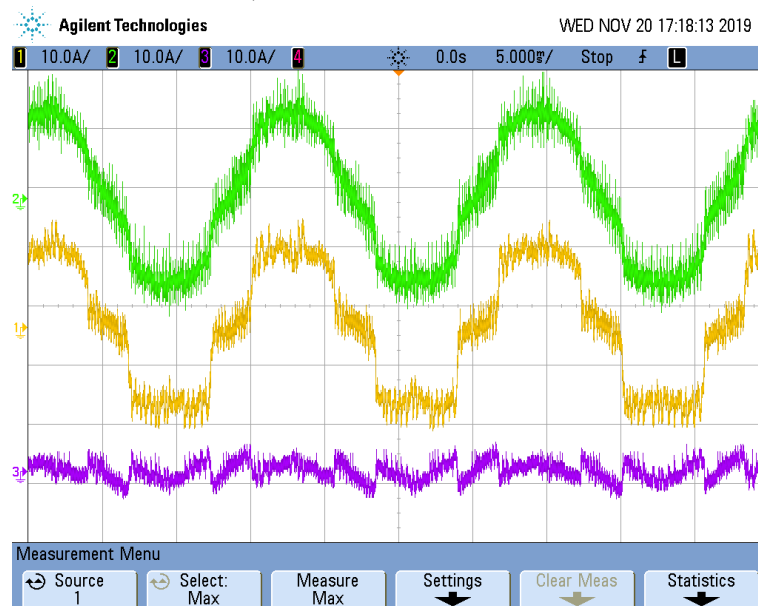
De posse dos valores de corrente e tensão captados por meio do sistema de aquisição, obteve-se, a partir dos dados amostrados fornecidos pela plataforma dSPACE, as formas de ondas das potências real, real média e real oscilante, que são apresentadas na Figura 42. É possível observar que a parcela oscilante da potência real tem leve redução, enquanto que a parcela média e, conseqüentemente, a potência real total aumentam em relação as apresentadas na Figura 37, pois é necessário potência média para manter a tensão no barramento CC e garantir o funcionamento adequado das chaves de potência. A potência imaginária na Figura 38 apresenta uma redução de 600 vai. A total eliminação da componente oscilante de potência real e da potência imaginária não acontece, o que indica que existem componentes harmônicas de corrente que não foram eliminadas.

Figura 40 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. CH1-CH3: correntes da rede. Mudança de comportamento da corrente com a atuação do filtro ativo (10 A/Div).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 41 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Comparação entre a corrente da rede (amarelo), a corrente da carga (verde) e a corrente de compensação do filtro (roxo) - (10 A/Div).



Fonte: Próprio Autor.

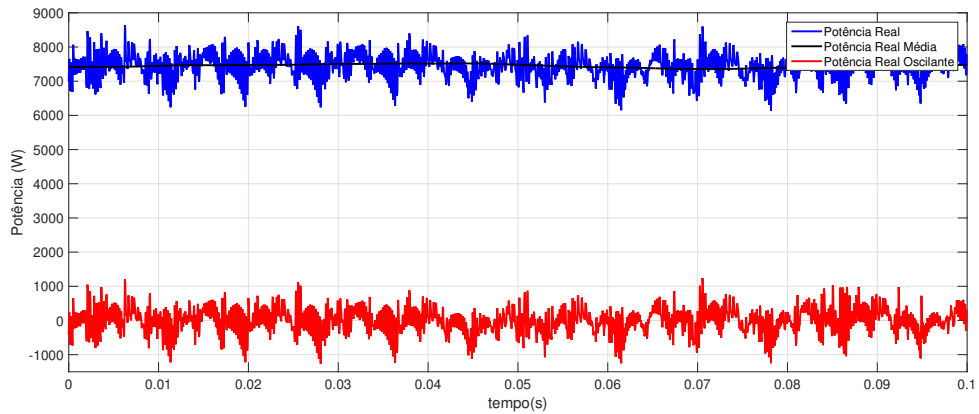
A partir dos dados obtidos pelo sistema de aquisição, foi possível calcular a distorção total de corrente da rede, de acordo com (2.5). Seus valores foram:

$$TDH_{ia} = 6,42\%$$

$$TDH_{ib} = 5,99\%,$$

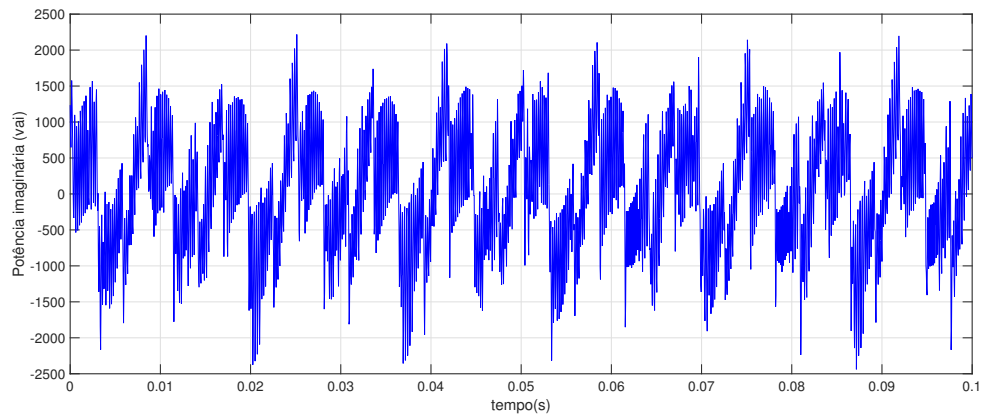
$$TDH_{ic} = 5,99\%.$$

Figura 42 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Potências real, média e oscilante durante a operação do filtro ativo paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 43 – Resultados experimentais para a primeira configuração de carga. Potência imaginária durante a operação do filtro ativo paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

A TDH de corrente ainda não é o ideal, porém, deve-se reconhecer que houve uma redução considerável. A existência de componentes harmônicos confirma o afirmado anteriormente sobre a existência de potências real oscilante e imaginária. Em se tratando de termos práticos e aplicação na indústria, essa redução de harmônicos, embora não seja total, é vista com bons olhos, pois pode ajudar a reduzir gastos por conta de prejuízos causados por harmônicos. A Tabela 4 apresenta um resumo comparativo entre as TDH_i para a primeira configuração de carga adotada.

Tabela 4 – Comparação entre os valores de TDH para a primeira carga.

Distorção Harmônica	Sem filtro	Com filtro
TDH_{ia}	17,04 %	6,42 %
TDH_{ib}	15,77 %	5,99 %
TDH_{ic}	14,97 %	5,99 %

Fonte: Próprio autor.

5.2.1.1 Segunda Configuração de carga

5.2.1.1.1 Sem a atuação do filtro

Primeiramente buscou-se observar a condição em que se apresentava a corrente da rede somente com a carga conectada a ela. A Figura 44 apresenta as formas de onda das correntes trifásicas. Pode-se perceber que elas possuem distorção causada por harmônicos, além de evidenciarem que a indutância de magnetização do transformador e a capacitância estão em ressonância.

De posse dos valores de corrente e tensão captados por meio do sistema de aquisição, obteve-se, a partir dos dados amostrados fornecidos pela plataforma dSPACE, as formas de ondas das potências real, real média e real oscilante, que são apresentadas na Figura 45. É possível observar que a parcela oscilante da potência real chega a valores de $\pm 1,2$ kW e $-1,8$ kW. A potência imaginária na Figura 46 apresenta valores que chegam até $-1,6$ kVA e $1,2$ kVA.

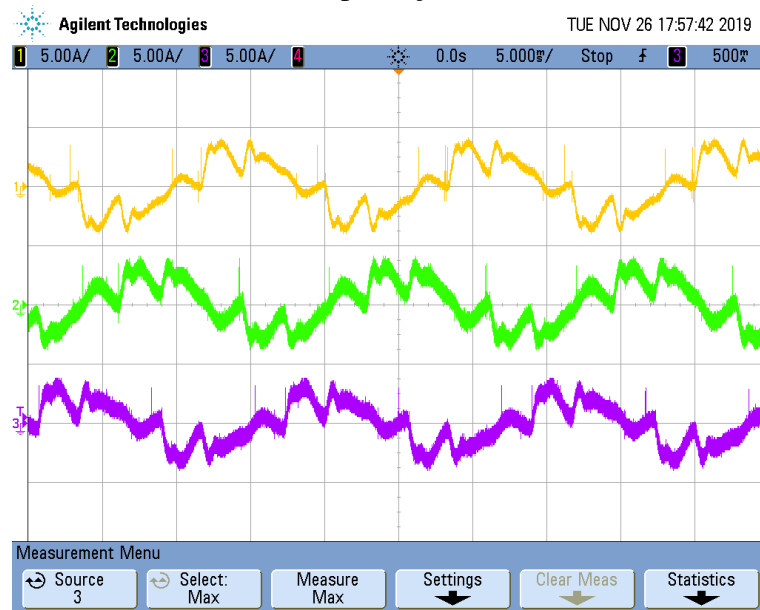
A partir dos dados obtidos pelo sistema de aquisição, foi possível calcular a distorção total de corrente da rede, de acordo com (2.5). Os valores obtidos foram bem elevados em comparação com a primeira configuração de carga sem o filtro.

