

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

JOHN KENNEDY SOARES CARVALHO

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO SOBRE DIFERENTES FORMAS DE
CONTROLE DE FILTROS ATIVOS TRIFÁSICOS EM DIFERENTES
SITUAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO**

**ITUMBIARA-GO
2022**

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: John Kennedy Soares Carvalho

Matrícula: 20151040070298

Título do Trabalho: Análise e comparação sobre diferentes formas de controle de filtros ativos trifásicos em diferentes situações do sistema elétrico

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Itumbiara-GO, 05 / 07 / 23.
Local Data



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

JOHN KENNEDY SOARES CARVALHO

**ANÁLISE E COMPARAÇÃO SOBRE DIFERENTES FORMAS DE
CONTROLE DE FILTROS ATIVOS TRIFÁSICOS EM DIFERENTES
SITUAÇÕES DO SISTEMA ELÉTRICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca examinadora do Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Qualidade de Energia Elétrica

Orientador(a): Prof. Dr. Eric Nery Chaves

ITUMBIARA-GO

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C331a Carvalho, John Kennedy Soares
 Análise e comparação sobre diferentes formas de controle de
 filtros ativos trifásicos em diferentes situações do sistema
 elétrico./John Kennedy Soares Carvalho. -- Itumbiara, 2023.
 85 p. : il. color.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia
 Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
 de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2023.
 Orientador: Prof. Dr. Eric Nery Chaves.

 1. Energia elétrica - Produção. 2. Energia elétrica -
 Distribuição. 3. Energia elétrica - Consumo. I. Título. II.
 Chaves, Eric Nery. III. Instituto Federal de Educação, Ciência
 e Tecnologia de Goiás.

CDD 621.31

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Biblioteca Maria Gabriela Pacheco Pardey / Câmpus Itumbiara
Bibliotecário: Eduardo Pereira Resende CRB1/3266



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS ITUMBIARA

Termo de Aprovação

John Kennedy Soares Carvalho

Análise e Comparação sobre Diferentes Formas de Controle de Filtros Ativos Trifásicos em Diferentes Situações do Sistema Elétrico

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás – Câmpus Itumbiara, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado, em 07 de Junho de 2023, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eric Nery Chaves - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Marcelo Escobar de Oliveira - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Ghunter Paulo Viajante - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Itumbiara – GO

2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Marcelo Escobar de Oliveira**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/06/2023 15:09:15.
- **Ghunter Paulo Viajante**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/06/2023 14:39:22.
- **Eric Nery Chaves**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 30/06/2023 14:24:03.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 30/06/2023. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 425963

Código de Autenticação: 4190a40c48



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Avenida Furnas, nº 55, Bairro Village Imperial, ITUMBIARA / GO, CEP 75524-010
(64) 2103-5612 (ramal: 5612)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado todos os requisitos necessários para conclusão desse curso e trabalho, e também por ter traçado este caminho para mim. A minha família que me deu muito mais que todo o suporte necessário para que houvesse condições de redigir este e cursar esta graduação. Aos professores que tiveram a paciência de me capacitar e me deram condições de aprender a ciência em questão. Aos meus amigos que me distraíram e me divertiram nas horas necessárias para manter a sanidade e em especial aqueles que sempre me motivaram também. Um obrigado especial a quem viveu ativamente comigo todo esse período e suportou todos os meus lamentos e reclamações, sempre me incentivando e ouvindo com toda a atenção tudo que eu tinha a dizer.

A todos, meus mais sinceros agradecimentos.

“Cada caminho que nasce é perfeitamente
decidido pelos céus, e é perfeitamente livre também.”

Inoue, Takehiko de “Vagabond”.

RESUMO

A demanda por energia elétrica tem apresentado um crescimento constante desde o surgimento desse importante recurso. Com o aumento da população e a dependência cada vez maior de dispositivos elétricos, é natural que haja uma demanda contínua por maiores quantidades de potência disponível. Além do desafio de aumentar a capacidade de geração de energia, é igualmente importante garantir a qualidade dessa energia elétrica disponível para uso efetivo.

A pesquisa sobre novas formas de geração de energia tem desempenhado um papel fundamental na busca por soluções sustentáveis e eficientes. No entanto, um aspecto muitas vezes negligenciado, mas de extrema importância, é a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores. A qualidade da energia refere-se à conformidade com as características ideais de tensão, corrente e frequência, e sua falta pode resultar em problemas como variações de tensão, distorção harmônica e flutuações indesejadas.

Um fator que contribui para a melhoria da quantidade de energia elétrica apta ao consumo efetivo é a mitigação de perdas. A redução de perdas de energia em sistemas de distribuição é uma estratégia apropriada para aumentar a disponibilidade de potência. Nesse contexto, este trabalho de conclusão de curso (TCC) tem como objetivo explorar maneiras de mitigar as perdas de energia elétrica, por meio da mitigação de harmônicos, que são efeitos descobertos relativamente recentemente, em conjunto com o aumento do uso de cargas não-lineares.

À medida que o consumo de energia elétrica e o uso de cargas não-lineares continuam a crescer, a presença de dispositivos eletrônicos com chaves eletrônicas, tanto em ambientes residenciais como industriais, torna-se cada vez mais comum. Essas cargas não-lineares são uma das principais fontes de distorção harmônica nos sistemas elétricos. Portanto, é fundamental encontrar soluções eficazes para mitigar esse problema e garantir uma distribuição de energia de alta qualidade.

Neste trabalho, propomos o uso de filtros ativos, especificamente as técnicas de *Sinusoidal Current Control* (SCC) e *Multiple Second Order Generalized Integrator* (SOGI), para a mitigação de harmônicos. Além de apresentar essas técnicas, também exploramos o plano de fundo necessário para aplicar essas técnicas, como as Transformadas de Clark, a Teoria P-Q, *Frequency Locked Loop* (FLL), *Phase Locked Loop* (PLL), trazendo seus resultados em relação a diferentes condições do sistema e outros conhecimentos relevantes para a simulação e implementação dos filtros em questão.

Espera-se que, ao combinar essas técnicas e conhecimentos, seja possível alcançar uma mitigação efetiva de harmônicos e, conseqüentemente, uma redução significativa nas perdas de energia elétrica. Essa abordagem não apenas contribuirá para aumentar a potência disponível, mas também melhorará a qualidade geral da energia elétrica fornecida aos consumidores.

Ao abordar essa problemática e buscar soluções práticas e eficientes, este trabalho visa contribuir para o avanço da área de qualidade de energia elétrica, fornecendo insights valiosos e resultados significativos. Os próximos capítulos discutirão em detalhes os fundamentos teóricos e conceitos essenciais relacionados ao tema, a fim de fornecer uma base sólida para o desenvolvimento e análise dos filtros ativos SCC e MSOGI.

Palavras-chave: Sistemas Elétricos de Potência, Qualidade de Energia, Harmônicos, Filtros Ativos, Transformada Clark, Teoria P-Q, Constant Instantaneous Power, Sinusoidal Current Control, Second Order Generalized Integrator.

ABSTRACT

The demand for electrical energy has been steadily growing since the discovery of this important resource. With the increasing population and growing dependence on electrical devices, there is a continuous demand for larger quantities of available power. In addition to the challenge of increasing power generation capacity, ensuring the quality of the electrical energy available for effective use is equally important.

Research into new forms of energy generation has played a crucial role in the search for sustainable and efficient solutions. However, a frequently overlooked yet extremely significant aspect is the quality of the electrical energy supplied to consumers. Energy quality refers to compliance with ideal characteristics of voltage, current, and frequency, and its lack can result in problems such as voltage variations, harmonic distortion, and unwanted fluctuations.

One factor that contributes to improving the quantity of electrical energy suitable for effective consumption is the mitigation of losses. Reducing energy losses in distribution systems is an appropriate strategy to increase power availability. In this context, this undergraduate thesis aims to explore ways to mitigate electrical energy losses through harmonic mitigation, which is a relatively recently discovered effect, in conjunction with the increasing use of non-linear loads.

As electrical energy consumption and the use of non-linear loads continue to grow, the presence of electronic devices with electronic switches in both residential and industrial settings becomes increasingly common. These non-linear loads are one of the main sources of harmonic distortion in electrical systems. Therefore, it is crucial to find effective solutions to mitigate this problem and ensure high-quality energy distribution.

In this work, we propose the use of active filters, specifically the Sinusoidal Current Control (SCC) and Multiple Second Order Generalized Integrator (SOGI) techniques, for harmonic mitigation. In addition to presenting these techniques, we also explore the necessary background to apply them, such as Clark Transforms, P-Q Theory, Frequency Locked Loop (FLL), Phase Locked Loop (PLL), providing their performance under different system conditions and other relevant knowledge for the simulation and implementation of the filters in question.

It is expected that by combining these techniques and knowledge, effective harmonic mitigation and consequently a significant reduction in electrical energy losses can be achieved. This approach will not only contribute to increasing available power but also enhance the overall quality of electrical energy supplied to consumers.

By addressing this issue and seeking practical and efficient solutions, this work aims to contribute to the advancement of the field of electrical energy quality, providing valuable insights and significant results. The upcoming chapters will discuss in detail the theoretical foundations and essential concepts related to the topic, to provide a solid foundation for the development and analysis of the SCC and MSOGI active filters.

Key-words: Electric Power Systems, Power Quality, Harmonics, Active Filters, Clark Transform, P-Q Theory, Constant Instantaneous Power, Sinusoidal Current Control, Second Order Generalized Integrator.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Diagrama de blocos de mitigação Harmônica	19
Figura 2.1 - Forma de Onda com harmônicos	20
Figura 2.2 – Formas de Ondas Fundamental e Harmônicas	22
Figura 2.3 - Espectro de Frequências	23
Figura 2.4 – Circuito com fontes harmônicas.....	25
Figura 2.5 – Circuito com fontes harmônicas simplificado.....	25
Figura 2.6 - Retificador Monofásico	29
Figura 2.7 - Tensão na carga	29
Figura 2.8 - Corrente na carga	30
Figura 2.9 - Corrente na entrada do retificador monofásico	30
Figura 2.10 - Tensão na entrada do retificador monofásico	31
Figura 2.11 - Harmônicos na tensão de entrada do retificador monofásico	31
Figura 2.12 - Circuito Retificador Trifásico	32
Figura 2.13 - Tensão na carga do retificador trifásico.....	33
Figura 2.14 - Corrente na carga do retificador trifásico	33
Figura 2.15 - Corrente na entrada do retificador trifásico	34
Figura 2.16 - Tensão na entrada do retificador trifásico.....	34
Figura 2.17 - Harmônicos gerados pelo retificador trifásico.....	35
Figura 2.18 - Filtro Sintonizado	36
Figura 2.19 - Filtro amortecido.....	37
Figura 3.1 – Circuito do Filtro Ativo Shunt.	39
Figura 3.2 – Circuito simplificado do filtro ativo shunt.	40
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do filtro ativo shunt	41
Figura 3.4 – Filtro Ativo Série.....	43
Figura 3.5 – Circuito simplificado filtro ativo série.	44
Figura 3.6 – Circuito do Filtro Ativo UPQC	45
Figura 3.7 – Filtro Ativo Híbrido	46
Figura 3.8 – Inversor por Fonte de Tensão.....	47
Figura 3.9 – Inversor por Fonte de Corrente	48
Figura 3.10 – Transformada Clarke.....	49

Figura 3.11 – Gráfico da Transformada Clarke.....	51
Figura 3.12 – Espectro de frequências da Transformada Clarke.....	52
Figura 3.13 – Gráfico da Teoria P-Q.....	53
Figura 3.14 – Diagrama de blocos do método CIP.....	55
Figura 3.15 – Tensão Trifásica da Carga do Filtro CIP	56
Figura 3.16 – Corrente Trifásica da Carga do Filtro CIP	57
Figura 3.17 – Potências ativas da carga do Filtro CIP	57
Figura 3.18 - Potência Imaginária da carga do Filtro CIP.....	58
Figura 3.19 – Corrente de Correção do Filtro CIP.	59
Figura 3.20 – Diagrama de Blocos do Filtro SCC.....	60
Figura 3.21 - Diagrama de Blocos do PSD.	61
Figura 3.22 – Gráfico entre as tensões originais e do PSD.	61
Figura 3.23 – Diagrama de Blocos de um PLL.	62
Figura 3.24 – Gráficos das Correntes de Saída do PLL.	62
Figura 3.25 – Tensão na Carga do Filtro SCC	63
Figura 3.26 – Corrente na Carga do Filtro SCC.....	63
Figura 3.27 – Potências Ativas Total, Constantes e Oscilante do Filtro SCC.....	64
Figura 3.28 – Potência Imaginária do Filtro SCC	64
Figura 3.29 – Corrente de Compensação do Filtro SCC	65
Figura 3.30 – Diagrama de Blocos da Estrutura SOGI.	66
Figura 3.31 – Diagrama de Blocos da Estrutura DSOGI.	67
Figura 3.32 – Diagrama de Blocos da Estrutura PNSC.....	67
Figura 3.33 – Diagrama de Blocos da Estrutura FLL.....	68
Figura 3.34 – Diagrama de Blocos de um DSOGI-FLL.....	69
Figura 3.35 – Componente de Frequência Fundamental do DSOGI.....	70
Figura 3.36 – Sinal de Entrada do DSOGI.	70
Figura 3.37 – Forma de Onda harmônica gerada pelo DSOGI.	71
Figura 3.38 – Corrente de Referência Gerado pelo MSOGI.	72
Figura 3.39 – Corrente na Fonte com filtro DSOGI.....	72
Figura 3.40 – Corrente na Fonte no Domínio da Frequência.	73
Figura 4.1 - Circuito de simulação	75
Figura 4.2 - Circuito do filtro ativo	75
Figura 4.3 - Circuito de controle por Histerese.	76

Figura 4.4 – Gráfico $V \times I$ da carga.....	77
Figura 4.5 – Resposta do MSOGI para Carga Indutiva.....	77
Figura 4.6 – Resposta do Filtro SCC para Carga Indutiva.	78
Figura 4.7 – Gráficos das Correntes de Carga, Fonte e Tensão da Fonte.	78
Figura 4.8 – Corrente Fornecida pela Fonte (Filtro DSOGI).	79
Figura 4.9 – Corrente Fornecida pela Fonte (Filtro SCC).....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Sequência de Ordem Harmônicas.....	24
Tabela 2.2 – Harmônicos permitidos pela IEC 61000 3-2.	27
Tabela 2.3 – Limites Harmônicos Definidos pela ANEEL.	27
Tabela 3.1 – Parâmetros para a simulação	56
Tabela 4.1 – Parâmetros do Circuito.	74

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
2	QUALIDADE DE ENERGIA.....	20
2.1	Harmônicos	20
2.1.1	Série e Transformada de Fourier	21
2.1.2	Ressonância Harmônica	24
2.1.3	Distorção Harmônica Total (THD).....	26
2.1.4	Cargas Não-Lineares	28
2.1.4.1	Retificador Monofásico.....	28
2.1.4.2	Retificador Trifásico	32
2.2	Filtros Passivos.....	35
2.2.1	Filtros Sintonizados	36
2.2.2	Filtros Amortecidos	36
3	FILTROS ATIVOS	38
3.1	Introdução.....	38
3.1.1	Topologias de Filtros Ativos	38
3.1.1.1	Filtro Ativo Shunt	38
3.1.1.2	Filtro Ativo Série.....	42
3.1.1.3	Filtro Ativo UPQC	44
3.1.1.4	Filtro Ativo Híbrido	46
3.1.2	Classificação por Tipo de Conversores	46
3.1.3	Classificação Por Quantidade de Fios	48
3.1.3.1	Sistemas a dois fios:	48
3.1.3.2	Sistemas a três fios:	49
3.1.3.3	Sistemas a quatro fios:.....	49
3.2	Transformada Clarke.....	49
3.3	Teoria $p-q$	52
3.4	Filtro Constant Instantaneous Power (CIP).....	54
3.5	Filtro Sinusoidal Current Control (SCC)	59
3.6	<i>Filtro Multiple Second Order Generalized Integrator - Frequency Locked Loop (MSOGI-FLL)</i>	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	74
4.1	Carga Indutiva.....	74
4.2	Carga Harmônica.....	79
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	81
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
7	APÊNDICE – TABELA TRANSFORMADAS DE FOURIER.....	85

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica é um conjunto de limites elétricos que permitem que um equipamento funcione de maneira apropriada sem perdas significantes de performance ou expectativa de vida (SANKARAN, 2002).

Considerando a dinâmica de rede como entradas e saídas de grandes cargas além de suas características operacionais, ocorrência de defeitos em equipamentos do sistema elétrico seja em condutores, transformadores, subestações e geradores, assim como as casualidades ambientais em situações de clima chuvoso em situações de descargas atmosféricas podem ocasionar problemas e declínios na qualidade de energia para os consumidores que são divididos e classificados em:

- Transitórios
 - Impulsivo: impulso sem alteração na frequência de estado permanente da tensão e corrente, sendo unidirecional.
 - Oscilação: oscilações sem alteração na frequência de estado permanente da tensão e corrente, ocorrendo em valores positivos e negativos.
- Variações de tensão de longa duração
 - Sobretensão: aumento no valor eficaz da tensão em 10% ou mais para uma duração mínima de 1 minuto.
 - Subtensão: diminuição no valor eficaz da tensão em 10% ou mais para uma duração mínima de 1 minuto.
 - Interrupção sustentada: quando a tensão de alimentação permanece em zero por um período maior que 1 minuto.
- Variações de curta duração
 - Interrupções: tensão de alimentação ou corrente de carga esteja abaixo de 0,1 pu por um período menor que 1 minuto.
 - “Sags”: diminuição para valores entre 0,1 e 0,9 pu da tensão ou corrente eficaz para durações entre 0,5 ciclo e 1 minuto.
 - “Swell”: aumento para valores entre 1,1 e 1,8 pu da tensão ou corrente eficaz para durações entre 0,5 ciclo e 1 minuto.
- Desbalanceamento - desvio máximo da média das três tensões ou correntes de fase dividido pela média das três tensões ou correntes de fase, expresso em porcentagem.

A melhor análise seria através de componentes simétricas, pois a taxa de componentes de sequência negativa e positiva em relação à sequência positiva daria o desbalanceamento para um dado sistema.

- Distorção da forma de onda
 - DC offset: presença de tensão ou corrente contínua no sistema elétrico.
 - Harmônicos: tensões ou correntes de frequências múltiplas à fundamental presentes na forma de onda de tensão ou corrente.
 - Interharmônicos: tensões ou correntes em frequências não inteiras à fundamental presentes na forma de onda de tensão ou corrente.
 - Notching: distúrbio periódico de tensão causado pela operação de componentes eletrônicos de potência quando ocorre comutação de uma fase para outra. e. Ruído: sinais indesejáveis em grandes frequências, abaixo de 200 kHz, superpostas a tensão ou corrente nos condutores de fase.
- Flutuação de tensão - Variações sistemáticas na tensão cuja amplitude não exceda a faixa de 0,9 a 1,1 pu do valor eficaz de tensão.
- Variações na frequência da rede - desvios na frequência fundamental da rede. Flicker seria um fenômeno associado a este problema, caracterizando-o como uma flutuação na iluminação (PIRES, 2006).

Como citado anteriormente as características de carga afetam a forma de onda que é distribuída pela concessionária aos consumidores. Além da tradicional carga resistiva, indutiva e capacitiva há a existência das cargas não-lineares que alteram diretamente a forma de onda e induz harmônicos na rede através do chaveamento nos equipamentos de eletrônica de potência modernos

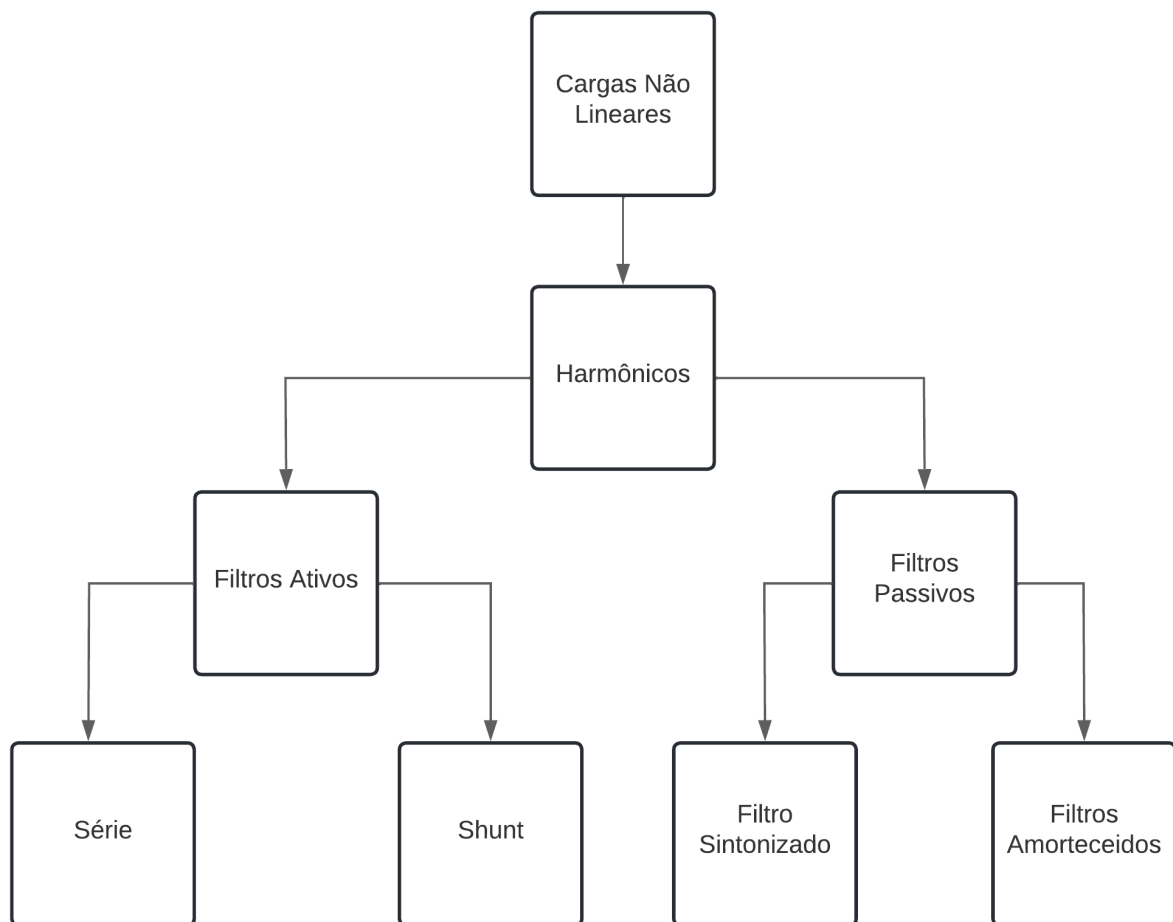
A presença de cargas não-lineares e o número crescente de geração distribuída contribuem significativamente para mudar as características da forma de onda de tensão e corrente nos sistemas de distribuição de energia. Sob essas condições técnicas de processamento avançadas são necessárias para mensurar e quantificar o sistema elétrico de potência. O impacto das cargas não-lineares vem aumentando durante as últimas décadas (REY e MUNETA, 2011).

Os equipamentos eletrônicos como computadores, recarregadores de baterias, inversores de frequência, entre outros, causam harmônicos e geram grandes perdas econômicas todo ano (MIKKILI e PANDA, 2016).

Dessa, esse trabalho apresenta os filtros ativos, que são soluções modernas para a mitigação desses harmônicos. Abordando principalmente os trabalhos de Akagi (2017) sobre os filtros ativos trifásicos especificamente os filtros *Constant Instantaneous Power* (CIP) e *Sinusoidal Current Source* (SCC) e Rocha (2018) que tem como foco o *Multiple Second Order Generalized Integrator – Frequency Locked Loop* (MSOGI – FLL) apresentam diferentes técnicas para controles do filtro, e comparando as respostas geradas por ambas as técnicas e seus efeitos em algumas situações de circuito.

O trabalho seguirá as subdivisões do diagrama de blocos presentes na Figura 1.1

Figura 1.1 - Diagrama de blocos de mitigação Harmônica



Fonte: Autoria Própria.

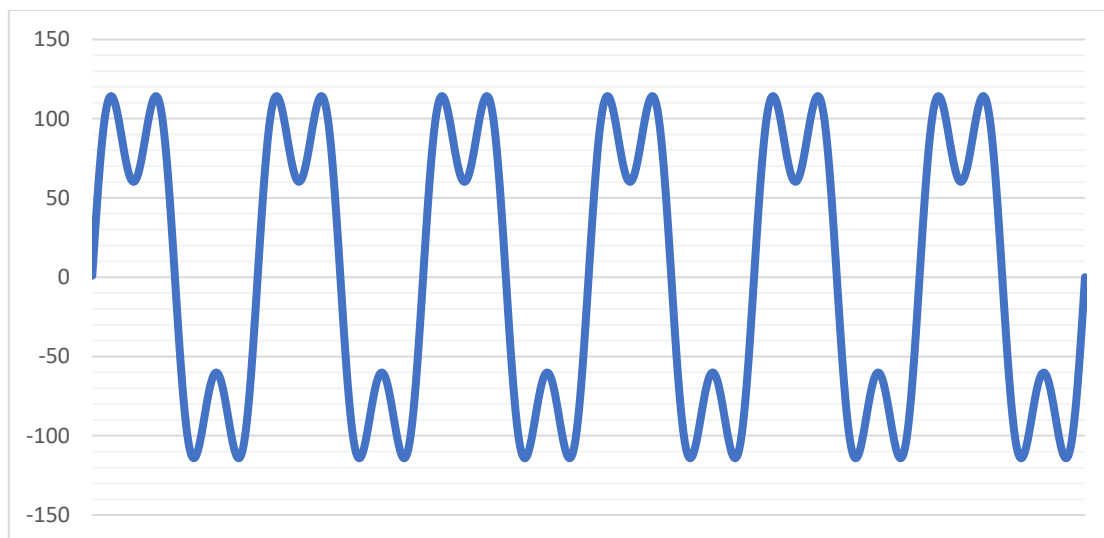
2 QUALIDADE DE ENERGIA

Neste capítulo, serão abordadas as frequências de ordens harmônicas, seus efeitos, origens, consequências e indicadores no sistema elétrico. O início da discussão consistirá na conceituação dos harmônicos, ressaltando a importância da transformada de Fourier como ferramenta analítica para sua análise. Em seguida, será examinada a maneira pela qual as cargas não-lineares produzem esses ruídos no sistema elétrico, e será explorada a abordagem convencional de compensação por meio do uso de bancos de capacitores. No entanto, também serão consideradas as implicações decorrentes do emprego desses bancos de capacitores, e serão apresentados indicadores que permitem quantificar o nível de poluição na rede elétrica.

2.1 Harmônicos

Os harmônicos que estão representados na Figura 2.1 são componentes de frequência indesejáveis que aparecem na forma de onda de tensão ou corrente em um sistema elétrico. Esses componentes adicionais são múltiplos inteiros da frequência fundamental, também conhecida como frequência de linha. Por exemplo, no caso de uma frequência fundamental de 60 Hz, os harmônicos seriam múltiplos inteiros de 60 Hz, como 120 Hz (segundo harmônico), 180 Hz (terceiro harmônico), 240 Hz (quarto harmônico) e assim por diante.

Figura 2.1 - Forma de Onda com harmônicos



Fonte: Autoria Própria.

A crescente utilização das cargas eletrônicas residenciais, somadas aos avanços da eletrônica de potência na indústria - utilização de equipamentos com materiais semicondutores tais como "soft-starters" e conversores de tensão - para o controle de velocidade nas máquinas de indução, produzem grandes distorções harmônicas nas correntes das redes de distribuição e transmissão de energia elétrica (ROCHA, 2018).

