

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

JOÃO VICTOR PEREIRA DANTA

**MÉTODO ATIVO DE CANCELAMENTO DE HARMÔNICOS
USANDO OS MÉTODOS *CONSTANT INSTANTANEOUS POWER*
E *SINUSOIDAL CURRENT CONTROL***

**ITUMBIARA-GO
2023**



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**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: João Victor Pereira Danta

Matrícula: 20171040070020

Título do Trabalho: MÉTODO ATIVO DE CANCELAMENTO DE HARMÔNICOS USANDO OS MÉTODOS CONSTANT INSTANTANEOUS POWER E SINUSOIDAL CURRENT CONTROL

Autorização - Marque uma das opções

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

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

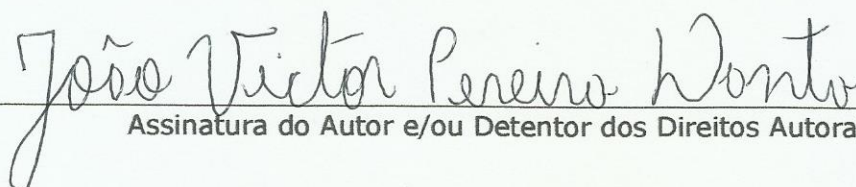
- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

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

- 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;
- 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;
- 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, 21/12/23.
Local Data


Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

JOÃO VICTOR PEREIRA DANTA

**MÉTODO ATIVO DE CANCELAMENTO DE HARMÔNICOS
USANDO OS MÉTODOS *CONSTANT INSTANTANEOUS POWER*
E *SINUSOIDAL CURRENT CONTROL***

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, Campus 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

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

D192m Danta, João Victor Pereira
 Método ativo de cancelamento de harmônicos usando os
 métodos Constant Instantaneous Power e Sinusoidal Current
 Control. / João Victor Pereira Danta. -- Itumbiara, 2023.
 62p. : il.

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 - Qualidade. 2. Filtros elétricos
ativos. 3. Filtros elétricos passivos. 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
Bibliotecária: Rosiane Gonçalves de Lima CRB1/1684



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

João Victor Pereira Danta

MÉTODO ATIVO DE CANCELAMENTO DE HARMÔNICOS USANDO OS MÉTODOS CIP E SCC

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 dezembro de 2023, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Eric Nery Chaves - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli - membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara.

(Assinado Eletronicamente).

Itumbiara – GO

2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Eric Nery Chaves**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/12/2023 18:17:08.
- **Marcos Antonio Arantes de Freitas**, DIRETOR(A) GERAL - CD2 - CP-ITUMBIA, em 07/12/2023 18:17:01.
- **Victor Regis Bernardeli**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 07/12/2023 18:16:21.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 07/12/2023. 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: 487386

Código de Autenticação: 420dcb45fe



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 primeiro a Deus, por ter me permitido e me ajudado a chegar até aqui, agradeço a minha família, que nunca se recusou a me ajudar e a me apoiar em nenhum momento, ao meu pai que sempre me levou e buscou do Campus quando precisei, a minha mãe que segurou a minha mão durante todo o curso, nunca me deixou desistir. Aos meus amigos e colegas de curso, que sempre tiveram solidariedade em me ajudar nos momentos de necessidade, também agradeço aos meus amigos fora do curso, que também puderam me ajudar a chegar até esse momento da minha vida. E é claro, não posso deixar de agradecer aos professores que foram peças fundamentais para a minha formação, me passaram o caminho que trilhei até esse momento.

Um obrigado sincero a todos que estiverem comigo por esse longo caminho.

“Ultrapasse seus limites, aqui, agora mesmo.”

Yami, Sukehiro de “Black Clover”, por Yuki Tabata.

RESUMO

Nos últimos anos, a qualidade de energia e eficiência energética têm se tornado temas recorrentes devido à evolução da sociedade. Preocupações que surgiram nas décadas de 1940 e 1950 tornaram-se cada vez mais relevantes no contexto atual. Dentre essas preocupações, destaca-se a presença de distorções harmônicas no sistema elétrico. Para corrigir essas distorções, têm sido desenvolvidos diversos métodos, sendo os filtros a abordagem mais comum. Os filtros podem ser classificados em ativos e passivos. Os filtros passivos são amplamente utilizados no mercado devido à sua simplicidade e custo acessível. Porém, os filtros ativos apresentam diversas vantagens, embora sejam mais caros. O objetivo deste trabalho é realizar uma avaliação sistêmica dos harmônicos, analisar seus efeitos no sistema elétrico, examinar normas da IEEE relacionadas ao tema e investigar os diferentes métodos de cancelamento de harmônicos, com foco especial nos filtros ativos, destacando o Método de Controle de Corrente Senoidal (SCC). Para projetar os filtros ativos, são empregadas estratégias como a transformada Clarke e a teoria P-Q. Além disso, existem softwares específicos, como o POWERSIM (PSIM), que auxiliam nesse processo. Dessa forma, o presente trabalho busca contribuir para o conhecimento e compreensão dos efeitos dos harmônicos no sistema elétrico, assim como para a avaliação dos métodos de cancelamento, priorizando a análise dos filtros ativos, por meio de ferramentas de projeto e simulação adequadas.

Palavras-chave: Qualidade de energia elétrica, eficiência energética, distorções harmônicas, filtros ativos, filtros passivos, avaliação sistêmica, efeitos no sistema elétrico, normas da IEEE, métodos de cancelamento, Método de Controle de Corrente Senoidal (SCC), transformada Clarke, teoria P-Q, POWERSIM (PSIM), projeto e simulação.

ABSTRACT

In recent years, energy quality and energy efficiency have become recurrent topics due to societal advancements. Concerns that emerged in the 1940s and 1950s have become increasingly relevant in today's context. Among these concerns, the presence of harmonic distortions in the electrical system stands out. Various methods have been developed to correct these distortions, with filters being the most common approach. Filters can be classified as active or passive. Passive filters are widely used in the market due to their simplicity and affordable cost. However, active filters offer several advantages, albeit being less common. The objective of this study is to perform a systemic evaluation of harmonics, analyze their effects on the electrical system, examine relevant IEEE standards, and investigate different harmonic cancellation methods, with a special focus on active filters, specifically the Sinusoidal Current Control (SCC) method. Strategies such as the Clarke transform and the P-Q theory are employed for designing active filters. Additionally, specific software tools like POWERSIM (PSIM) aid in this process. Thus, this work aims to contribute to the knowledge and understanding of harmonic effects on the electrical system, as well as the evaluation of cancellation methods, with a prioritized analysis of active filters using suitable design and simulation tools.

Key-words: *Energy quality, energy efficiency, harmonic distortions, active filters, passive filters, systemic evaluation, effects on the electrical system, IEEE standards, cancellation methods, Sinusoidal Current Control (SCC), Clarke transform, P-Q theory, POWERSIM (PSIM), design and simulation.*

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Fluxograma do trabalho	14
Figura 2: Harmônicos.....	18
Figura 3: Distorção de corrente causada por resistência não linear	20
Figura 4: Corrente(A) no domínio do tempo(s) e frequência (Hz)	21
Figura 5: Representação de um filtro capacitivo	27
Figura 6: Representação de como é um Filtro passivo de Sintonia simples	28
Figura 7: Representação dos tipos de filtros passivos	29
Figura 8: Exemplificação de como é o funcionamento de um filtro ativo	31
Figura 9: Componentes vetoriais trifásicas e Bifásicas da transformada Clarke:	33
Figura 10: Componentes vetoriais trifásicas e Bifásicas da transformada Clarke no domínio do tempo	34
Figura 11: Diagrama de blocos do método CIP	37
Figura 12: Diagrama de blocos do método SCC.....	39
Figura 13: Diagrama do Detector de sequência positiva	40
Figura 14: Bloco funcional do circuito PLL.....	41
Figura 15: Sistema elétrico usado no PSIM	43
Figura 16: Tensões de linha, em Volts(V), no sistema.....	44
Figura 17: Correntes de linha, em amperes(A), no sistema.....	44
Figura 18: Correntes, em Amperes(A), de linha no sistema no domínio da frequência	45
Figura 19: Método CIP montado no PSIM	46
Figura 20: Bloco para cálculos da Potências	46
Figura 21: Bloco para cálculos das correntes de compensação	47
Figura 22: Bloco detector de sequência positiva.....	47
Figura 23: Circuito PLL	48
Figura 24: Corrente de linha, em amperes(A), da fase A, no domínio do Tempo(s)	49
Figura 25: Corrente(A) na fase a, no domínio da frequência (Hz)	49
Figura 26: Corrente compensatória, em amperes(A), gerada pelo método CIP no domínio do tempo(s).....	50
Figura 27: Corrente compensatória, em amperes(A), no domínio da frequência (Hz)	50
Figura 28: Corrente Corrigida, em amperes(A), no domínio do tempo(s)	51
Figura 29: Corrente Corrigida, em amperes(A), domínio da frequência(Hz)	51

Figura 30: Corrente compensatória, em amperes(A), gerada pelo método SCC no domínio do tempo(s).....	52
Figura 31: Corrente compensatória, em amperes(A), no domínio da frequência (Hz)	52
Figura 32: Corrente corrigida, em amperes(A), pelo método SCC, no domínio do tempo(s).....	53
Figura 33: Corrente corrigida, em amperes(A), no domínio da frequência	53
Figura 34: DHT da corrente original do sistema calculada pelo PSIM	54
Figura 35: DHT da corrente corrigida pelo Método CIP	54
Figura 36: DHT da corrente corrigida pelo Método CIP	55

SUMÁRIO

Capítulo 1: Introdução.....	11
Capítulo 2: Qualidade de Energia Elétrica	15
2.1 Harmônicos	16
2.1.1 Série e Transformada de Fourier	16
2.1.2 Causadores de Harmônicos e Cargas não-lineares.	18
2.1.3 Domínio do Tempo e da Frequência.....	20
2.2 Sistema Elétrico	21
2.2.1 Consequências dos Harmônicos no sistema elétrico.....	22
2.2.2 Distorção Harmônica Total (DHT).....	24
Capítulo 3: Filtros passivos.....	27
3.1 Filtro Série	28
3.2 Filtro Paralelo ou Shunt.....	28
3.2.1 Filtros Sintonizados.....	28
3.2.2 Filtros Amortecidos	29
Capítulo 4: Filtros Ativos CIP E SCC	31
4.1 Transformada Clarke.....	32
4.2 Teoria P-Q.....	35
4.3 Método Constant Instantaneous Power (CIP)	36
4.4 Método Sinusoidal Current Control (SCC).....	38
4.4.1 Detetor de Tensão fundamental e o Circuito PLL	39
Capítulo 5: Metodologia	42
5.1 Power Electronic Simulations (PSIM).....	42
5.1.1 Características do circuito montado no PSIM	43
5.2 Implementação do Modelo CIP	45
5.3 Implementação do Método SCC	47
Capítulo 6: Resultados e Discussões	49
6.1 Análise do método CIP	50
6.2 Análise do Método SCC	52
6.3 Análise da Distorção Harmônica Total	54
Capítulo 7 Conclusões.....	56
Capítulo 8: Referências	58

Capítulo 1: Introdução

Nos últimos anos, a questão da "Qualidade da Energia Elétrica" tem se tornado cada vez mais importante no contexto elétrico nacional (Ferreira, 2006). A má qualidade da energia pode ter impactos significativos em diversos grupos de consumidores, incluindo residências, comércios e indústrias. Com um maior conhecimento de seus direitos conforme previsto na legislação e devido ao crescente uso de dispositivos altamente sensíveis aos padrões de fornecimento de energia, os consumidores não podem mais ignorar a importância de receber um serviço elétrico que atenda a critérios como segurança e qualidade.

As empresas concessionárias de energia também estão atentas aos problemas relacionados à qualidade da energia (Ferreira, 2006). Elas têm motivações substanciais para atender às expectativas dos consumidores e manter sua confiança, especialmente devido à crescente competição entre as concessionárias.

Além disso, a existência de legislação específica que impõe sanções aos fornecedores que não atendem aos índices estabelecidos tem impulsionado o estudo e a pesquisa em qualidade de energia. O objetivo é melhorar os padrões de fornecimento de energia, garantindo o bom funcionamento dos sistemas elétricos (Ferreira, 2006).

Um dos principais pontos no desenvolvimento dos sistemas de transmissão e distribuição de corrente alternada (CA) no final do século XIX baseou-se na geração de tensão senoidal com frequência constante (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017). A tensão senoidal com frequência constante tornou mais fácil o projeto de transformadores e linhas de transmissão, incluindo linhas de grande distância.

Se a tensão não fosse senoidal, complicações surgiriam no projeto de transformadores, máquinas e linhas de transmissão. Essas complicações certamente teriam prejudicado o desenvolvimento da 'eletrificação generalizada da sociedade humana' (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017). Dentre as principais preocupações quanto a qualidade de energia podemos citar:

- Transitórios: São variações de curta duração na tensão elétrica que podem ser causadas por eventos como chaveamento de cargas, falhas momentâneas ou descargas atmosféricas. Eles podem danificar equipamentos sensíveis e afetar a

qualidade da energia (Gers, 2006). Aqui estão alguns dos principais tipos de transitórios elétricos:

- Transitórios de Comutação: Ocasionalmente pela abertura ou fechamento de interruptores ou disjuntores em um circuito elétrico.
- Transitórios de Energização: Acontecem quando equipamentos elétricos são ligados e inicializam.
- Transitórios de Descarga Atmosférica: Causados por raios que atingem linhas de transmissão ou equipamentos elétricos.
- Transitórios de Manobra: Ocorrem durante a ligação ou desligamento de equipamentos elétricos.
- Transitórios de Falha: Gerados por falhas súbitas, como curtos-circuitos.
- Transitórios de Ressonância: Acontecem quando um sistema elétrico entra em ressonância com uma frequência específica.
- Variações de Tensão: Essas variações podem resultar em desligamentos ou danos a equipamentos (Jang, 2013).
 - Sobretensão: Refere-se a uma elevação temporária da tensão acima do nível nominal na rede elétrica. Isso pode ser causado por comutações de carga, descargas atmosféricas, ou operações de manobra de equipamentos.
 - Subtensão: É o oposto da sobretensão, ocorrendo quando a tensão cai temporariamente abaixo do nível nominal. Isso pode acontecer devido a cargas pesadas, falhas no sistema ou outros eventos.
 - Variação de Tensão de Curta Duração: São quedas momentâneas de tensão que podem ser causadas por curtos-circuitos, falhas no sistema ou operações de comutação.
 - Variações de Tensão de Longa Duração: São variações mais prolongadas na tensão que podem ocorrer devido a falhas graves no sistema, como interrupções prolongadas de energia.
 - Flutuações de Tensão: São variações cíclicas de curto prazo na tensão que podem ser causadas por cargas não lineares, como motores elétricos.
- Variação de Frequência: podem ocorrer devido a flutuações na carga ou

desequilíbrios na geração. Isso afeta a sincronização de dispositivos elétricos sensíveis (Tong, 2017).

- Quedas de Energia: Representam interrupções temporárias no fornecimento de eletricidade e podem ser causadas por falhas no sistema ou eventos externos. Elas resultam em perda de produtividade e interrupção das operações (Rahman 2011).
- Distorção de Forma de Onda: Ocorre quando a tensão ou a corrente elétrica não segue uma forma senoidal pura (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017). Os principais responsáveis pela distorção da forma de onda são:
 - Cargas Não Lineares: Um dos principais causadores de distorção são as cargas não lineares, como retificadores, inversores, fontes chaveadas e dispositivos eletrônicos modernos. Essas cargas não têm uma relação linear entre a tensão e a corrente, o que introduz harmônicos na rede elétrica.
 - Harmônicos: São componentes de frequência múltipla da frequência fundamental (60 Hz em sistemas dos Estados Unidos, 50 Hz em muitos outros países) que são adicionados à forma de onda da tensão ou corrente. Eles são causados principalmente por cargas não lineares.
 - Fornecimento de Energia a Partir de Fontes Variáveis: Fontes de energia variáveis, como sistemas de energia solar e eólica, podem introduzir variações na forma de onda da tensão quando sua produção flutua devido a condições climáticas.