$$TDH_{ia} = 42,66\%,$$

$$TDH_{ib} = 45,75\%,$$

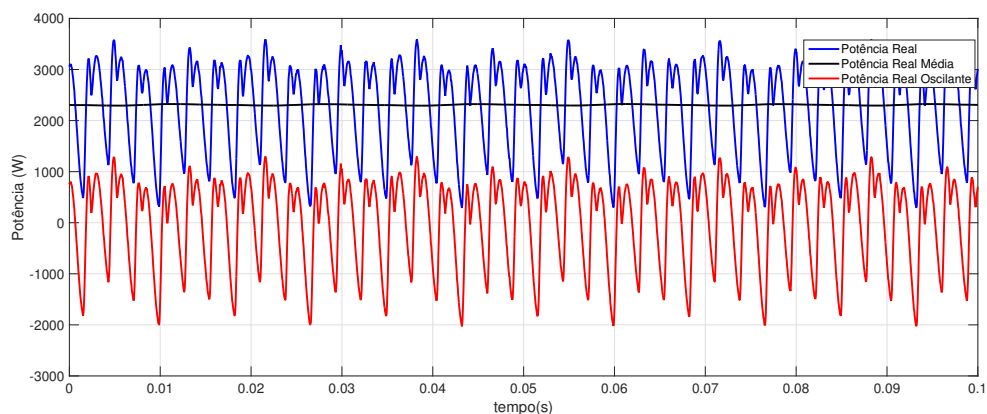
$$TDH_{ic} = 39,36\%.$$

Figura 44 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. CH1-CH3: Correntes de rede antes da compensação (6 A/Div).



Fonte: Próprio Autor.

Figura 45 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. Potências real, média e oscilante antes da operação do filtro ativo paralelo.

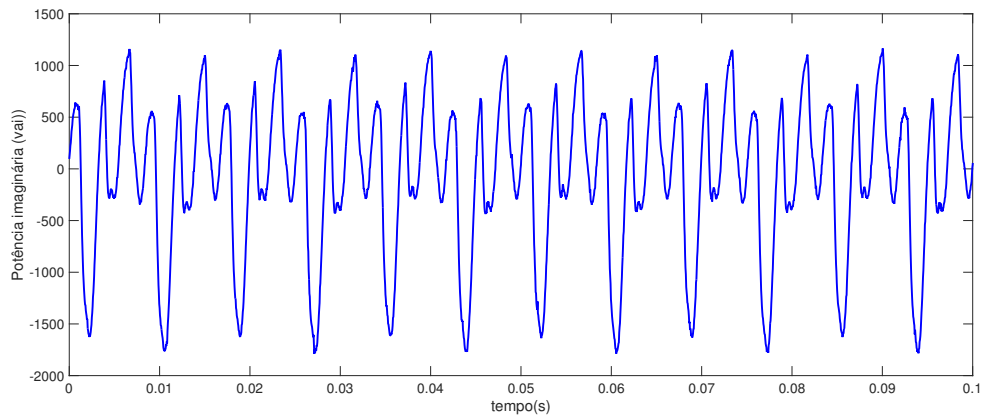


Fonte: Próprio Autor.

Nesse momento é importante apresentar as formas de onda das tensões, vistas na Figura 47 e obtidas a partir de medições no secundário do transformador, uma vez que deseja-se fazer apenas uma análise qualitativa sobre seu comportamento. Diferentemente do que

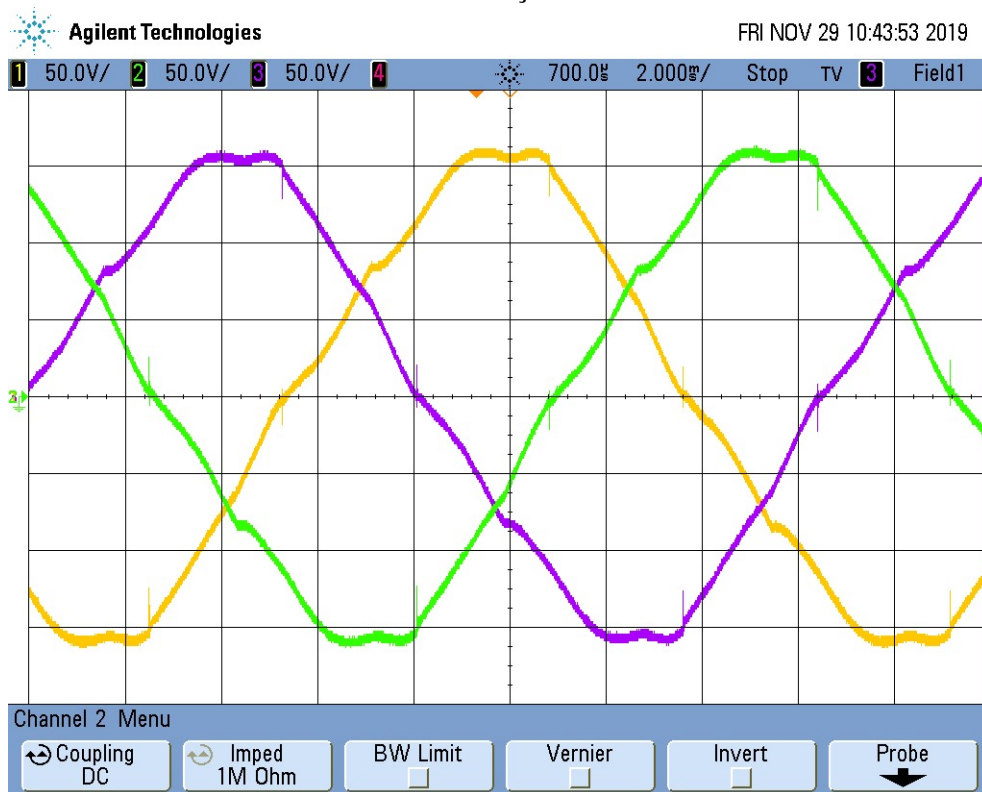
acontece para a primeira configuração de carga, para essa situação a tensão possui distorção, o que influencia diretamente nos cálculos de potência como demonstrado em (4.16) a (4.21). A existência de distorção na tensão tem como problemas a impossibilidade de se garantir simultaneamente fluxo somente de potência real média e corrente senoidal drenada da rede.