Existem alguns equipamentos que são responsáveis por causar distorções harmônicas na rede. Eles são divididos em:

- Fontes clássicas: Máquinas elétricas que trabalham com o seu núcleo ferromagnético saturado, fornos a arco e lâmpadas fluorescentes, equipamentos de solda, retificadores, motores de corrente contínuas com escovas.
- Fontes modernas: Cargas não lineares, equipamentos de eletrônica de potência, inversores de frequência para motores, PDSs (Processadores digitais de sinais) e lâmpadas de alta eficiência (MIKKILI e PANDA, 2016).

2.1.1 Série e Transformada de Fourier

O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta de uma expressão senoidal em frequência fundamental de expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas), e de uma eventual componente contínua (SCHNEIDER ELECTRIC).

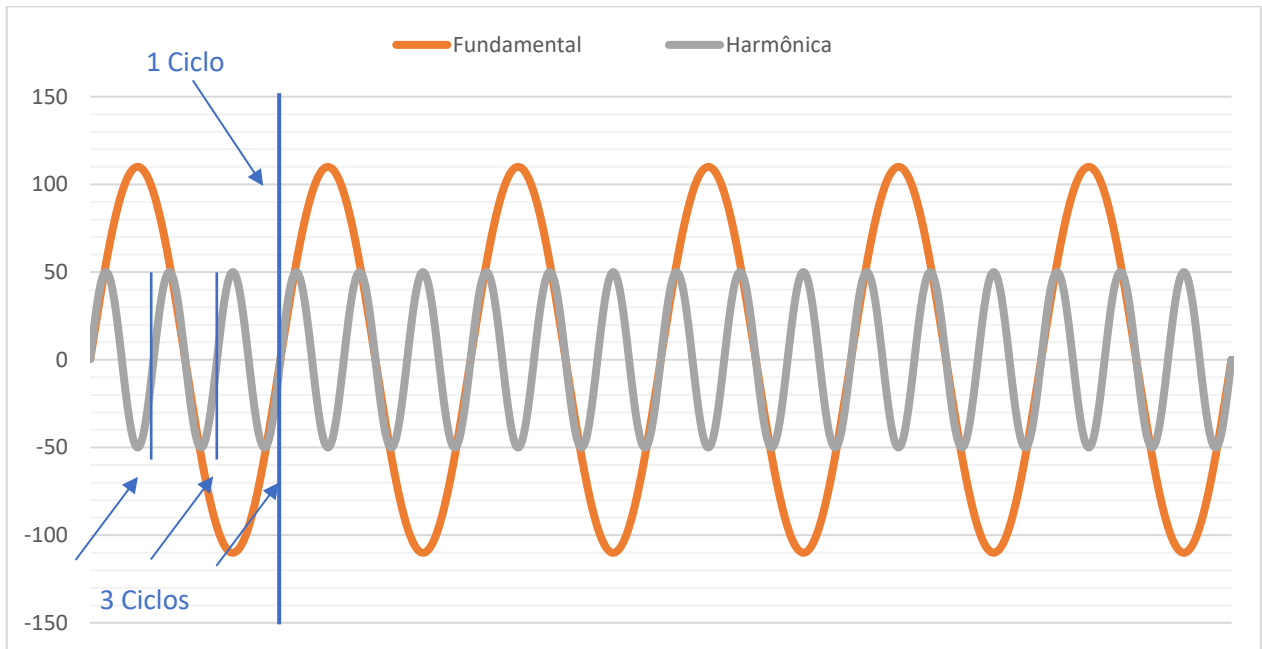
Na Figura 2.1 é ilustrado o resultado das somas de componentes harmônicas em uma componente fundamental, que como é possível notar possui uma notável distorção em seu formato. Uma forma de representação para esse tipo de função ilustrada na Figura 2.2, é uma decomposição na série de Fourier conforme a equação (2.1), o que é extremamente útil para realizar análises em circuitos com presença de harmônicos.

$$v(t) = V_0 + V_1 \sin(\omega t) + V_2 \sin(2\omega t) + V_3 \sin(3\omega t) + \dots + V_n \sin(n\omega t) \quad (2.1)$$

A série de Fourier (2.1) configura uma série Infinita, onde V_0 representa uma componente CC (Corrente Contínua), e $V_1, V_2, \dots, V_n$ configurar os valores de picos dos componentes periódicos das harmônicas de mesma ordem n (SANKARAN, 2002). A partir disso é possível decompor a onda da Figura 2.1, em frequências múltiplas como demonstrado na Figura 2.2.

Existem infinitos componentes harmônicos inteiros e por definição são separados entre par e ímpar devido a característica da onda. Quando as duas metades positivas e negativas são iguais, os harmônicos gerados possuem ordem ímpar enquanto os de ordem par são bem mais incomuns na rede elétrica.

Figura 2.2 – Formas de Ondas Fundamental e Harmônicas



Fonte: Autoria Própria.

A grande maioria das cargas não-lineares geram harmônicos de ordem ímpar, enquanto para haver um harmônico de ordem par são necessárias algumas condições especiais, ou a existência de um componente de corrente contínua impregnado no sinal de corrente alternada (SANKARAN, 2002).

De forma geral não há informação exata de antemão para separar o sinal da Figura 2.1 em uma resultante de somas como ilustrado na Figura 2.2, para isso seriam necessários as informações tanto da forma de onda fundamental quanto das harmônicas, em razão disso, existe uma ferramenta matemática que se chama Transformada de Fourier. Ela possui a função de transformar uma função periódica no tempo, em um espectro de frequência como demonstrado na Figura 2.3.

Um sinal, portanto, possui uma identidade dual: a identidade no domínio do tempo e a identidade no domínio da frequência (espectro de Fourier). As duas identidades são complementares uma da outra, e, quando juntas, possibilitam um melhor entendimento do sinal (LATHI, 2008).

Como foi citado anteriormente o sinal da Figura 2.1 possui um 3º harmônico, e a figura 3 comprova isso sendo observável suas amplitudes em valores de frequência fundamental (60Hz) e o outro pico sendo na frequência de 180 Hz ou 3º harmônico, a ferramenta utilizada para realizar a montagem desse gráfico é a transformada de Fourier.

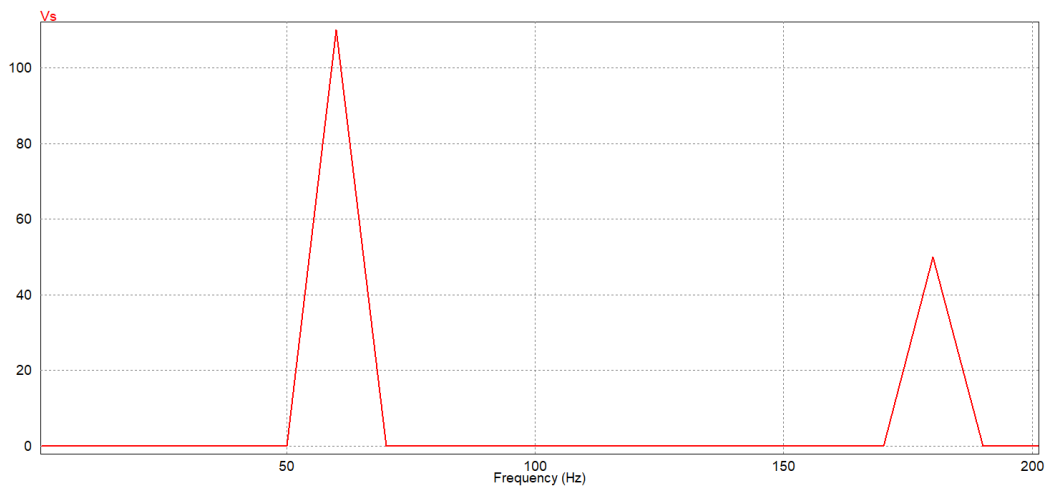
E a equação relacionada a isso é apresentado em (2.2)

$$X(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j\omega t} dt \quad (2.2)$$

Onde:

$x(t)$ - equação no domínio do tempo.

Figura 2.3 - Espectro de Frequências



Fonte: Autoria Própria

Uma propriedade interessante das transformadas de Fourier é elas serem inversas, ou seja, há a possibilidade de através dos módulos frequências e fases dos sinais obter a equação no domínio do tempo utilizando a equação (2.3).

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} X(\omega)e^{j\omega t} d\omega \quad (2.3)$$

Além dessas equações também há a possibilidade do uso de uma tabela de transformadas que consta no Apêndice A.

Os harmônicos possuem ângulo de fase que tem como base a fundamental, porém com a peculiaridade de ter sua frequência e ângulo multiplicados pelo coeficiente harmônico k (2.4), onde I_{nk} é a amplitude da máxima da onda.

$$i_{nk} = I_{nk} \sin k(\omega t) \quad (2.4)$$

Ao se tratar de sistemas trifásicos esse ângulo de fase possui importância no sentido de definir a sequência das fases. Então há a existência, dependendo de quais harmônicos estiverem presente na onda, de sequências positivas, negativas e caso haja presença de neutro, sequência zero, conforme a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Sequência de Ordem Harmônicas

Ordem Harmônica	Sequência
1, 4, 7, 10, 13, 16, 19	Positiva
2, 5, 8, 11, 14, 17, 20	Negativa
3, 6, 9, 12, 15, 18, 21	Zero

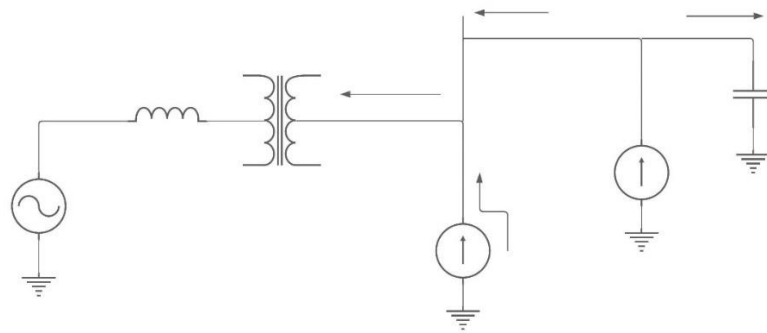
2.1.2 Ressonância Harmônica

Um efeito que pode ocorrer nas redes elétricas e principalmente nas redes de distribuição ou de alguma rede interna a indústrias é a ressonância harmônica. Ela se dá quando os valores de impedâncias de uma carga capacitiva e outra indutiva são iguais para uma determinada frequência, causando problemas como altas correntes, sobreaquecimento de cabos e perda de banco de capacitores. Como o circuito de distribuição elétrica é composto por inúmeras cargas desse tipo, caso haja a presença considerável de componentes harmônicos no fornecimento de energia a uma possibilidade considerável de acontecer ressonâncias harmônicas.

Os capacitores que são dispositivos que armazenam energia no campo elétrico, possuem reatância igual a $-1/\omega C$ e as redes de distribuição com características fortemente indutivas como, por exemplo, com muita carga de motores de indução, reatores ou bobinas que armazenam energia no campo magnético, possuem reatância igual a ωL . Quando a reatância capacitiva é igual a reatância indutiva ambas irão anular-se e a impedância do circuito será puramente resistiva. Desse modo, obtem-se correntes eficazes muitas vezes maiores que as correntes em regime (MINAMIZAKI, 2011).

Na Figura 2.4 está representado um circuito que possui a presença de fontes harmônicas, as correntes tendem a ir da carga, que se comportam como fontes harmônicas para a geração. Quando há a presença de um capacitor, seja para correção de potência, seja para atuar como um filtro as correntes também vão tender a ir nessa direção.

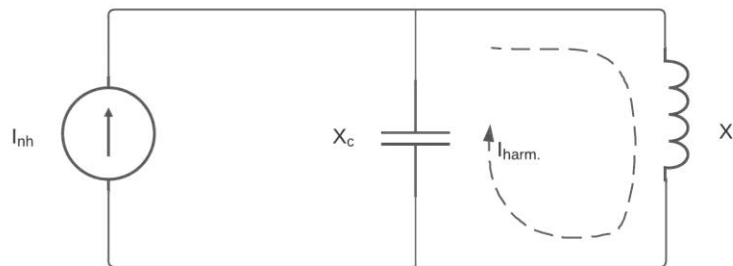
Figura 2.4 – Circuito com fontes harmônicas



Fonte: Autoria Própria.

Ao simplificar o circuito, obtém-se uma aproximação do formato mostrado na Figura 2.5, no qual a fonte de corrente representa a fonte harmônica de ordem n , enquanto X_C e X_L são as impedâncias correspondentes à frequência de ordem n . Quando os valores de X_C e X_L são iguais, a impedância resultante assume valores muito baixos, resultando em uma queda de tensão significativa mesmo com uma corrente relativamente baixa.

Figura 2.5 – Circuito com fontes harmônicas simplificado



Fonte: Autoria Própria.

Para poder realizar uma previsão sobre qual ordem de corrente harmônica poderia ocasionar a ressonância se utiliza a equação (2.5), onde ω é a velocidade angular, L e C a indutância e capacitância respectivamente.

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.5)$$

2.1.3 Distorção Harmônica Total (THD)

Um meio de ter um indicador de quanto o sistema possui harmônicos em sua composição é através da distorção harmônica total, ou em inglês *Total Harmonic Distortion* (THD). Sua função é ter uma medida de quanto a forma de onda está distorcida em relação a onda fundamental (DUGAN, MCGRANAGHAN, *et al.*, 2004).

A equação responsável por quantificar a distorção é apresentada em (2.6).

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{h_{max}} M_h^2}}{M_1} \quad (2.6)$$

Onde:

h_n – Ordem do Harmônico;

M_h – Valor RMS da grandeza em questão do componente harmônico h (Tensão ou corrente).

Para ilustrar sua utilização os circuitos retificadores monofásicos e trifásicos das Figuras 2.4 e 2.10, respectivamente, serão utilizadas. Como é possível notar na transformada de Fourier de ambos os circuitos há a presença de harmônicos, para se quantificar utiliza-se o conceito de THD, até para que ele seja normalizado e regulado pelas agências de energia elétrica.

O valor de THD referente a tensão para o circuito retificador monofásico da Figura 2.4 é de 13% para uma impedância de linha de $0.1 + j0.001 \, \Omega$. Essa distorção quando é originária da corrente depende dos valores de impedância de linha em função da reflexão desse efeito na grandeza da tensão, quanto maiores os valores de reatância e resistência mais distorcidos serão pois são provenientes do efeito da corrente. E a corrente possui um THD de 60%.

Para a Figura 2.10 o retificador trifásico possui um THD referente a tensão de 5%, para uma impedância de linha de $0.1 + j0.001 \, \Omega$. Referente a corrente, o valor de THD é de 63%.

Além da distorção harmônica total, também há a distorção referente a ordens harmônicas específicas. A equação utilizada ainda é a (2.3) com a diferença de que é utilizado apenas o valor da ordem harmônica determinada no lugar do somatório de todos os valores.

A norma IEC 61000-3-2 que trata sobre os limites de emissão de corrente, define alguns tipos de classe de equipamentos, que serão citados abaixo:

- Classe A: Equipamentos com alimentação trifásica equilibrada; aparelhos de uso doméstico, excluindo os classe D; ferramentas, exceto as portáteis; “dimmers” para

lâmpadas incandescentes; equipamentos de áudio e todos os demais não incluídos nas classes seguintes.

- Classe B: Ferramentas portáteis.
- Classe C: Dispositivos de iluminação.
- Classe D: Computadores pessoais, monitores de vídeo e aparelhos de televisão. A potência ativa de entrada deve ser igual ou inferior a 600 W, medida esta feita obedecendo às condições de ensaio estabelecidas na norma.

Para cada classe há uma taxa determinada de harmônicos permitidos, que serão apresentados na Tabela 2.2. Esses valores são referentes as ordens individuais, e precisam ser calculados de forma separada, como foi anteriormente relatado.

Tabela 2.2 – Harmônicos permitidos pela IEC 61000 3-2.

Ordem do Harmônico n	Classe A Máxima corrente [A]	Classe B Máxima corrente[A]	Classe C (>25W) % da fundamental	Classe D (>75W, <600W) [mA/W]
3	2,300	3,450	30* FP	3,400
5	1,140	1,710	10	1,900
7	0,770	1,155	7	1
9	0,400	0,600	5	0,500
11	0,330	0,495	5	0,350
13	0,210	0,315	3	0,296
15<n<39	0,150 * 15/n	0,225 * 15/n	3	3,850/n

Fonte: Autoria Própria.

Em contraponto disso, a ANEEL com o módulo 8 do PRODIST, que trata sobre “Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica” define que os harmônicos não podem ultrapassar o THD da Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Limites Harmônicos Definidos pela ANEEL.

Indicadores	Tensão nominal		
	Vn < 1kV	1,0kV < Vn< 69kV	69kV<Vn<23kV
DHT	10,0%	8,0%	5,0%
DHT pares	2,5%	2,0%	1,0%
DHT impares	7,5%	6,0%	4,0%
DHT mult. 3	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL.

Nos sistemas de transmissão elétrica geralmente são encontrados valores bem menores que 1% de distorção harmônica. Entretanto quanto mais próximos as cargas mais esses valores de distorção aumentam. Há alguns poucos casos em que essa distorção é aleatória, a maioria é uma distorção periódica ou um múltiplo inteiro da frequência fundamental (DUGAN, MCGRANAGHAN, *et al.*, 2004).

2.1.4 Cargas Não-Lineares

Anteriormente foi citado duas fontes que fornecem correntes harmônicas a rede, as fontes clássicas que existem há muito tempo e as fontes modernas que começaram a surgir juntamente com as cargas eletrônicas e principalmente com o forte desenvolvimento e utilização da eletrônica de potência.

O aumento substancial das cargas não-lineares resultantes de novas tecnologias como os retificadores controlados de silício (SCRs), transistores de potência e o controle por microprocessadores criaram as cargas geradoras de harmônicos por todo o sistema (REY e MUNETA, 2011).

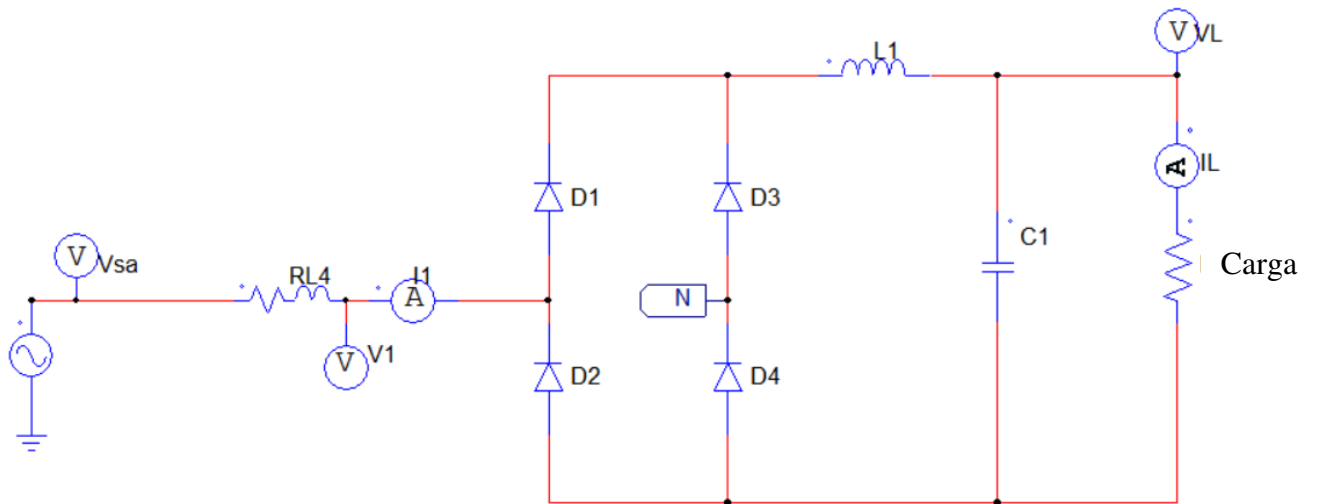
Em razão disso é compreensível concluir que uma das principais razões da quantidade de harmônicos no sistema ser crescente é devido a necessidade de retificação do sinal alternado em um sinal contínuo. Para ilustrar esse efeito serão apresentados 2 circuitos retificadores.

2.1.4.1 Retificador Monofásico

Durante o semiciclo positivo da tensão de entrada, a potência é fornecida à carga por meio dos diodos D1 e D2. Já durante o semiciclo negativo, são os diodos D3 e D4 que conduzem a corrente.. (RASHID, 1999)

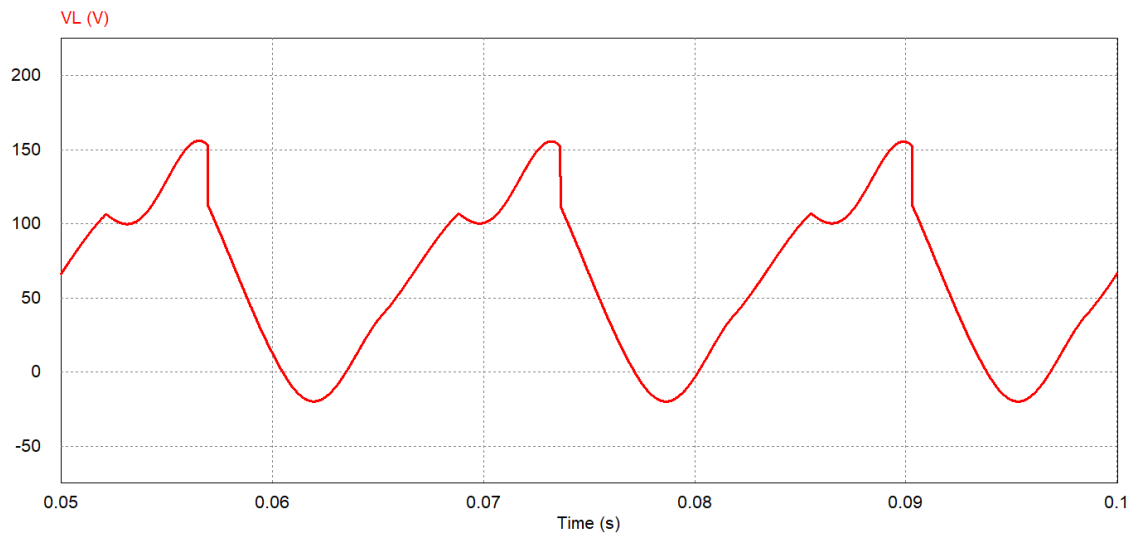
A entrada de tensão AC da Figura 2.6, é uma onda senoidal ideal, a carga é um conjunto RLC, enquanto a onda da tensão na entrada da carga após ser retificada possui o formato da Figura 2.7. A corrente consumida pela carga possui o formato da Figura 2.8.

Figura 2.6 - Retificador Monofásico



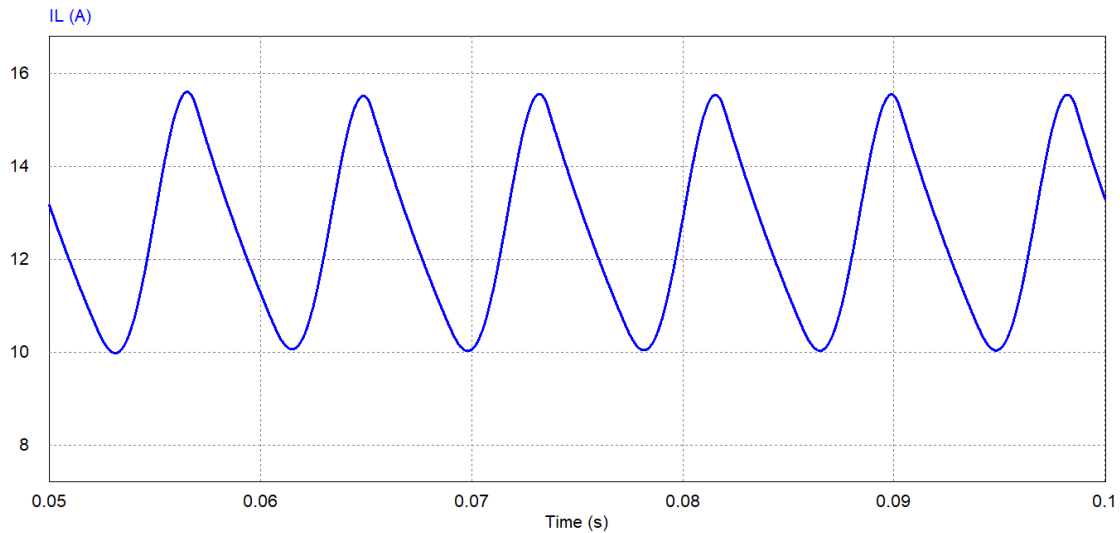
Fonte: Autoria Própria.

Figura 2.7 - Tensão na carga



Fonte: Autoria Própria

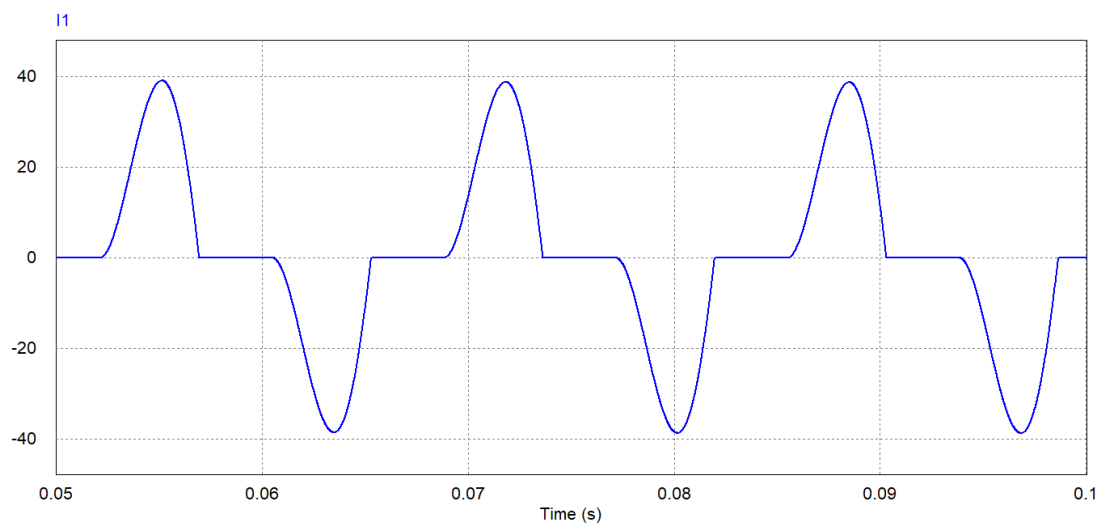
Figura 2.8 - Corrente na carga



Fonte: Autoria Própria

A corrente que atravessa a parte CA do retificador, ou seja a corrente na entrada possui o gráfico presente na Figura 2.9, o que não teria tanta relevância em função dessa corrente ser necessária para alimentar a carga. Porém devido a existência de impedâncias de linhas representadas no circuito da Figura 2.6 por R e L há uma queda de tensão, e como a corrente possui harmônicos a tensão reflete esse efeito.