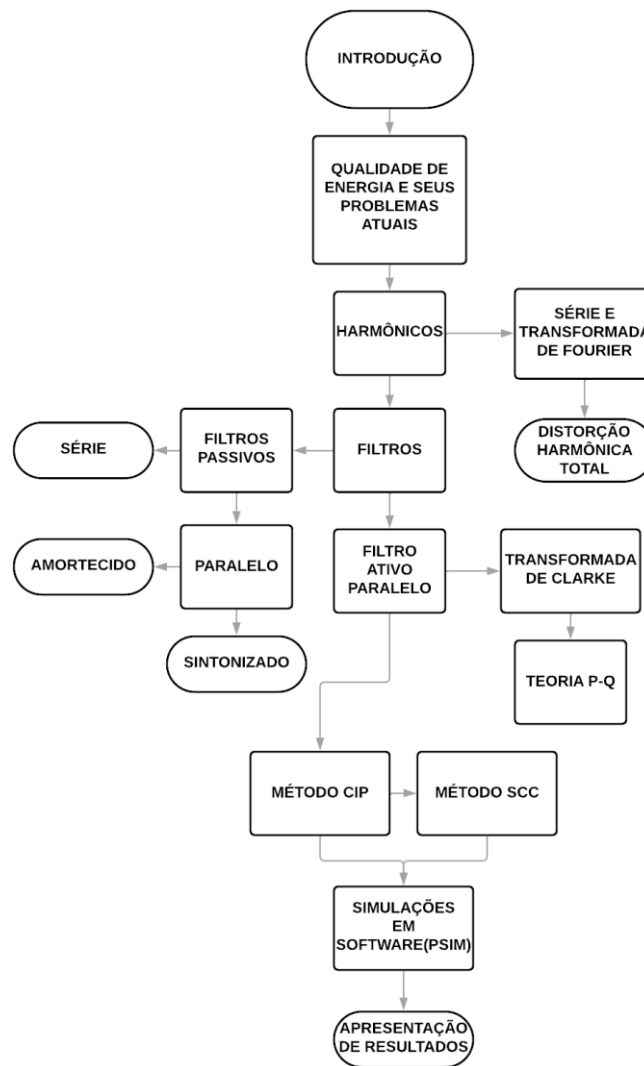
A partir dos problemas mencionados anteriormente, o foco deste trabalho será o estudo dos harmônicos e a apresentação de métodos modernos para sua mitigação no sistema elétrico usando filtros ativos. No próximo capítulo, 'Qualidade de Energia Elétrica', serão abordados os conceitos relacionados aos harmônicos e seus impactos no sistema elétrico.

Nos capítulos subsequentes, serão apresentadas abordagens para lidar com esses harmônicos, incluindo o uso de filtros passivos e ativos. O destaque principal será o Capítulo 4, que se concentra nos filtros ativos, o principal objeto de estudo deste

trabalho, lá serão apresentados os métodos Constant Instantaneous Power (CIP) e o Sinusoidal Current Control(SCC), bem como as teorias que os sustentam. O Capítulo 5 descreverá a implementação dos métodos de filtragem ativa apresentados no Capítulo 4 em um software para simulação. Por fim, o Capítulo 6 apresentará os resultados obtidos nesta pesquisa.

A figura 1 apresenta como serão os principais tópicos apresentados neste trabalho através de um fluxograma.

Figura 1: Fluxograma do trabalho



Fonte: Autoria Própria

Capítulo 2: Qualidade de Energia Elétrica

A qualidade de energia elétrica é uma preocupação perene que remonta aos primórdios da eletrificação no final do século XIX, quando a tecnologia começou a iluminar nossas cidades. Naquela época, o fornecimento de eletricidade era caracterizado por flutuações de tensão, interrupções frequentes e distorções na forma de onda, resultando em equipamentos frágeis e operações instáveis (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

A importância da qualidade de energia na sociedade moderna é mais evidente do que nunca. Nossas vidas cotidianas dependem fortemente da eletricidade, impulsionando dispositivos eletrônicos sensíveis, sistemas de comunicação e processos industriais essenciais. Interrupções momentâneas ou flutuações de tensão podem resultar em falhas críticas em sistemas de computadores e dispositivos médicos (Arrilaga, WATSON, 2004).

Para compreender a qualidade de energia, é fundamental observar os princípios subjacentes que a regem. Parâmetros como tensão, frequência, distorção harmônica e estabilidade desempenham papéis cruciais na avaliação da qualidade de energia (IEEE Std 1159-2019). Normas rigorosas, como a IEEE 519, estabelecem critérios para limitar distorções harmônicas em sistemas elétricos (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014)

Em um mundo cada vez mais impulsionado pela eletricidade, as distorções harmônicas tornaram-se um dos principais problemas que afetam a qualidade da energia elétrica. Com a proliferação de dispositivos eletrônicos não lineares, como inversores, fontes de alimentação comutadas e eletrônicos de consumo, a presença de harmônicos nas formas de onda de tensão e corrente se tornou uma preocupação crítica (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

A correção de harmônicos é uma área vital na melhoria da qualidade de energia, e filtros ativos têm desempenhado um papel significativo nesse contexto. Eles são dispositivos eletrônicos avançados que podem mitigar eficazmente as distorções harmônicas, gerando correntes de compensação que cancelam os harmônicos indesejados (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

Em resumo, a qualidade de energia é uma preocupação que transcende gerações,

desempenhando um papel cada vez mais importante em nossa sociedade altamente eletrificada. Compreender seus princípios fundamentais, como os descritos por normas do IEEE, é crucial para garantir um suprimento elétrico confiável em um mundo onde a eletricidade é essencial.

2.1 Harmônicos

A distorção harmônica é um fenômeno bem conhecido e estudado nos sistemas elétricos, pois descreve a deformação das ondas senoidais de tensão e corrente fornecidas por usinas de geração de energia (Arrillaga, WATSON, 2004).

Essa deformação ocorre quando a forma de onda de tensão ou corrente não é mais uma senoide pura, mas contém componentes em múltiplos inteiros da frequência fundamental da rede elétrica, que, no caso do sistema brasileiro, é de 60Hz (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014).

2.1.1 Série e Transformada de Fourier

Uma forma eficaz de analisar e quantificar os harmônicos é por meio da série de Fourier, que permite decompor um sinal em suas componentes de frequência. A Transformada de Fourier, introduzida por Jean-Baptiste Joseph Fourier no século XIX, é fundamental para entender como as formas de onda podem ser decompostas em suas frequências constituintes. Isso é aplicável tanto a sistemas contínuos quanto discretos e é amplamente utilizado em análise de sinais e processamento de dados, incluindo a análise de harmônicos (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

A Série e Transformada de Fourier são ferramentas fundamentais na análise de sinais e sistemas, usadas para decompor um sinal complexo no domínio do tempo em suas componentes de frequência. Ela permite analisar a contribuição de diferentes frequências em um sinal e é amplamente utilizada em campos como processamento de sinais, análise de espectro, comunicações, entre outros (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

Matematicamente, a Transformada de Fourier de um sinal $x(t)$ é representada como $X(f)$, onde f é a frequência, e é definida pela seguinte equação:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (2.1)$$

Nesta equação, $X(f)$ é a representação do sinal no domínio da frequência, $x(t)$ é o sinal no domínio do tempo, e a integral é realizada em todo o domínio do tempo.

A Transformada de Fourier nos fornece informações valiosas sobre a distribuição espectral de um sinal, permitindo-nos identificar as frequências componentes e suas respectivas amplitudes e fases (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

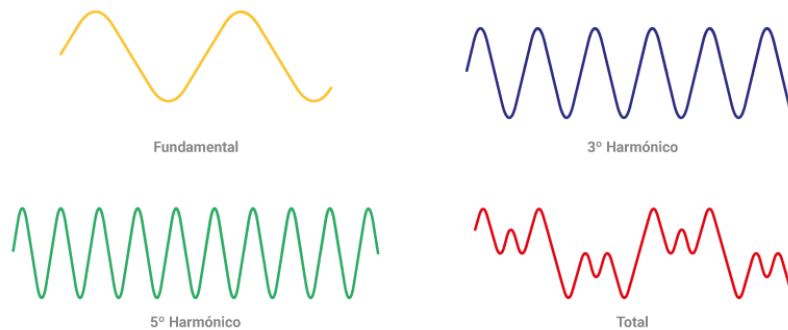
Através da equação apresentada anteriormente é possível chegar na série de Fourier, que é uma técnica matemática usada para representar funções periódicas como uma soma ponderada de funções seno e cosseno. Ela desempenha um papel fundamental na análise de sinais periódicos, como ondas, fornecendo uma maneira de descrever esses sinais de maneira mais simples e compreensível (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

A ideia central por trás da Série de Fourier é que muitas funções periódicas podem ser aproximadas pela soma infinita de senos e cossenos com diferentes frequências. Essas funções seno e cosseno são chamadas de "harmonias" ou "componentes harmônicas." A fórmula geral para a Série de Fourier de uma função periódica $f(x)$ é a seguinte:

$$i(t) = i_0 + i_1 \sin wt + i_2 \sin 2wt + i_3 \sin 3wt + \dots + i_n \sin nwt \quad (2.2)$$

A Figura 2 ilustra a decomposição de uma onda de corrente ou tensão harmônica. Na cor amarela, temos a frequência fundamental, que no Brasil é de 60 Hz. Em azul e verde, representamos as frequências do 3º e 5º harmônicos, correspondendo a 180 Hz e 300 Hz, respectivamente.

Figura 2: Harmônicos



Fonte: PowerControl(2023)

A região em vermelho representa a corrente distorcida, que é o resultado da soma da corrente fundamental com duas componentes harmônicas. Essa figura nos ajuda a compreender como a corrente ou tensão em um sistema pode ser decomposta em suas diferentes componentes harmônicas, revelando a presença e o impacto dos harmônicos no sinal original.

Com uma decomposição da figura 2 na série de Fourier seria possível chegar na seguinte equação:

$$i(t) = i_0 + i_1 \sin 60t + i_3 \sin 180t + i_5 \sin 300t \quad (2.3)$$

2.1.2 Causadores de Harmônicos e Cargas não-lineares.

As causas dos harmônicos podem ser classificadas em causas antigas e modernas. As causas antigas remontam a dispositivos magnéticos, como transformadores que operavam em condições não lineares de saturação, bem como lâmpadas a arco e retificadores (Arrillaga, WATSON, 2004). Já as causas modernas estão intimamente relacionadas ao avanço da eletrônica de potência, que deu origem a uma ampla gama de dispositivos eletrônicos não lineares.

Dentre os principais causadores de distorções harmônicas modernos podemos citar:

- Inversores PWM: Inversores de modulação por largura de pulso usados em sistemas fotovoltaicos e fontes de energia renovável.

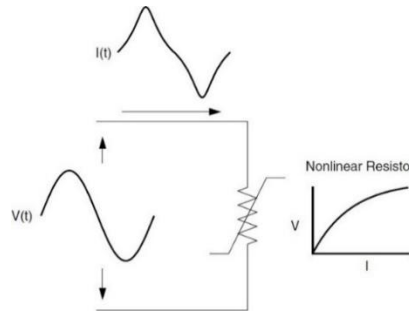
- Equipamentos de Soldagem Inversores: Soldagem TIG e MIG com inversores.
- Retificadores de Freio Dinâmico: Usados em máquinas industriais.
- Conversores de Potência em Veículos Elétricos: Inversores e conversores usados em veículos elétricos, como controladores de tração e carregadores.
- Cargas Eletrônicas de Soldagem de Arco: Usadas em aplicações industriais, as quais, quando não corretamente filtradas.
- Retificadores de Alta Potência em Telecomunicações: Fontes de alimentação em sistemas de telecomunicações.
- Motores de Velocidade Variável (VFDs): Usados para controle de motores, introduzem distorções harmônicas nos sistemas elétricos.
- Fontes de Alimentação de Comutação (SMPS): Fontes de alimentação chaveadas usadas em eletrônicos de consumo.
- Equipamentos de Informática e Centros de Dados: Fontes de alimentação de comutação em computadores, servidores e centros de dados podem ser fontes de distorções harmônicas

Outra consideração importante ao abordar os harmônicos é a diferença entre cargas lineares e não lineares. Cargas lineares respondem a um sinal elétrico de frequência única, como tensão e corrente senoidais, com uma simples alteração na amplitude ou no deslocamento de fase. Por exemplo, motores de indução alimentados com tensão senoidal têm uma corrente que segue a mesma forma de onda da tensão, apenas com um desfasamento angular (Rahman, 2011).

No entanto, mesmo em máquinas síncronas, onde as harmônicas de terceira e quinta ordem predominam, a corrente fundamental é muito maior do que as harmônicas absorvidas, permitindo considerá-las como cargas lineares.

Já cargas não lineares são aquelas que, alimentadas com um sinal de frequência única, produzem uma corrente ou tensão não senoidal, com múltiplas frequências. Essas cargas incluem eletrônicos sensíveis, como computadores e lâmpadas economizadoras de energia (Rahman, 2011).

Figura 3: Distorção de corrente causada por resistência não linear



Fonte: Dugan, 2004.

É importante destacar que as cargas eletrônicas sensíveis têm uma resposta crítica à distorção harmônica, muitas vezes apresentando passagens por zero repetidas vezes. Além disso, a eficiência dos retificadores pode ser reduzida devido à diminuição do pico da forma de onda, e o aumento do pico de tensão pode levar ao desgaste da isolamento (Fitzgerald, 2008).

Em instalações monofásicas grandes, como escritórios, o terceiro harmônico é muito presente devido ao grande uso de computadores e lâmpadas econômicas, o que pode sobrecarregar o neutro se não for projetado para lidar com essas correntes (Boylestad, 2003).

A presença desses dispositivos eletrônicos modernos é uma das principais fontes de distorção harmônica nos sistemas elétricos atuais (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014). Dispositivos não lineares como esses têm uma relação não linear entre tensão e corrente, o que significa que a corrente que eles consomem não é mais diretamente proporcional à tensão fornecida. Isso resulta na injeção de harmônicos na rede elétrica, distorcendo as formas de onda.

2.1.3 Domínio do Tempo e da Frequência

A análise e a mitigação de harmônicos requerem a identificação das frequências e amplitudes dos harmônicos presentes em um sistema específico. Geralmente, essa tarefa é realizada por meio de estudos nos domínios do tempo e da frequência (Rocha, 2018).