Figura 46 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga.
Potência imaginária antes da operação do filtro ativo paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 47 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga.
Tensões da rede com distorção.

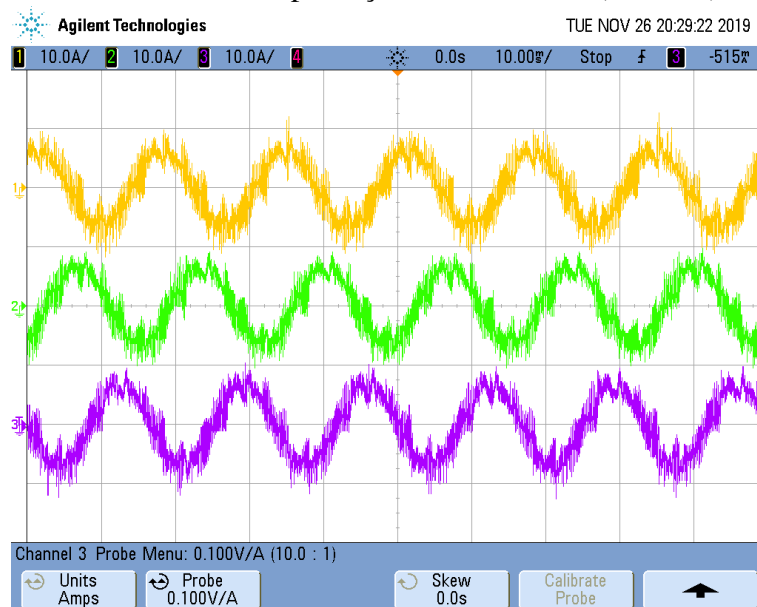


Fonte: Próprio Autor.

5.2.1.1.2 Com atuação do filtro

O mesmo procedimento realizado anteriormente foi repetido, porém, com a atuação do filtro ativo de potência. O esperado era que a distorção de corrente fosse reduzida. A Figura 48 mostra as correntes da rede e suas magnitudes, que aumentaram devido a operação do filtro, porém, pode-se perceber que seus valores são praticamente iguais. A forma de onda da corrente é mais semelhante a uma senoide, o que confirma que o filtro é aplicável inclusive em situações de ressonância e com a existência de tensão distorcida. Ainda assim é possível observar a existência de distorção de corrente, parte por conta das correntes de altas frequências causadas pelo próprio chaveamento das chaves de potência e também por conta da não otimização do filtro, que não consegue filtrar determinadas componentes harmônicas da corrente. Esse efeito pode ser reduzido ajustando-se o filtro de linha e a estratégia de controle.

Figura 48 – Resultados experimentais para segunda configuração de carga. CH1-CH3: Correntes da rede com compensação do filtro ativo (6 A/Div).



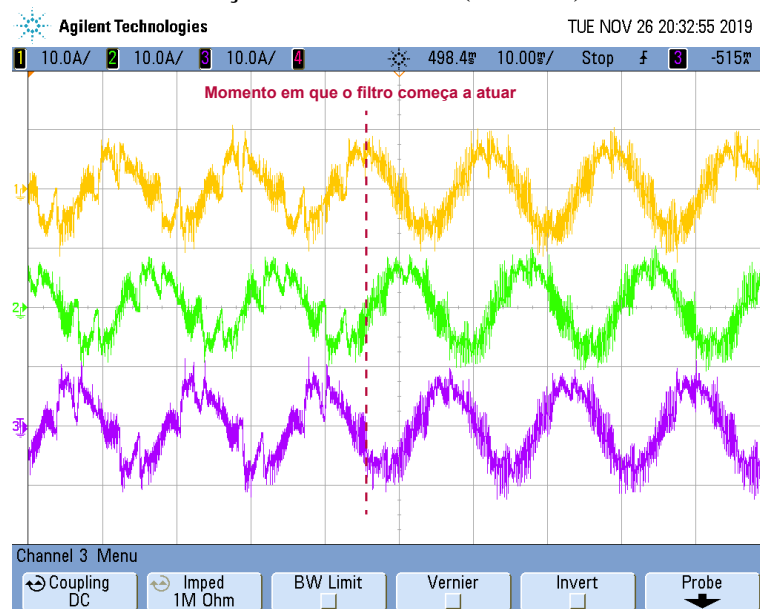
Fonte: Próprio Autor.