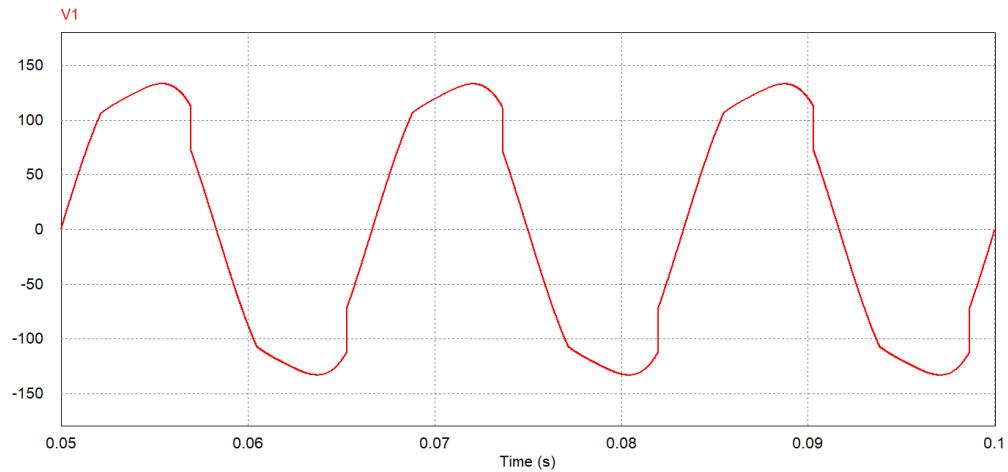
Figura 2.9 - Corrente na entrada do retificador monofásico



Fonte: Autoria Própria.

Para representar a tensão na entrada com o efeito da queda de tensão será apresentada na Figura 2.10, onde é claramente notável a distorção em comparação a uma onda ideal na qual o sinal de entrada da linha é gerado.

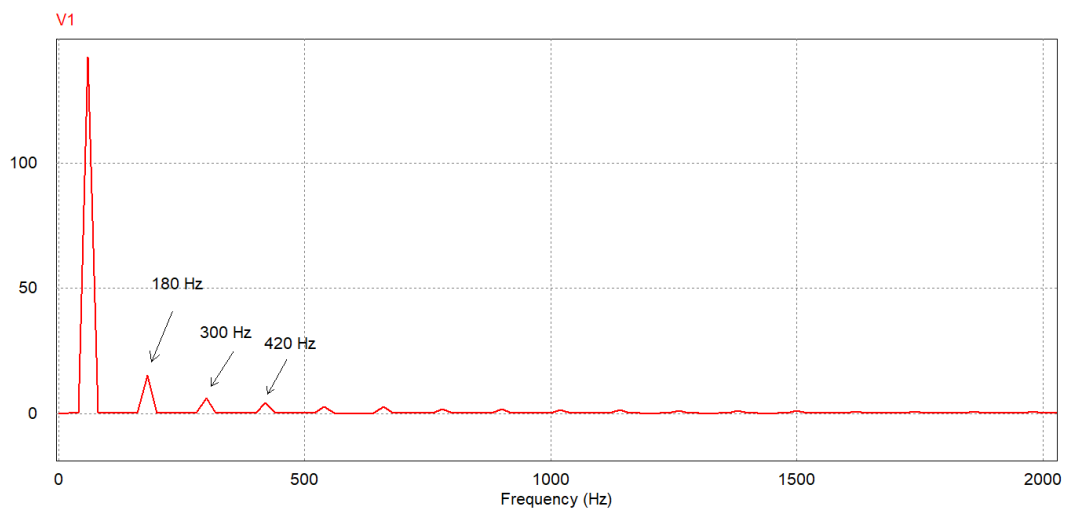
Figura 2.10 - Tensão na entrada do retificador monofásico



Fonte: Autoria Própria.

De forma mais clara, ao se realizar a transformada de Fourier no software PSIM, é possível observar que há existência de várias componentes harmônicas nessa onda que está ilustrada pela Figura 2.11, onde é notável a presença dos harmônicos de ordem ímpar e que possuem amplitude relevante até a ordem 7, e caso haja à presença de outras instalações alimentadas por esse ramal elas seriam afetadas pelo efeito destas correntes refletidas na tensão.

Figura 2.11 - Harmônicos na tensão de entrada do retificador monofásico



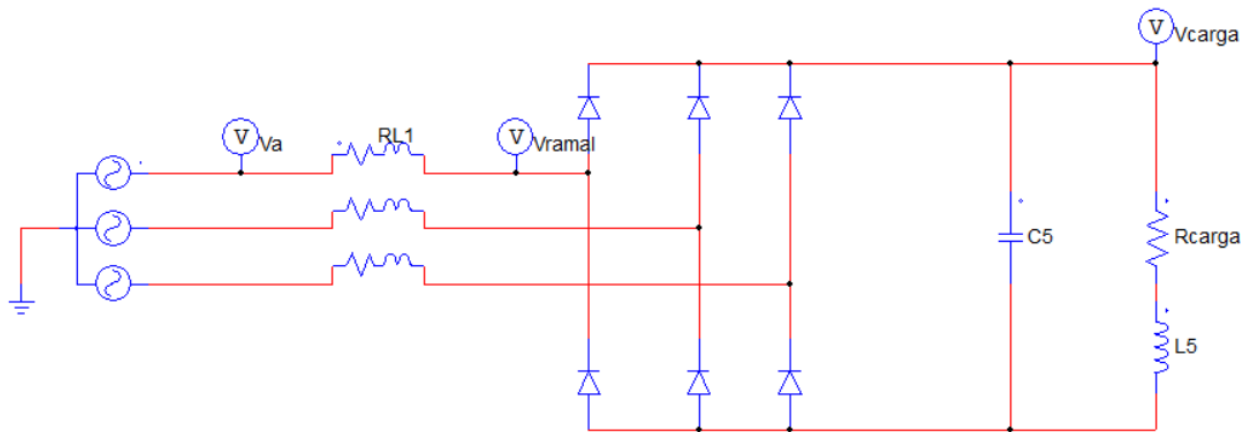
Fonte: Autoria Própria.

2.1.4.2 Retificador Trifásico

Um retificador trifásico em ponte é comumente utilizado em aplicações de alta potência. Os diodos são numerados na ordem da sequência de condução e cada um conduz por 120° . O par de diodos que estiver conectado entre aquele par das fases da alimentação que tiver a maior tensão instantânea de fase a fase conduzirá (RASHID, 1999).

O circuito representado na Figura 2.12 é um retificador trifásico, usado normalmente em aplicações industriais para, por exemplo, controlar a velocidade de um motor ou em uma soft-starter.

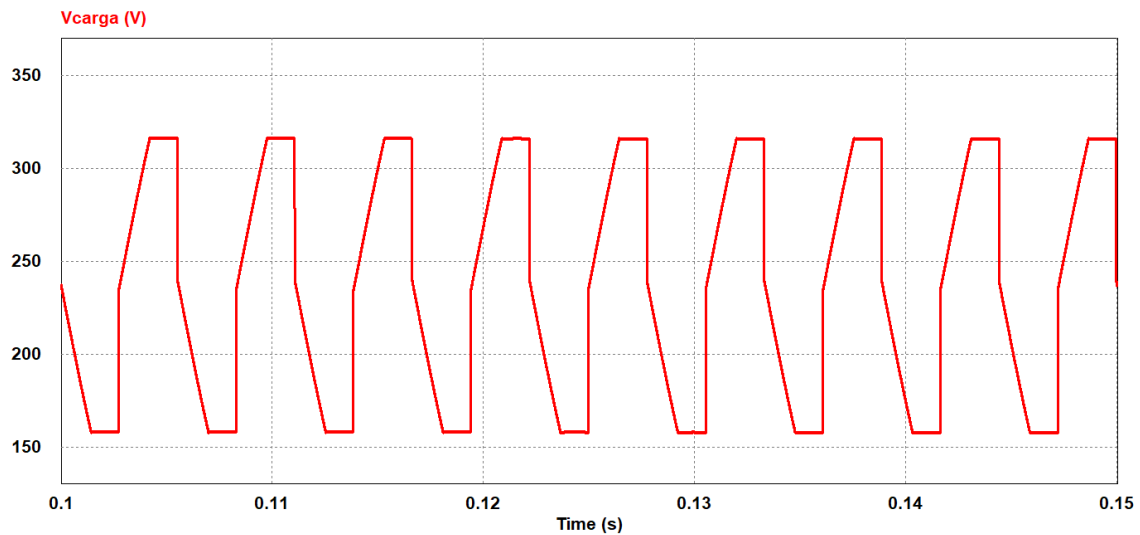
Figura 2.12 - Circuito Retificador Trifásico



Fonte: Autoria Própria.

Para elucidar esse fato, serão apresentados os gráficos de uma simulação do circuito da Figura 2.12. A entrada de tensão para uma carga RL que pode ser interpretado como um motor, com a alimentação CA do retificador sendo uma senoide ideal trifásica e balanceada, tem como formato a onda na Figura 2.13.

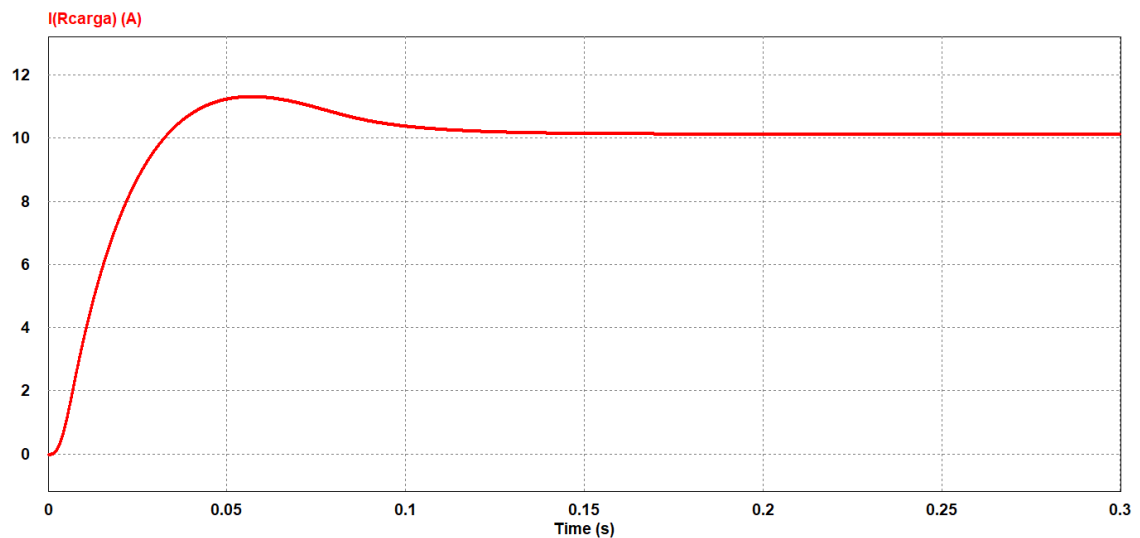
Figura 2.13 - Tensão na carga do retificador trifásico



Fonte: Autoria Própria

A sua corrente correspondente está representada na Figura 2.14.

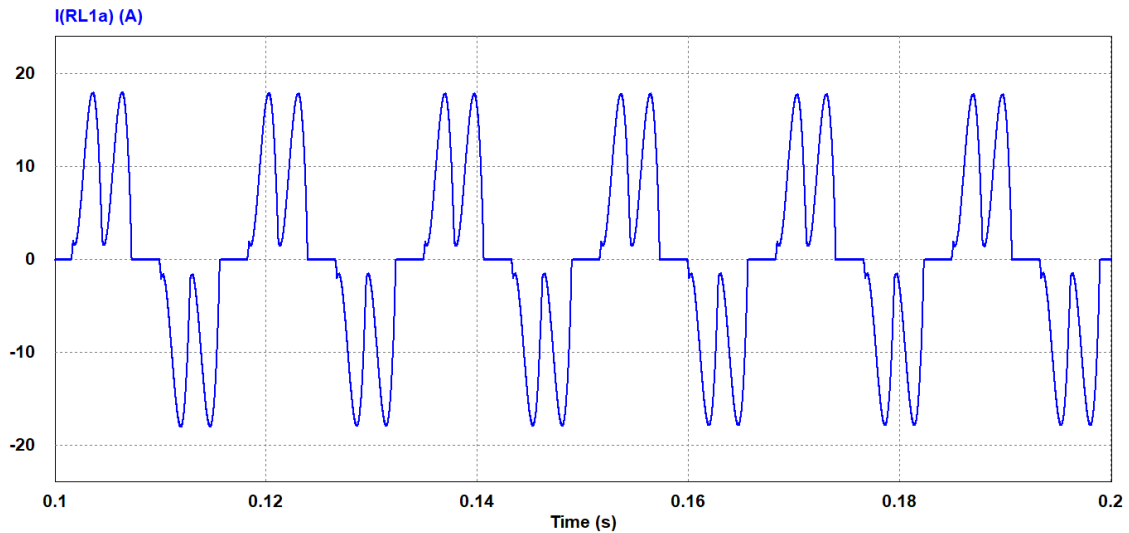
Figura 2.14 - Corrente na carga do retificador trifásico



Fonte: Autoria Própria.

Nas próximas página será tratado das grandezas na entrada do retificador, que como foi citado anteriormente, tem maior relevância nesse tipo de análise em decorrência dos harmônicos que são injetados na rede, a corrente consumida pelo retificador é apresentada na Figura 2.15.

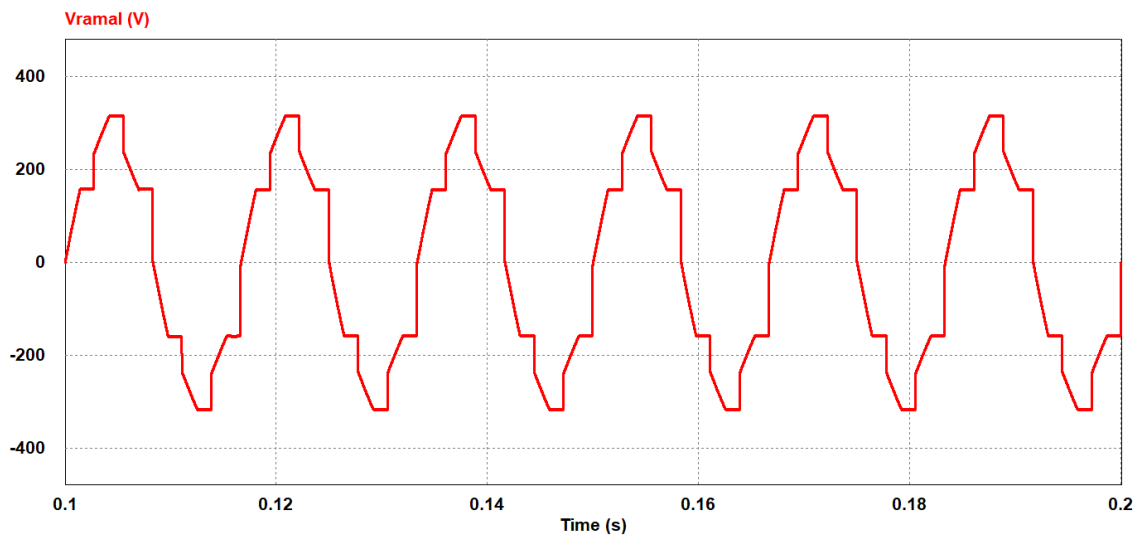
Figura 2.15 - Corrente na entrada do retificador trifásico



Fonte: Autoria Própria.

Por consequência devido as impedâncias de linha e do transformador a tensão é distorcida e apresenta a característica demonstrada na Figura 2.16.

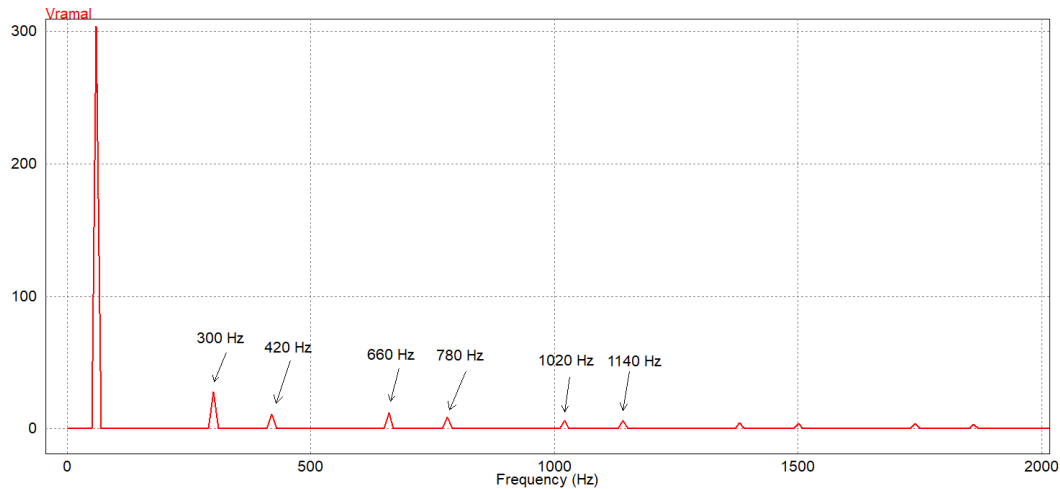
Figura 2.16 - Tensão na entrada do retificador trifásico



Fonte: Autoria Própria.

Essa tensão que apresenta ruídos tem impregnado em si os componentes harmônicos principalmente das ordens de 5ª, 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 19ª conforme é ilustrado na Figura 2.17. É possível notar a ausência dos componentes múltiplos de 3, isso é devido ao fato de não haver a presença do neutro, pois esses harmônicos são de sequência zero.

Figura 2.17 - Harmônicos gerados pelo retificador trifásico



Fonte: Autoria Própria.

2.2 Filtros Passivos

O modo de correção para as componentes harmônicas mais difundidas são os filtros passivos, onde além de poderem suprimir essas correntes do circuito da rede elétrica, também podem corrigir o fator de potência se projetados de forma adequada, como será visto adiante.

A solução clássica para a redução da contaminação harmônica de corrente em sistemas elétricos é o uso de filtros sintonizados conectados em derivação no alimentador. As células LC série que a figura 2.18 apresenta são sintonizadas nas proximidades das frequências que se deseja eliminar, o que, via de regra, são os componentes de ordem inferior. Para as frequências mais elevadas é usado, em geral, um simples capacitor funcionando como filtro passa-alta (POMILIO e DECKMANN, 2009).

Os filtros passivos em derivação (shunt) podem ser classificados em:

- Filtros sintonizados;
- Filtros amortecidos.

Além dessa solução, existe uma outra com uso muito específico que são os filtros passivos em série com o circuito.

Os filtros passivos-série são utilizados quando o objetivo é evitar que uma determinada frequência (ou uma faixa de frequências) tenha acesso a uma parte do sistema. Com ação

semelhante a uma bobina de bloqueio, este filtro é composto por um capacitor e um indutor em paralelo. Esta é uma solução cara e raramente utilizada, tendo como principal fator negativo o fato de o filtro ter de conduzir toda a corrente passante no ponto do sistema em que ele foi instalado (PIRES, 2010).

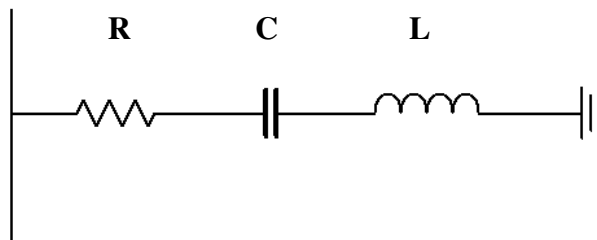
2.2.1 Filtros Sintonizados

É um circuito RLC série, que apresentará uma impedância mínima para uma frequência de sintonia. Na frequência de sintonia, a impedância do filtro se resume ao resistor do filtro e para as demais frequências o filtro apresenta alta impedância. Para frequências inferiores a frequência de sintonia, o filtro tende a ser capacitivo. E para frequências superiores a frequência de sintonia, o mesmo tenderá a ser indutivo (MORAIS, 2011).

O filtro sintonizado está representado na Figura 2.18, e pode ter sua frequência de ressonância f_n calculada por (2.7), onde L é o valor da indutância e C o valor da capacitância.

$$f_n = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2.7)$$

Figura 2.18 - Filtro Sintonizado



Fonte: Autoria Própria.

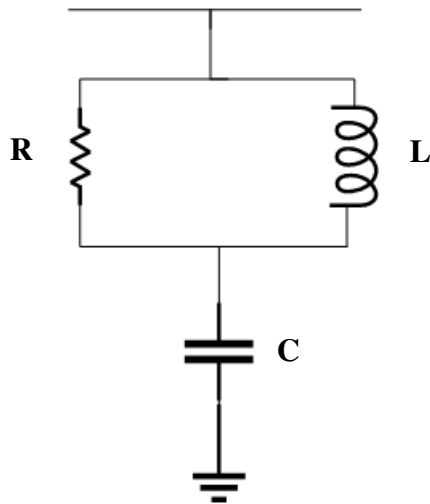
2.2.2 Filtros Amortecidos

Tem por característica serem filtros passa-alta, ou seja que apresentam uma baixa impedância a partir da frequência de ressonância. Esta é sintonizada, normalmente, em um harmônico de baixa ordem (PIRES, 2010).

Este filtro tem a característica de filtrar frequências altas acima da sua frequência de sintonia. Quanto maior for à frequência, acima de sua frequência de sintonia, mais próximo a impedância do filtro estará do valor de seu resistor (MORAIS, 2011).

Os filtros amortecidos tem por característica terem o componente capacitivo em série com um componente RL em paralelo como demonstra a Figura 2.19. Da mesma forma do filtro sintonizado é possível utilizar a equação (2.5), com a diferença, como citado anteriormente, que o filtro irá suprimir a partir da frequência da equação e não apenas a frequência desejada.

Figura 2.19 - Filtro amortecido



Fonte: Autoria Própria

3 FILTROS ATIVOS

Este capítulo apresenta uma descrição e simulação dos filtros ativos CIP, SCC e MSOGI. Inicialmente são abordados as características e funcionamentos gerais dos filtros ativos, assim como seus tipos e usos. É dado uma breve explicação sobre as Transformadas Clark, e a teoria p-q que são amplamente utilizadas em sistemas de controles desses filtros.

3.1 Introdução

Os filtros ativos de potência se caracterizam como uma alternativa eficiente para eliminação dos harmônicos presentes nas tensões e correntes da rede. Eles podem ser classificados quanto à sua topologia, tipo do conversor e número de fases (LIMONGI, 2006). Devido aos problemas citados no Capítulo 2 referentes a compensação passiva com capacitores, há a possibilidade de utilização dos filtros ativos.

Eles podem ser classificados em função de alguns fatores como:

- Topologia (Shunt, Série, UPQC ou Híbrido);
- Tipo do Conversor: Inversor por fonte de Tensão(VSI) e Inversor por fonte de Corrente (CSI);
- Número de fases (dois fios, três fios ou quatro fios).

3.1.1 Topologias de Filtros Ativos

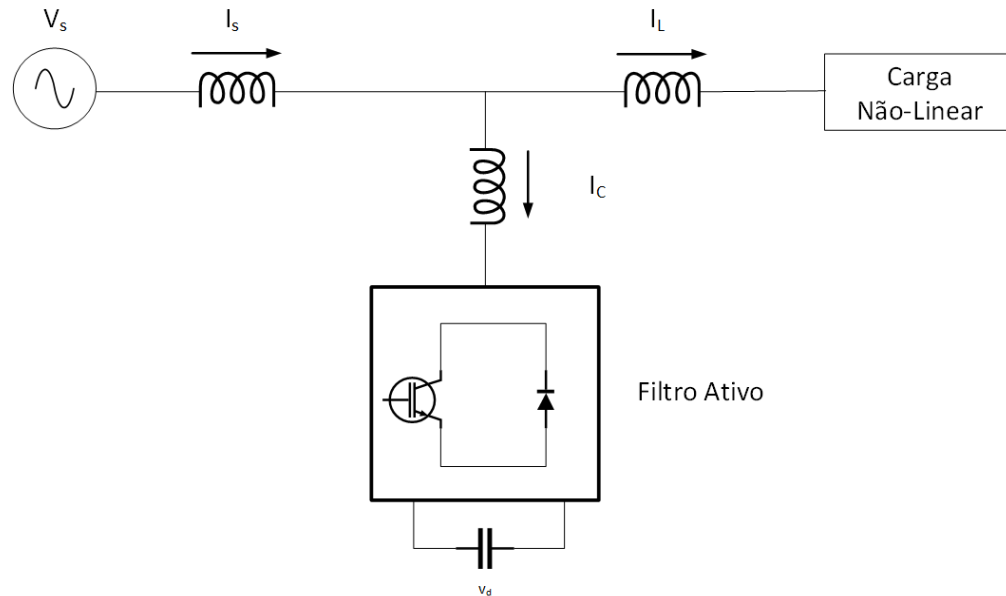
Filtros ativos com sua classificação baseada na topologia são definidos em paralelos (shunt) ou série e UPQC (condicionadores unificados de qualidade de energia) que usam uma combinação de ambos. As combinações dos filtros ativos e passivos são conhecidos como filtros híbridos (SINGH e AL-HADDAD, 1999).

3.1.1.1 Filtro Ativo Shunt

Na Figura 3.1 está representado o circuito de um filtro ativo shunt no qual serão os filtros abordados neste trabalho, onde o funcionamento do filtro é descrito como uma fonte de corrente que absorve os harmônicos da rede. Na prática não necessariamente eles são absorvidos pelo filtro,

e sim a corrente distorcida é fornecida por ele para que não haja queda de tensão na barra alimentadora e a tensão permaneça com o formato original da onda.

Figura 3.1 – Circuito do Filtro Ativo Shunt.

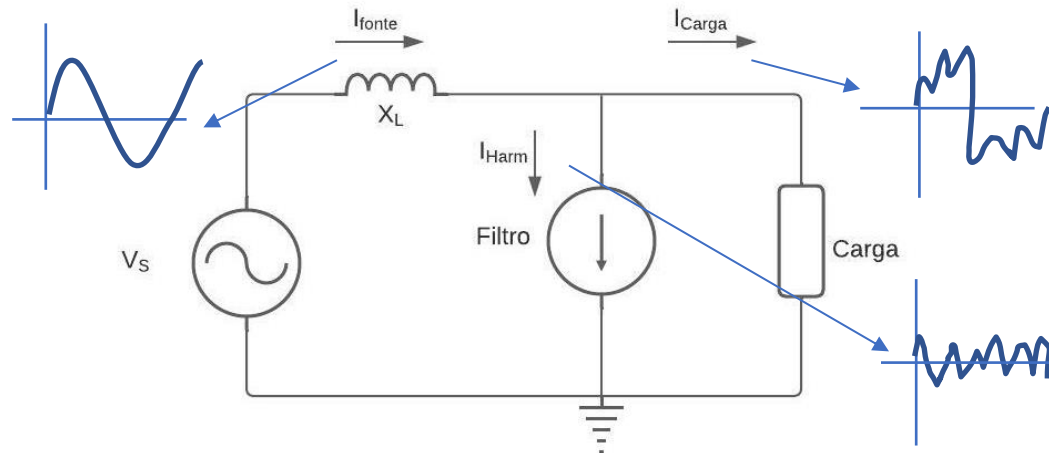


Fonte: Autoria Própria.

Além da compensação de correntes harmônicas o filtro ativo tem propriedades bastante vantajosas como compensação de potência reativa e balancear correntes desbalanceadas (LIMONGI, 2006).

O circuito simplificado representado na Figura 3.2 ilustra o que foi dito nos parágrafos anteriores, caso o I_{fonte} seja uma corrente distorcida a tensão que se apresenta no ponto de acoplamento da carga será distorcida. Mesmo que essa carga seja a fonte de distorção, na possibilidade de haver outras cargas nesse mesmo ponto que não sejam causadoras de harmônicas serão afetadas pelos seus efeitos. Com o filtro fornecendo a parte da onda de corrente distorcida que a carga necessita, outras cargas nesse ponto de acoplamento não serão afetadas.

Figura 3.2 – Circuito simplificado do filtro ativo shunt.