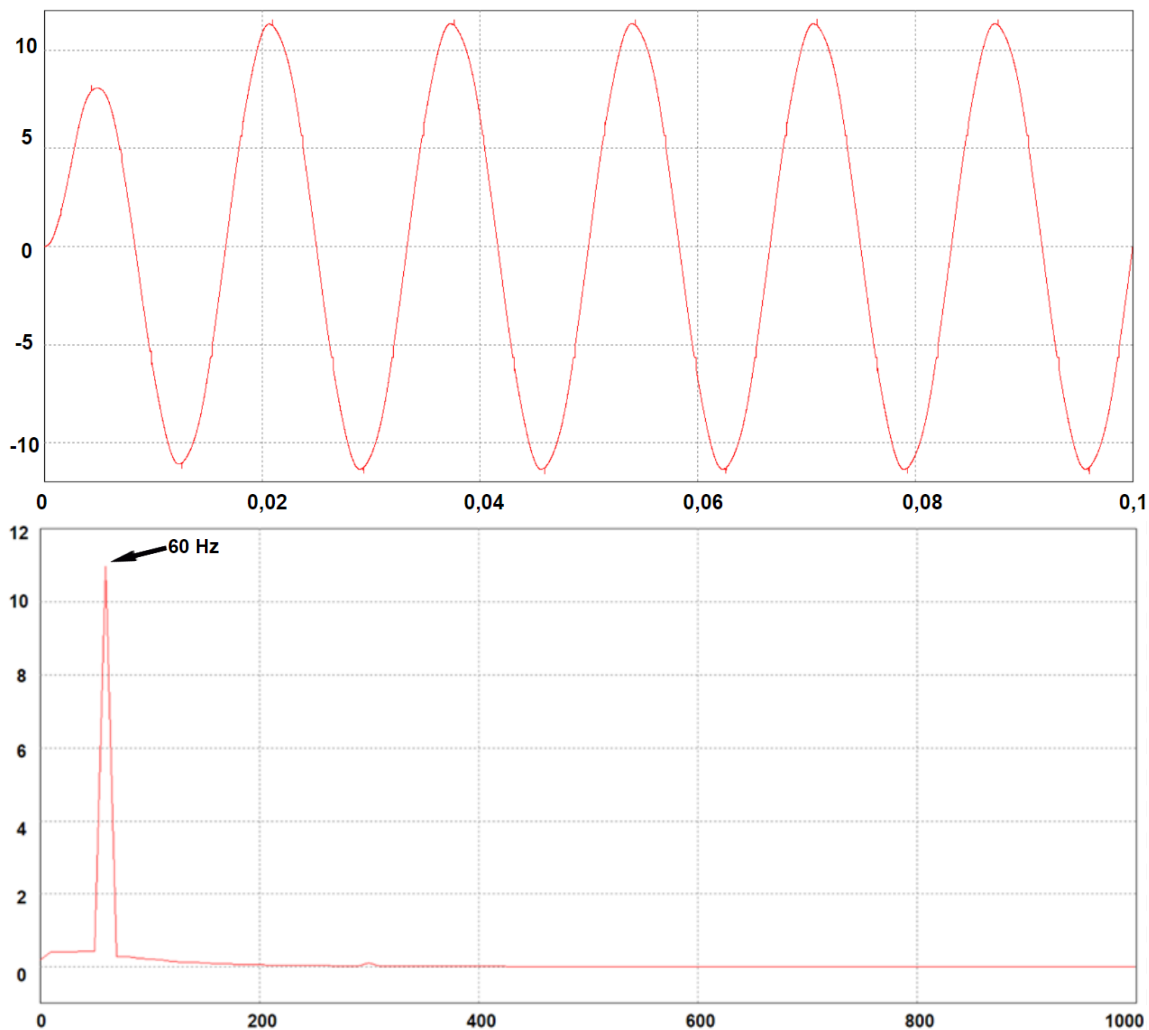
No estudo no domínio do tempo, o sistema é minuciosamente modelado para obter formas de onda reais, enquanto, no estudo no domínio da frequência, o sistema é

analisado separadamente para cada componente de frequência (Rahman, 2011).

A Figura 4 exemplifica a representação da mesma corrente nos domínios do tempo e da frequência. O gráfico superior mostra a corrente na forma de uma onda senoidal no domínio do tempo, enquanto o gráfico inferior exibe um pico de corrente na frequência de 60Hz, que é, neste caso, a frequência fundamental da corrente.

A análise no domínio da frequência permite uma melhor visualização dos harmônicos que afetam a corrente, possibilitando uma análise mais precisa. Além disso, oferece a oportunidade de aplicar métodos mais otimizados no tratamento da corrente.

Figura 4: Corrente(A) no domínio do tempo(s) e frequência (Hz)



Fonte: Autoria própria

2.2 Sistema Elétrico

O sistema elétrico é uma infraestrutura complexa e crucial que desempenha um

papel fundamental na sociedade moderna. É responsável por gerar, transmitir e distribuir eletricidade para alimentar uma ampla variedade de dispositivos e aplicações em residências, indústrias e estabelecimentos comerciais. Para entender plenamente o sistema elétrico, é essencial compreender os conceitos subjacentes, bem como os princípios que o regem (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014).

No cerne do sistema elétrico estão os conceitos de potência ativa e potência reativa. A potência ativa, medida em quilowatts (kW), representa a parcela da energia elétrica que realiza trabalho útil, alimentando motores, dispositivos eletrônicos e sistemas industriais. É o que impulsiona o funcionamento eficaz de todos os equipamentos conectados à rede elétrica. Por outro lado, a potência reativa, medida em quilovolt-ampere reativo (kVAR), é necessária para manter o fluxo de energia no sistema elétrico, mas não realiza trabalho útil (Fitzgerald, 2008). Ela é essencial para manter a tensão e a estabilidade do sistema.

O sistema elétrico apresenta uma topologia variada que inclui centrais de geração, subestações, redes de transmissão e distribuição, além de conexões em residências e empresas. Essa estrutura complexa permite que a eletricidade seja gerada em usinas de diferentes tipos, incluindo termelétricas, hidrelétricas, nucleares e de fontes renováveis, como a solar e eólica. A eletricidade é então transmitida por meio de linhas de alta tensão para subestações, onde é transformada em tensões adequadas para distribuição local. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014).

2.2.1 Consequências dos Harmônicos no sistema elétrico

É importante observar que a distorção harmônica pode ter diversos efeitos prejudiciais em sistemas elétricos e dispositivos conectados a eles (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014). Aqui estão alguns dos principais efeitos dos harmônicos no sistema elétrico:

- **Aquecimento Excessivo:** Os harmônicos podem causar aquecimento excessivo em componentes do sistema, como transformadores, cabos e equipamentos. Esse superaquecimento pode reduzir a vida útil dos componentes e levar a falhas prematuras.
- **Redução da Eficiência:** Dispositivos eletroeletrônicos, como motores e

transformadores, podem ter sua eficiência reduzida devido à presença de harmônicos na rede. Isso pode resultar em maior consumo de energia e custos operacionais mais elevados.

- **Mau Funcionamento de Equipamentos Sensíveis:** Harmônicos podem causar mau funcionamento de equipamentos sensíveis, como computadores, equipamentos de laboratório e dispositivos médicos. Isso pode resultar em perda de dados, interrupções operacionais e danos aos equipamentos.
- **Ressonância do Sistema:** A presença de harmônicos pode levar a ressonâncias no sistema elétrico, aumentando a distorção harmônica e causando instabilidade. Esse fenômeno pode resultar em desligamentos inesperados e interrupções no fornecimento de energia.
- **Problemas de Qualidade da Energia:** Harmônicos afetam a qualidade da energia elétrica, levando a oscilações na tensão e na frequência. Isso pode impactar negativamente o funcionamento de dispositivos sensíveis e sistemas críticos.
- **Maior Desgaste:** A presença de harmônicos pode resultar em maior desgaste de equipamentos elétricos, levando a custos adicionais de manutenção e substituição.
- **Aumento da Corrente:** Os harmônicos podem aumentar a corrente nas redes elétricas, levando a sobrecargas em condutores e transformadores.

Além disso, a distorção harmônica pode causar perdas de energia devido ao aumento das perdas de resistência em componentes, como cabos e transformadores, resultando em maior consumo de energia e custos adicionais para os consumidores (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014). A qualidade da energia elétrica é um aspecto crítico para a operação confiável e eficiente dos sistemas elétricos modernos.

Melhorias no projeto de redes elétricas e o uso de equipamentos mais eficientes e menos distorcidos contribuem para a mitigação dos harmônicos (Fitzgerald,D, 2008). Normas e regulamentações, como as estabelecidas pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014), desempenham um papel importante na definição de limites

aceitáveis para a distorção harmônica e na orientação sobre como lidar com esse problema (Dugan, 2004).

Para determinar a conformidade com os padrões de qualidade de energia elétrica, como os definidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e normas internacionais como a IEC e o IEEE, é essencial realizar análises precisas de harmônicos (Fitzgerald, 2008). Esses padrões estabelecem limites para a distorção harmônica permitida nos sistemas elétricos, garantindo uma qualidade adequada da energia fornecida aos consumidores (Rocha, 2018)..

Existem várias normas e regulamentações relacionadas à distorção harmônica, incluindo aquelas estabelecidas pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) e normas internacionais, como as da IEC e do IEEE (Dugan, 2004). Essas normas definem limites aceitáveis para a distorção harmônica na rede elétrica e orientam como lidar com esse problema (Rahman, 2011).

Um desafio significativo na análise harmônica é determinar o nível "ideal" de harmônicos na rede. Muitos estudos estão sendo realizados para tornar esses parâmetros mais tangíveis, especialmente em relação aos conversores estáticos de potência que utilizam controle PWM (Modulação por Largura de Pulso) (Rocha, 2018). Esses conversores empregam chaves semicondutoras para gerar formas de onda anti-harmônicas, que anulam as distorções harmônicas presentes (Fitzgerald, 2008).

A compreensão das causas, efeitos e técnicas de mitigação dos harmônicos é essencial para garantir a operação eficiente e confiável dos sistemas elétricos modernos (Dugan, 2004). Além disso, a conformidade com as normas e regulamentações desempenha um papel fundamental na minimização dos efeitos adversos dos harmônicos (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014).

2.2.2 Distorção Harmônica Total (DHT)

A Distorção Harmônica Total (THD - Total Harmonic Distortion) é um parâmetro importante para avaliar a qualidade de um sinal elétrico, particularmente em sistemas de energia elétrica e eletrônica. Ela mede a quantidade de distorção harmônica presente em relação à componente fundamental do sinal. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014)

A DHT pode ser definida pelas equações (2.4) e (2.5), onde é calculada como a raiz quadrada da soma dos quadrados das amplitudes dos harmônicos dividida pela amplitude do componente fundamental representadas pelas componentes V_1 e I_1 :

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum V_H^2}}{V_1} \quad (2.4)$$

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum I_H^2}}{I_1} \quad (2.5)$$

O IEEE(Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos), uma organização de padronização globalmente reconhecida na área de engenharia elétrica e eletrônica, desenvolveu padrões para especificar e limitar a THD em diferentes aplicações. Esses padrões garantem o desempenho adequado dos dispositivos e sistemas elétricos, minimizando os efeitos indesejáveis da distorção harmônica. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014)

Um dos padrões relevantes é o IEEE 519-2014, intitulado "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems". Este padrão estabelece critérios para limitar a THD em sistemas de energia elétrica, a fim de evitar problemas como aquecimento excessivo de equipamentos, vibrações, interferências e perda de eficiência energética.

O padrão mencionado assim define limites específicos de THD para diferentes tipos de instalações elétricas, como residenciais, comerciais e industriais. Esses limites são baseados na capacidade de mitigação de harmônicos dos equipamentos e na sensibilidade das cargas conectadas ao sistema elétrico.

Os limites para distorção harmônica total (THD) estabelecidos pela IEEE podem variar dependendo do tipo de instalação elétrica. Aqui estão alguns exemplos de limites de THD recomendados pelo padrão IEEE 519-2014, para diferentes tipos de sistemas:

Tabela 1: Limites de THD recomendados

Tipo de Sistema	Tensão	Corrente
Residencial	THD ≤ 5%	THD ≤ 8%
Comercial	THD ≤ 5%	THD ≤ 8%
Industrial	THD ≤ 5%	THD ≤ 5%

Fonte: Autoria Própria

É importante destacar que esses limites são apenas exemplos e podem variar em diferentes normas ou regulamentações específicas de cada país ou região. Além disso, em algumas aplicações críticas, como hospitais ou indústrias sensíveis, podem ser estabelecidos limites mais rigorosos para garantir um funcionamento confiável dos equipamentos. (Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014)

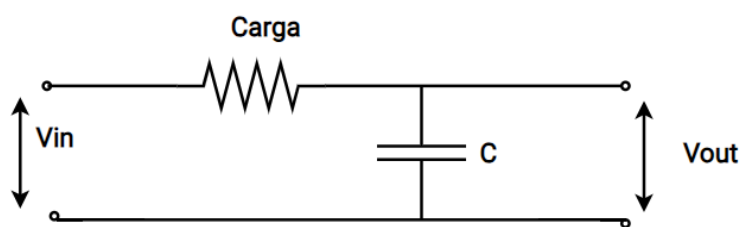
Capítulo 3: Filtros passivos

Para reduzir o conteúdo harmônico em um sistema elétrico contaminado com fontes harmônicas, utiliza-se filtragem de tensão e/ou corrente. Os filtros podem ser passivos ou ativos. Os filtros passivos são conexões fixas em série / paralelo de capacitores, indutores e resistores dimensionados para bloquear ou desviar componentes indesejados, além disso, devido as características construtivas dos filtros passivos, se projetados devidamente, eles podem elevar o fator de potência. (Pomilio e Deckmann, 2009).

Um circuito eletrônico composto por um elemento e um elemento capacitivo, é chamado de Circuito LC ou de Célula LC. Esses dois componentes são combinados em série ou paralelo para criar um circuito ressonante que é capaz de filtrar ou sintonizar frequências específicas em um sistema elétrico.

As células LC série são ajustadas para operar nas frequências próximas daquelas que se pretende eliminar, geralmente correspondentes aos componentes de ordem mais baixa. Para as frequências mais altas, é comum utilizar um capacitor simples como um filtro passa-alta (Pomilio e Deckmann, 2009), a Figura 5 exemplifica como é a disposição de um Capacito simples em um sistema elétrico.

Figura 5: Representação de um filtro capacitivo



Fonte: Autoria Própria

Os filtros passivos são amplamente utilizados devido à sua facilidade de construção e custos mais baixos. Existem dois tipos de esquemas para esse tipo de filtro, conhecidos como série e paralelo, sendo o esquema paralelo o mais comum.

3.1 Filtro Série

O filtro série atua filtrando as frequências indesejadas, bloqueando sua passagem para um equipamento específico ou evitando sua propagação na rede elétrica. No entanto, devido à forma como é instalado, todo o circuito é submetido à passagem da corrente, o que encarece os componentes e torna seu uso impopular (Wagner, 2015). Esse tipo de filtro é construído utilizando um circuito paralelo composto por um indutor e um capacitor.

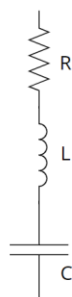
3.2 Filtro Paralelo ou Shunt

Por outro lado, o filtro harmônico shunt desvia as correntes harmônicas do sistema para o sistema de aterramento, melhorando assim a qualidade da energia elétrica nos circuitos de carga. Isso traz benefícios tanto para a instalação elétrica quanto para os equipamentos conectados ao sistema, reduzindo os danos causados pela circulação das correntes harmônicas. O princípio de funcionamento desse filtro permite apenas a passagem das correntes harmônicas projetadas, tornando sua implementação viável. Os filtros shunt são classificados como sintonizados e amortecidos (Wagner, 2015).