A Figura 49 mostra o momento de transição entre da forma de onda da corrente a partir do momento em que o filtro ativo entra em operação. Claramente observa-se que o seu comportamento antes do tempo indicado pela linha tracejada em vermelho é não senoidal e há diferenças visíveis de amplitude, que são corrigidas a partir do tempo da operação do filtro, passando a se comportar de maneira senoidal e balanceada.

A Figura 50 põe juntas as formas de onda de corrente da rede, da carga e de

compensação gerada pelo filtro. A corrente da rede (em amarelo) tem comportamento mais próximo ao de uma senoide, a corrente da carga (em verde) tem o mesmo aspecto da forma de onda da Figura 44, o que era de se esperar, pois a corrente da carga deve permanecer a mesma. Por fim, a corrente de compensação (em roxo) produzida pelo filtro possui um aspecto bem particular, que pode variar conforme a carga. A forma de onda da corrente do filtro apresenta muito ruído devido a interferências nos cabos utilizados como pontas de prova. Ao se somar a corrente da carga com a corrente de compensação do filtro obtêm-se como resultado a corrente da rede, de acordo com (3.1).

Figura 49 – Resultados experimentais para segunda configuração de carga. CH1-CH3: correntes da rede. Mudança de comportamento da corrente com a atuação do filtro ativo (7 A/Div).



Fonte: Próprio Autor.

De posse dos valores de corrente e tensão captados por meio do sistema de aquisição, obteve-se, a partir dos dados amostrados fornecidos pela plataforma dSPACE, as formas de ondas das potências real, real média e real oscilante, que são apresentadas na Figura 51. É possível observar que a parcela oscilante da potência real diminuiu de aproximadamente 600 W na parte negativa, enquanto que a parcela média e, conseqüentemente, a potência real total aumentam em relação as apresentadas na Figura 45, pois é necessário potência média manter a constante e em nível adequado a tensão no barramento CC, garantindo assim o funcionamento das chaves de potência. A componente oscilante da potência real e a potência imaginária não foram totalmente eliminadas, significando que ainda existem componentes harmônicos de corrente que não foram

filtradas. Além disso, como explicado anteriormente, existindo tensão da rede distorcida ou desbalanceada não é possível garantir simultaneamente fluxo somente de potência real média e o padrão senoidal da corrente.

A partir dos dados obtidos pelo sistema de aquisição, foi possível calcular a distorção total de corrente da rede, de acordo com (2.5). Seus valores foram:

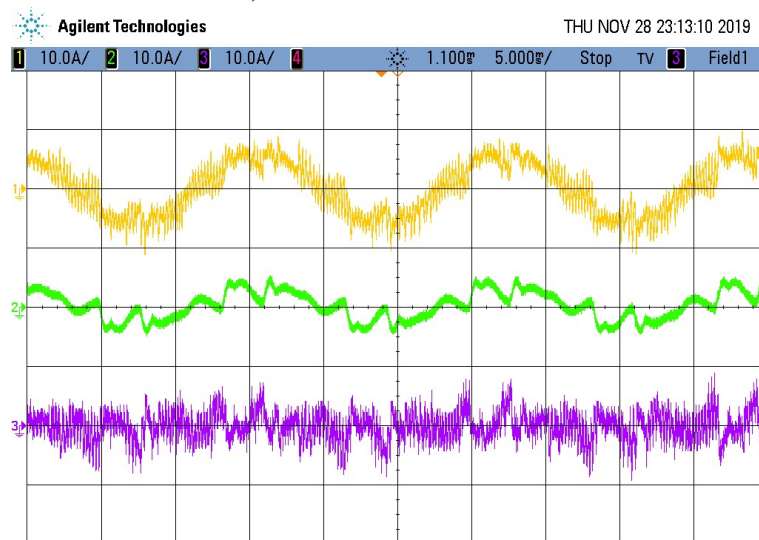
$$TDH_{ia} = 11,69\%,$$

$$TDH_{ib} = 13,48\%,$$

$$TDH_{ic} = 13,18\%.$$

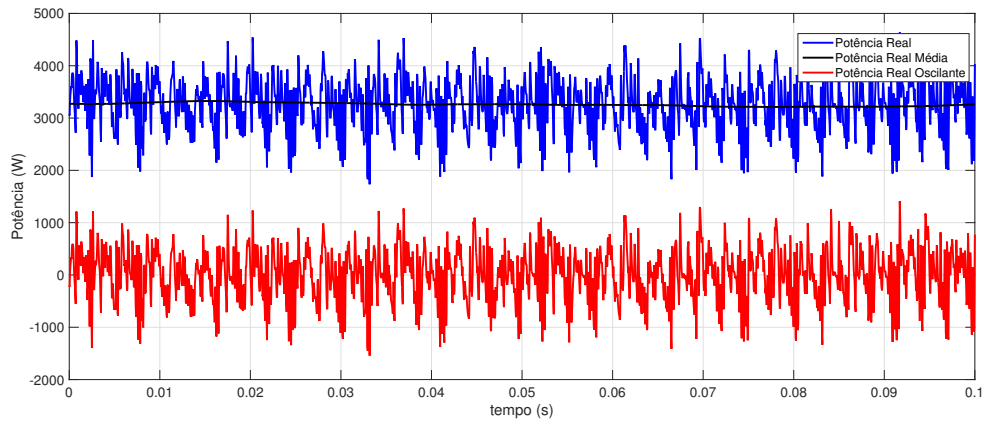
A TDH de corrente ainda não é desejada, porém, deve-se reconhecer que houve uma redução considerável, o que torna a solução de filtros ativos vantajosa.

Figura 50 – Resultados experimentais para segunda configuração de carga. Comparação entre a corrente da rede (verde), a corrente da carga (amarelo) e corrente de compensação do filtro (roxo). (10 A/Div).



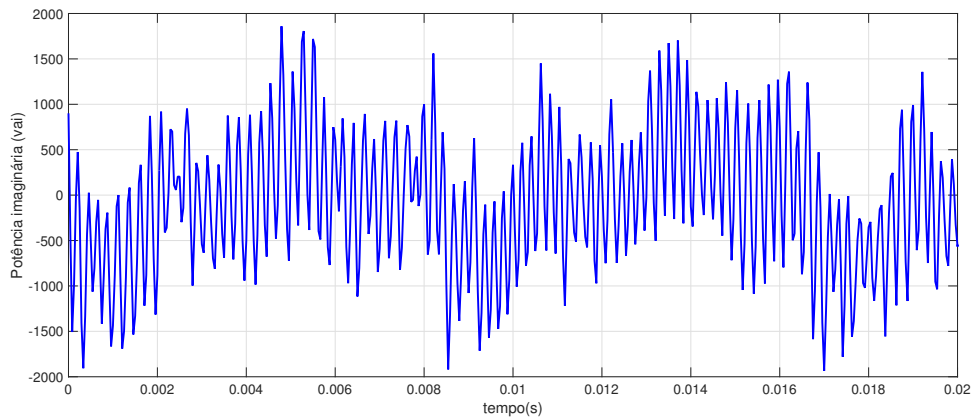
Fonte: Próprio Autor.

Figura 51 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. Potências real, média e oscilante durante a operação do filtro ativo paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

Figura 52 – Resultados experimentais para a segunda configuração de carga. Potências imaginária após a operação do filtro ativo paralelo.



Fonte: Próprio Autor.

A Tabela 5 apresenta um resumo comparativo entre as TDH_i para a segunda configuração de carga adotada.

Tabela 5 – Comparação entre os valores de TDH para a segunda carga.

Distorção Harmônica	Sem filtro	Com filtro
TDH_{ia}	42,66 %	11,69 %
TDH_{ib}	45,75 %	13,48 %
TDH_{ic}	39,36 %	13,18 %

Fonte: Próprio autor.

5.2.2 Conclusão

A partir dos dados experimentais, foi possível observar que, ao inserir o filtro ativo de potência aos sistemas elétricos propostos com dois tipos de cargas diferentes, a distorção da corrente da rede reduziu e o comportamento da sua forma de onda aproximou-se mais de uma senoide. Para as duas configuração de carga, não foi possível reduzir o nível de TDH para abaixo de 5%, como era desejado, porém, os resultados obtidos apresentaram-se satisfatórios, pois as reduções foram bastante consideráveis. Além disso, em uma situação particular da segunda carga, onde havia ressonância entre a indutância de magnetização do transformador e o capacitor, e também tensão distorcida, o filtro conseguiu atuar e reduzir os níveis de distorção harmônica de corrente, constatando-se, portanto, que a partir do momento que ele entra em operação, a qualidade da energia é melhorada.

Entre os possíveis problemas responsáveis para que a redução da TDH_i não tenha sido alcançada nos níveis desejados pode-se citar o filtro de linha, que não possuía a indutância mais adequada para a aplicação prática devido a sua não otimização e o controle do chaveamento das chaves de potência, que não estava no melhor ajuste possível como consequência da não otimização do filtro de linha, uma vez que a modulação por banda de histerese é sensível à indutância de entrada, que precisa estar bem ajustada.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho propôs a melhoria da qualidade de energia elétrica de um sistema por meio de uma abordagem prática, o que consistiu em reduzir o nível de conteúdo harmônico da corrente da rede elétrica, quantificado pela TDH_i . Para tanto, soluções possíveis incluem o uso de filtro ativos (paralelo e/ou série), passivos ou híbridos. Optou-se por trabalhar com um filtro ativo paralelo por conta de suas vantagens, como auto-sintonização e seletividade de frequências das harmônicas a serem filtradas.