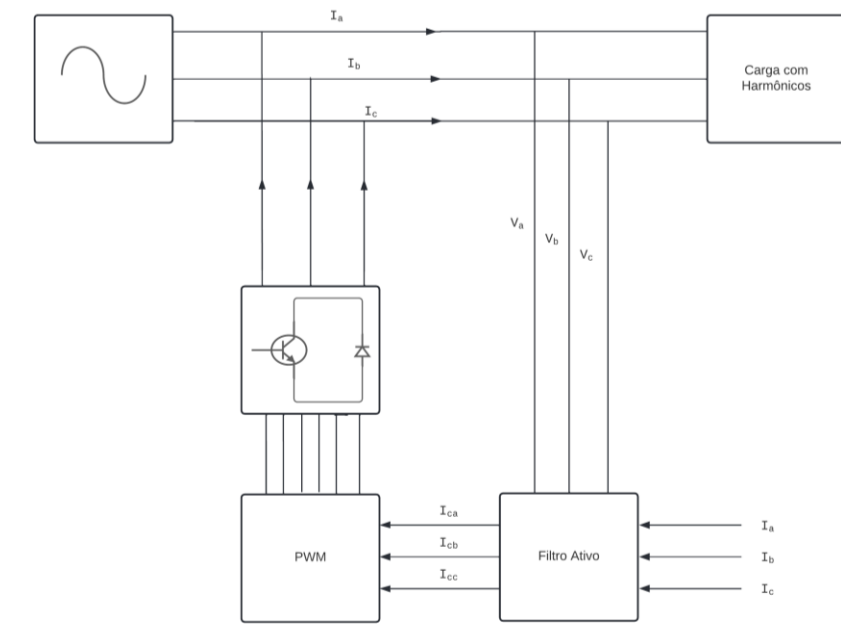
Fonte: Autoria Própria.

Os filtros ativos shunt consistem geralmente de dois grandes blocos:

- Modulação de largura de pulso (PWM);
- Controlador do filtro ativo, o processamento de sinais (AKAGI, WATANABE e AREDES, 2017).

De forma mais detalhada, o filtro ativo shunt possui o funcionamento descrito na Figura 3.3, onde as informações de grandezas são adquiridas da rede e são fornecidas ao sistema de controle do Filtro Ativo, onde são utilizadas algumas técnicas como por exemplo SCC (Sinusoidal Current Control), ou MSOGI-FLL (Multiple Second Order Generalized Integrator – Frequency Locked Loop). Após esse processo é feita a modulação PWM para controle de corrente do inversor, onde são injetadas correntes de compensação na rede para a mitigação dos harmônicos e correção de fator de potência

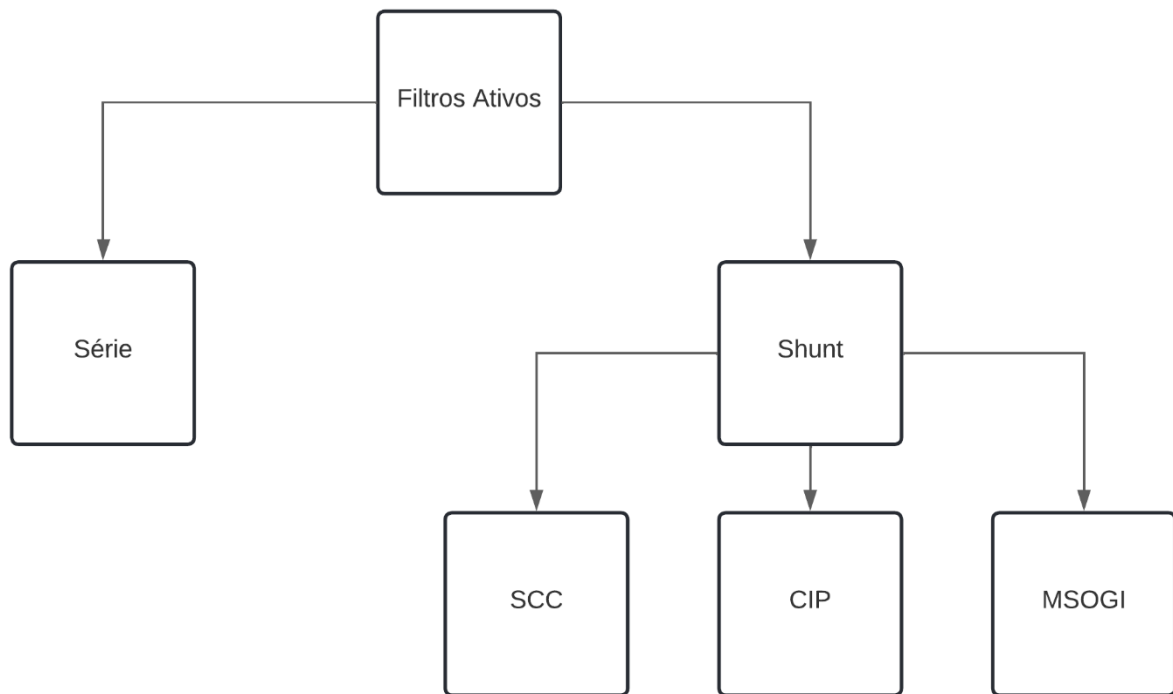
Figura 3.3 – Diagrama de blocos do filtro ativo shunt



Fonte: Autoria Própria.

Utilizando a Figura 3.4 para esmiuçar o universo de filtros ativos é possível perceber que há varias técnicas que podem serem implementadas para a compensação das componentes harmônicas sendo que, no circuito da Figura 3.3, porém deve ser utilizado técnicas shunts devido a característica do circuito nessa situação em específico.

Figura 3.4 – Diagrama de blocos dos filtros ativos



Fonte: Autoria Própria

3.1.1.2 Filtro Ativo Série

Os filtros ativos série possuem o circuito da Figura 3.5, onde são conectados através de um transformador, que possuem a finalidade de compensar harmônicos de tensão, desbalanços de tensão, afundamentos de tensão e também para atenuar propagações harmônicas causada por ressonâncias entre filtros e impedâncias de linha.

Ele atua como uma fonte de tensão controlada que produz um sinal contrário à distorção harmônica presente na tensão de entrada. O funcionamento básico de um filtro ativo série envolve a detecção da distorção harmônica na forma de onda de tensão de entrada. Isso é feito por meio de um circuito de medição que identifica as componentes harmônicas presentes no sinal. Com base nessas informações, o filtro ativo gera uma tensão de saída que possui uma amplitude e uma fase adequadas para cancelar ou atenuar a distorção harmônica.

Para realizar essa compensação, o filtro ativo série utiliza componentes como amplificadores operacionais, dispositivos de comutação controlados por transistores ou *Insulated Gate Bipolar Transistors* (IGBTs) e algoritmos de controle sofisticados. Esses componentes

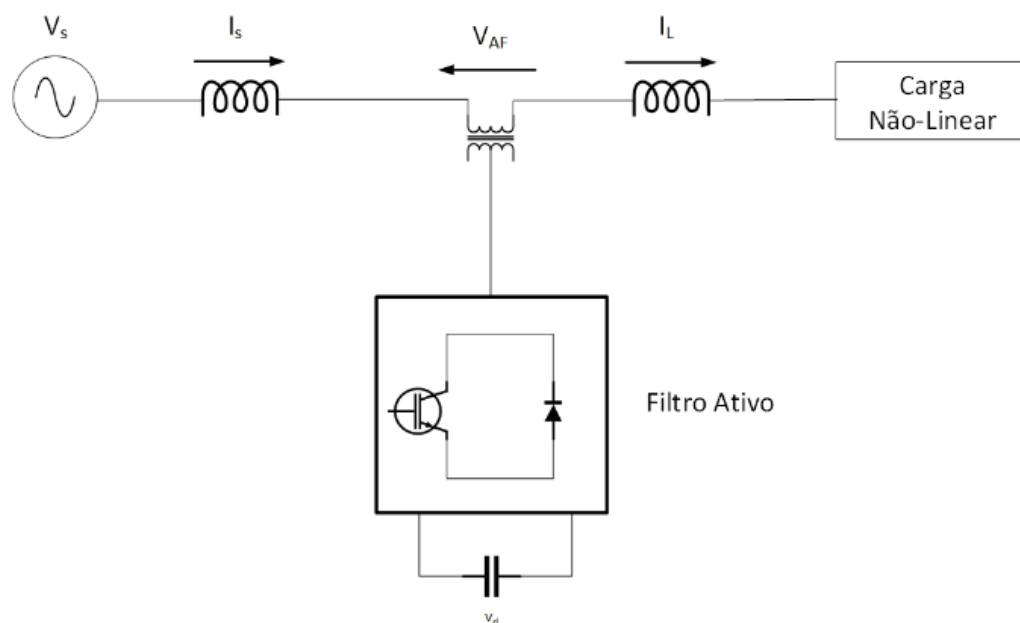
trabalham em conjunto para gerar um sinal de tensão que é somado ao sinal de entrada, resultando em uma forma de onda de saída com menor conteúdo harmônico.

É importante destacar que o filtro ativo série precisa ser ajustado de acordo com as características específicas do sistema elétrico em que será utilizado. Isso envolve determinar a frequência e a amplitude das componentes harmônicas presentes na tensão de entrada, bem como as impedâncias da linha e da carga. Com base nessas informações, os parâmetros do filtro, como ganho e fase, são ajustados para obter a compensação desejada.

O filtro ativo série é capaz de compensar uma ampla faixa de frequências harmônicas e pode ser aplicado em sistemas de diferentes capacidades e configurações. Ele oferece maior flexibilidade e eficiência em comparação com outros tipos de filtros passivos, pois pode se adaptar às variações do sistema elétrico e fornecer uma compensação precisa em tempo real.

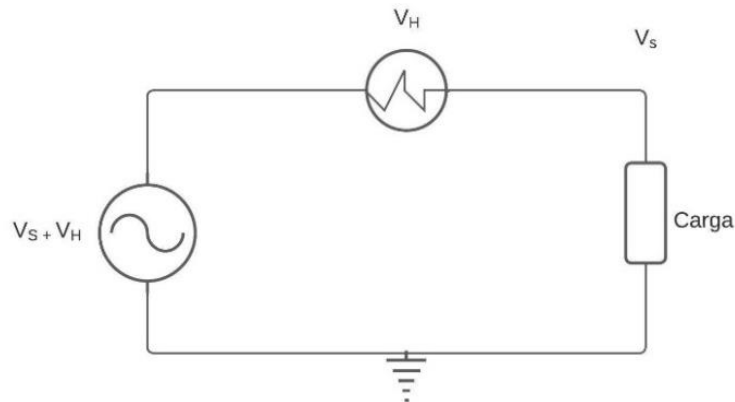
Em resumo, um filtro ativo série atua como uma fonte de tensão controlada que gera um sinal contrário à distorção harmônica presente na tensão de entrada conforme ilustrado pela Figura 3.6. Ele utiliza componentes eletrônicos e algoritmos de controle para detectar e compensar as componentes harmônicas, resultando em uma forma de onda de saída mais limpa e livre de distorções. Esses filtros são amplamente utilizados para melhorar a qualidade da energia elétrica, reduzindo a presença de harmônicos e garantindo um fornecimento de energia mais estável e confiável.

Figura 3.5 – Filtro Ativo Série



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.6 – Circuito simplificado filtro ativo série.



Fonte: Autoria Própria.

3.1.1.3 Filtro Ativo UPQC

O filtro UPQC é uma combinação dos filtros ativos série e shunt e está representado pela Figura 3.7.

O funcionamento do filtro UPQC baseia-se em uma estrutura que inclui dois filtros: um filtro de corrente e um filtro de tensão. Esses filtros são interconectados por meio de um link DC (banco de capacitor DC) compartilhado.

O filtro de corrente, SAPF, é responsável por compensar as correntes harmônicas geradas pelos equipamentos conectados ao sistema elétrico. Ele monitora as correntes de carga e identifica as componentes harmônicas indesejadas. Em seguida, gera uma corrente harmônica de mesma amplitude, porém com polaridade oposta, para cancelar as harmônicas presentes no sistema. Dessa forma, o filtro de corrente minimiza a presença de correntes harmônicas indesejadas na rede elétrica.

Por outro lado, o filtro de tensão, é responsável por compensar as tensões harmônicas presentes no sistema elétrico. Ele monitora as tensões de carga e detecta as componentes harmônicas indesejadas. Em seguida, gera uma tensão harmônica de mesma amplitude, mas com fase oposta, para cancelar as harmônicas existentes. Assim, o filtro de tensão reduz a presença de tensões harmônicas indesejadas na rede elétrica.

Ao compartilharem o link DC, os dois filtros trabalham em conjunto para compensar tanto as correntes quanto as tensões harmônicas, garantindo uma energia elétrica mais limpa e estável.

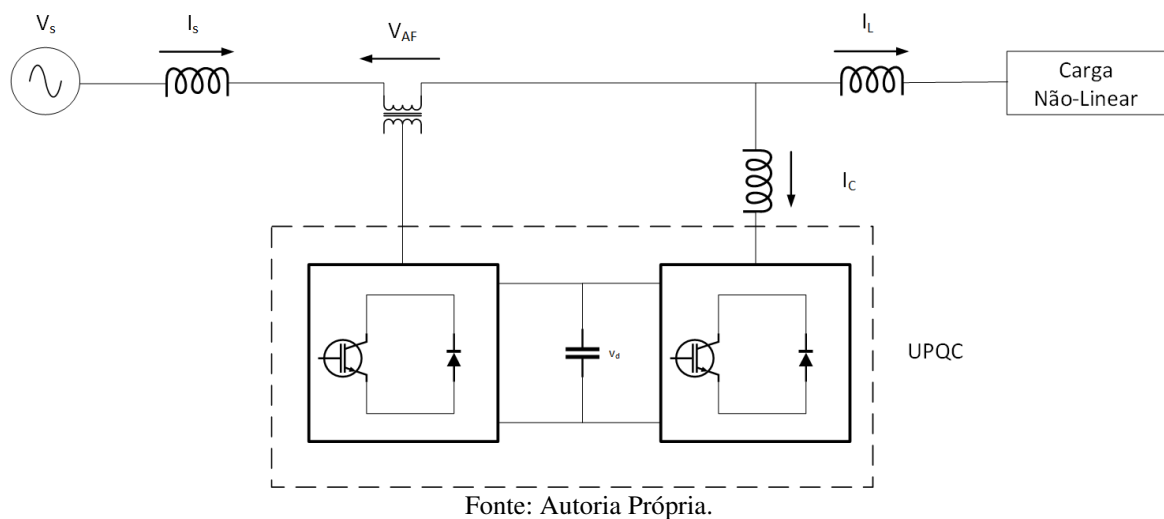
Isso resulta em uma redução significativa da distorção harmônica e melhoria geral da qualidade da energia elétrica fornecida ao sistema.

O filtro UPQC pode ser utilizado tanto em sistemas monofásicos quanto em sistemas trifásicos, adaptando-se às diferentes configurações de rede. É comumente aplicado em locais onde é essencial fornecer uma energia elétrica de alta qualidade, especialmente em equipamentos sensíveis que não suportam oscilações ou distorções na energia elétrica, como equipamentos médicos, laboratórios de pesquisa, sistemas de comunicação, entre outros.

Em resumo, o filtro UPQC é composto por um filtro de corrente e um filtro de tensão, interligados por um link DC. Essa configuração permite a eliminação de correntes e tensões harmônicas, proporcionando uma energia elétrica mais limpa e estável. Sua aplicação é ampla e abrange desde sistemas residenciais até ambientes industriais e de saúde, garantindo uma melhor qualidade da energia elétrica fornecida e protegendo equipamentos sensíveis contra distúrbios elétricos.

Uma das grandes desvantagens é seu alto e a complexidade de controle devido a quantidades de chaves eletrônicas utilizadas (SINGH e AL-HADDAD, 1999).

Figura 3.7 – Circuito do Filtro Ativo UPQC



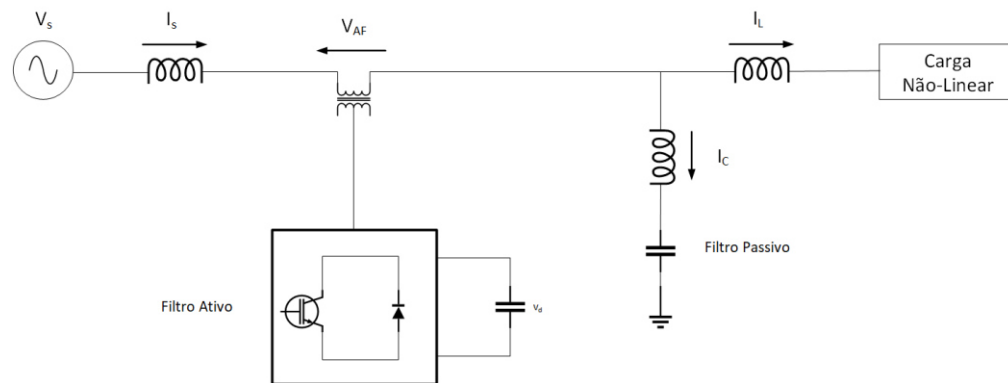
3.1.1.4 Filtro Ativo Híbrido

O filtro ativo híbrido representado na Figura 3.8 é uma combinação entre filtro ativo e filtro passivo, existem vários tipos de configurações, nesse em questão é um filtro ativo em série com um filtro passivo em paralelo.

Seu grande diferencial está na sua capacidade de diminuir a potência do filtro ativo devido a utilização do filtro passivo para os harmônicos de ordem baixa, sendo assim o inversor necessário terá um custo mais baixo.

A combinação do filtro ativo com o filtro passivo permite obter os benefícios de ambos os tipos de filtros. O filtro passivo atenua as frequências específicas para as quais foi projetado, enquanto o filtro ativo é capaz de compensar uma ampla faixa de frequências e fornecer uma resposta dinâmica mais rápida às perturbações na rede elétrica. Dessa forma, a combinação desses dois tipos de filtros proporciona uma solução mais eficaz para melhorar a qualidade da energia elétrica, reduzindo a presença de harmônicos, distorções e outras perturbações indesejadas.

Figura 3.8 – Filtro Ativo Híbrido



Fonte: Autoria Própria.

3.1.2 Classificação por Tipo de Conversores

Na implementação de filtros ativos, existem duas opções principais: os inversores por fonte de tensão (VSI – *Voltage Source Inverter*) e os inversores por fonte de corrente (CSI – *Current Source Inverter*). O VSI é representado pela Figura 3.9, enquanto o CSI é representado pela Figura 3.10.

Atualmente, os inversores VSI são amplamente adotados devido a algumas vantagens significativas em relação aos CSI. Uma das principais razões é o fato de que os CSI requerem a

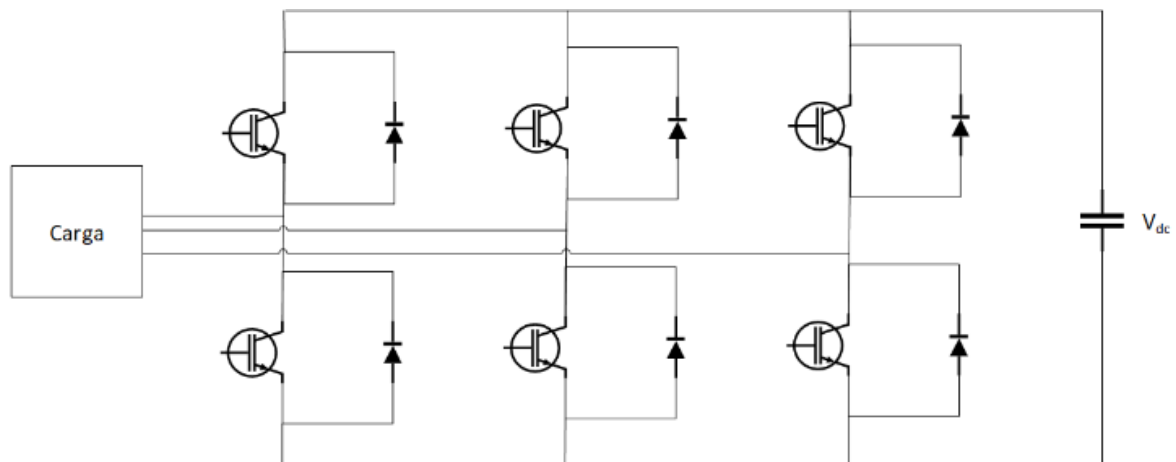
utilização de um diodo em série para correntes reversas. Esse diodo acarreta em grandes perdas de energia, o que pode limitar a eficiência e o desempenho geral do sistema. Por outro lado, os VSI são considerados mais vantajosos em termos de custo e peso, o que os torna uma escolha preferida em muitas aplicações.

Ao optar pelos VSI, é possível obter benefícios econômicos, pois esses inversores são mais acessíveis em termos de custo de produção e manutenção. Além disso, eles também são mais leves em comparação aos CSI, o que pode facilitar a instalação e a integração em sistemas existentes.

No contexto deste trabalho, os VSI's serão adotados como a opção preferencial para a implementação dos filtros ativos. Essa escolha se baseia nas vantagens mencionadas anteriormente, que incluem a eficiência aprimorada, o desempenho confiável e a economia de custos.

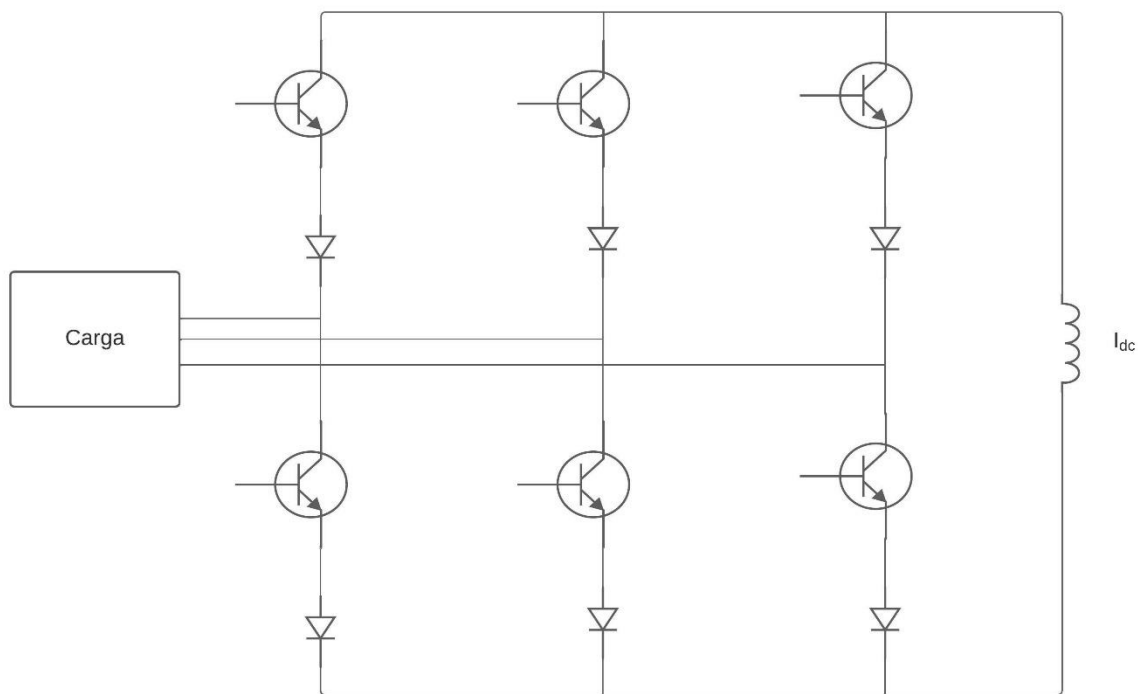
Dessa forma, ao utilizar os inversores por fonte de tensão (VSI) para projetar filtros ativos, espera-se obter uma solução eficiente, confiável e economicamente viável para a melhoria da qualidade de energia elétrica, atendendo às necessidades do sistema em questão.

Figura 3.9 – Inversor por Fonte de Tensão



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.10 – Inversor por Fonte de Corrente



Fonte: Autoria Própria.

3.1.3 Classificação Por Quantidade de Fios

Essa classificação é feita utilizando-se basicamente do número de fases e características de cargas. Quando se há um sistema monofásico são utilizados filtros com técnicas e equipamentos adequados para dois-fios. Em um sistema trifásico há a presença do neutro ou não, determinando se o filtro será a três-fios ou quatro-fios. Esse trabalho apresentará técnicas para sistemas a três-fios.

3.1.3.1 Sistemas a dois fios

Os sistemas a dois fios são utilizados em aplicações de baixa potência ou em locais onde a conexão à terra não é necessária. Nesses sistemas, o filtro ativo é conectado em série com a carga entre duas fases, sem a presença do condutor neutro. O filtro ativo é responsável por compensar as correntes harmônicas e realizar a filtragem para melhorar a qualidade de energia fornecida à carga.

3.1.3.2 Sistemas a três fios

Os sistemas a três fios são comumente encontrados em sistemas de distribuição de energia trifásica. Esses sistemas consistem em três fases. O filtro ativo é conectado entre cada fase permitindo a compensação das correntes harmônicas. Isso resulta em uma redução significativa dos harmônicos presentes na rede elétrica.

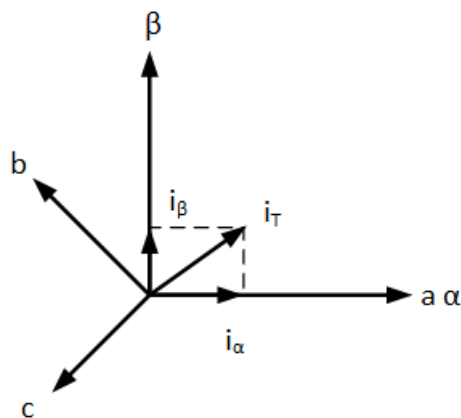
3.1.3.3 Sistemas a quatro fios

Os sistemas a quatro fios são semelhantes aos sistemas a três fios, com a adição de um condutor de neutro. Esses sistemas são frequentemente utilizados em instalações residenciais e comerciais, onde a presença de um condutor de neutro é necessária para garantir a segurança dos equipamentos e das pessoas. O filtro ativo é conectado entre cada fase e o condutor neutro, permitindo a compensação das correntes harmônicas e a filtragem para melhorar a qualidade de energia.

3.2 Transformada Clarke

A Transformada Clarke (Figura 3.11) é uma ferramenta muito útil para reduzir o número de variáveis presentes em um sistema de controle, ele parte do princípio de reduzir uma fase de um sistema originalmente trifásico, através dos eixos imaginários α e β (ROCHA, 2018).