3.2.1 Filtros Sintonizados

Os filtros sintonizados são amplamente conhecidos como filtros ressonantes shunt e se destacam por serem filtros de passagem de banda, o que significa que reduzem a impedância para a frequência desejada a fim de desviar as correntes indesejadas para terra. Eles são os filtros passivos mais comumente utilizados. (Wagner, 2015)

Figura 6: Representação de como é um Filtro passivo de Sintonia simples



Fonte: Autoria Própria

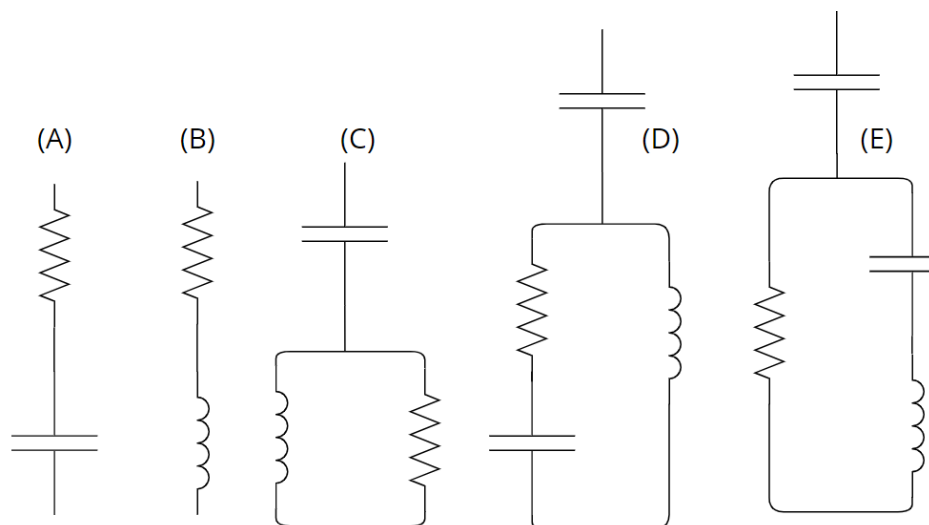
Esses filtros são amplamente empregados nas frequências harmônicas que apresentam amplitudes mais altas, abrangendo principalmente as harmônicas mais baixas, como a 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª. Uma de suas características é contribuir para a correção do fator de potência, pois, para frequências abaixo da ressonância, a impedância do filtro se comporta de maneira capacitiva (Wagner, 2015).

3.2.2 Filtros Amortecidos

Os filtros amortecidos são compostos por capacitores, indutores e resistores, dispostos de diferentes maneiras, e se caracterizam por apresentarem baixa impedância para frequências acima de uma determinada frequência de corte. Na frequência fundamental, eles se comportam como capacitores (Wagner, 2015).

Existem diferentes classificações para os filtros amortecidos, a Figura 7 exemplifica essas classificações, sendo (A) e (B) filtros de 1ª ordem, (C) de 2ª ordem, (D) de 3ª ordem e (E) o filtro tipo "C".

Figura 7: Representação dos tipos de filtros passivos



Fonte: Autoria Própria

Os filtros de 1ª ordem têm perdas de energia significativas na frequência fundamental e exigem capacitores robustos, o que os torna menos utilizados na prática. No entanto, eles são estudados como filtros passa-baixa ou passa-alta.

Os filtros de 2ª ordem são amplamente utilizados na indústria devido ao seu melhor desempenho de filtragem em comparação com os filtros de 3ª ordem. No entanto, eles

também apresentam perdas mais elevadas. Esses filtros são compostos principalmente por um capacitor em série com um reator e um resistor em paralelo, conforme ilustrado na Figura 2. São comumente aplicados para a correção das harmônicas 7^a ou 11^a, bem como todas as harmônicas acima delas. Possuem um resistor ajustável para atenuar possíveis ressonâncias paralelas (Wagner, 2015).

Os filtros de 3^a ordem têm menos perdas na frequência fundamental em comparação com os filtros de 2^a ordem. São utilizados em circuitos de alta potência. Sua construção é muito semelhante à do filtro de 2^a ordem, com a adição de um banco de capacitores em série com o resistor, o que resulta em uma redução das perdas na frequência fundamental (Wagner, 2015). Uma característica desse filtro é a capacidade de ajustar o banco de capacitores, localizado em paralelo ao resistor, para reduzir a impedância na frequência de ressonância paralela.

O filtro tipo C apresenta a maior redução de perdas na frequência fundamental em comparação com todos os outros filtros amortecidos e possui várias aplicações industriais. Seu desempenho de filtragem está entre os filtros de 2^a e 3^a ordem. Uma de suas principais características é a maior suscetibilidade a variações na frequência fundamental e nos valores dos componentes (Wagner, 2015).

Capítulo 4: Filtros Ativos CIP E SCC

O conceito de filtragem ativa shunt foi introduzido pela primeira vez por Gyugyi e Strycula em 1976 (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017). Hoje em dia, um filtro ativo shunt não é um sonho, mas uma realidade, e muitos filtros ativos shunt estão em operação comercial em todo o mundo. Seus controladores determinam em tempo real a referência de corrente de compensação e forçam um conversor eletrônico a sintetizá-la com precisão.

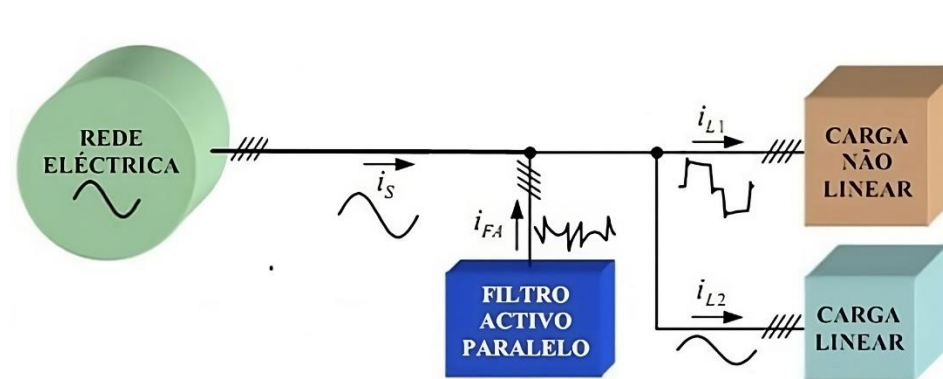
Dessa forma, a filtragem ativa pode ser seletiva e adaptativa. Em outras palavras, um filtro ativo shunt pode compensar apenas a corrente harmônica de uma carga não linear selecionada e pode acompanhar continuamente as alterações em seu conteúdo harmônico (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

Os filtros ativos shunt geralmente consistem em dois blocos principais distintos:

- O conversor de modulação por largura de pulso (PWM) (processamento de energia) e
- O controlador do filtro ativo (processamento de sinal)

O conversor PWM é responsável pelo processamento de energia na síntese da corrente de compensação que deve ser retirada do sistema de energia. O controlador do filtro ativo é responsável pelo processamento de sinal ao determinar em tempo real as referências instantâneas da corrente de compensação, que são continuamente enviadas para o conversor PWM (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

Figura 8: Exemplificação de como é o funcionamento de um filtro ativo



Fonte: Franco, 2011.

A razão é que a função principal de um filtro ativo shunt é se comportar como um compensador. Em outras palavras, a energia média trocada entre o filtro ativo e o sistema de energia deve ser zero. Além disso, o controlador do filtro ativo deve ser projetado para manter constante a tensão média em corrente contínua do VSC ou a corrente média em corrente contínua do CSC, e deve forçar o sistema de energia a suprir as perdas no conversor de energia (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

Os conversores PWM geram harmônicas indesejáveis de corrente em torno da frequência de comutação e seus múltiplos. Se a frequência de comutação do conversor PWM for suficientemente alta, essas harmônicas de corrente indesejáveis podem ser facilmente filtradas usando pequenos filtros passivos de alta frequência. Idealmente, as harmônicas de corrente da frequência de comutação são totalmente eliminadas,

O algoritmo de controle implementado no controlador do filtro ativo shunt determina as características de compensação do filtro ativo shunt. Existem várias maneiras de projetar um algoritmo de controle para filtragem ativa.

4.1 Transformada Clarke

Neste capítulo, abordaremos o estudo da Transformada de Clarke, também conhecida como Transformação Trifásica-Bifásica ou Transformação $\alpha\beta 0$. Esse estudo surge da necessidade de simplificar os modelos matemáticos da máquina de indução trifásica.

A Transformação $\alpha\beta 0$ é uma conversão algébrica de tensões ou correntes trifásicas em uma referência bifásica. Fisicamente, ela transforma a máquina de indução trifásica simétrica em uma máquina de indução bifásica simétrica. Um detalhe interessante é que a alimentação (correntes ou tensões) pode ser assimétrica e não senoidal, desde que a máquina seja fisicamente simétrica (Vilefort, 2012).

Essa transformação consiste em converter as grandezas trifásicas em componentes bifásicos $\alpha\beta 0$. O componente α representa a média das grandezas trifásicas, enquanto o componente β representa a diferença entre elas. Já o componente $\beta 0$, também chamado de componente zero ou neutro, indica a assimetria do sistema (Vilefort, 2012).

A principal vantagem da Transformada de Clarke é simplificar a análise e o controle

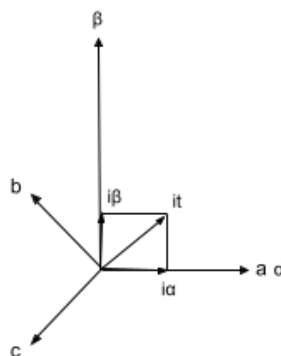
de sistemas trifásicos, permitindo o uso de técnicas de processamento de sinais bidimensionais já estabelecidas e amplamente utilizadas. Isso facilita o projeto e a implementação de algoritmos de controle e sistemas de compensação em sistemas elétricos complexos (Vilefort, 2012).

Além disso, a Transformada de Clarke é útil para estudar transientes em transformadores simétricos e reatores trifásicos. Ela possibilita uma representação mais simples e eficiente desses dispositivos durante a análise de eventos transitórios, contribuindo para uma compreensão e projeto aprimorados de sistemas de energia. (Vilefort, 2012).

Em resumo, a Transformada de Clarke é uma ferramenta importante para simplificar a análise e o controle de sistemas elétricos trifásicos. Ao converter grandezas trifásicas em componentes bifásicos, ela facilita o processamento de sinais e o projeto de sistemas de potência mais eficientes e confiáveis.

A figura 9 mostra que é uma combinação das componentes vetoriais trifásicas a , b e c . A soma resultante dessas componentes é decomposta em componentes estáticas α e β , transformando assim uma grandeza que antes era trifásica em uma equivalente bifásica.

Figura 9: Componentes vetoriais trifásicas e Bifásicas da transformada Clarke:



Fonte: Autoria Própria

A fim de efetuar essa modificação, é empregada uma matriz de transformação $T_{\alpha\beta 0}$ (4.1).

$$T_{\alpha\beta 0} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

A fim de permitir a reversão dessa transformação e restaurar as componentes bifásicas para a componente original, é necessária a existência de uma componente 0. A matriz inversa de Clarke é representada na equação (4.2).

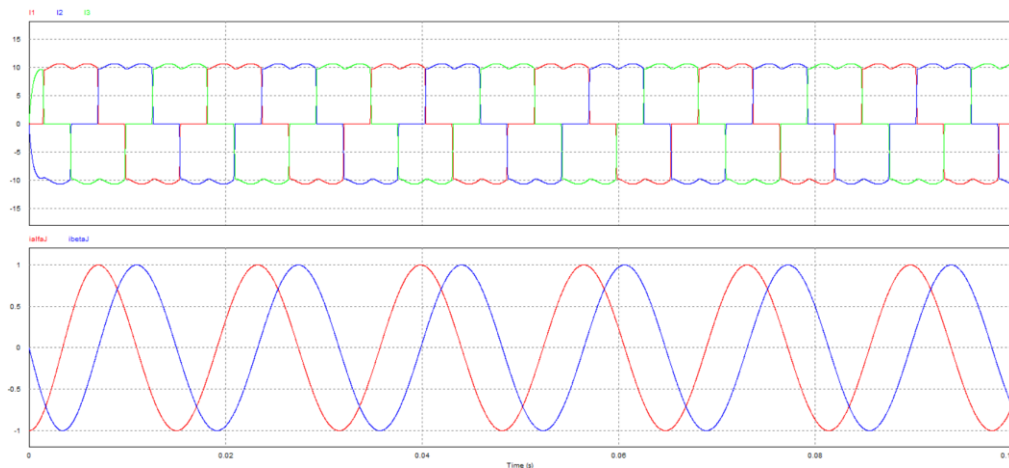
$$T_{0\alpha\beta}^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

E para fazer a transformação é necessário usa a equação (4.3).

$$v_{\alpha\beta 0} = [T_{\alpha\beta 0}]v_{abc} \quad (4.4)$$

A figura 10 mostra dois gráficos, o gráfico superior mostra as tensões trifásicas em fase perfeita, enquanto o gráfico inferior mostra as mesmas tensões após passarem pela transformada de Clarke, mesmo apresentando amplitudes diferentes, ainda estão em fase.

Figura 10: Componentes vetoriais trifásicas e Bifásicas da transformada Clarke no domínio do tempo



Fonte: Autoria Própria

4.2 Teoria P-Q

A teoria p-q é definida em sistemas trifásicos com ou sem um condutor neutro. Três potências instantâneas, a potência instantânea de sequência zero, a potência real instantânea e a potência imaginária instantânea, são definidas a partir das tensões de fase instantâneas e das correntes de linha nos eixos $\alpha\beta 0$ (Vilefort, 2012).

A teoria p-q é fundamentada em um conjunto de valores de potência instantânea definidos no domínio temporal. Não há restrições quanto à forma de onda da corrente e da tensão, o que possibilita a aplicação dessa teoria em sistemas trifásicos com ou sem a presença de um condutor neutro, tanto no estado estacionário quanto no estado transitório (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

Não há componentes de corrente de sequência zero em sistemas trifásicos com três fios. Nesse caso, apenas as potências instantâneas definidas nos eixos $\alpha\beta$ existem, pois, o produto entre as componentes de sequência zero é sempre zero. Portanto, em sistemas trifásicos com três fios, a potência real instantânea p representa o fluxo total de energia por unidade de tempo em termos de componentes $\alpha\beta$ (Vilefort, 2012).

Uma outra maneira de introduzir a teoria p-q para sistemas trifásicos com três fios é utilizar os vetores instantâneos de tensão e corrente. Os vetores podem ser definidos como:

$$e = v_{\alpha} + jv_{\beta} \quad (4.5)$$

$$i = i_{\alpha} + ji_{\beta} \quad (4.6)$$

O conceito convencional de potência complexa utiliza um fasor de tensão e o conjugado de um fasor de corrente.

Uma nova definição de potência complexa instantânea é possível ao utilizar os vetores instantâneos de tensão e corrente. A potência complexa instantânea s é definida como o produto do vetor de tensão e o conjugado do vetor de corrente i^* , apresentados na forma de números complexos: (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

$$s = e * i^* \quad (4.7)$$

Substituindo 4.5 e 4.6 em 4.7 temos:

$$s = (v\alpha + jv\beta)(i\alpha - ji\beta) = (v\alpha i\alpha + v\beta i\beta) + j(v\beta i\alpha - v\alpha i\beta) \quad (4.8)$$

Na equação (4.8), a parte real corresponde à potência instantânea ativa (p), enquanto a parte imaginária corresponde à potência instantânea imaginária (q). No contexto da parte instantânea, o conceito de potência reativa não pode ser aplicado, e a parte imaginária representa fisicamente a energia trocada entre as fases sem transferência de energia.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Também é possível obter as correntes i_α e i_β através de (4.9), após isolar o termo em questão é possível se chegar a (4.10).

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

4.3 Método Constant Instantaneous Power (CIP)

Em 1983, Akagi desenvolveu o filtro CIP, que foi um dos primeiros a serem criados. Esse filtro tem a capacidade de fornecer uma potência constante da fonte e é recomendado instalá-lo o mais próximo possível da carga não linear. Sua função principal é compensar a componente oscilante da potência ativa gerada por essa carga (Akagi, Watanabe e Aredes, 2017).