Para controlar o chaveamento do conversor do filtro ativo paralelo, lançou-se mão de uma estratégia de controle baseada na teoria de potência ativa e reativa instantâneas, a Teoria pq . Ela é mais generalista que a teoria clássica de potência e permite trabalhar com correntes de diferentes frequências no domínio do tempo. A técnica de modulação utilizada foi a de histerese, que permite rapidez no controle do filtro ativo, além de ser bem simples de implementar, mas que requer uma boa otimização de todos os componentes do filtro ativo para operar da forma idealizada.

O filtro ativo paralelo foi implementado em uma bancada física que possui a plataforma dSPACE, que é bastante prática para esse tipo de aplicação que visa validar por meio de experimentos uma teoria proposta. As formas de onda de corrente e os dados relacionados a distorção harmônica e potência obtidos na bancada foram apresentados. Constatou-se que o filtro não conseguiu compensar as correntes de forma que a TDH_i tivesse o seu valor abaixo de 5%, como era desejado, de acordo com o exposto no Capítulo 5. Os motivos para isso podem ser o filtro de linha que não possuía a indutância mais adequada para a aplicação prática devido à sua não otimização e o controle do chaveamento das chaves de potência, que não estava no melhor ajuste possível. Entretanto, como foi demonstrado, reduziu-se consideravelmente a distorção causada por harmônicos. Para a situação onde a carga era composta apenas por resistores e a ponte retificadora trifásica, a TDH_i foi reduzida de 17,04%, 15,77% e 14,97% para 6,42%, 5,99% e 5,99% nas fases a,b,c, respectivamente. Para a situação onde se utilizou resistor, capacitor e o transformador a TDH_i foi reduzida de 17,04%, 15,77% e 14,97% para 6,42%, 5,99% e 5,99% nas fases a,b,c, respectivamente

Portanto, apesar existirem melhoras a serem alcançadas, conclui-se que o objetivo de melhorar a qualidade de energia elétrica, reduzindo os níveis de distorção harmônica de corrente, foram obtidos. Esse feito, quando considerado em aplicações na indústria, pode significar menos perda monetária, além de não prejudicar o funcionamento da rede elétrica.

Visando trabalhos futuros, são propostos os seguintes tópicos:

- Melhorar o desempenho do filtro de potência ativo paralelo por meio de ajustes no filtro de linha que é responsável por reduzir os efeitos das correntes na frequência do chaveamento das chaves de potência do conversor;
- Estudar e implementar uma malha passiva de filtro, trabalhando, assim, com um filtro híbrido, além de analisar o seu desempenho e viabilidade técnica e econômica em relação ao filtro ativo;
- Aplicar uma diferente estratégia de controle para obtenção das correntes de referência e assim comparar com o desempenho obtido com a Teoria pq.

REFERÊNCIAS

- ABNT, N. 5410: Instalações elétricas de baixa tensão. **Rio de Janeiro**, 2004.
- AKAGI, H. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits. **IEEJ IPEC-Tokyo'83**, v. 1375, 1983.
- AKAGI, H. Modern active filters and traditional passive filters. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, Polish Academy of Sciences, 2006.
- ANEEL, A. d. E. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional-prodist/módulo 8-qualidade da energia elétrica-rev. 10. 2018.
- ANEEL, R. N. 414/2010. **Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica**, 2010.
- ASES. **Plataforma DS1103**. In: _____, 2019. Disponível em: <<https://www.ases.co/Products/dSPACE/Single-Board-Hardware/DS1103-PPC-Controller-Board>>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- ASWAL, J.; PAL, Y. Passive and active filter for harmonic mitigation in a 3-phase, 3-wire system. In: IEEE. **2018 2nd International Conference on Inventive Systems and Control (ICISC)**. [S.l.], 2018. p. 668–672.
- BENCHOUIA, M. T.; MAHNI, T.; GOLEA, A.; SRAIRI, K.; BENBOUZID, M. E.-H. dspace based adaptive fuzzy controller of dc bus voltage for three-phase power filter. In: IEEE. **2015 International Conference on Sustainable Mobility Applications, Renewables and Technology (SMART)**. [S.l.], 2015. p. 1–5.
- CAMPANHOL, L. B. G. **Filtros Ativo de Potência Paralelo Utilizando Inversores Monofásicos Full-Bridge Aplicado em Sistemas Trifásicos a Quatro-Fios**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Cornélio Procópio, 2012.
- DSPACE. **dSPACE Connector LED Panels Single Board HW Catalog2018**. In: _____, 2019. Disponível em: <https://www.dspace.com/shared/data/pdf/2018/dSPACE_Connector_LED_Panels_Single-Board_HW_Catalog2018.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2019.
- EMADI, A.; NASIRI, A.; BEKIAROV, S. B. **Uninterruptible power supplies and active filters**. [S.l.]: CRC press, 2005.
- FONSECA, J. M. L. d. **Algoritmo de sincronização com detector de sequência positiva e negativa: aplicação em conversores estáticos conectados à rede elétrica** 2019. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019.
- FORTESCUE, C. L. Method of symmetrical co-ordinates applied to the solution of polyphase networks. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, IEEE, v. 37, n. 2, p. 1027–1140, 1918.
- IEEE 519 Working Group and others. IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electrical power systems. **IEEE STD**, p. 519–1992, 2014.
- International Electrotechnical Commission and others. Electromagnetic compatibility (emc)—part 3-4: Limits—limitation of emission of harmonic currents in low-voltage power supply systems for equipment with rated current greater than 16 a. **IEC**, v. 61000, p. 3–4, 1998.