Figura 3.11 – Transformada Clarke



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 3.11 i_T é uma soma das componentes vetoriais trifásicas a, b e c. A resultante dessa soma é decomposta nas componentes estáticas α e β tornando assim uma grandeza

anteriormente trifásica em uma correspondente bifásica. Para realizar essa transformação é utilizado uma matriz de transformadas $T_{\alpha\beta 0}$ (3.1). Para que essa transformação tenha a possibilidade de inversão para retorno das componentes bifásicas para a componente original há a necessidade de uma componente 0.

$$T_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Para encontrar as correspondentes das transformadas é utilizada a equação (3.2)

$$v_{\alpha\beta 0} = [T_{\alpha\beta 0}] v_{abc} \quad (3.2)$$

Resultando em (3.3)

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

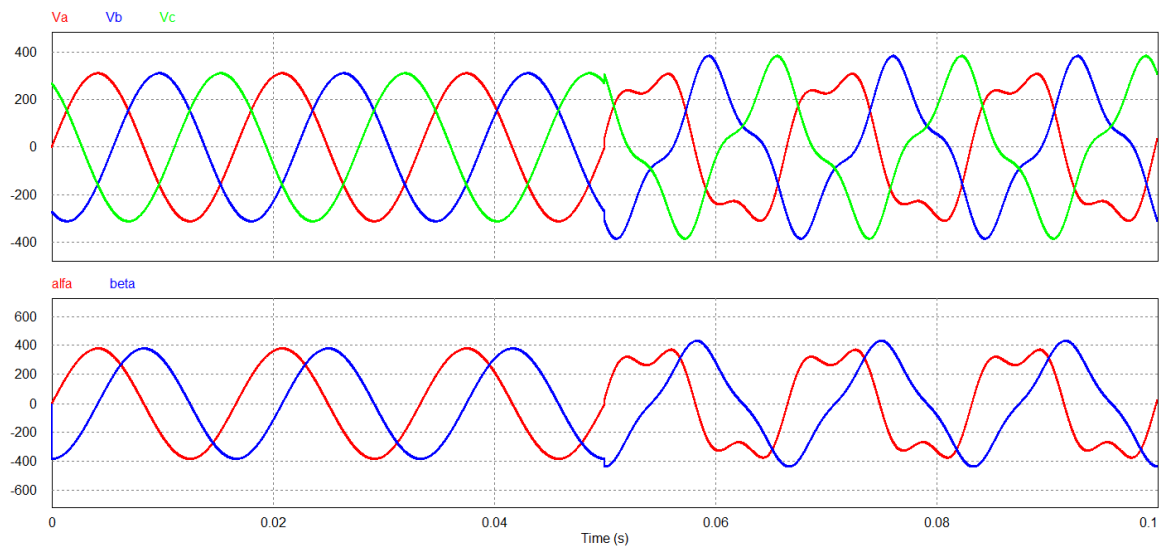
Como citado, essa matriz com a presença da componente v_0 se torna invertível, e uma outra propriedade dela é que sua matriz transposta é igual a inversa, ou seja essa é uma matriz ortogonal. A equação (3.4) representa a transformada inversa de Clarke.

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

Na Figura 3.12 o gráfico superior ilustra um sistema trifásico equilibrado e balanceado sem a presença de componentes harmônicos, e depois de 0.05 segundos é adicionado um componente. Pode-se notar que no gráfico inferior da mesma figura a Transformada Clarke do sinal original, é possível notar visualmente que a distorção harmônica também foi referida para o gráfico da transformada.

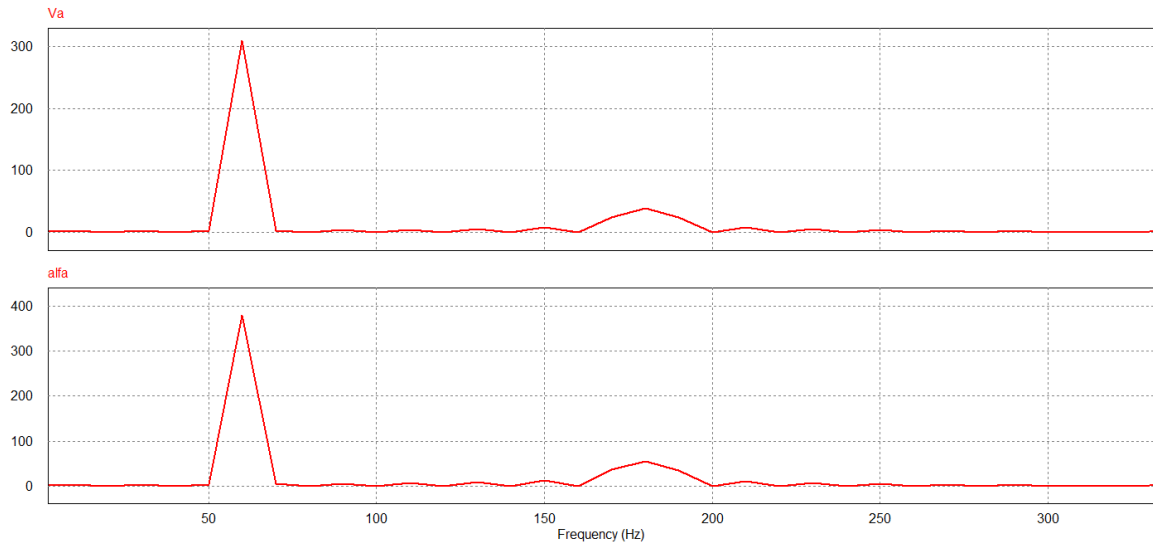
Apesar de visualmente ser perceptível a distorção na forma de onda da Transformada Clarke, para que ela seja útil em termos de controle de harmônicos e geração de correntes para correção dos mesmos, a frequência dos harmônicos tem que permanecer intacta, ao realizar a Transformada de Fourier (FFT) o resultado foi exposto na Figura 3.13 na qual é possível avaliar que o conteúdo harmônico manteve sua frequência após a Transformada Clarke, onde o gráfico superior é referente a Fase A, e o inferior a transformada Alfa.

Figura 3.12 – Gráfico da Transformada Clarke



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.13 – Espectro de frequências da Transformada Clarke



Fonte: Autoria Própria.

3.3 Teoria $p-q$

A teoria $p-q$ é baseada em um conjunto de valores de potência instantânea definida no domínio do tempo. Não havendo restrições impostas ao formato de onda da corrente e da tensão, pode ser aplicada a sistemas trifásicos com ou sem a presença de neutro, além de ser válida tanto para o estado estacionário quanto ao estado transitório (AKAGI, WATANABE e AREDES, 2017).

Como citado nos tópicos anteriores, os filtros ativos que serão tratados nesse trabalho são filtros shunts, trifásicos a três fios. A teoria $p-q$ será utilizada por um determinado tipo de abordagem de controle de filtro que será apresentada posteriormente. Essa teoria utiliza a ferramenta matemática da transformada Clarke, pensando no conceito de eficiência computacional de diminuição das variáveis para cálculo.

A teoria pode ser abordada de algumas maneiras, para sistemas em específico que não utilizam ou possuem componente de sequência zero é utilizado o conceito de potência aparente convencional (2.6), apesar deste ser válido apenas para estados estacionários ao utilizar as propriedades da transformada Clarke é possível abranger as potências instantâneas também.

$$s = e * i^* \quad (3.5)$$

Onde:

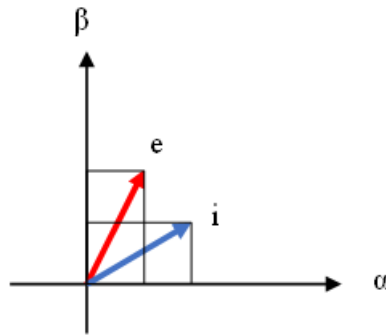
s – Potência aparente;

e – Vetor de tensão;

i^* - Vetor conjugado de corrente.

O gráfico dessa decomposição da potência que se utiliza da transformada Clarke está representado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Gráfico da Teoria P-Q



Fonte: Autoria Própria.

Utilizando os conceitos da transformada Clarke, onde a tensão e a corrente são tratados como fasores e possuindo os formatos de (3.6) e (3.7) respectivamente:

$$e = v_{\alpha} + jv_{\beta} \quad (3.6)$$

$$i = i_{\alpha} + ji_{\beta} \quad (3.7)$$

Substituindo em (3.5):

$$s = (v_{\alpha} + jv_{\beta})(i_{\alpha} - ji_{\beta}) = (v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta}) + j(v_{\beta}i_{\alpha} - v_{\alpha}i_{\beta}) \quad (3.8)$$

Em (3.8) a parte real é a parte da potência instantânea ativa (p), e a parte imaginária a potência instantânea imaginária (q), se tratando da parte instantânea o conceito de potência reativa não pode ser utilizado, e a parte imaginária representa fisicamente a energia trocada entre as fases sem transferência de energia.

Em termos de variáveis de estado podemos estabelecer (3.9) como:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Caso seja necessário é possível obter as correntes i_α e i_β através de (3.9), após isolar o termo em questão é possível se chegar a (3.10).

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.4 Filtro Constant Instantaneous Power (CIP)

O filtro CIP foi um dos primeiros criados por Akagi et al. em 1983, ele possui a capacidade de desenhar uma potência constante sendo injetada pela fonte, ele deve ser instalado o mais próximo possível da carga não linear e deve compensar a parte oscilante da potência ativa desta carga (AKAGI, WATANABE e AREDES, 2017).

Quando há a presença de conteúdos harmônicos na rede a potência a ser entregue tem característica oscilatória, causando uma oscilação na fonte. Levando em consideração que são majoritariamente compostas por geradores síncronos essa oscilação pode causar danos a máquinas, por exemplo danificando seus componentes devidos aos trancos causados em função da variação brusca e rápida de potência.

O filtro foi desenvolvido para evitar isso cancelando os harmônicos utilizando as ferramentas apresentadas na teoria P-Q, as potências da equação (3.9) podem ser separada em duas partes (DHAVAL.P.SUTHAR, S.N.PANDYA e RAJU.P.KESHAWALA, 2018).

Sendo assim, resultado em (3.11)

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Em que $\bar{p}$ é a parte constante da potência ativa constante e $\tilde{p}$ a parte oscilatória. O mesmo acontece para a potência imaginária em que $\bar{q}$ é parte da potência constante e $\tilde{q}$ a parte da potência oscilatória. Para ser possível que haja essa separação entre as partes são utilizados filtros passa-baixa, seja de segunda ordem, Butterworth, entre outros. A frequência de corte a ser utilizada irá depender da frequência fundamental do sistema e geralmente se utiliza valores iguais.

Após isso a potência $\bar{p}$ é subtraída de p para que seja possível obter-se a potência puramente oscilatória ($\tilde{p}$), que é subtraída de p_{loss} , onde essa potência é proveniente das perdas no inversor, obtida através da equação (3.12) após passar por um bloco controlador de PI como ilustrado na Figura 3.15.

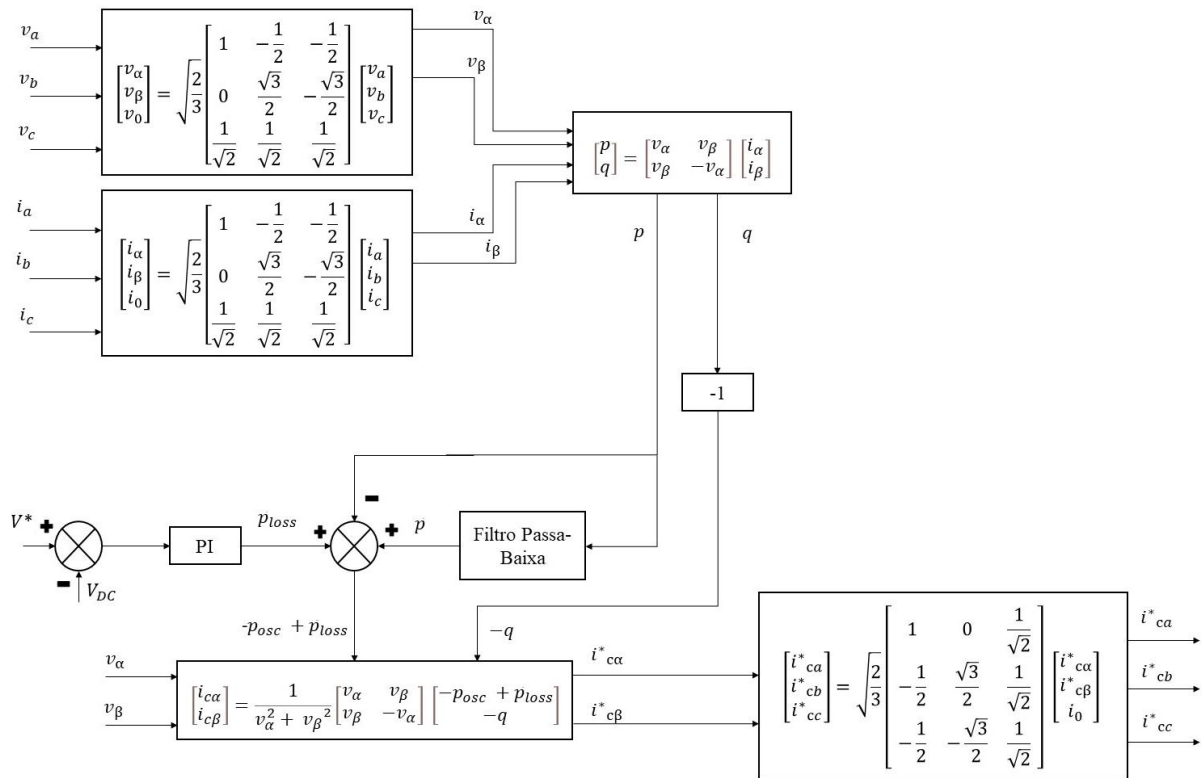
$$p_{loss} = (V^* - V_{DC}) \quad (3.12)$$

Onde:

V^* - Tensão de referência;

V_{DC} - Tensão atual no inversor.

Figura 3.15 – Diagrama de blocos do método CIP

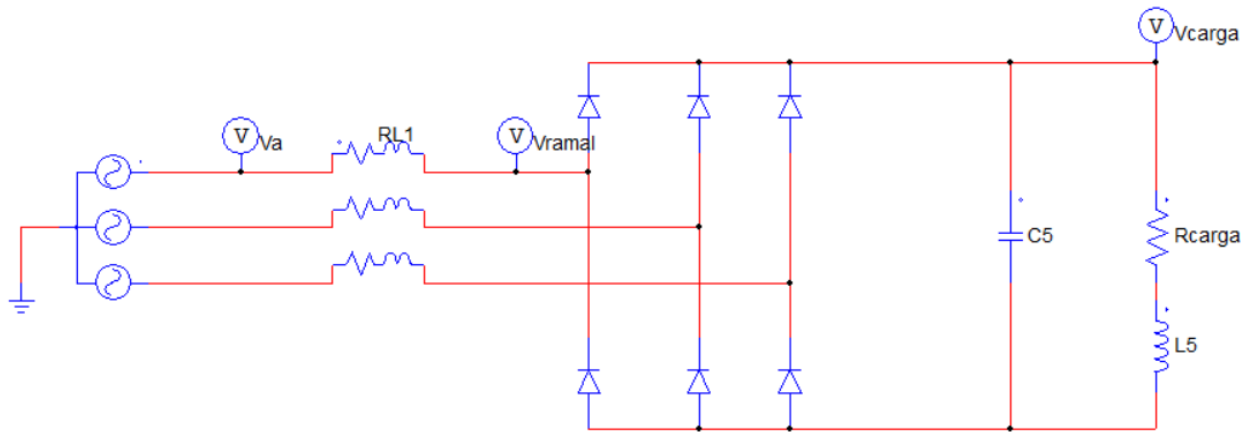


Fonte: Autoria Própria.

Através das potências obtidas, é possível calcular as correntes que compensem essa situação em questão como foi mostrado na equação (3.10), após esse processo as correntes em função das transformadas é obtida e se realiza a sua inversa para obter as correntes de correção de fase que serão utilizadas como referência para que o inversor as injete na rede.

Para ilustrar as situações descritas acima e os processos ocorridos no diagrama da Figura 3.15 será apresentado gráficos com as formas de ondas referentes e inerentes ao filtro CIP, utilizando a carga da Tabela 3.1 e com uma estrutura semelhante a Figura 2.10.

Figura 2.10 – Circuito Retificador Trifásico



Fonte: Autoria Própria.

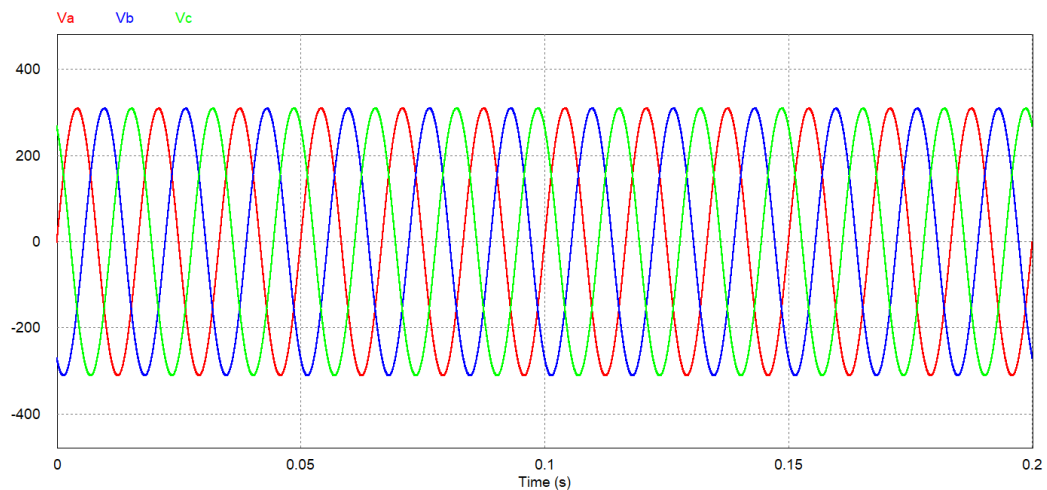
Tabela 3.1 – Parâmetros para a simulação

$V_{\text{linha}}(\text{L-L})$	380V
Carga (RL)	$R = 50\Omega$, $L = 20\text{mH}$
Carga não-Linear	Ponte Retificadora trifásica
Impedância da linha	$R = 10\mu\Omega$, $L = 100\mu\text{H}$

Fonte: Autoria Própria.

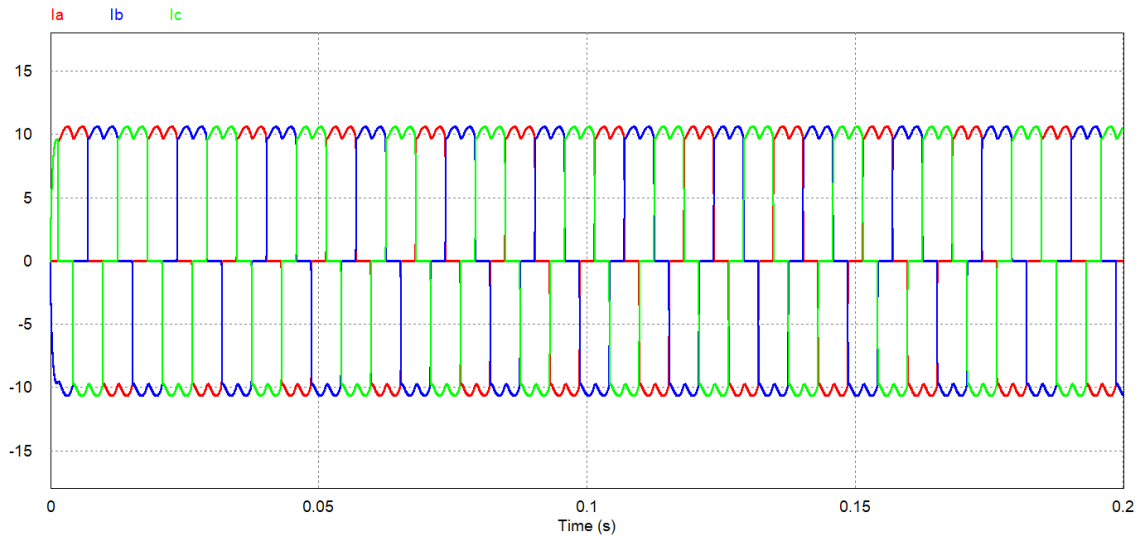
As tensões e correntes de carga referentes ao circuito da Tabela 3.1 estão apresentadas nas Figuras 3.16 e 3.17 respectivamente.

Figura 3.16 – Tensão Trifásica da Carga do Filtro CIP



Fonte: Autoria Própria.

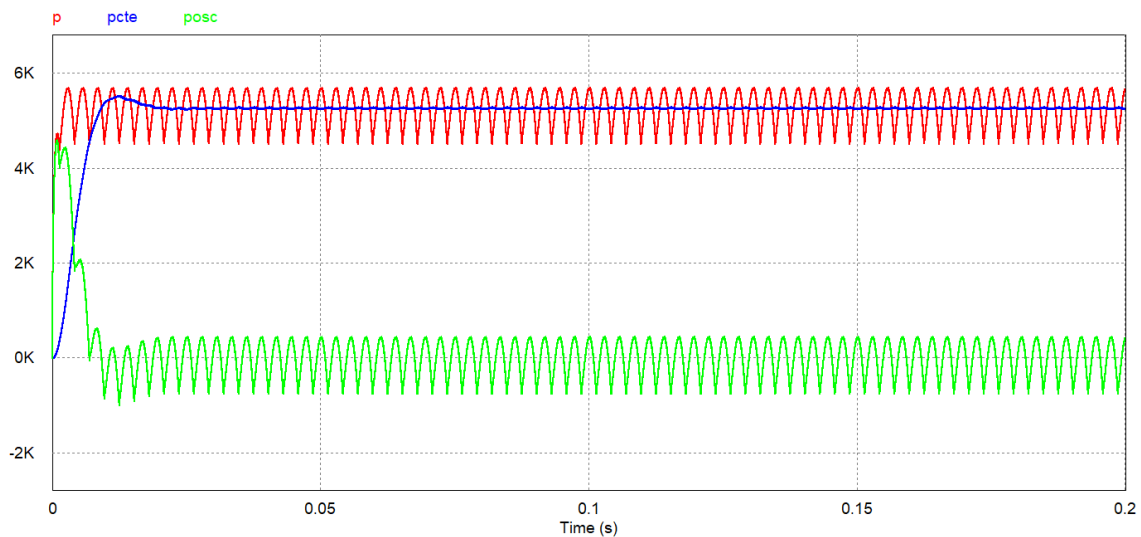
Figura 3.17 – Corrente Trifásica da Carga do Filtro CIP



Fonte: Autoria Própria.

As formas de ondas referentes a equação (3.11) em relação a parte da potência ativa, estão representada na Figura 3.18, onde em vermelho está a potência total (p), em azul a potência constante que é obtida através de um filtro passa-baixa e em verde a potência oscilante que é a subtração da potência ativa total pela potência ativa constante.

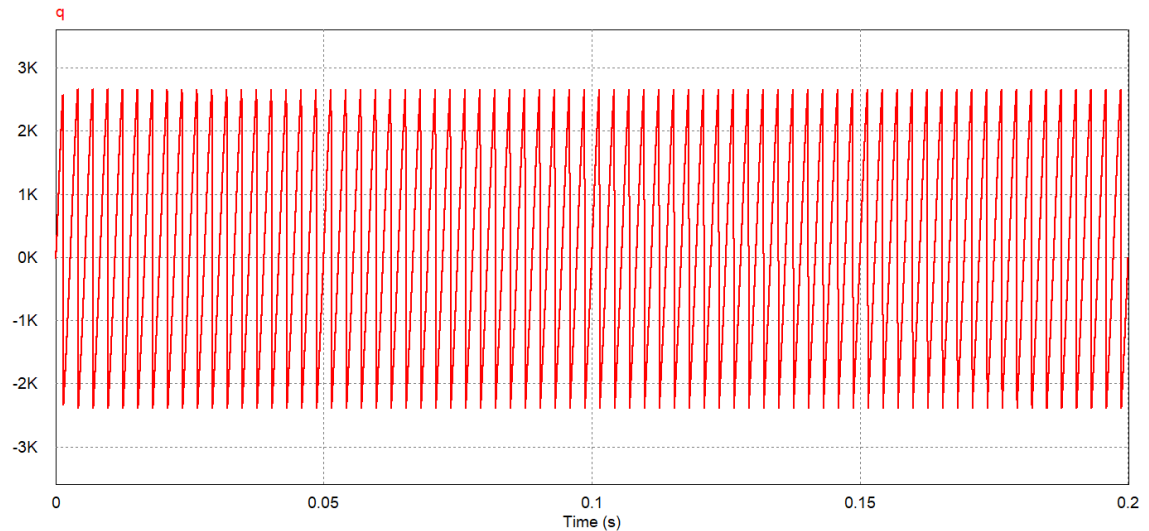
Figura 3.18 – Potências ativas da carga do Filtro CIP



Fonte: Autoria Própria.

A potência imaginária não possui a necessidade de ser filtrada pois em consequência do filtro além da correção dos harmônicos a compensação de fator potência também é realizada, por essa razão a potência apresenta o formato da Figura 3.19.

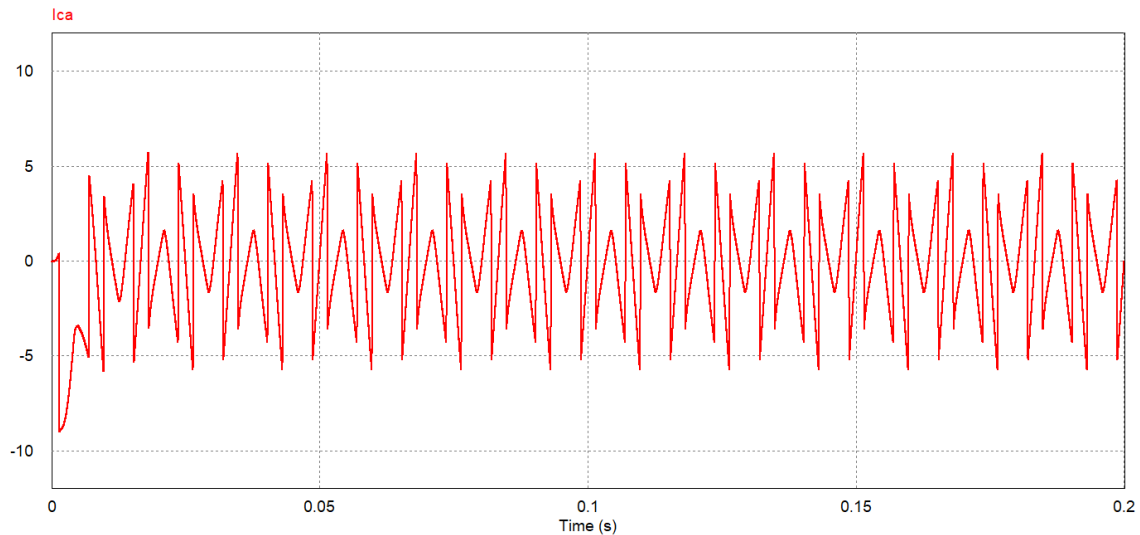
Figura 3.19 - Potência Imaginária da carga do Filtro CIP



Fonte: Autoria Própria.

De acordo com o diagrama de blocos da Figura 3.15, essas potências acima são utilizadas para realizar o cálculo das correntes de compensação, utilizando a equação (3.10). As correntes resultantes são ainda em função das transformadas Clarke, após realizar sua inversa a corrente de uma fase (I_{ca}^*) tem a forma de onda apresentada na Figura 3.20. As correntes das outras fases são similares a essa porém com defasamento de 120° entre as três, isso ocorre devido ao sistema ser equilibrado e balanceado. Caso o sistema não seja e possua desbalanceamentos de fases, desequilíbrio de tensão, entre outros, as correntes de fases podem apresentar formato diferente em cada uma das fases.

Figura 3.20 – Corrente de Correção do Filtro CIP.



Fonte: Autoria Própria.