Utilizando-se da Teoria P-Q é possível separar a potência da seguinte forma:

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

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

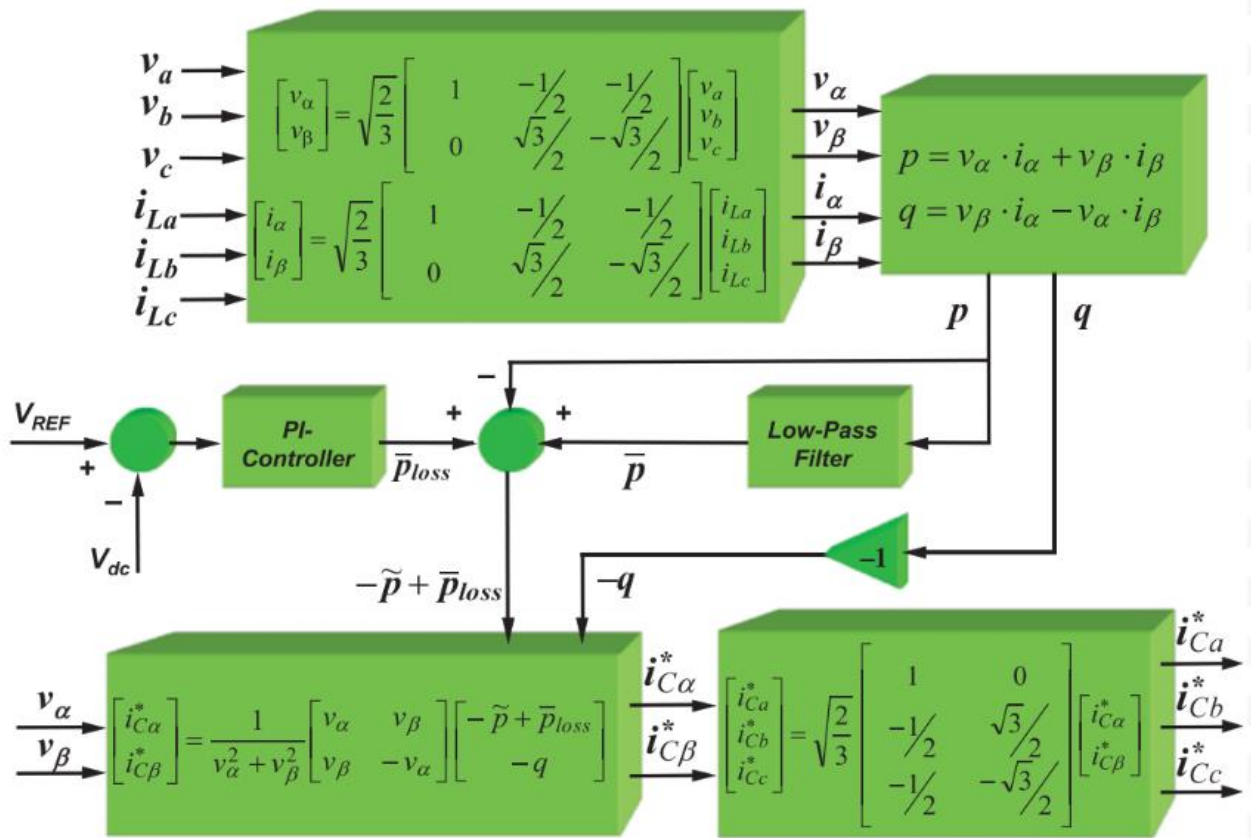
Em relação à potência ativa, pode-se decompor em uma parte constante, denotada por $\bar{p}$, e uma parte oscilatória, denotada por $\tilde{p}$. Da mesma forma, a potência imaginária pode ser decomposta em uma parte constante, representada por $\bar{q}$, e uma parte oscilatória, representada por $\tilde{q}$ (Akagi, Watanabe e Aredes, 2017).

Conforme mencionado previamente, quando há a existência de harmônicos na rede elétrica com características oscilatórias, podem surgir diversos efeitos indesejáveis no sistema.

Esses efeitos incluem ressonância, perturbações de tensão, interferência eletromagnética e perdas suplementares nos cabos de transmissão e transformadores. Através do filtro CIP é possível separar as componentes de características oscilatórias e gerar correntes de compensação para eliminar a oscilação do sistema.

A figura 11 mostra como é o diagrama do filtro CIP, nela as variáveis de entrada $V_a, V_b, V_c, I_{La}, I_{Lb}$ e I_{Lc} são os valores coletados da entrada do sistema, eles passam pela transformada de Clarke e são reduzidos para componentes $\alpha\beta$ bifásicas.

Figura 11: Diagrama de blocos do método CIP



Fonte: AKAGI, WATANABE, e AREDES, 2017.

A partir das componentes de bifásicas são obtidos os valores da potência real p e da potência imaginária q . A potência p passa por um filtro passa baixa para que a parte oscilatória real seja eliminada e reste apenas a componente constante $\bar{p}$. Em seguida é subtraída a Potencial total real p dá potência Real constante $\bar{p}$ onde o resultado é parte oscilatória, denotada por $\tilde{p}$.

Além disso, um controlador PI também é usado para obter a componente p_{loss} , onde essa potência é proveniente das perdas no inversor.

Após todo esse processo a Potência real Constante é separada das demais, a partir disso é possível gerar correntes que serão utilizadas para fazer a compensação dentro do sistema.

A partir as mesmas componentes $\alpha\beta$ bifásicas de tensão obtidas na transformação Clarke juntamente com as componentes de potência obtidas e usando a equação (4.10) são geradas as correntes de compensação. Porém elas ainda estão no formato de componentes $\alpha\beta$ bifásicas, para obter as correntes em para o sistema trifásico é necessário utilizar a transformada de Clarke inversa.

4.4 Método Sinusoidal Current Control (SCC)

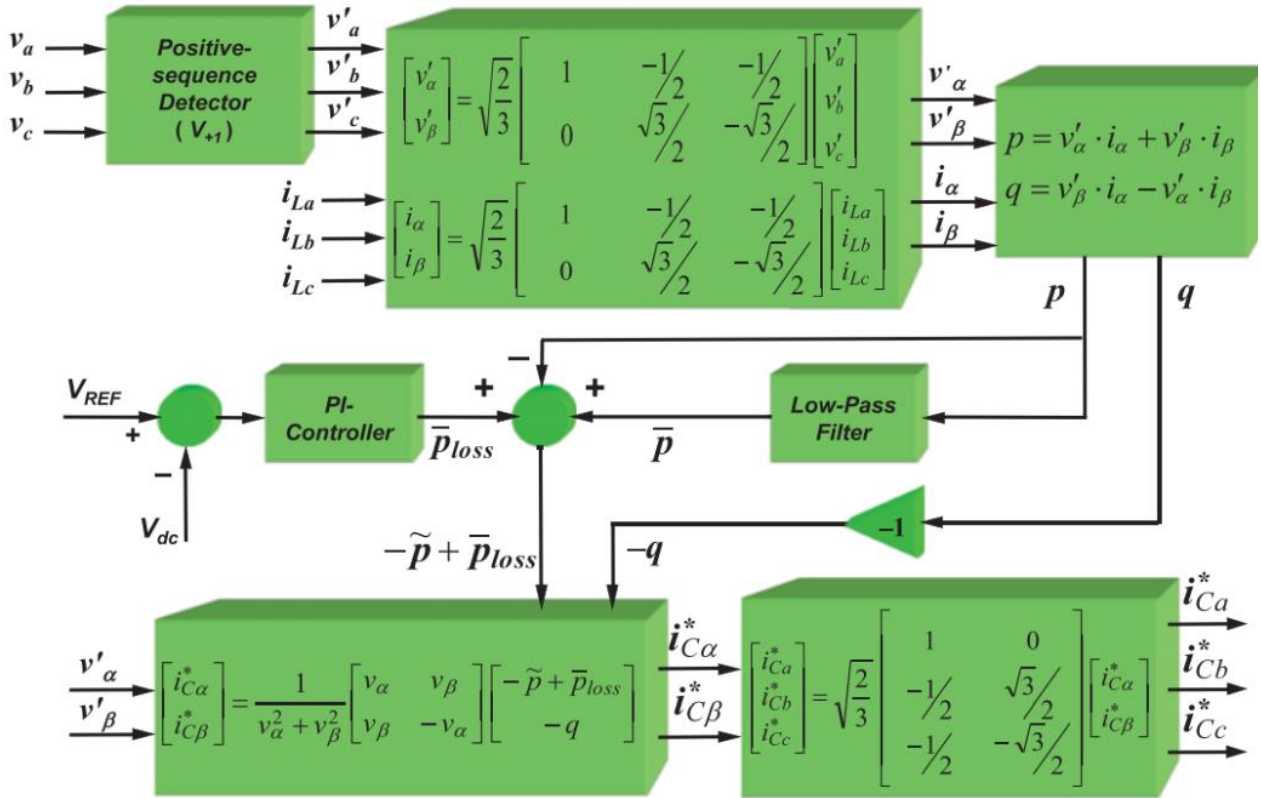
A estratégia de controle da corrente da fonte sinusoidal é um método de compensação que faz com que o filtro ativo compense a corrente de uma carga não linear, forçando a corrente compensada da fonte a se tornar sinusoidal e balanceada.

Na presença de desequilíbrios de tensão ou distorções de tensão, é impossível satisfazer simultaneamente ambas as condições: ter correntes compensadas sinusoidais e balanceadas e extrair apenas uma potência real constante da fonte (Akagi, Watanabe e Aredes, 2017).

A fim de tornar a corrente compensada sinusoidal e balanceada, o filtro ativo em derivação deve compensar todos os componentes harmônicos, bem como os componentes fundamentais que diferem da corrente fundamental de sequência positiva. (Akagi, Watanabe e Aredes, 2017). Apenas esse componente resta para ser fornecido pela fonte. Para determinar o componente fundamental de sequência positiva da corrente da carga, é necessário um detector de sequência positiva no controlador do filtro ativo.

Esta filtragem é uma variação do filtro CIP, com um diagrama de blocos quase idêntico. A figura 12 mostra um diagrama muito similar ao do método CIP, a principal diferença e única diferença do diagrama é a inclusão de um bloco chamado PSD (Positive Sequence Detector), que tem como função detectar a tensão de sequência positiva, conforme o próprio nome sugere (Akagi, Watanabe e Aredes, 2017).

Figura 12: Diagrama de blocos do método SCC



Fonte: AKAGI, WATANABE, e AREDES, 2017.

4.4.1 Detetor de Tensão fundamental e o Circuito PLL

O detector de tensão fundamental de sequência positiva é baseado na teoria p-q dual, e os conceitos de compensação de tensão são apresentados na Figura 13. As tensões v_a , v_b e v_c são transformadas nos eixos $\alpha\beta$ para determinar v_α e v_β . Elas são usadas em conjunto com as correntes auxiliares i'_α e i'_β , produzidas no circuito PLL, para calcular as potências auxiliares p' e q' (Akagi, Watanabe e Arede, 2017).

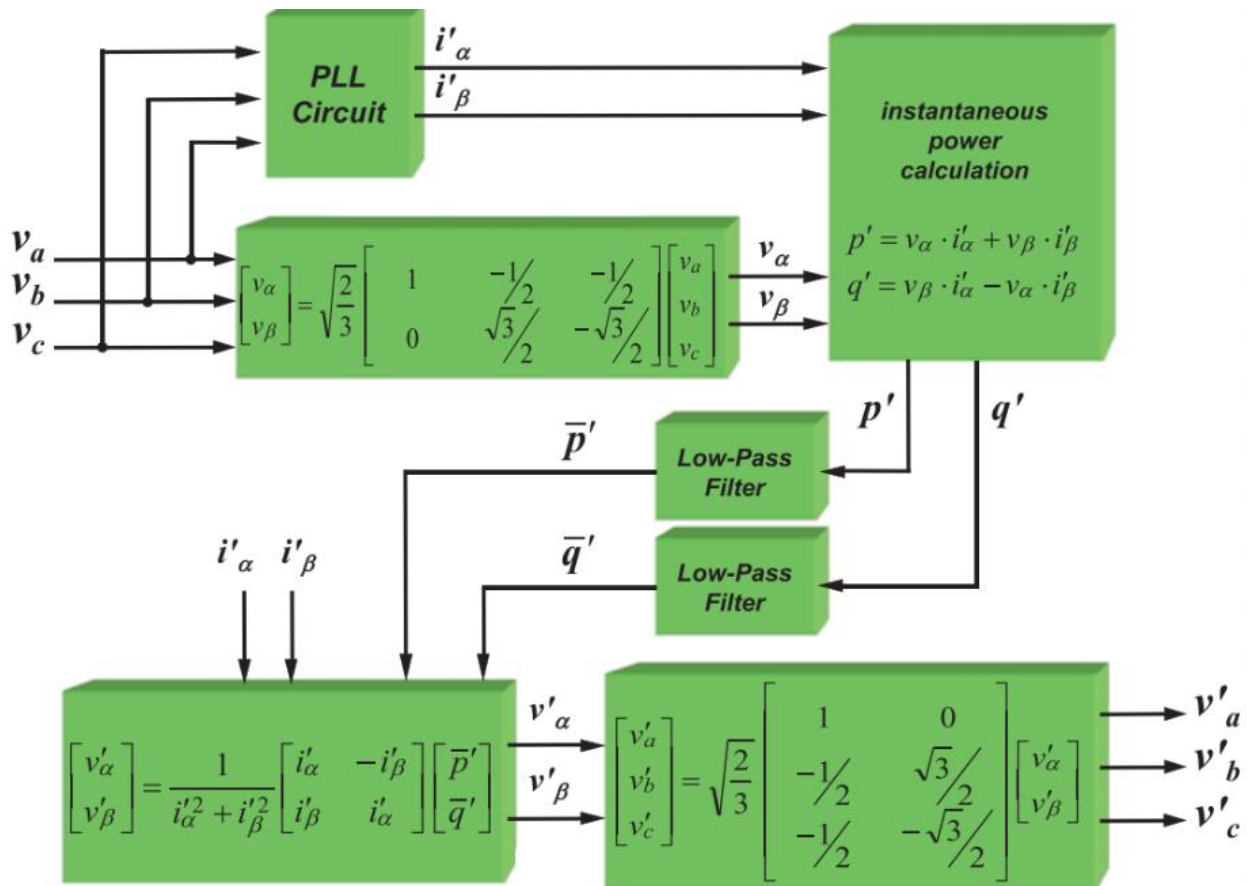
Assume-se que as correntes auxiliares i'_α e i'_β , com qualquer magnitude, são derivadas apenas de uma corrente auxiliar de sequência positiva na frequência fundamental, detectada pelo circuito PLL.