International Electrotechnical Commission and others. **Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 3-2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment Input Current 16 A per Phase)**. [S.l.], 2009.

JAIN, T.; JAIN, S.; AGNIHOTRI, G. Comparison of topologies of hybrid active power filter. IET, 2007.

KASSICK, E. Harmônicas em sistemas industriais de baixa tensão. INEP, 2008.

KEDRA, B. Comparison of an active and hybrid power filter devices. In: IEEE. **2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)**. [S.l.], 2014. p. 556–560.

LEÃO, R.; SAMPAIO, R.; ANTUNES, F. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. [S.l.]: Elsevier Editora Ltda, 2014. v. 2014.

LEM. **Lista de Produtos LEM**. In: _____, 2019. Disponível em: <<https://www.lem.com/en/product-list>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

LIMA, F.; SHIMODA, D.; ALMADA, J.; SILVA, M.; FILHO, H. O.; DANTAS, J. Dfig using its fact features through the grid-side converter in grid-connected wind power application. In: **ICREPQ-International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Santiago de Compostela**. [S.l.: s.n.], 2012.

LIMONGI, L. R. **Filtros Ativos de Potência Para Compensação de Corrente e Potência Reativa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pernambuco, Pernambuco, 2006.

LO, Y.-K.; CHUANG, C.-C.; PURNAMA, I.; RAHMAN, A. N. Matlab/simulink construction and implementation of dsp shunt active power factor corrector. In: IEEE. **2017 2nd International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT)**. [S.l.], 2017. p. 109–114.

MELO, P. F. d. **Projeto e implementação de um filtro ativo universal trifásico controlado digitalmente**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

MORAIS, E. E. C. **Estudo e Projeto de Filtros Passivos para Atenuação de Harmônicos em Instalações Elétricas Industriais**. 2011. 137 f. Dissertação (Trabalho Final de Curso em Engenharia Engenharia Elétrica) — Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

MORAIS, E. E. C. **Filtro Híbrido de Dupla Sintonia a Quatro Fios e a Quatro Braços**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2014.

ORTMANN, M. S. **Filtro Ativo Trifásico com Controle Vetorial Utilizando DSP: Projeto e Implementação**. 2008. 241 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Engenharia Elétrica) — Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PENG, F. Z. Harmonic sources and filtering approaches. **IEEE industry applications magazine**, IEEE, v. 7, n. 4, p. 18–25, 2001.

POMILIO, J. A. Eletrônica de potência. **Publicação FEEC**, v. 1, p. 98, 1995.

SILVA, D. C.; MUSSE, B. F.; SILVA, N. L.; ALMEIDA, P. M. de; OLIVEIRA, J. G. de. Hardware in the loop simulation of shunt active power filter (sapf) utilizing rtds and dspace. In: **IEEE. 2017 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)**. [S.l.], 2017. p. 1–6.

SUPPLIER. **Conjunto inversor quadrifásico spciq 450-60-50**. In: _____, 2019.

Disponível em: <<http://www.supplier.ind.br//produto/conjuntos-inversores-de-potencia/5/conjunto-inversor-de-4-bracos/36>>. Acesso em: 10 dez. 2019.

WATANABE, E. H.; AREDES, M.; AKAGI, H. The pq theory for active filter control: some problems and solutions. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, SciELO Brasil, v. 15, n. 1, p. 78–84, 2004.

WATANABE, E. H.; AREDES, M. *et al.* Teoria de potência ativa e reativa instantânea e aplicações-filtros ativos e facts. In: **CONGRESSO BRAS. DE AUTOMÁTICA**. [S.l.: s.n.], 1998. v. 12, p. 81–122.

WATEGAONKAR, S. S.; PATIL SWAPNILL, S.; JADHAV, P. R. Mitigation of current harmonics using shunt active power filter. IEEE, 2018.