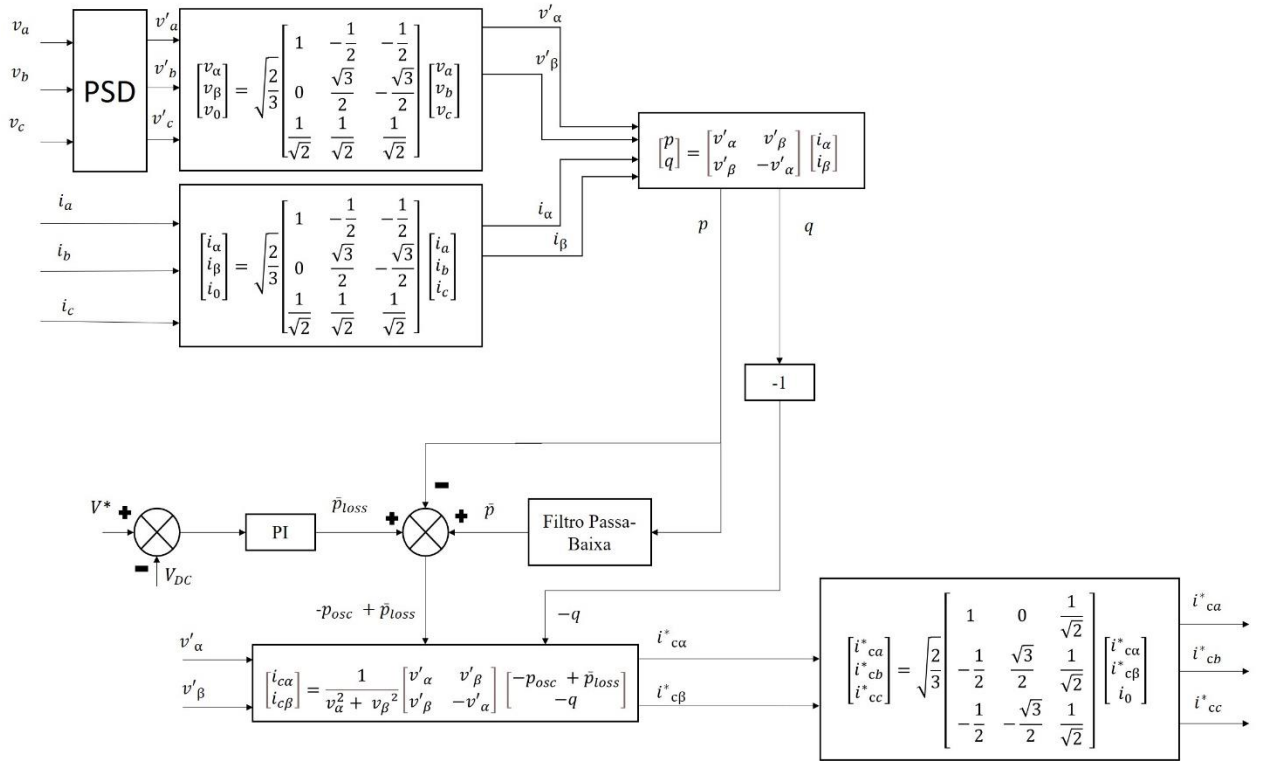
3.5 Filtro Sinusoidal Current Control (SCC)

Esse filtro é uma modificação do filtro CIP, apresentando um diagrama de blocos quase idêntico que está apresentado na Figura 3.21, a grande diferença que se apresenta é a presença do bloco denominado PSD (Positive Sequence Detector), que possui a função como o próprio nome sugere de detectar a tensão de sequência positiva.

Este método é muito útil quando há uma distorção e/ou um desbalanceamento no lado da alimentação. O bloco de sequência positiva detecta e determina a sequência e apenas entrega na saída a sequência positiva (DHAVAL.P.SUTHAR, S.N.PANDYA e RAJU.P.KESHAWALA, 2018).

Na presença de desbalanceamentos ou distorções de tensão é impossível satisfazer ambas as condições simultaneamente: ter correntes de compensadas de forma balanceadas e senoidais e obter uma potência ativa constante da fonte (AKAGI, WATANABE e AREDES, 2017).

Figura 3.21 – Diagrama de Blocos do Filtro SCC



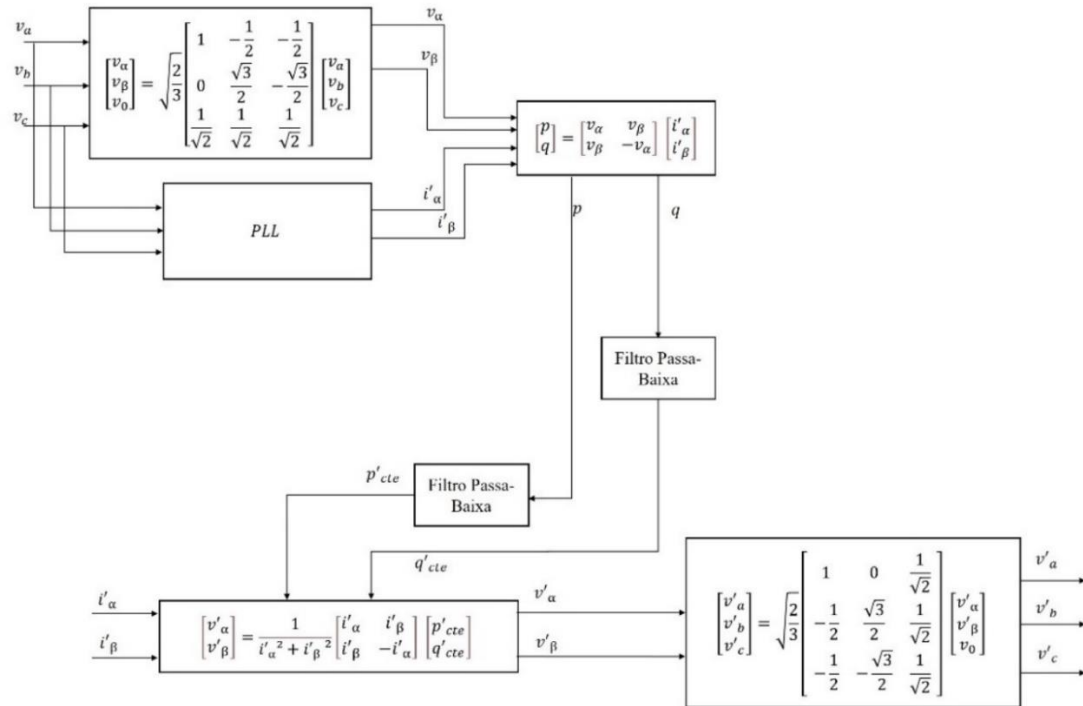
Fonte: Autoria Própria.

O bloco PSD é composto de um outro diagrama de blocos para que gere os sinais de sequência positiva das tensões, ele está exposto na Figura 3.22. Há grande semelhança dele com os outros diagramas de filtro, pois o princípio é o mesmo com a diferença da grandeza gerada, que será nesse caso a tensão, enquanto nos outros são as correntes, então a grande discrepância deles é a troca das grandezas de entrada e saída porém de forma semelhante utilizam a teoria p-q descrita em um dos tópicos anteriores.

A estrutura de PLL (Phase-Locked-Loop) presente na Figura 3.24 é o que torna tudo possível. Sua função é acompanhar continuamente a frequência fundamental do circuito em que é as tensões são mensuradas. Se ele for projetado de forma apropriada, mesmo em condições de distorção e desbalanceamento das tensões da fonte o PLL deve funcionar corretamente (AKAGI, WATANABE e AREDES, 2017).

A tensão utilizada para gerar o sinal do PSD são as tensões originais do sistema, juntamente com as correntes auxiliares geradas no PLL, assim após a transformação das grandezas trifásicas em bifásicas pela transformada Clarke pelo mesmo motivo já exposto anteriormente são calculadas as potências que não possuem nenhum significado físico.

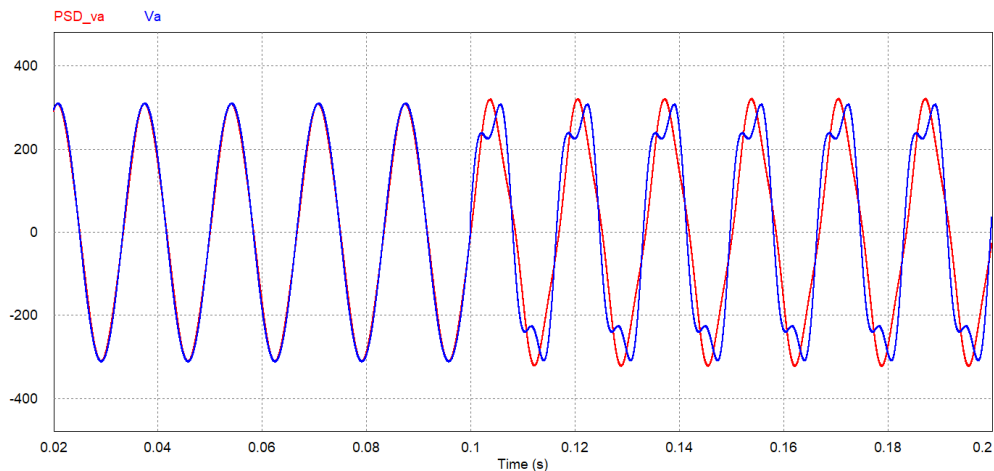
Figura 3.22 - Diagrama de Blocos do PSD.



Fonte: Autoria Própria.

Resultados experimentais mostram que o PSD apresenta uma resposta dinâmica e precisa mesmo em condições não-senoidais (AKAGI, WATANABE e AREDES, 2017). Para corroborar com essa citação a Figura 3.23 apresenta a tensão de fase v_a (em azul) original do sistema sob condições de distorções a partir do tempo 0.1s, e a tensão v'_a (em vermelho) que é a resposta do PSD.

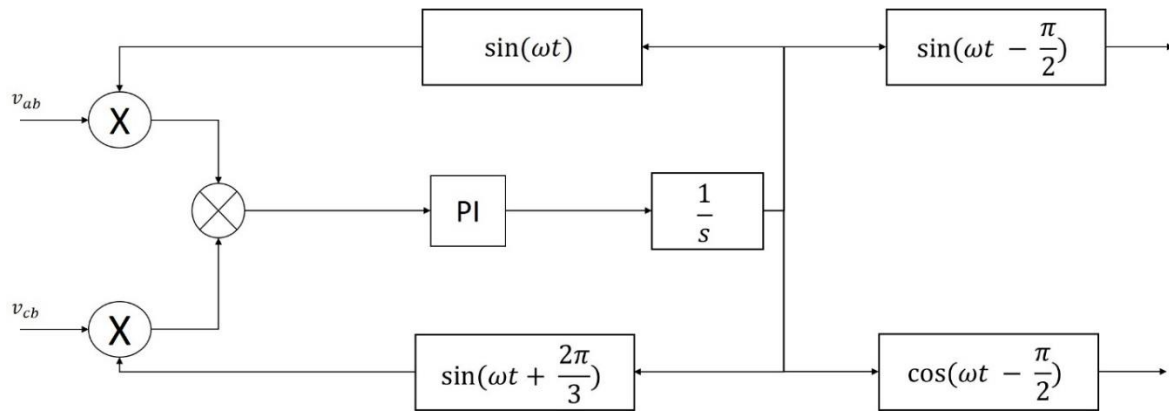
Figura 3.23 – Gráfico entre as tensões originais e do PSD.



Fonte: Autoria Própria.

Existem algumas maneiras de projetar um PLL, a utilizada nesse filtro é o modelo apresentado na figura 3.24. Como dito anteriormente, essa estrutura permite que a frequência fundamental seja rastreada continuamente e mesmo que o sinal de entrada esteja distorcido e desbalanceado a forma de onda da saída praticamente não será afetada.

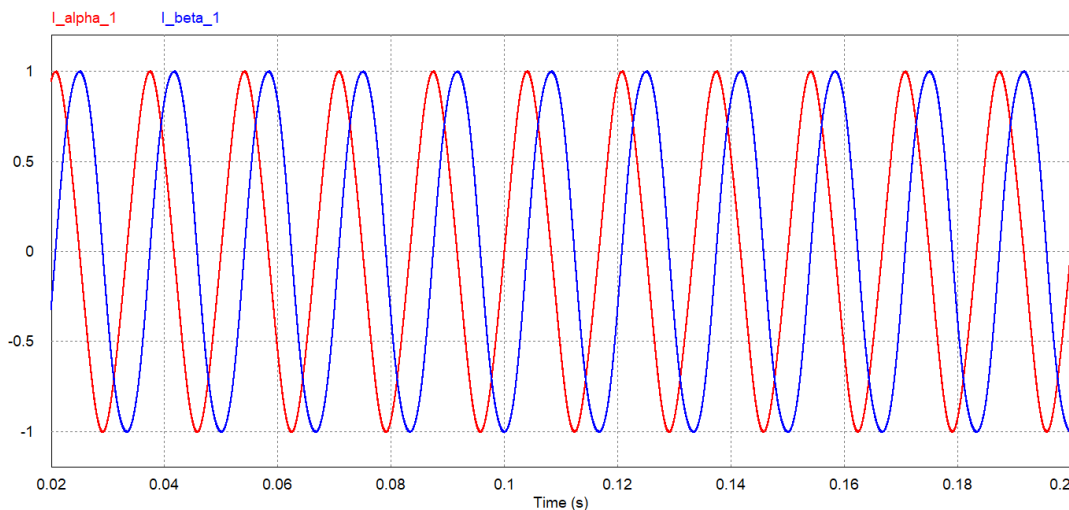
Figura 3.24 – Diagrama de Blocos de um PLL.



Fonte: Autoria Própria.

O sinal de saída são dois sinais de corrente defasados de 120° a amplitude pode ser arbitrariamente definida, por efeitos de simplificação geralmente são colocados valores unitários nos ganhos, o que gera um sinal com pico em 1. Os dois sinais de saída podem ser interpretados como correntes provenientes de uma transformada Clarke, tanto que no diagrama de blocos do PSD na Figura 3.22 são denominadas de i'_α (em vermelho) e i'_β (em azul) e suas formas de ondas resultantes estão presentes na Figura 3.25.

Figura 3.25 – Gráficos das Correntes de Saída do PLL.

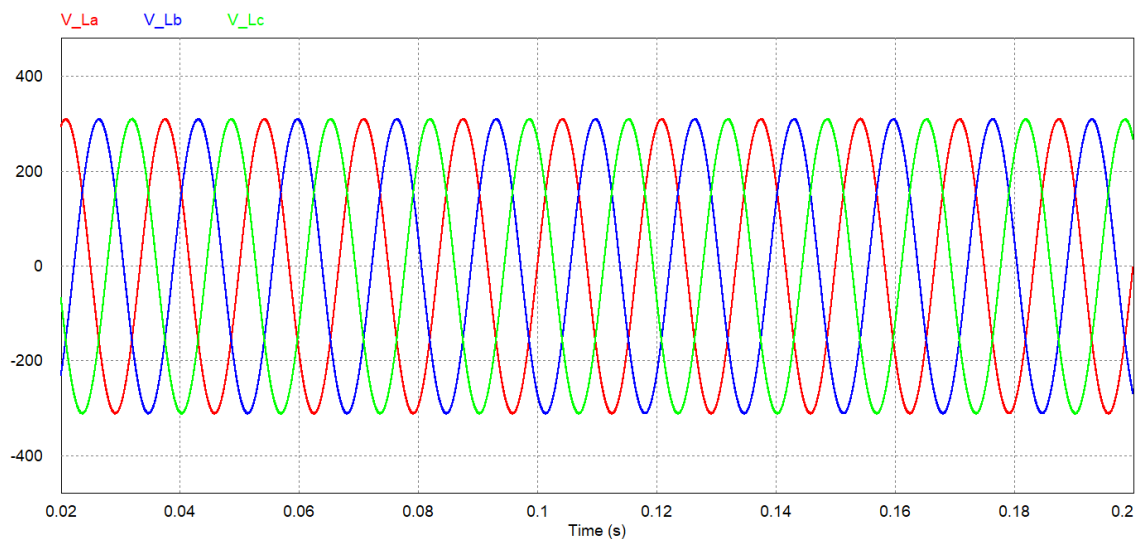


Fonte: Autoria Própria.

A técnica de controle SCC apresenta as melhores respostas em condições de desbalanceamentos e defasagens da fonte (DHAVAL.P.SUTHAR, S.N.PANDYA e RAJU.P.KESHAWALA, 2018). Para efeitos de comparação serão utilizadas configurações idênticas as que foram utilizadas no filtro CIP, a carga será a mesma que está descrita na Tabela 3.1, assim como os outros parâmetros.

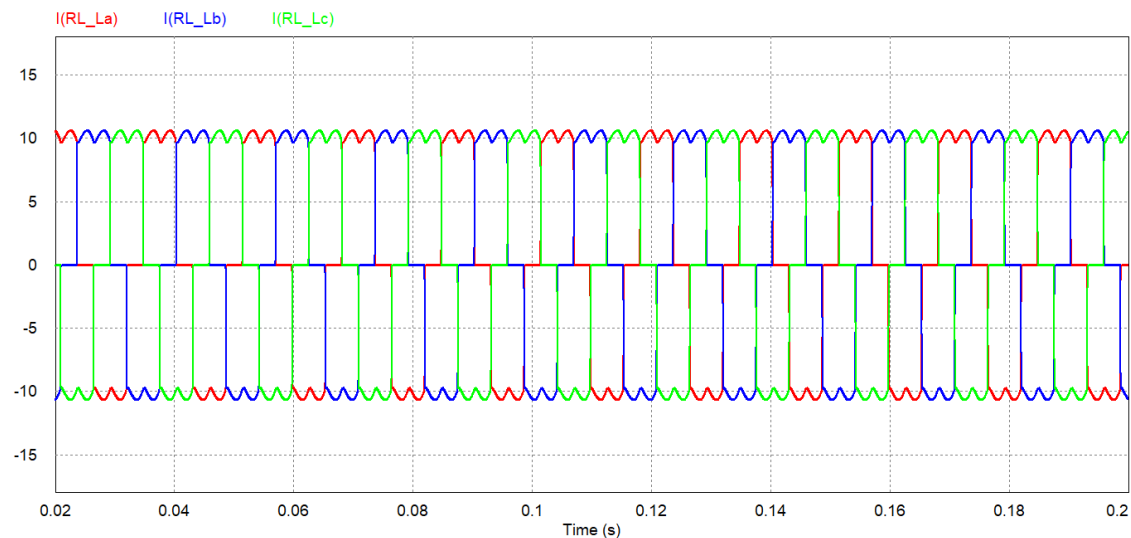
Seguindo a ordem de apresentação do filtro CIP, as Figuras 3.26 e 3.27 estão presentes as tensões e correntes de carga.

Figura 3.26 – Tensão na Carga do Filtro SCC



Fonte: Autoria Própria.

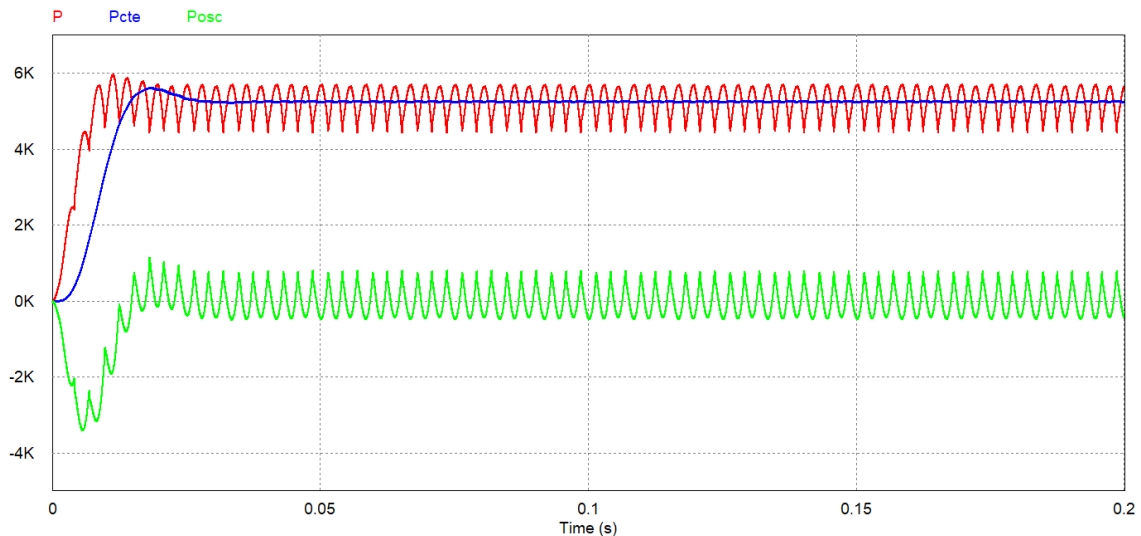
Figura 3.27 – Corrente na Carga do Filtro SCC



Fonte: Autoria Própria.

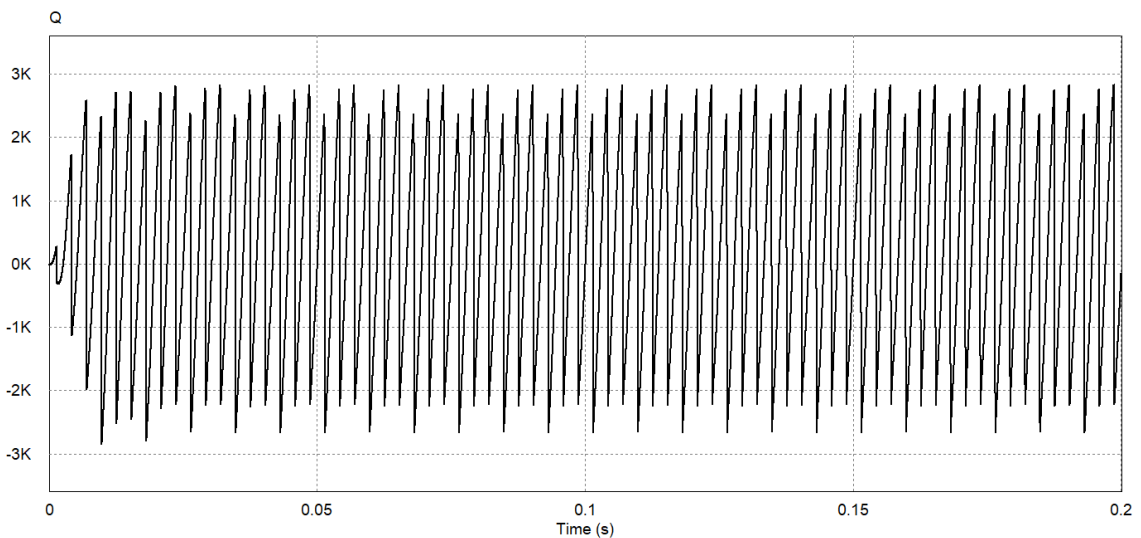
As potências ativas referentes ao circuito em questão estão apresentadas na Figura 3.28, onde em vermelho é a potência total, em azul a potência constante após ser filtrada e em verde a oscilante que é a correspondente ao uso da diferença entre a potência total e constante referentes a Equação (3.11). A potência imaginária está presente na Figura 3.29.

Figura 3.28 – Potências Ativas Total, Constantes e Oscilante do Filtro SCC.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.29 – Potência Imaginária do Filtro SCC

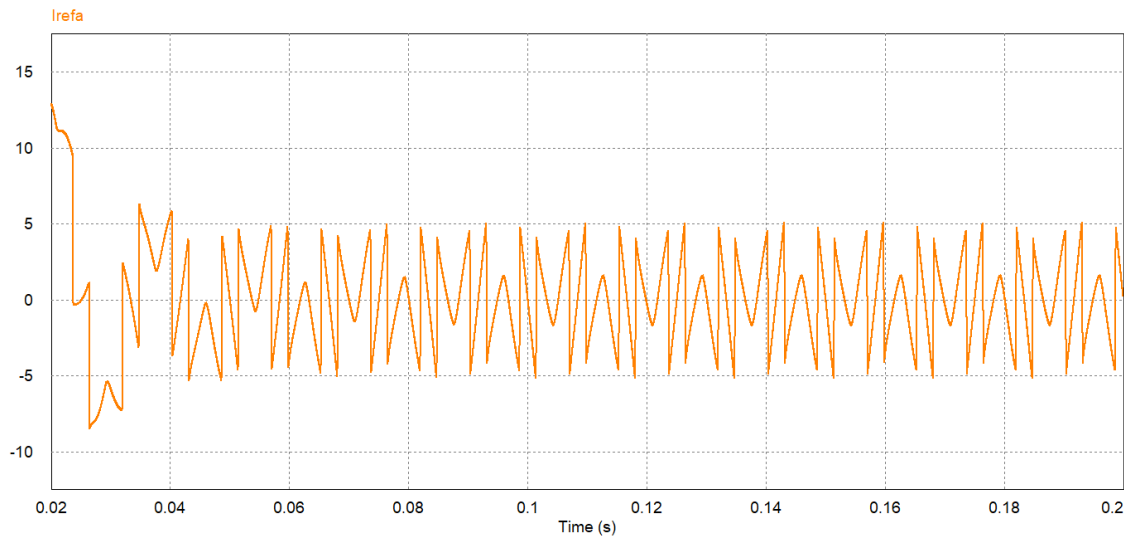


Fonte: Autoria Própria.

É notável que as formas de ondas acima são bastante semelhantes se comparadas as ondas do filtro CIP, o que é esperado devido ao gráfico da tensão ter características balanceadas e sem defasagens, porém como a Figura 3.23 evidência mesmo sob essas condições de distorções a

resposta seria similar ou quase idêntica pois a tensão de entrada do filtro não apresentaria grandes mudanças em relação a uma entrada de tensão ideal, e justamente por esse motivo esse filtro apresenta melhores respostas sob condições não-ideais. E essa resposta está exposta na curva da Figura 3.30, assim como foi feito no Filtro CIP, a corrente é referente a Fase A, e as outras fases são defasadas de 120° entre si.

Figura 3.30 – Corrente de Compensação do Filtro SCC



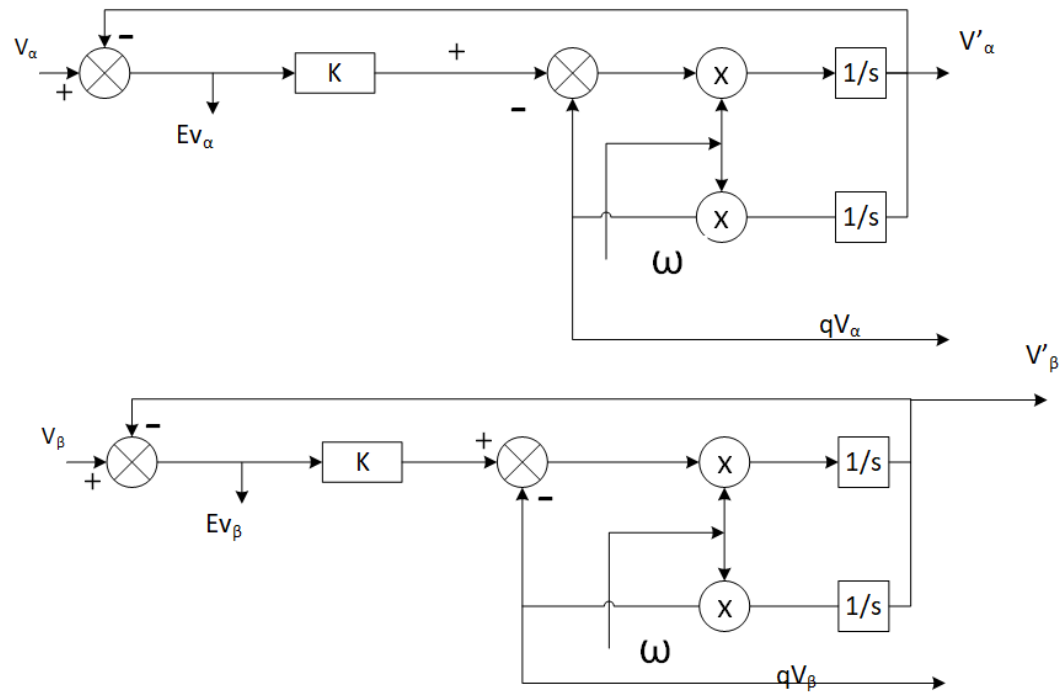
Fonte: Autoria Própria.

3.6 Filtro Multiple Second Order Generalized Integrator - Frequency Locked Loop (MSOGI-FLL)

Como o próprio nome sugere a estrutura MSOGI-FLL possui múltiplos componentes SOGI, acompanhados de uma estrutura de acoplamento de frequência (FLL). A estrutura SOGI é composta por uma modificação da estrutura GI (*Generalized Integrator*) que é definido por ter uma função transferência idêntica ao clássico cancelador de ruído senoidal. Porém as estruturas GI e o cancelador de ruído senoidal possuem a desvantagem de a largura de banda e o ganho no estado estacionário dependerem da frequência do filtro. Em razão dessa circunstância o filtro GI foi adaptado para que a largura de banda dependesse apenas do ganho e amplitude dos sinais de entrada (ROCHA, 2018).