O circuito PLL acompanha continuamente a frequência fundamental das tensões do sistema medidas. O design apropriado do PLL deve permitir um funcionamento adequado mesmo sob formas de onda de tensão distorcidas e desequilibradas. Um design interessante de um circuito PLL que é praticamente insensível a desequilíbrios e

distorções nas formas de onda de tensão. (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

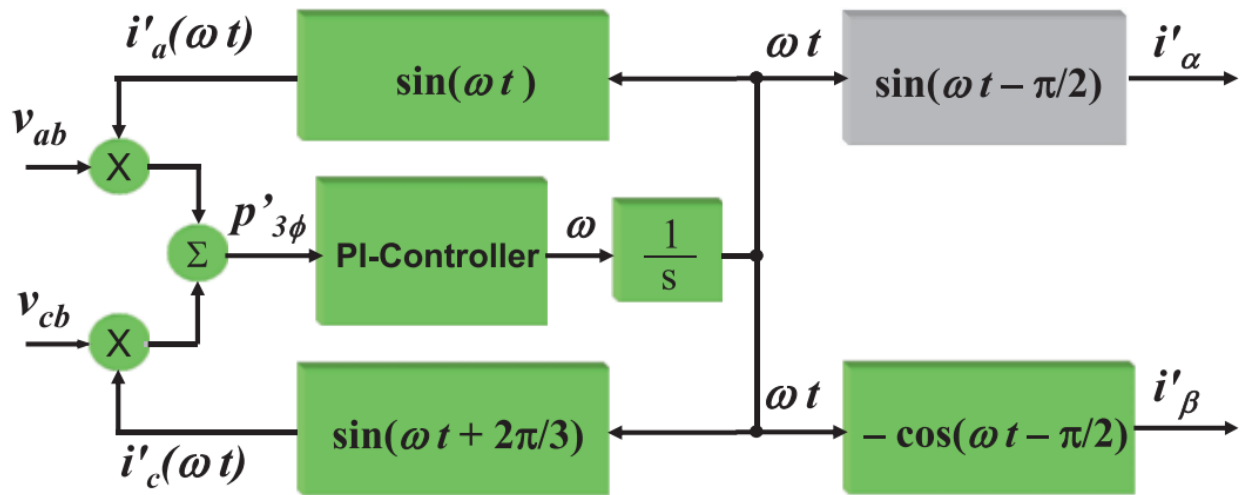
Este circuito de sincronização (circuito PLL) determina automaticamente a frequência do sistema e o ângulo de fase do componente de sequência positiva fundamental de um sinal de entrada genérico trifásico. No presente caso, são as tensões de fase medidas trifásicas v_a , v_b e v_c . A Figura 14 ilustra o diagrama de blocos funcional. Este circuito tem se mostrado muito eficaz, mesmo sob tensões de sistema altamente distorcidas (Akagi, Watanabe, e Aredes, 2017).

Figura 13: Diagrama do Detector de sequência positiva



Fonte: AKAGI, WATANABE, e AREDES, 2017.

Figura 14: Bloco funcional do circuito PLL



Fonte: AKAGI, WATANABE, e AREDES, 2017.

Capítulo 5: Metodologia

No capítulo seguinte, serão apresentadas como foram montados os filtros ativos CIP e SCC, os quais foram implementados utilizando o software PSIM.

5.1 Power Electronic Simulations (PSIM)

O software PSIM (Power Electronics Simulation) é uma ferramenta amplamente utilizada para simulação de eletrônica de potência no projeto e análise de sistemas de energia elétrica e eletrônica de potência. Ele oferece uma plataforma abrangente para modelar, simular e analisar circuitos de conversão de energia, permitindo que os engenheiros estudem o comportamento dos sistemas de energia antes de implementá-los fisicamente (POWERSIM Inc,2023).

O PSIM adota uma abordagem baseada em blocos para modelagem, em que os componentes do sistema são representados por blocos funcionais pré-definidos que podem ser interconectados para formar o circuito desejado.

Os blocos disponíveis no PSIM abrangem uma ampla variedade de dispositivos e componentes eletrônicos, como fontes de energia, interruptores eletrônicos, filtros, motores elétricos e controladores (POWERSIM Inc,2023). O software também apresenta blocos pré-programados com a transformação Clarke, que como já foi mencionado é fundamental para análise dos filtros CIP e SCC.

Os usuários podem configurar os parâmetros de cada bloco, estabelecer as conexões entre os blocos e especificar as condições iniciais do sistema. Ainda também é possível programar blocos próprios, como os da Teoria P-Q ou as equações derivadas dela. Com base nessas configurações, o software PSIM realiza a simulação em tempo real do sistema, fornecendo resultados precisos e detalhados sobre o comportamento do circuito.

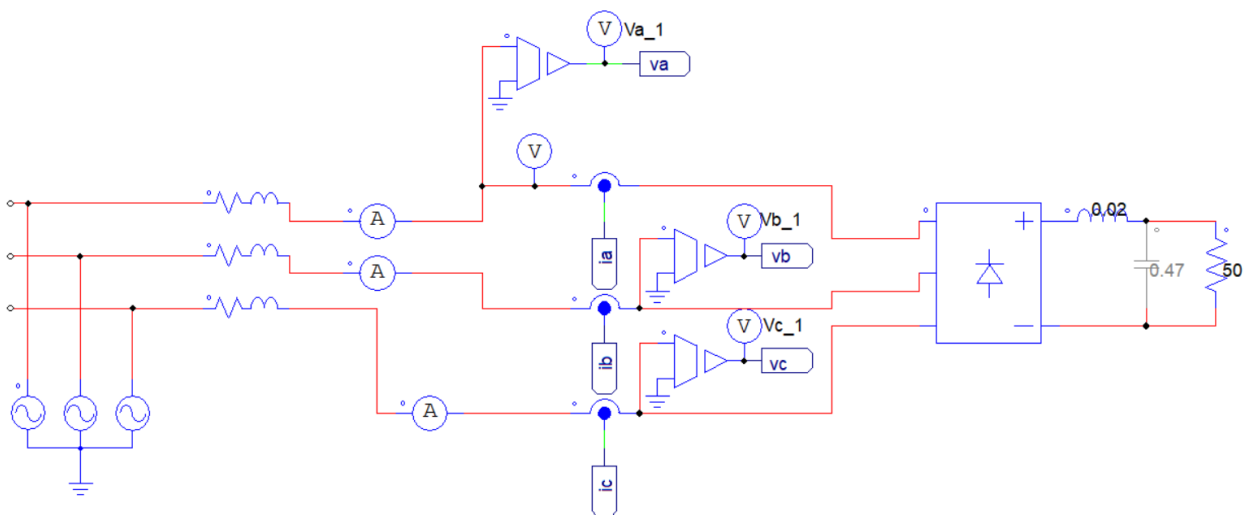
Além das funcionalidades de simulação, o PSIM também oferece recursos avançados, como análise de estabilidade, análise de resposta em frequência, e também a já mencionada Distorção Harmônica total, o que facilita bastante a análise das distorções dentro do PSIM (POWERSIM Inc,2023).

Em resumo, o software PSIM é uma ferramenta de simulação poderosa que permite aos engenheiros projetar, simular e analisar sistemas de eletrônica de potência de forma eficiente e precisa.

5.1.1 Características do circuito montado no PSIM

A figura 15 mostra o sistema elétrico usado no PSIM, ele é um sistema trifásico a 3 fios, ligado a uma ponte de diodos trifásica.

Figura 15: Sistema elétrico usado no PSIM



Fonte: Autoria própria

A tabela 2 mostra como são os valores escolhidos para o sistema apresentado na figura 17.

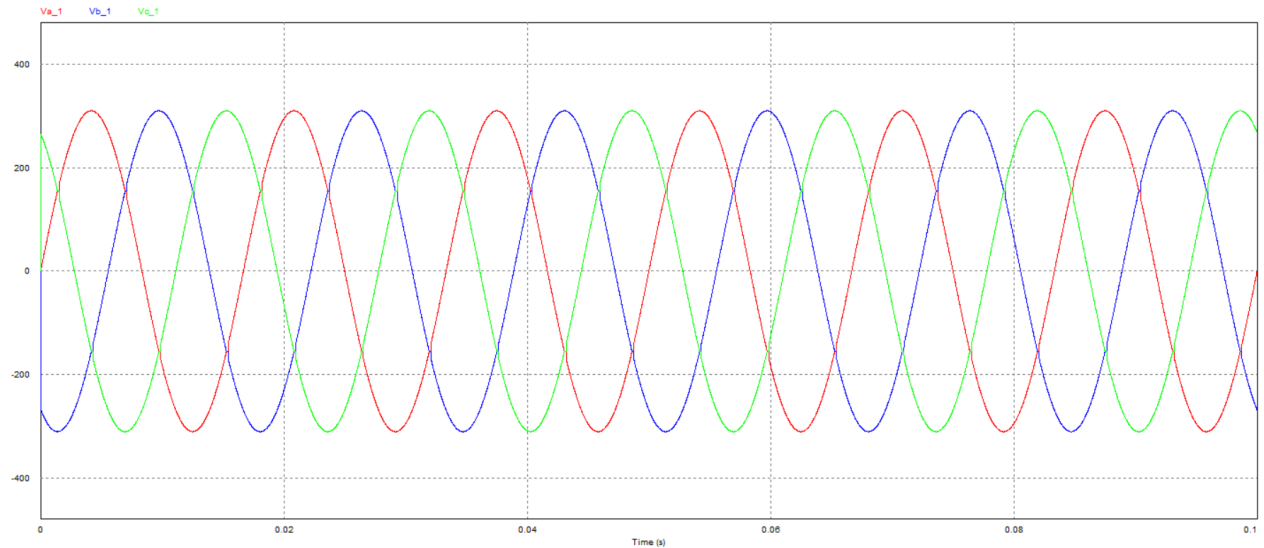
Tabela 2: Características do Sistema elétrico usado no PSIM

Característica do Sistema	Valores
TENSÃO DE LINHA(V)	380
Resistência de linha(Ohm)	0.00001
Indutancia de Linha(H)	100u
Indutancia da Carga(H)	0.02
Resistência da Carga(Ohm)	50
Capactiância da Carga(F)	0.47

Fonte: Autoria própria

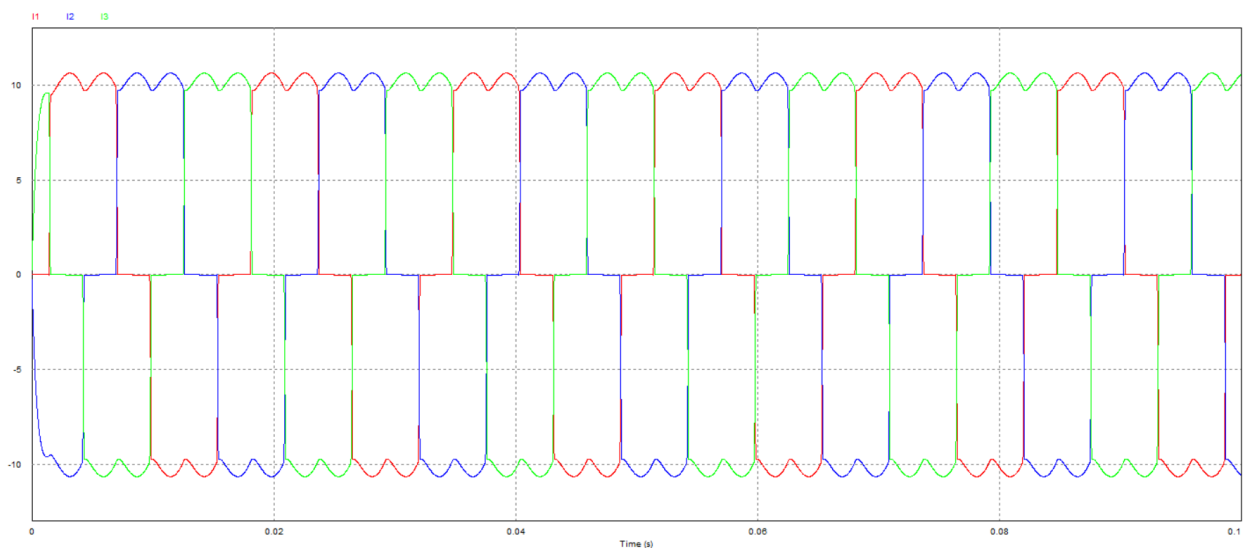
A figura 16 mostra como são as curvas das tensões do sistema, elas apresentam um comportamento senoidal, porém, as correntes da figura 17 estão bem deformadas demonstrando que apresentam um alto nível de conteúdo harmônico.

Figura 16: Tensões de linha, em Volts(V), no sistema



Fonte: Fonte: Autoria própria

Figura 17: Correntes de linha, em amperes(A), no sistema

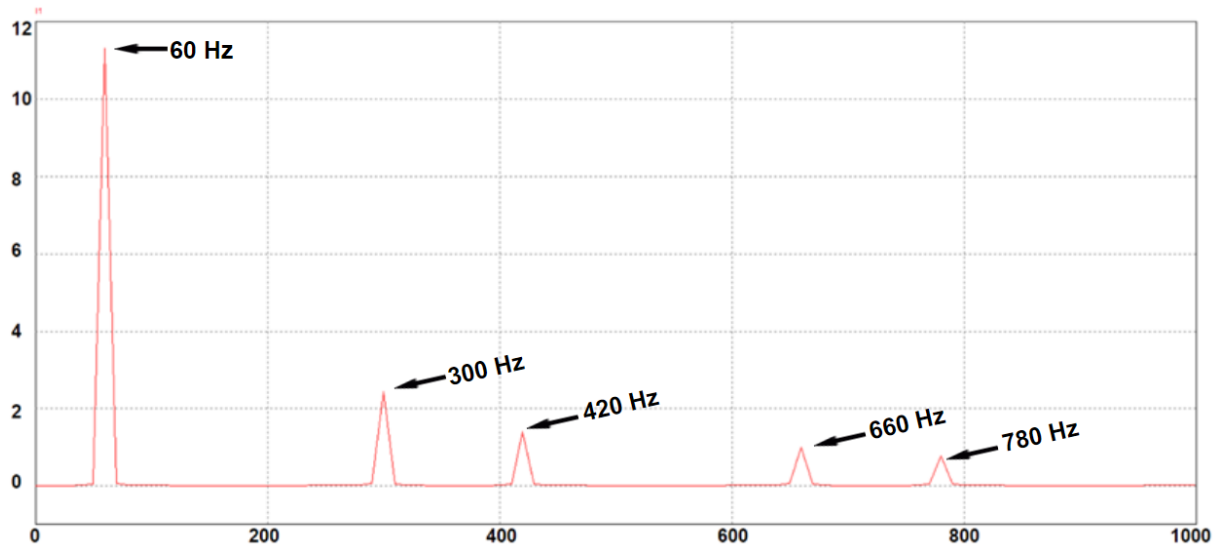


Fonte: Fonte: Autoria própria

A figura 18 mostra o gráfico com de corrente da fonte no domínio da frequência, pelo comportamento, apresentando vários picos de corrente, é possível ver que há muito conteúdo harmônico.

É possível observar que além da corrente da onda fundamental (em 60Hz), existem grandes picos de corrente nas frequências de 300 Hz e 420 Hz deixando claro que há a presença de harmônicos de 5ª e 7ª ordem.

Figura 18: Correntes, em Amperes(A), de linha no sistema no domínio da frequência



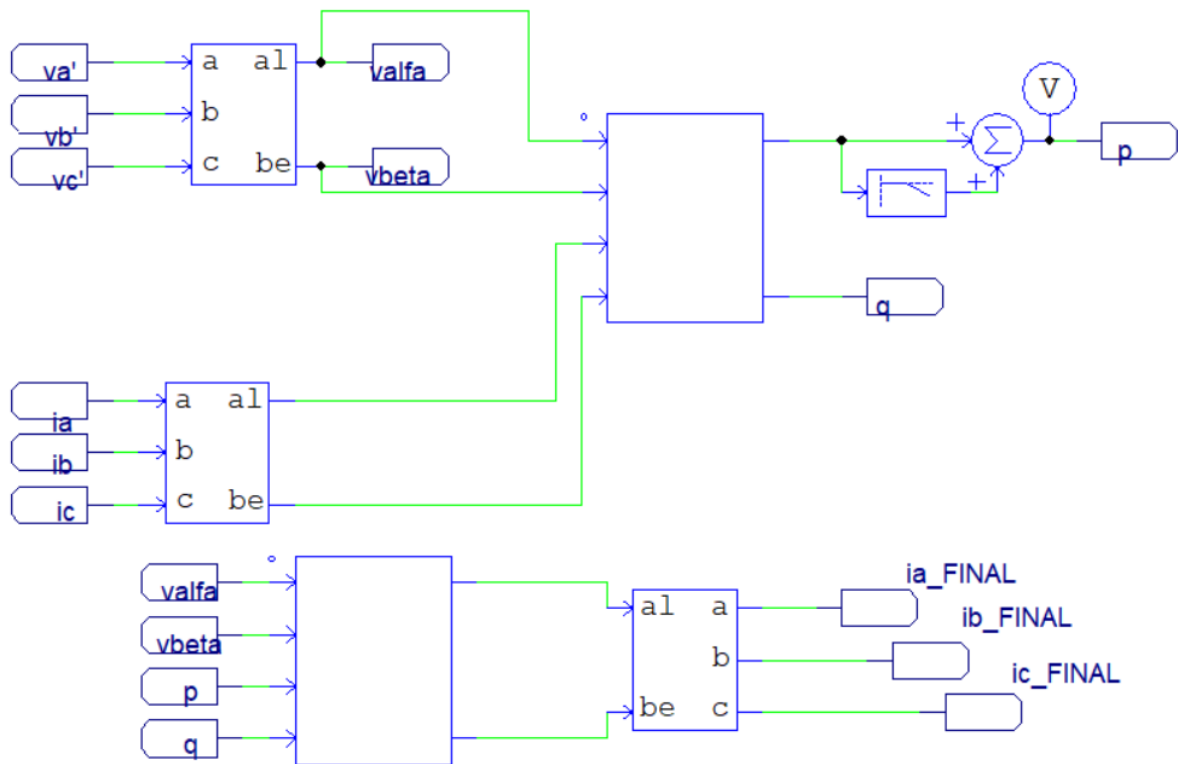
Fonte: Fonte: Autoria própria

5.2 Implementação do Modelo CIP

As informações de corrente e tensão coletadas no circuito acima foram implementadas no modelo CIP, a Figura 19 mostra como o Bloco CIP foi montado no PSIM, nesse bloco, são empregados os blocos de Transformada de Clarke, Transformada Inversa de Clarke, um bloco programado para obter as potências ativa, reativa, separa-las em suas componentes contantes e oscilatória e outro bloco que utiliza a Equação (4.10) para calcular as correntes de compensação. Esses componentes são utilizados em conjunto para realizar as operações necessárias no sistema.

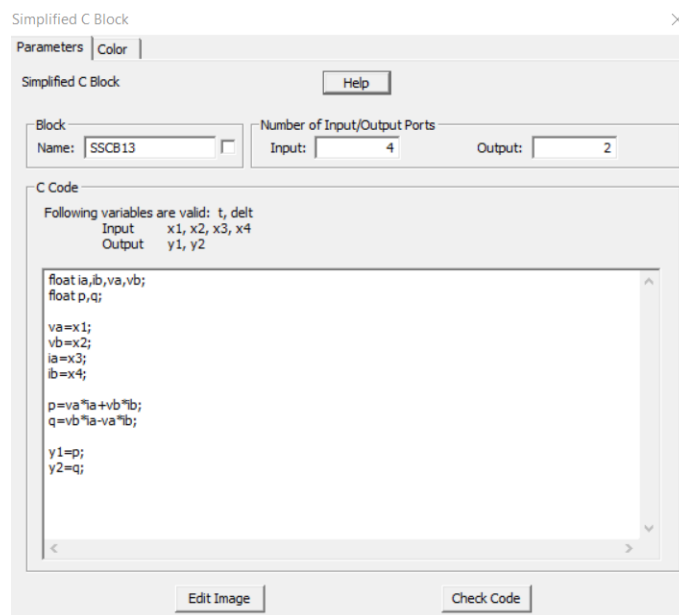
A figura 20 apresenta o código do bloco que calcula a potencia ativa e reativa e a figura 21 apresenta o código do bloco responsável por calcular as correntes de compensação, com esse bloco elas saem em sua forma Bifásica($\alpha\beta$) e é necessário que passem por um bloco que faz a transformação inversa para forma trifásica.

Figura 19: Método CIP montado no PSIM



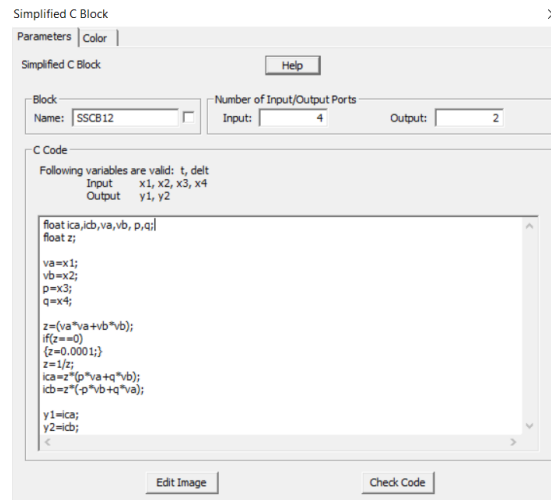
Fonte: Autoria própria

Figura 20: Bloco para cálculos da Potências



Fonte: Autoria própria

Figura 21: Bloco para cálculos das correntes de compensação



Fonte: Autoria própria

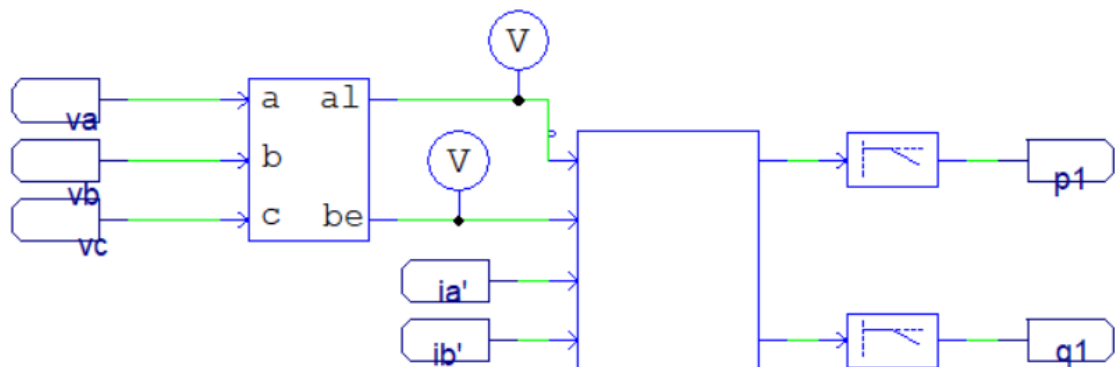
5.3 Implementação do Método SCC

Para a implementação do método SCC, como já dito anteriormente, basta utilizar o modelo CIP como base, a única diferença é que a tensão original o sistema passará por um bloco detector de sequência positiva.

Com uma simples troca de comandos no software PSIM, é possível realizar simulações tanto para o método CIP quanto para o método SCC dentro do mesmo programa.

A Figura 22 ilustra o bloco detector de sequência positiva no controlador, conforme apresentado no capítulo anterior. Esse bloco está conectado às tensões no bloco padrão do PSIM, responsável pela transformação Clarke.

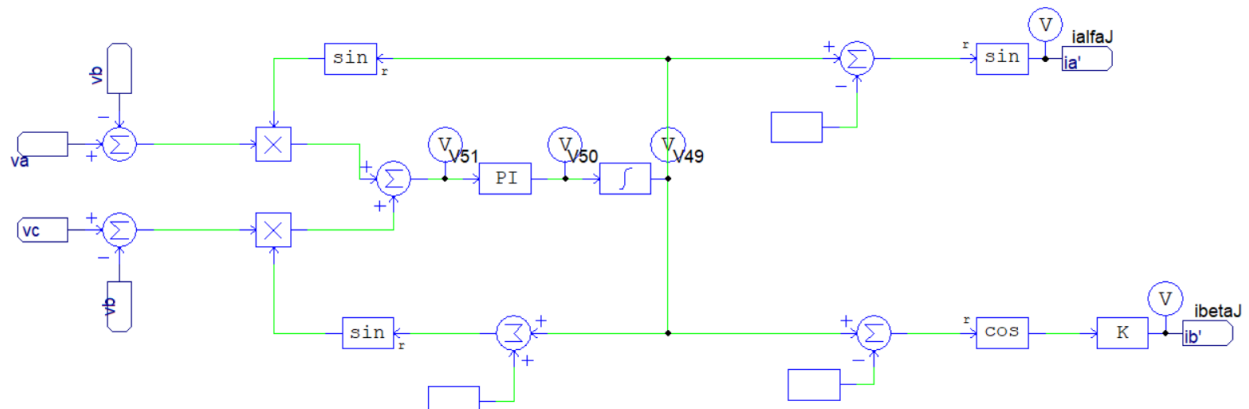
Figura 22: Bloco detector de sequência positiva



Fonte: Fonte: Autoria própria

Ainda na figura 23 existe um bloco programado que faz a separação das potências, esse bloco possui o mesmo código apresentado na Figura 20. Por sua vez, a Figura 21 mostra o bloco para o circuito PLL, que gera as correntes que são utilizadas no Bloco detector de tensão.

Figura 23: Circuito PLL



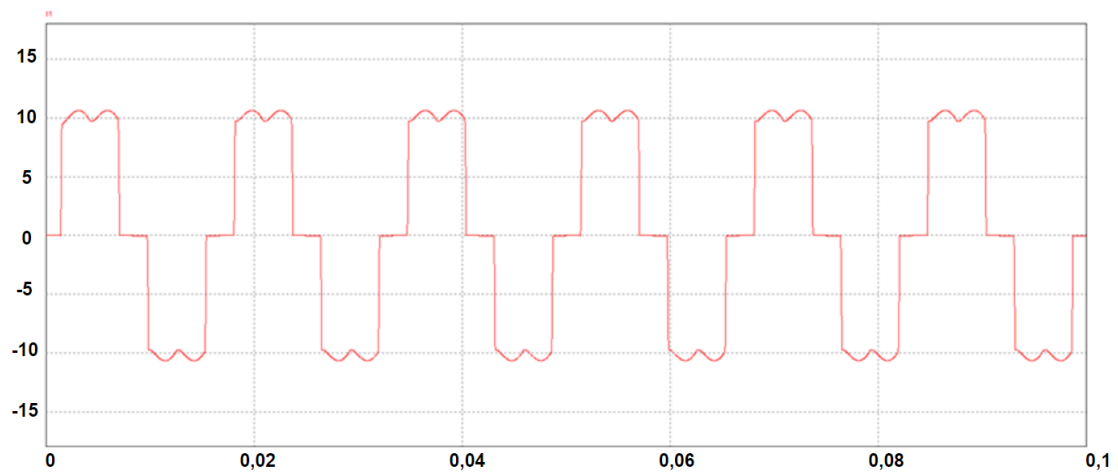
Fonte: Autoria própria

Capítulo 6: Resultados e Discussões

Neste capítulo, serão apresentados os resultados obtidos por meio das simulações realizadas no software PSIM. Será feita uma comparação entre os métodos CIP e SCC, além de uma análise da melhoria na corrente.

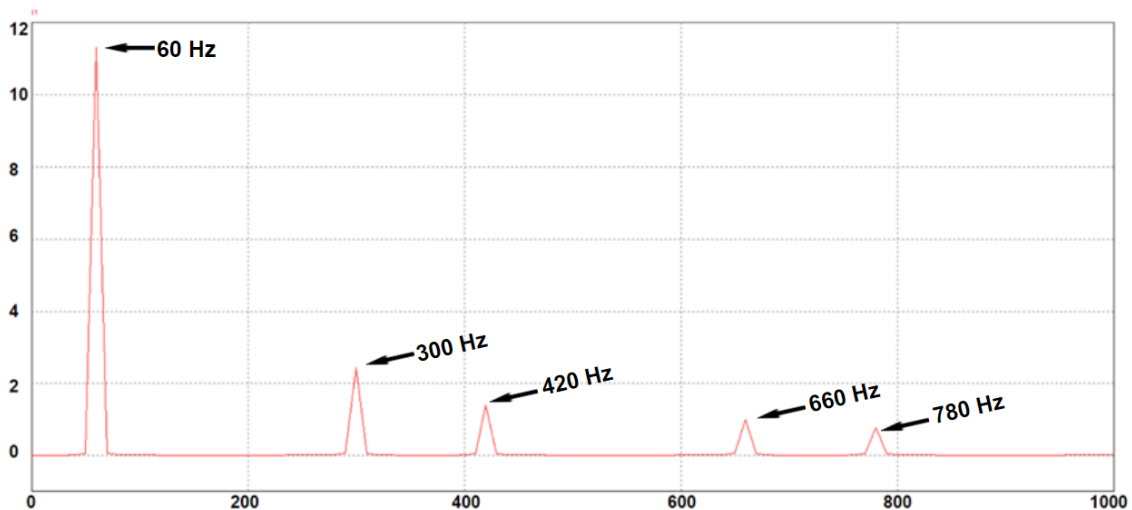
A corrente a ser analisada e filtrada é mostrada na Figura 24, representando a corrente da fase A do circuito no domínio do tempo. Já a Figura 25, apresenta a análise no domínio da frequência. Essas informações serão utilizadas para avaliar os efeitos dos métodos de filtragem e aprimorar o desempenho da corrente.

Figura 24: Corrente de linha, em amperes(A), da fase A, no domínio do Tempo(s)



Fonte: Autoria própria

Figura 25: Corrente(A) na fase a, no domínio da frequência (Hz)



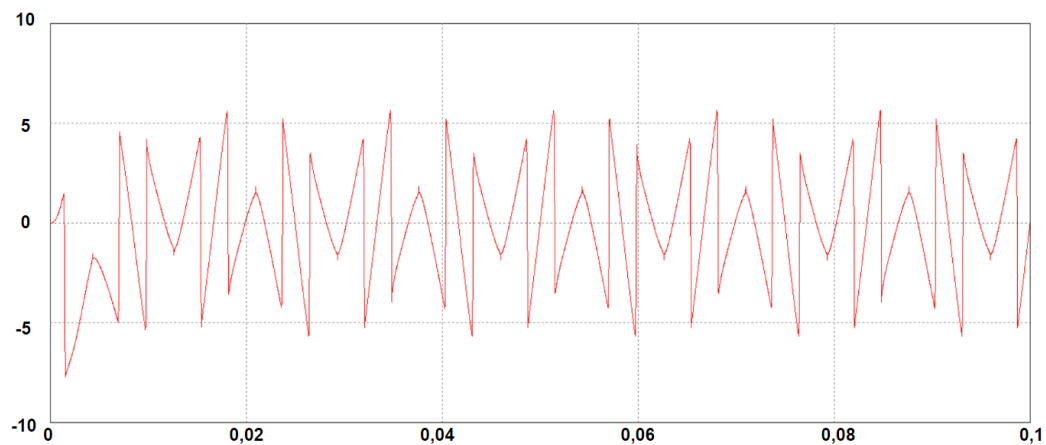
Fonte: Autoria própria

6.1 Análise do método CIP

A figura 26 apresenta a corrente compensadora da fase A gerada através do método CIP. Ela apresenta um formato irregular devido a ausência da corrente fundamental de 60 Hz, nela estão presentes apenas as componentes. A figura 27 ilustra isso, ela apresenta a análise da corrente compensatória no domínio da frequência.