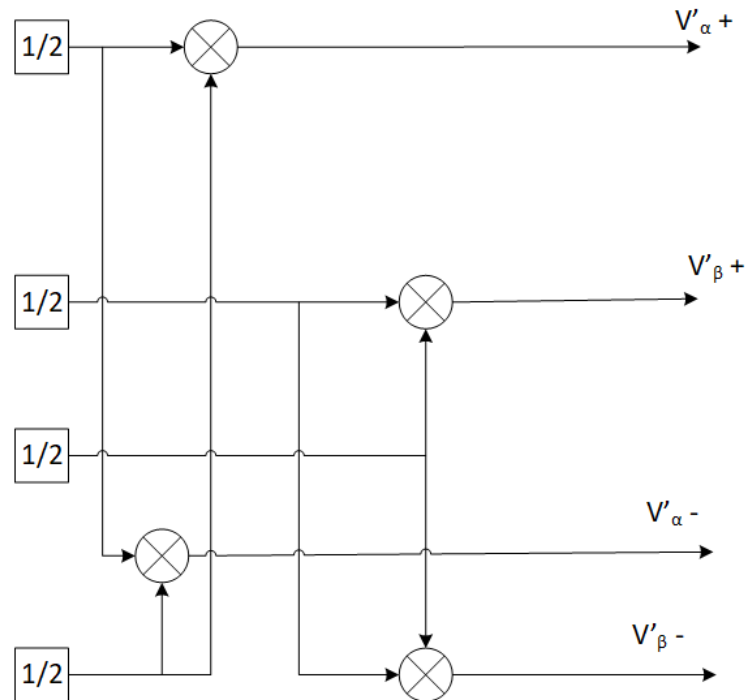
A função de transferência que descreve tanto o GI quanto o cancelador de ruído senoidal é apresentada em (3.13).

Figura 3.32 – Diagrama de Blocos da Estrutura DSOGL.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.33 – Diagrama de Blocos da Estrutura PNSC.

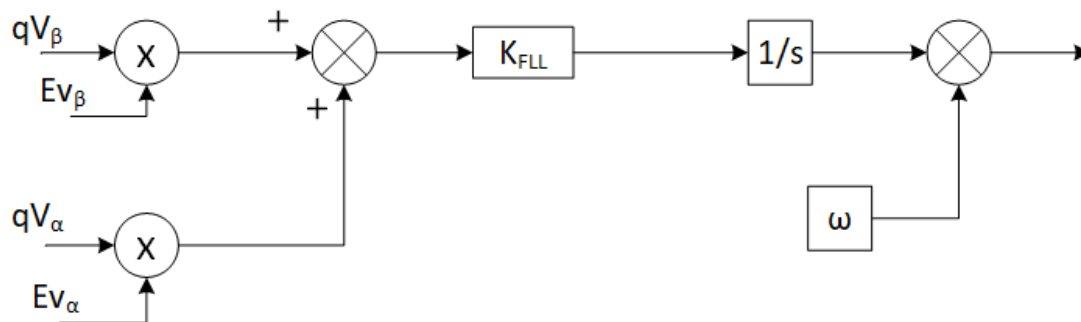


Fonte: Autoria Própria.

A estrutura de FLL é capaz de determinar a frequência principal de um sinal entrada. Nesse caso os sinais de entradas serão os gerados pela estrutura DSOGI. É razoável pensar que é necessário apenas uma estrutura FLL para ambos os SOGI que compõe o DSOGI, pois possuem frequências iguais. Seu funcionamento é baseado em um valor de referência e de erros, fazendo assim dele um sistema de malha fechada.

A função do FLL na estrutura SOGI é alterar a frequência de ressonância para que seja igual a frequência de entrada. O diagrama de blocos de um FLL para SOGI e DSOGI possuem diferenças mínimas na Figura 3.34 está apresentado o FLL referente a um DSOGI, a diferença entre esse e para um feito referente ao SOGI é o primeiro bloco somador, onde existem apenas um par de sinais de entrada.

Figura 3.34 – Diagrama de Blocos da Estrutura FLL.

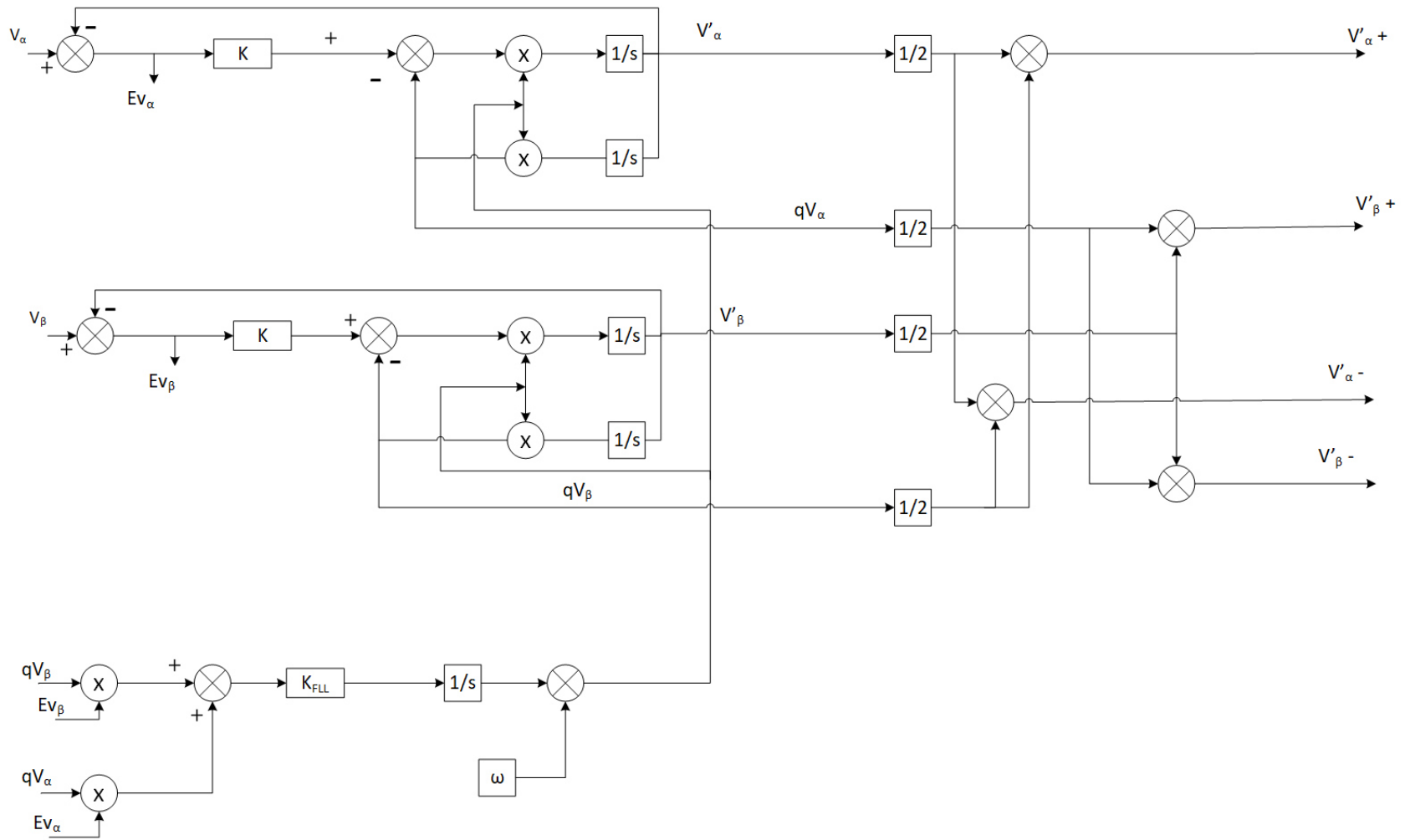


Fonte: Autoria Própria.

Todas essas estruturas juntas formam um DSOGI-FLL que é apresentado na Figura 3.35. Seu funcionamento é baseado em gerar sinais em quadratura que dependem da amplitude e frequência do sinal de entrada, e ao final ser possível obter a parte de sequência negativa e positiva do sinal.

Isso é útil pois torna possível desacoplar a componente harmônica de um sinal não-senoidal para que seu cancelamento possa ser realizado. Essa estrutura é capaz de fazer isso apenas com um sinal por vez, ou seja cancelar apenas uma ordem harmônica. Para cancelar várias ordens simultaneamente são necessárias mais estruturas dessas, criando assim a estrutura MSOGI-FLL. Sendo necessário apenas alguns tratamentos com o sinal de entrada é possível cancelar as ordens harmônicas desejadas, o que difere dos outros tipos de filtros apresentados que cancelam todos os sinais harmônicos presentes, porém o custo computacional desse filtro é menor.

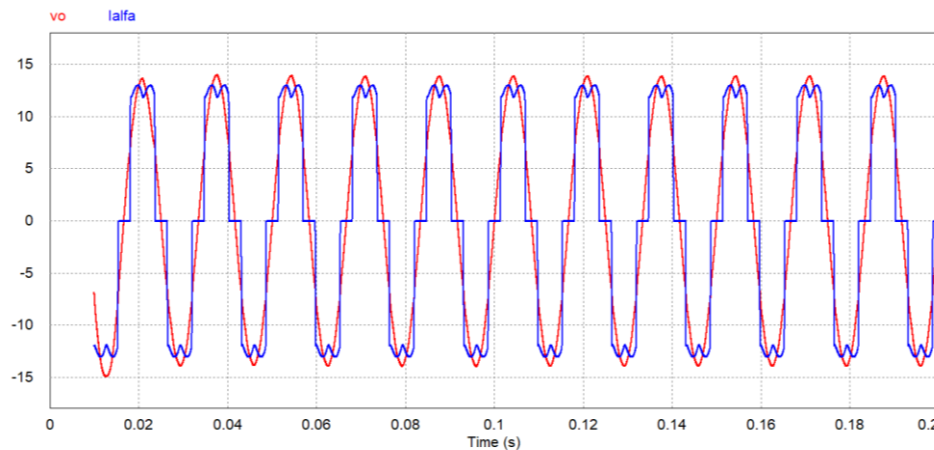
Figura 3.35 – Diagrama de Blocos de um DSOGI-FLL.



Fonte: Autoria Própria.

Considerando os mesmos parâmetros de circuito dos capítulos anteriores baseados na Tabela 3.1, a simulação ocorre primeiramente com um componente DSOGI tentando encontrar a componente fundamental da onda para ser utilizada como base de todas as outras estruturas DSOGI. Também a uma subtração das ondas de frequências harmônicas da componente de entrada do circuito desse DSOGI em questão para que a onda possa ser o mais limpa possível.

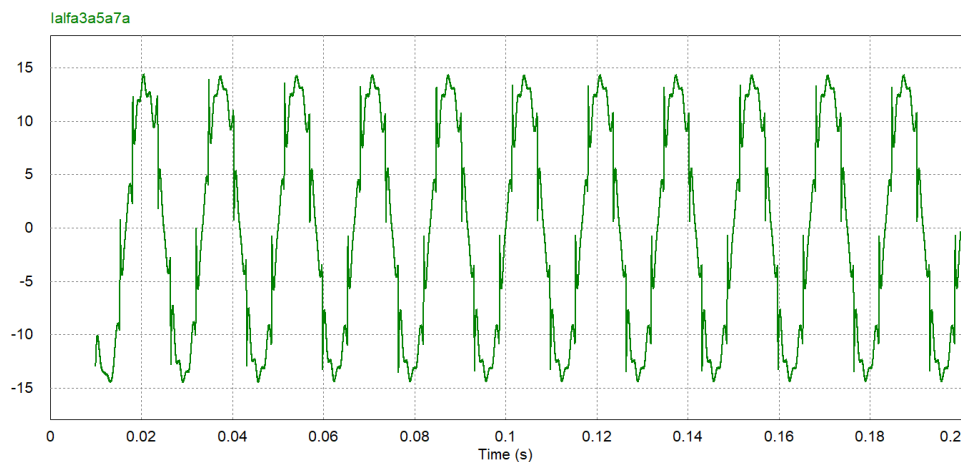
Figura 3.36 – Componente de Frequência Fundamental do DSOGI.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 3.36 em vermelho está a onda de resposta do componente DSOGI sintonizado para a frequência fundamental e em azul o sinal de entrada. O sinal de entrada ainda passa por subtração algébrica antes de ser inserido no DSOGI, a onda que de fato é a entrada desse componente é a da Figura 3.37.

Figura 3.37 – Sinal de Entrada do DSOGI.

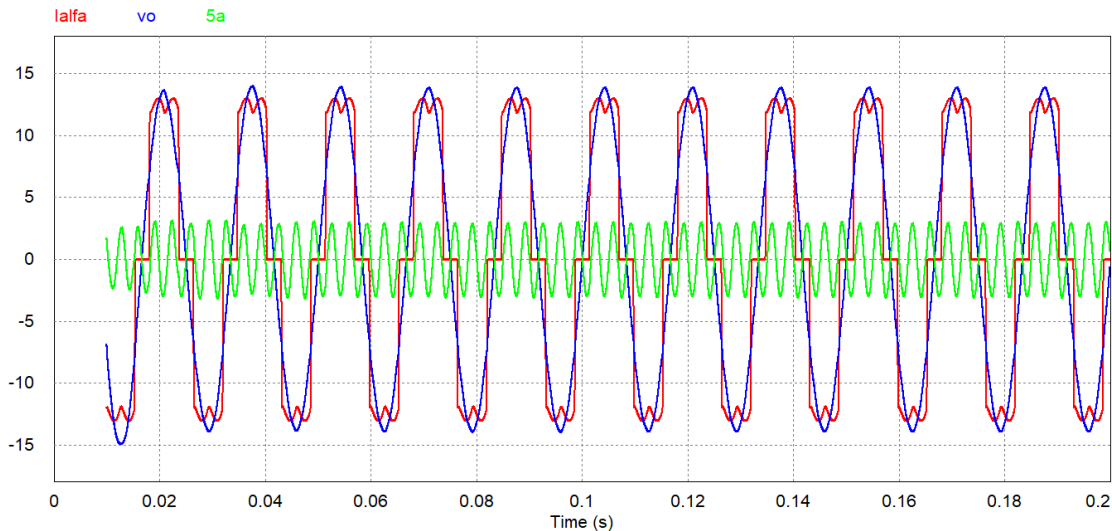


Fonte: Autoria Própria.

No primeiro ciclo há uma leve diferença na onda da Figura 3.37 devido ao fato de ser dependente da saída para que as outras referências harmônicas sejam geradas. As outras ondas de referências são geradas de forma muito semelhante a essa. São trocados algumas constantes e a frequência no circuito DSOGI, e também subtraídas as componentes que são de frequências diferentes do harmônico em questão.

Como dito anteriormente para cada frequência que se deseja cancelar há a existência de um componente DSOGI, para ilustrar isso será comparado na Figura 3.38 o 5º harmônico gerado pelo DSOGI com as ondas presente na Figura 3.36.

Figura 3.38 – Forma de Onda harmônica gerada pelo DSOGI.

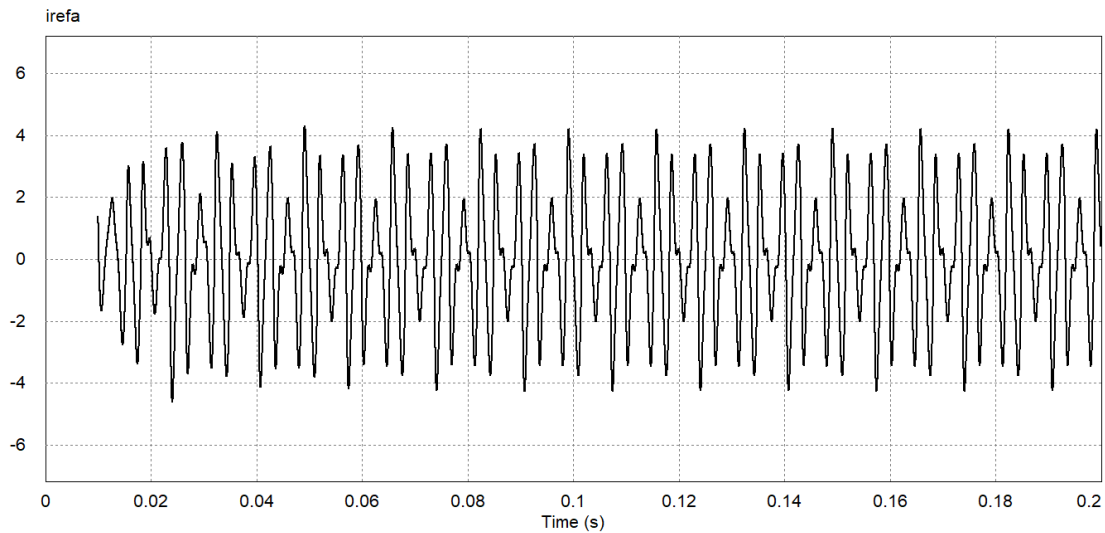


Fonte: Autoria Própria.

A onda em verde da Figura 3.38 representa a componente múltipla de 5ª ordem presente na onda da carga, ou de entrada (Azul). E de forma semelhante é gerada os sinais das outras ordens escolhidas. Esses sinais gerados em quadratura passam pelo PNSC, e assim é possível obter as sequências positivas e negativas de cada harmônico para então ser anulado.

Para ocorrer a anulação harmônica é preciso escolher a componente referente a cada sequência harmônica em questão, após isso as ondas são somadas e depois através da Transformada Clarke Inversa voltam a ser grandezas trifásicas para então gerar a corrente de referência do filtro presente na Figura 3.39.

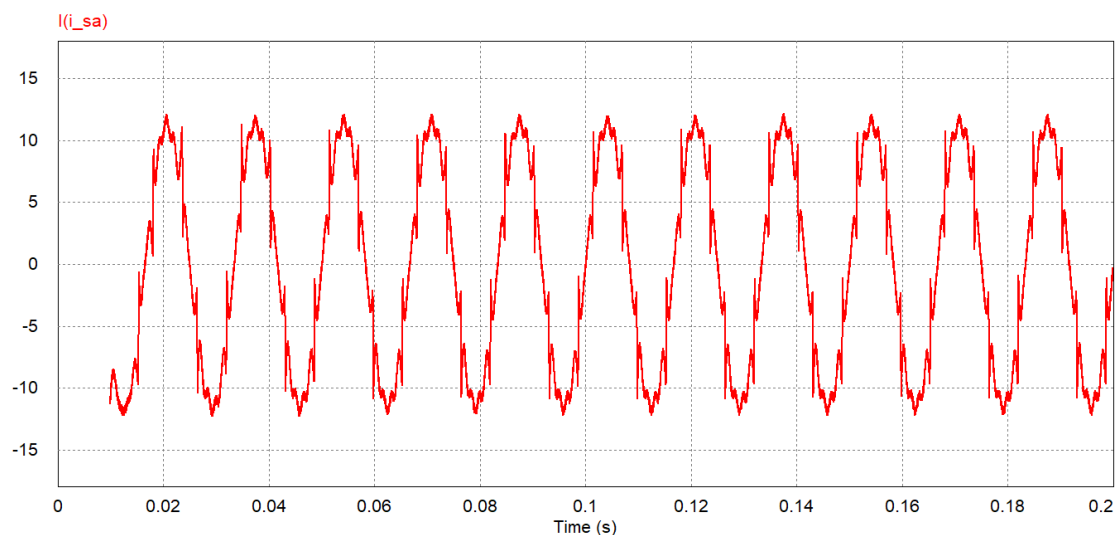
Figura 3.39 – Corrente de Referência Gerado pelo MSOGI.



Fonte: Autoria Própria.

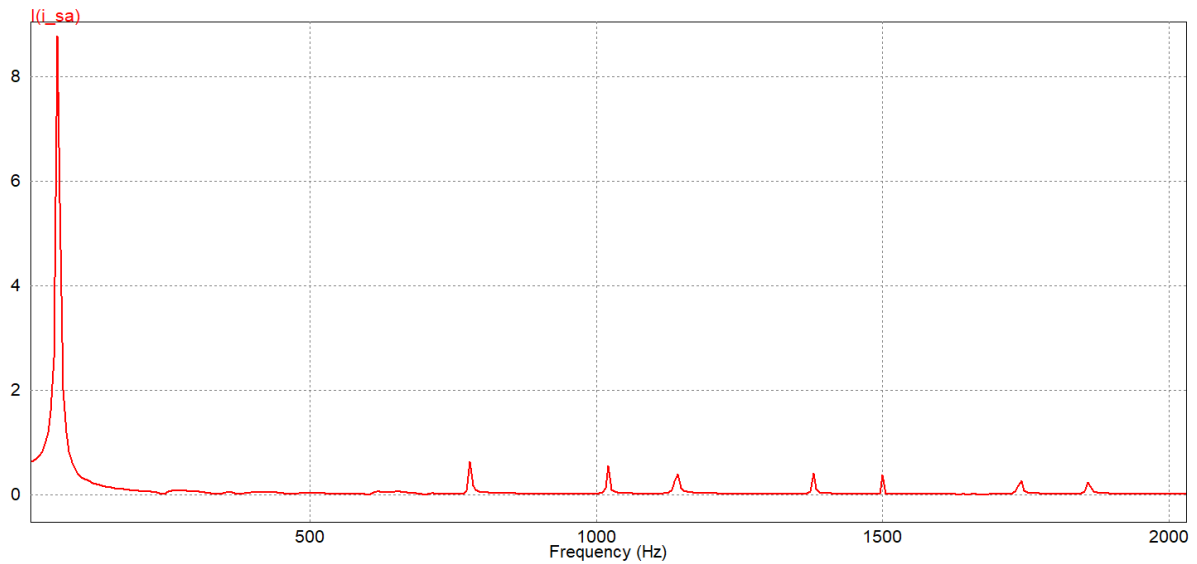
A corrente apresenta um formato bem diferente se comparado com os outros filtros apresentados neste trabalho devido a seu cancelamento ser seletivo, existem inúmeros componentes harmônicos não cancelados, é possível afirmar isso levando em consideração o gráfico da transformada de Fourier do sinal filtrado presentes nas Figuras 3.40 e 3.41.

Figura 3.40 – Corrente na Fonte com filtro DSOGI



Fonte: Autoria Própria.

Figura 3.41 – Corrente na Fonte no Domínio da Frequência.



As componentes que foram escolhidas pra serem anuladas foram as múltiplas de ordem 3, 5, 7 e 11 e pelo gráfico da Figura 3.40 é notável que o filtro cumpriu seu objetivo, pois ao comparar com a Figura 2.15 que são cargas do mesmo tipo, existem as componentes harmônicas das frequências citadas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será realizada a comparação dos filtros em diferentes condições de carga, para analisar sua resposta e ver qual foi seu comportamento em situações que há apenas cargas majoritariamente capacitivas ou indutivas, com ou sem harmônicos presente na rede.

4.1 Carga Indutiva

Para esse tópico será simulado os circuitos de filtro MSOGI e SCC com uma carga indutiva de baixo fator de potência. Os parâmetros do circuito estão na Tabela 4.1 e o circuito utilizado está presente na Figura 4.1.

O circuito utilizado para inserção das correntes de compensação utilizando o VSI está apresentado na Figura 4.2 assim como seu circuito de controle pelo método de histerese está ilustrado na Figura 4.3.

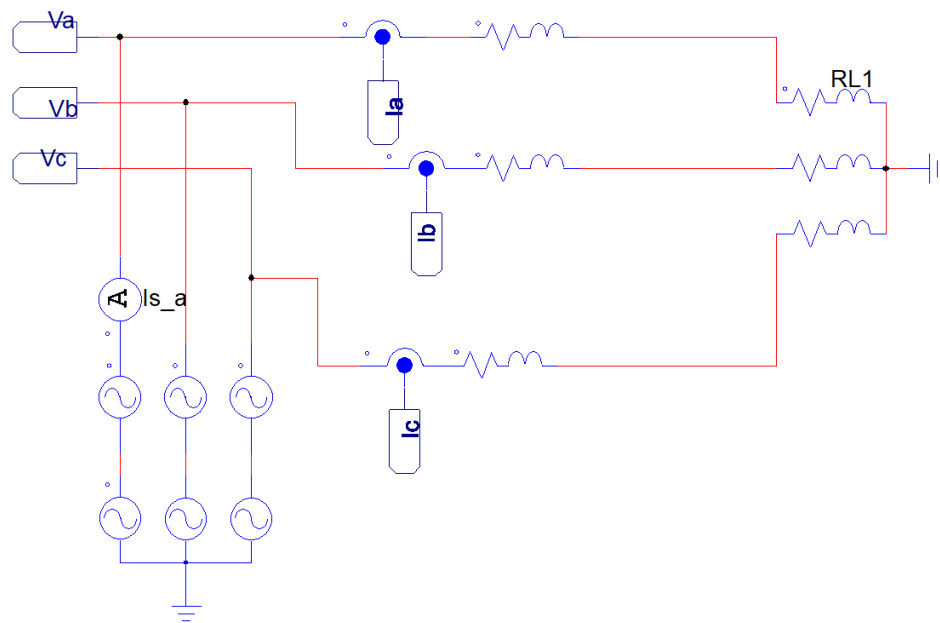
Os circuitos das técnicas de mitigação que serão utilizadas estão presentes no capítulo anterior.

Tabela 4.1 – Parâmetros do Circuito.

$V_{\text{linha}}(\text{L-L})$	380V
Carga (RL)	$R = 2\Omega$, $L = 10\text{mH}$
Carga não-Linear	Ausente
Impedância da linha	$R = 10\mu\Omega$, $L = 100\mu\text{H}$
Fator de Potência	0.47 indutivo

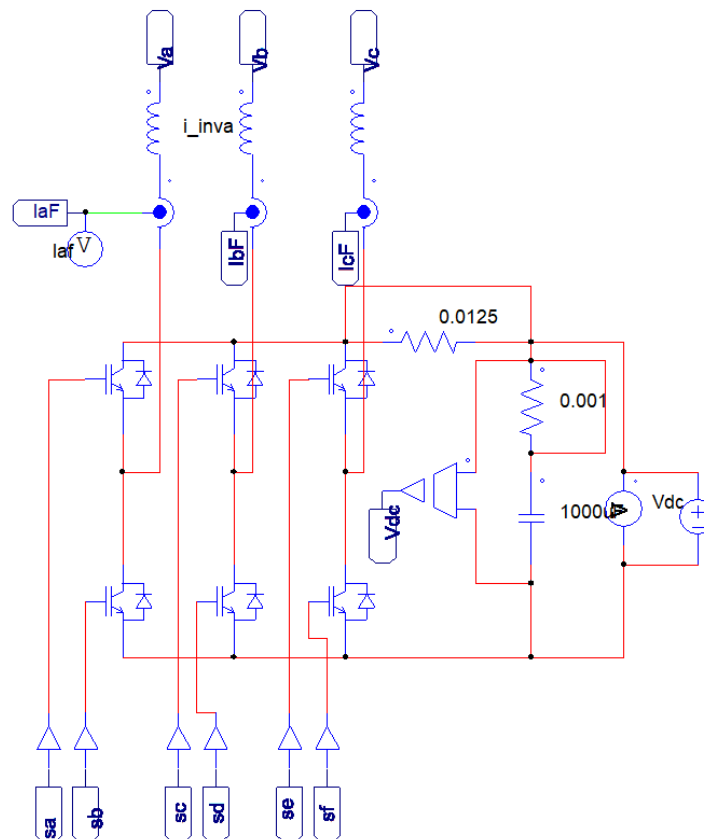
Fonte: Autoria Própria.

Figura 4.1 - Circuito de simulação



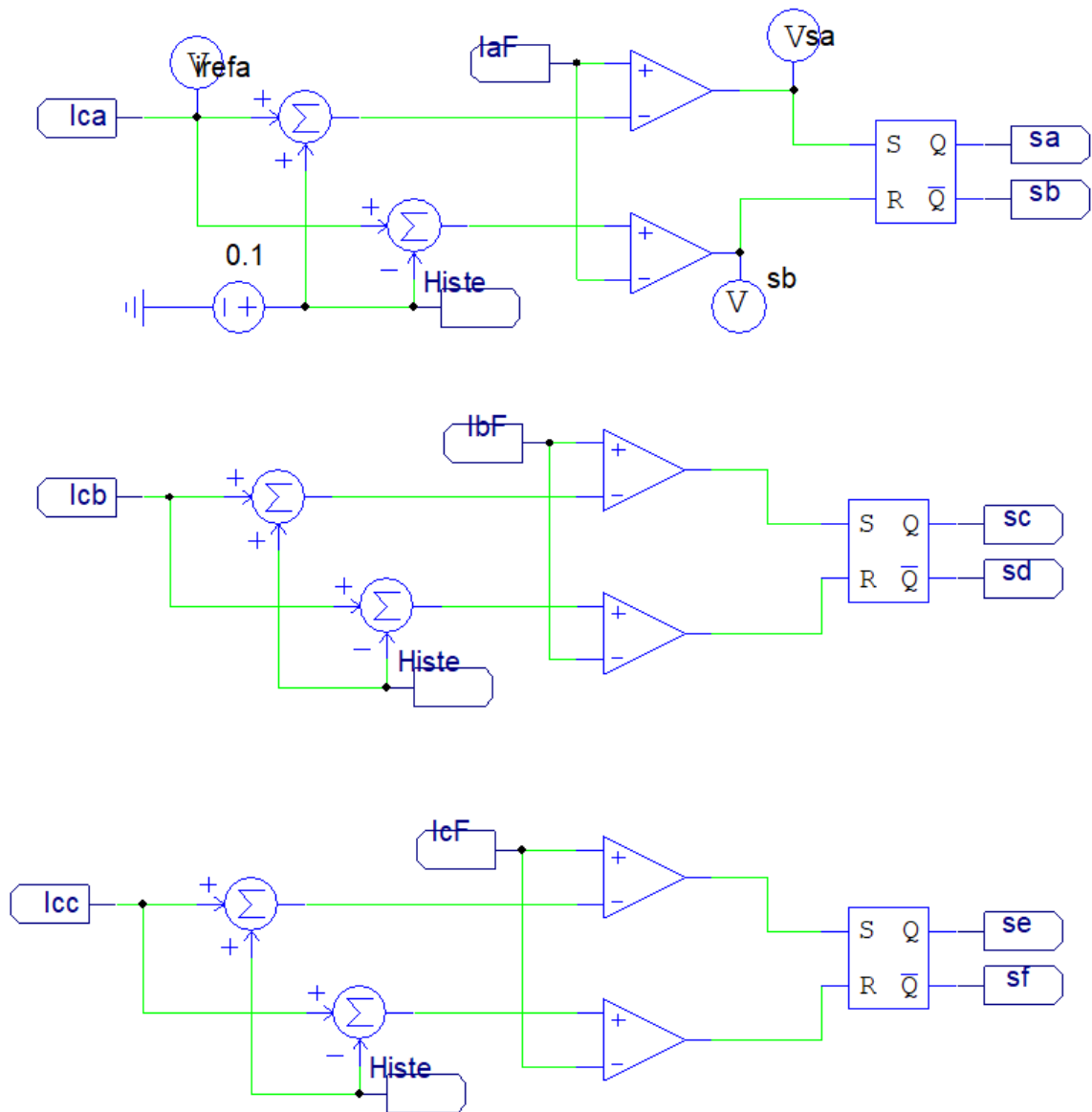
Fonte: Autoria Própria

Figura 4.2 - Circuito do filtro ativo



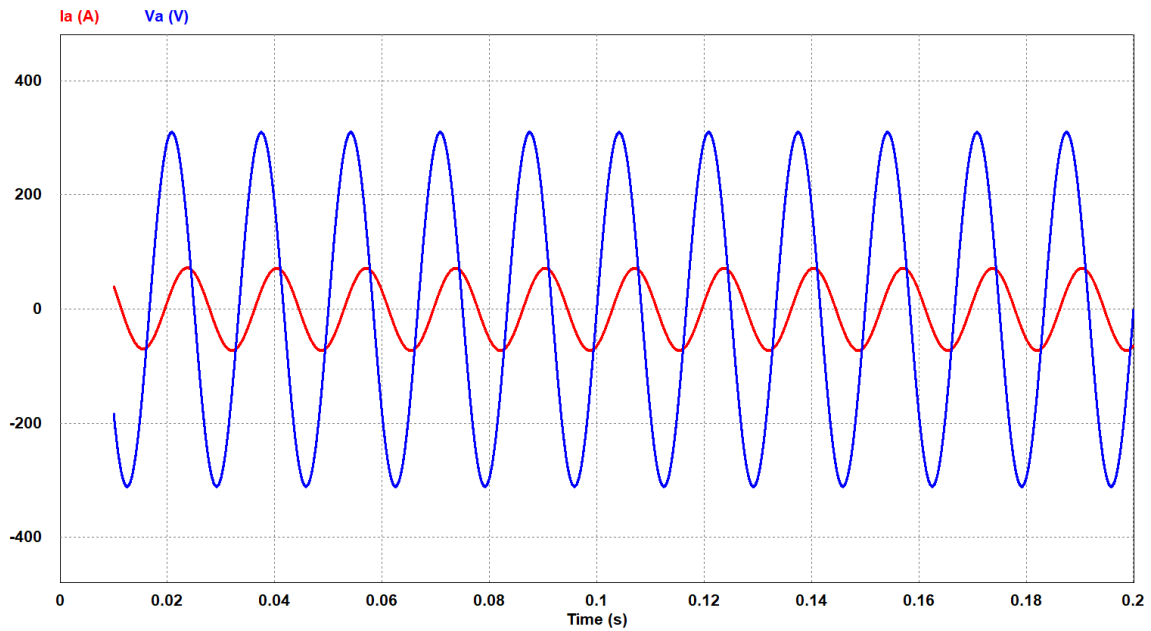
Fonte: Autoria Própria.

Figura 4.3 - Circuito de controle por Histerese.



Fonte: Autoria Própria.

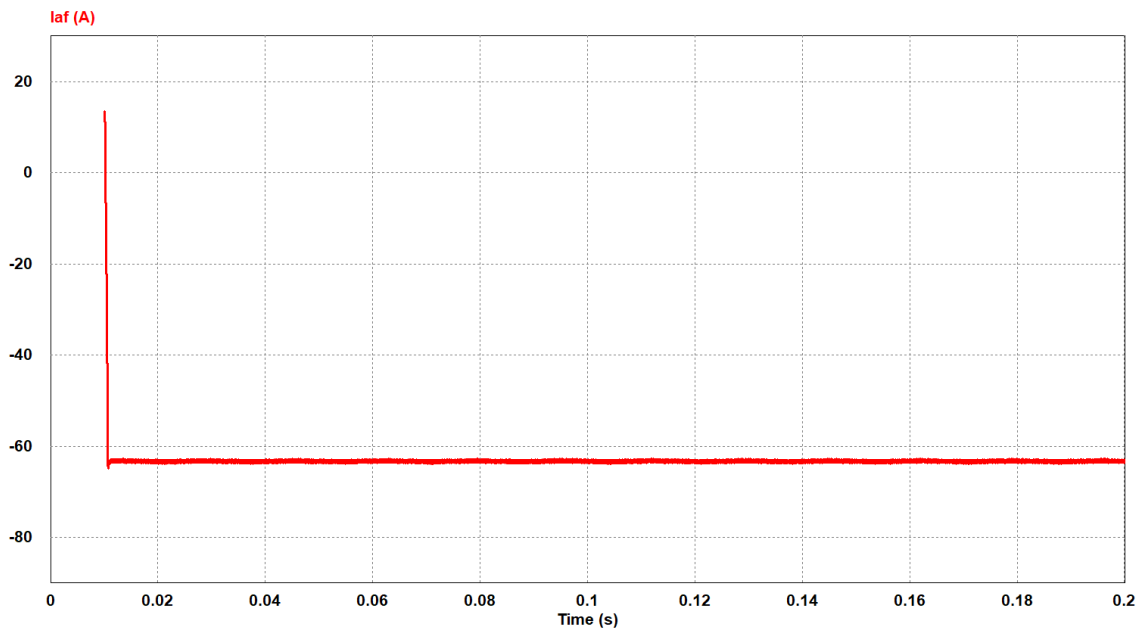
As formas de ondas que representam o circuito dos parâmetros da Tabela 4.1 estão apresentadas na Figura 4.4.

Figura 4.4 – Gráfico $V \times I$ da carga

Fonte: Autoria Própria.

A resposta do filtro MSOGI está presente na Figura 4.4. A resposta foi nula, ou seja sem harmônicos o filtro está desativado e não corrige fator de potência nem apresenta algum sinal que possa vir a prejudicar a qualidade da energia em questão.

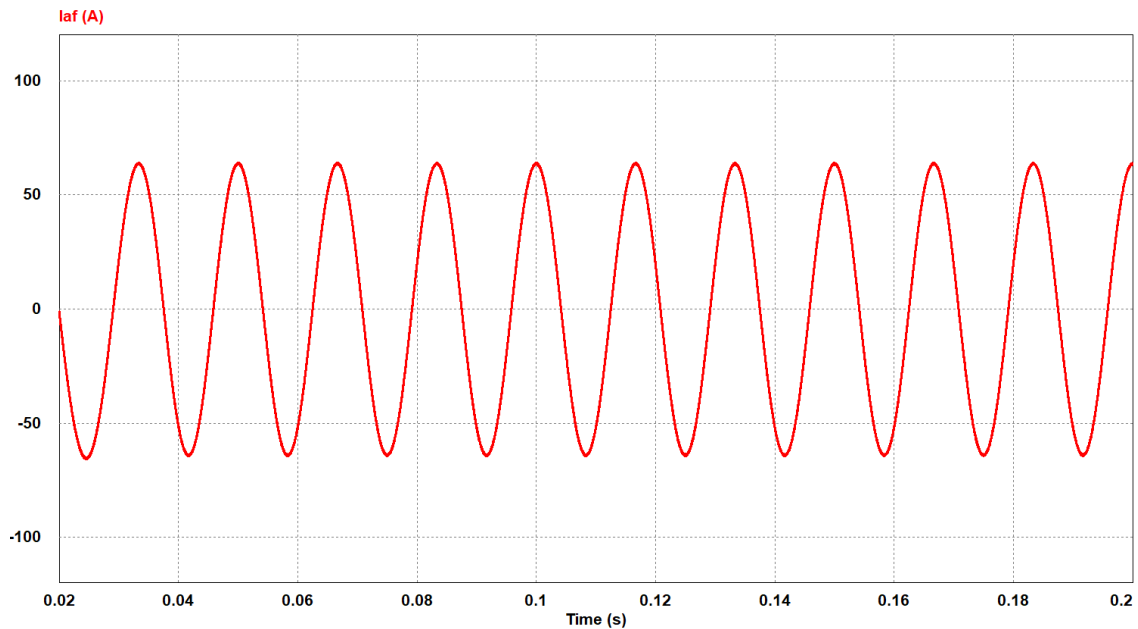
Figura 4.5 – Resposta do MSOGI para Carga Indutiva.



Fonte: Autoria Própria.

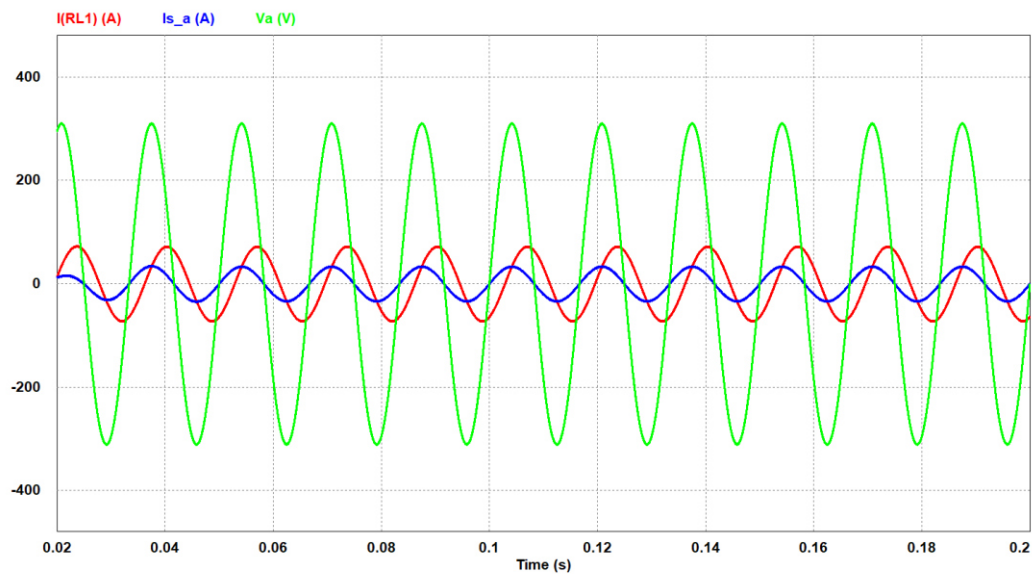
A resposta do Filtro SCC está presente na Figura 4.6. Diferentemente do outro filtro, esse teve uma resposta, que resulta na correção do fator de potência do circuito, é possível confirmar isso através do gráfico da Figura 4.7 onde está presente a corrente de carga em comparação a corrente da fonte.

Figura 4.6 – Resposta do Filtro SCC para Carga Indutiva.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 4.7 – Gráficos das Correntes de Carga, Fonte e Tensão da Fonte.



Fonte: Autoria Própria.

O gráfico da Figura 4.7 demonstra a corrente de carga em vermelho, a corrente da fonte em azul e em verde a tensão da fonte. A olho nu é possível notar que o gráfico em verde está defasado em relação ao vermelho, mas com a correção do filtro SCC, a corrente vista pela fonte é resistiva.

4.2 Carga Harmônica

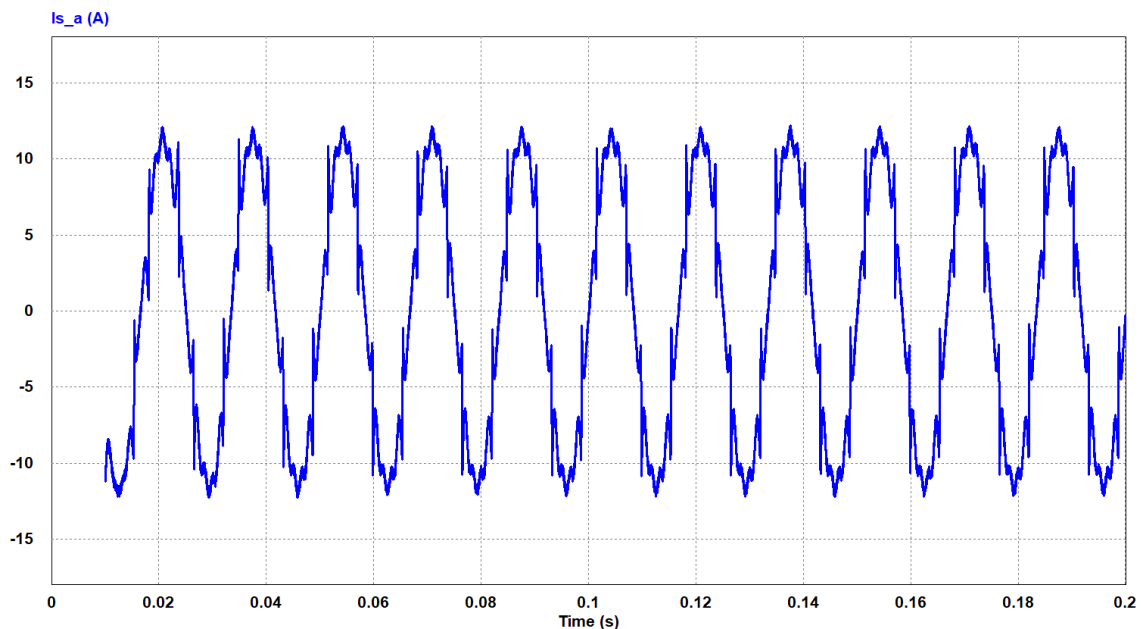
Conforme o objetivo dos filtros, as cargas serão comparadas em relação ao seu cancelamento harmônico. Utilizando os parâmetros da Tabela 3.1.

A resposta dos filtros SCC e DSOGI foram apresentadas anteriormente, neste momento apenas os efeitos no alimentador da fonte serão analisados.

A corrente fornecida pelo gerador tem o formato apresentado na Figura 4.5, essa corrente possui um fator de potência de 0.99 em relação a tensão da fonte, mas é nítido que ainda há grande distorção, os harmônicos anulados pelo DSOGI, em função da seletividade do filtro, foram os 3º, 5º, 7º e 11º. Foram selecionados as ordens harmônicas em questão em razão de serem os mais comuns e de maior amplitude encontrados na rede.

O THD obtido após a filtragem foi de 13%.

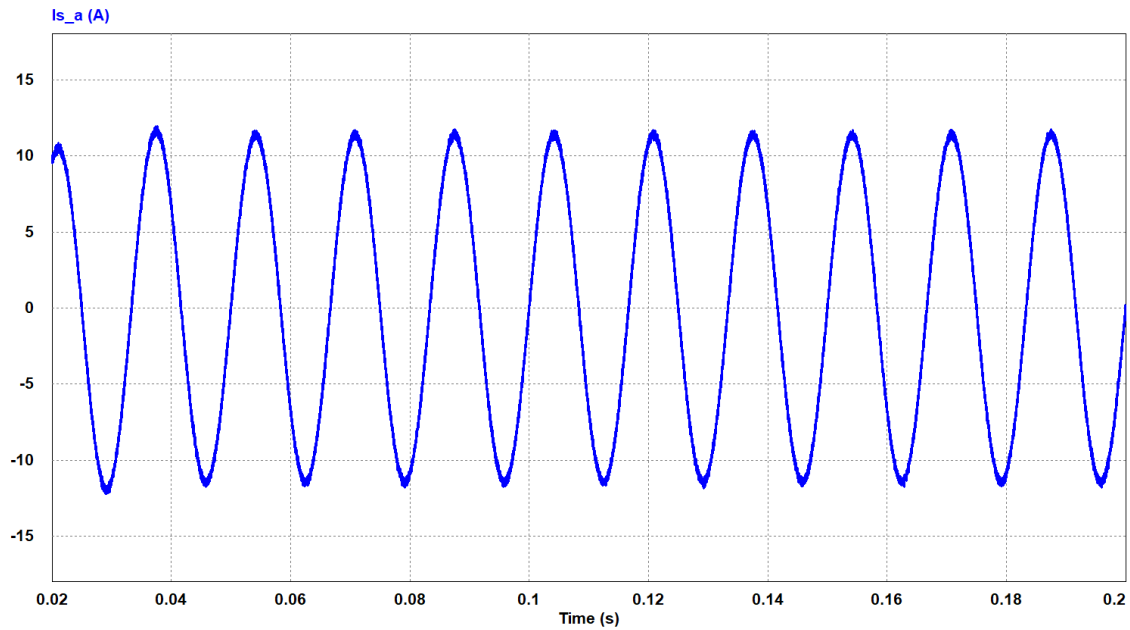
Figura 4.8 – Corrente Fornecida pela Fonte (Filtro DSOGI).



Fonte: Autoria Própria.

O Filtro Ativo SCC, teve o efeito testado nos mesmos parâmetros de circuito do filtro anterior e a forma gráfica da onda obtida na corrente da fonte está apresentada na Figura 4.6. O resultado apresenta uma onda que pode ser visualmente percebida como senoidal, ou algo muito próximo disso. Os valores de fator potência e THD são respectivamente: aproximadamente 1 e 2%

Figura 4.9 – Corrente Fornecida pela Fonte (Filtro SCC).



Fonte: Autoria Própria.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A partir das simulações, gráficos e fluxogramas apresentados é possível entender o funcionamento de cada filtro, e assim notar como são realizados as formas de controles para cancelamento de ruído harmônico, e o que afeta ou não cada tipo de filtro. Suas vantagens e desvantagens e também formas de serem aplicados.

Ao realizar uma análise nos resultados pode-se notar que o filtro SCC possui uma flexibilidade e maior gama de possibilidade de usos devido a sua vantagem de cancelar simultaneamente tanto os harmônicos presentes no sistema, como corrigir o fator de potência. Sua desvantagem é que pode ter valores muito dispendiosos obter os equipamentos para que esse filtro seja aplicado. Devido tanto ao seu alto custo computacional de cálculos de potências instantânea quanto a potência necessária do inversor necessário, levando em conta que quanto mais harmônicos são cancelados mais corrente é necessária para isso e também um chaveamento de mais alta frequência que pode diminuir a vida útil do equipamento.

Através das análises é possível concluir que o filtro MSOGI possui a desvantagem de não ser tão flexível e adaptativo, criando a necessidade de ser previamente projetado para sua situação específica de atuação, porém pode ser utilizado em conjunto com filtros passivos para que torne mais acessível o preço de seus equipamentos. Ou então ser utilizado em alguma frequência de ressonância específica.

Em questão de suas vantagens e desvantagens, é possível determinar quais as situações é mais indicado a aplicação de determinado tipo de técnica de mitigação harmônica. Para ambientes em que a rede é mais volátil e imprevisível o filtro SCC seria mais adequado, o que não o torna inutilizável em situações que a rede possui harmônicos pré-determinados a serem cancelados. Porém isso causaria um gasto desnecessário.

Os filtros MSOGI são utilizados em situações que há alguma ressonância harmônica, ou a presença de harmônicos de baixa frequência que são complicados de serem cancelados e que há grande presença na rede. Usá-los junto a banco de capacitores e filtro passivos pode ser a solução que resolva os problemas de qualidade de energia relacionados a harmônicos e correção de fator potência. Caso já haja uma estrutura pré-instalada há grande redução do valor a ser investido se comparado com o outro filtro deste trabalho.

Pontos interessantes a serem realizados em trabalhos futuros são as análises de custos computacionais onde seria possível obter um detalhamento melhor sobre os cálculos de potências instantâneas assim como investigar técnicas de otimização para reduzir a carga sobre o processamento exigido pelos filtros. Efeitos práticos dos filtros onde seria interessante obter dados reais para avaliação experimental e comparação dos resultados obtidos com a simulação. Por fim, técnicas de filtros ativos híbridos seria uma promissora área de estudo onde pode se obter benefícios adicionais em termos de eficiência, custo e desempenho além de possibilitar a adaptação a diferentes situações e necessidades específicas de mercado.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. **Instantaneous power theory and applications to power conditioning**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [2] DHAVAL.P.SUTHAR; S.N.PANDYA; RAJU.P.KESHAWALA. **Comparison of Different Control Strategies for Shunt Active Power Filter**. Morbi: IEEE, 2018.
- [3] DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2ª. ed. [S.l.]: McGraw-Hill, 2004.
- [4] LATHI, B. P. **Sinais e sistemas lineares**. 2ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.
- [5] LIMONGI, L. R. **Filtros Ativos de Potência para Compensação de Harmônicos de Corrente Potência Reativa**. Recife: Universidade Federal de Pernambuco, 2006.
- [6] MIKKILI, S.; PANDA, A. K. **Power Quality Issues - Current Harmonics**. Boca Raton: CRC PRESS, 2016.
- [7] MINAMIZAKI, G. M. **Mitigação de Problema de Ressonância Harmônica de Banco de Capacitores Instalados na Rede de Distribuição**. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2011.
- [8] MORAIS, E. E. C. **Estudo e Projeto de Filtros Passivos para Atenuação de Harmônicos em Instalações Elétricas Industriais**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, 2011.
- [9] PIRES, I. A. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia elétrica**. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- [10] PIRES, I. A. **Medidas de mitigação de harmônicos**. [S.l.]: O Setor Elétrico, 2010.
- [11] POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS**. Campinas: UNICAMP, 2009.
- [12] RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência Circuitos, Dispositivos e Aplicações**. São Paulo: Makron Books, 1999.
- [13] REY, G. R.; MUNETA, L. M. **Power Quality Harmonics Analysis and Real Measurements Data**. Rijeka: InTech, 2011.

- [14] ROCHA, C. X. **Geração Seletiva de Corrente de Referência Trifásica usando Método Multi-Ressonante para Filtro Ativo de Potência**. UFU. Uberlândia. 2018.
- [15] SANKARAN, C. **Power Quality**. Boca Raton: CRC Press, 2002.
- [16] SCHNEIDER ELECTRIC. **Qualidade de Energia Harmônicas**. [S.l.]: [s.n.].
- [17] SINGH, B.; AL-HADDAD, K. **A Review of Active Filters for Power Quality Improvement**. [S.l.]: IEEE, 1999.
- [18] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica**.

7 APÊNDICE – TABELA TRANSFORMADAS DE FOURIER

Nº	$x(t)$	$X(\omega)$	
1	$e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{a + j\omega}$	$a > 0$
2	$e^{at} u(-t)$	$\frac{1}{a - j\omega}$	$a > 0$
3	$e^{-a t }$	$\frac{2a}{a^2 + \omega^2}$	$a > 0$
4	$t e^{-at} u(t)$	$\frac{1}{(a + j\omega)^2}$	$a > 0$
5	$t^n e^{-at} u(t)$	$\frac{n!}{(a + j\omega)^{n+1}}$	$a > 0$
6	$\delta(t)$	1	
7	1	$2\pi \delta(\omega)$	
8	$e^{j\omega_0 t}$	$2\pi \delta(\omega - \omega_0)$	
9	$\cos \omega_0 t$	$\pi [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)]$	
10	$\text{sen } \omega_0 t$	$j\pi [\delta(\omega + \omega_0) - \delta(\omega - \omega_0)]$	
11	$u(t)$	$\pi \delta(\omega) + \frac{1}{j\omega}$	
12	$\text{sgn } t$	$\frac{2}{j\omega}$	
13	$\cos \omega_0 t u(t)$	$\frac{\pi}{2} [\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0)] + \frac{j\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}$	
14	$\text{sen } \omega_0 t u(t)$	$\frac{\pi}{2j} [\delta(\omega - \omega_0) - \delta(\omega + \omega_0)] + \frac{\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$	
15	$e^{-at} \text{sen } \omega_0 t u(t)$	$\frac{\omega_0}{(a + j\omega)^2 + \omega_0^2}$	$a > 0$
16	$e^{-at} \cos \omega_0 t u(t)$	$\frac{a + j\omega}{(a + j\omega)^2 + \omega_0^2}$	$a > 0$
17	$\text{ret}\left(\frac{t}{\tau}\right)$	$\tau \text{sinc}\left(\frac{\omega\tau}{2}\right)$	
18	$\frac{W}{\pi} \text{sinc}(Wt)$	$\text{ret}\left(\frac{\omega}{2W}\right)$	
19	$\Delta\left(\frac{t}{\tau}\right)$	$\frac{\tau}{2} \text{sinc}^2\left(\frac{\omega\tau}{4}\right)$	
20	$\frac{W}{2\pi} \text{sinc}^2\left(\frac{Wt}{2}\right)$	$\Delta\left(\frac{\omega}{2W}\right)$	
21	$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT)$	$\omega_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(\omega - n\omega_0)$	$\omega_0 = \frac{2\pi}{T}$
22	$e^{-t^2/2\sigma^2}$	$\sigma\sqrt{2\pi} e^{-\sigma^2\omega^2/2}$	