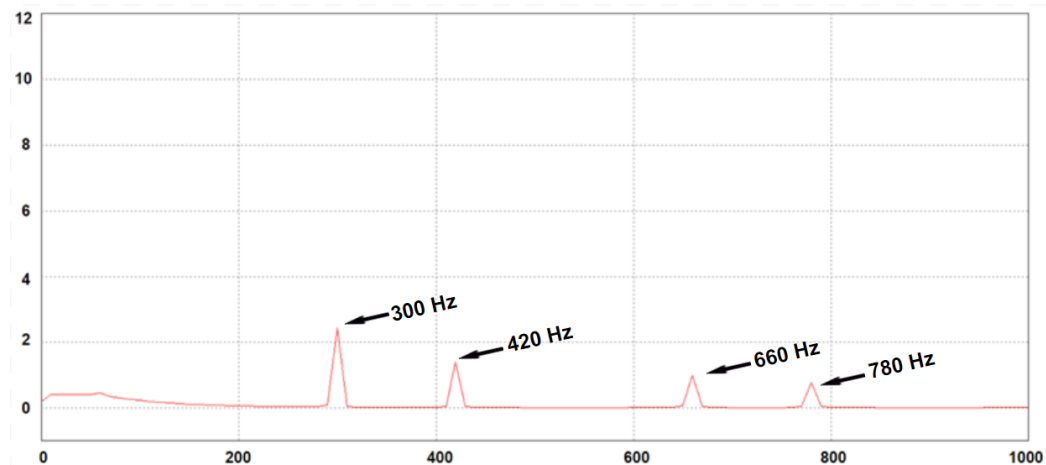
Analisando a figura 27 e comparando com a figura 25 é possível ver que os picos de corrente são os mesmos, com exceção do pico da corrente fundamental em 60Hz. Quando a corrente compensatória for aplicada ao sistema, apenas a componente fundamental será aplicada.

Figura 26: Corrente compensatória, em amperes(A), gerada pelo método CIP no domínio do tempo(s)



Fonte: Autoria própria

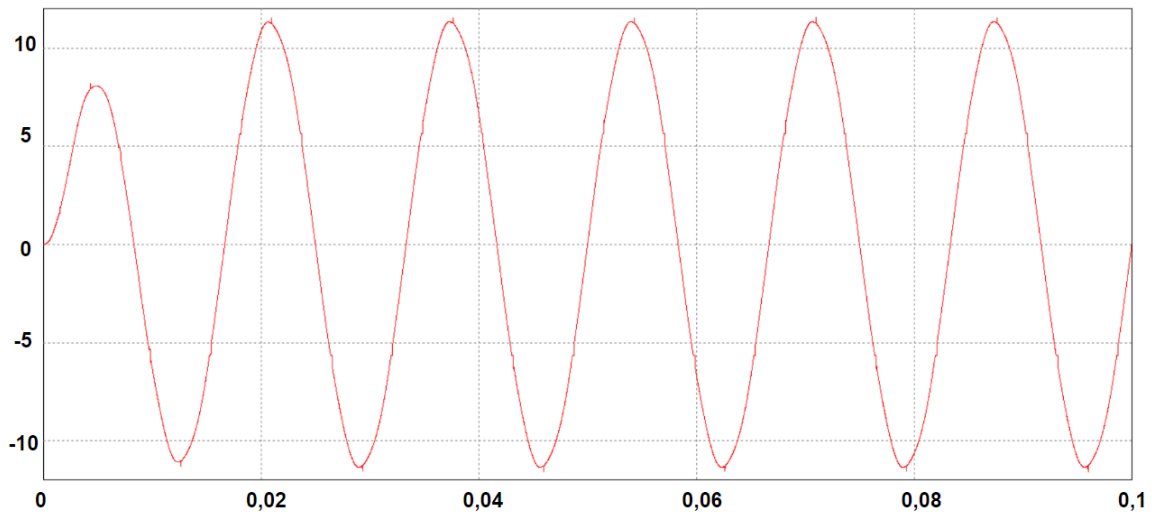
Figura 27: Corrente compensatória, em amperes(A), no domínio da frequência (Hz)



Fonte: Autoria própria

A figura 28 é a corrente fase A subtraída da corrente de compensação, com esse cálculo é obtida a correção da corrente de linha, reduzindo bastante a distorção decorrente dos harmônicos.

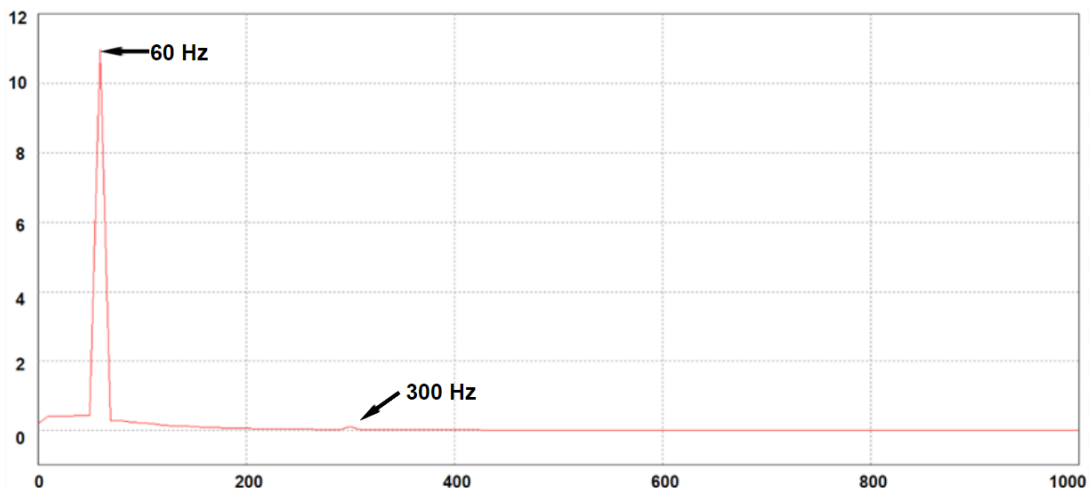
Figura 28: Corrente Corrigida, em amperes(A), no domínio do tempo(s)



Fonte: Autoria própria

Analisando a figura 28 e comparando com a figura 24 existe uma notável melhora no comportamento da corrente que agora exibe novamente o comportamento senoidal. Olhando na figura 29 e comparando com a figura 25, é possível ver, no domínio da frequência, que os harmônicos que estavam presentes na corrente foram quase completamente eliminados.

Figura 29: Corrente Corrigida, em amperes(A), domínio da frequência (Hz)

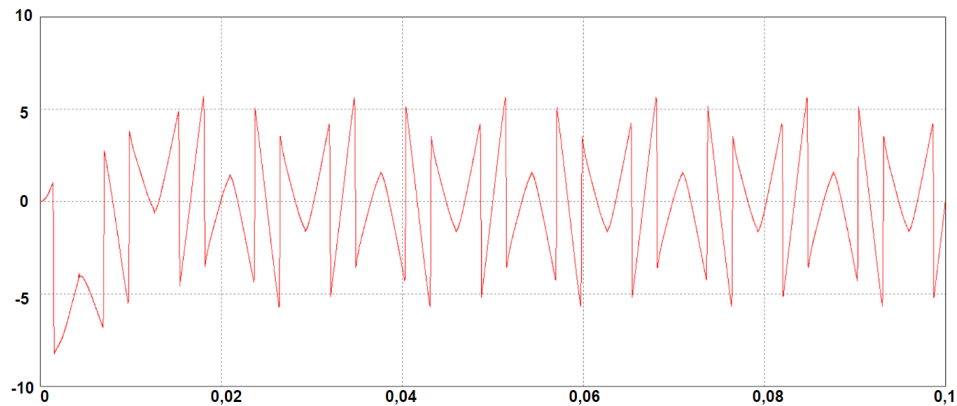


Fonte: Autoria própria

6.2 Análise do Método SCC

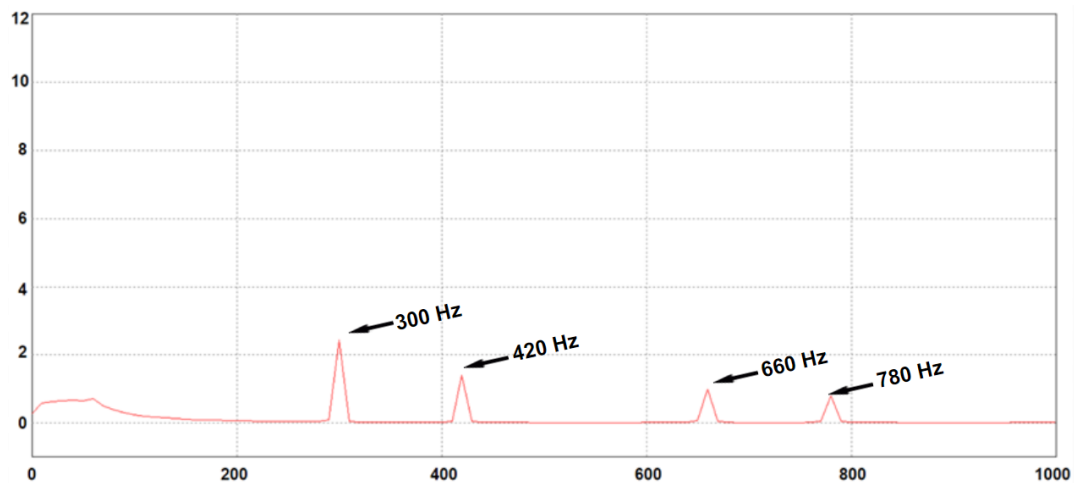
Como já citado anteriormente, o método SCC é bem similar ao método CIP e apresenta uma resposta parecida, a figura 30 mostra a corrente de compensação gerada através do método SCC, se comparada com a figura 26, elas apresentam um formato parecido. O mesmo acontece se comprar a figura 31, que mostra no domínio da frequência a corrente compensadora assim como a apresentada na figura 30, mas já é possível notar uma diferença entre os gráficos.

Figura 30: Corrente compensatória, em amperes(A), gerada pelo método SCC no domínio do tempo(s)



Fonte: Autoria própria

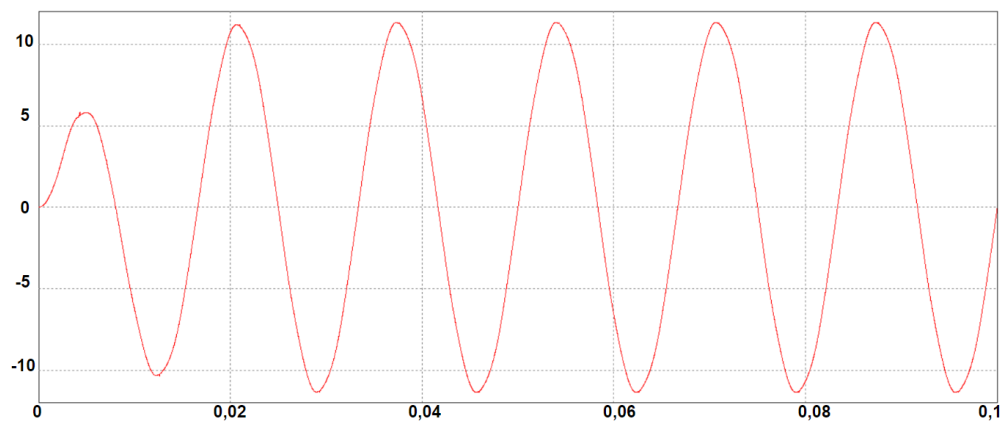
Figura 31: Corrente compensatória, em amperes(A), no domínio da frequência (Hz)



Fonte: Autoria própria

A corrente corrigida, conforme mostrada na Figura 32, assim como na Figura 28, exibe um formato senoidal, evidenciando uma correção adequada da corrente original. Além disso, é perceptível que a Figura 32 apresenta um formato de onda ainda mais suave em comparação com a Figura 28, na qual ainda podem ser observadas algumas falhas residuais. Isso indica uma melhora significativa no desempenho da corrente após a aplicação do método de compensação.

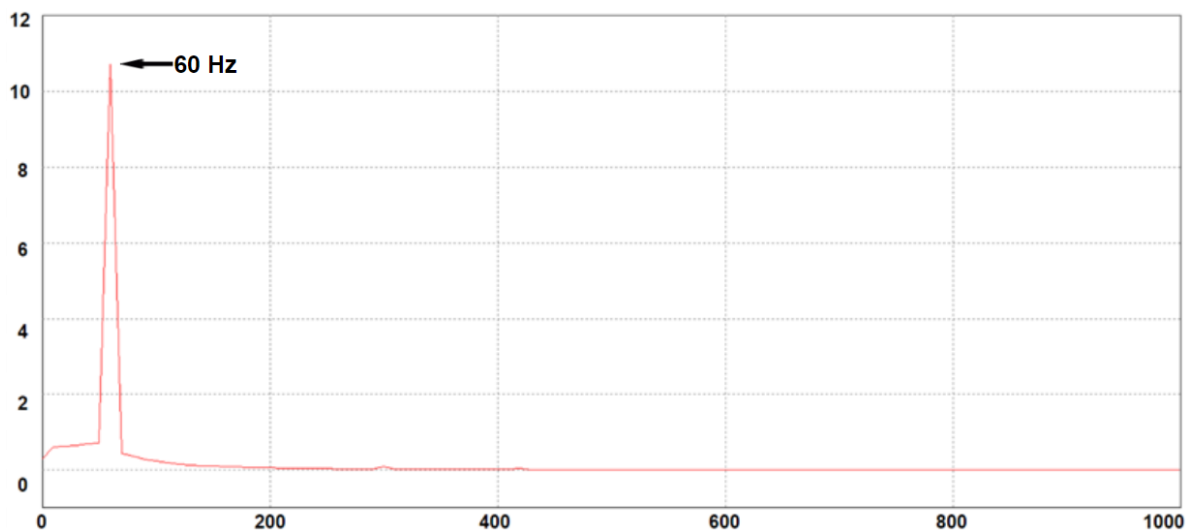
Figura 32: Corrente corrigida, em amperes(A), pelo método SCC, no domínio do tempo(s)



Fonte: Autoria própria

A figura 33 mostra que a maioria dos harmônicos foram eliminados do sistema, onde agora a corrente predominante se encontra na frequência de 60Hz.

Figura 33: Corrente corrigida, em amperes(A), no domínio da frequência



Fonte: Autoria própria

6.3 Análise da Distorção Harmônica Total

Conforme mencionado no capítulo 2, existem limites para as distorções harmônicas que um sistema elétrico deve respeitar. O software PSIM possui ferramentas que permitem a análise da Distorção Harmônica Total (DHT) do sistema.

A Figura 34 mostra a Distorção Harmônica Total no sistema original, calculada pelo PSIM. O valor apresentado indica uma DHT de aproximadamente 29,82%, excedendo significativamente os limites de DHT aceitáveis estabelecidos pelo IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers). Esse resultado ressalta a presença de distorções harmônicas consideráveis no sistema, indicando a necessidade de aplicar técnicas de mitigação para atender aos requisitos normativos

Figura 34: DHT da corrente original do sistema calculada pelo PSIM

THD	
Fundamental Frequency	6.0000000e+001 HZ
I1	2.9820147e-001

Fonte: Autoria própria

A Figura 35 exibe a Distorção Harmônica Total da corrente corrigida utilizando o método CIP, com um valor de aproximadamente 1,019%. Essa é uma redução considerável em relação à corrente original. No entanto, quando comparada à Figura 39, que mostra a Distorção Harmônica Total da corrente corrigida pelo método SCC, fica evidente uma redução ainda mais substancial.

A figura 36 revela um valor de aproximadamente 0,79%, o que representa uma redução de quase 98% em relação à corrente original. Essa diferença ressalta a eficácia do método SCC na mitigação das distorções harmônicas, resultando em uma corrente corrigida com uma DHT significativamente menor.

Figura 35: DHT da corrente corrigida pelo Método CIP

THD	
Fundamental Frequency	6.0000000e+001 HZ
Corrente_Final	1.0187401e-002

Fonte: Autoria própria

Figura 36: DHT da corrente corrigida pelo Método CIP

THD

Fundamental Frequency	6.0000000e+001 HZ
Corrente_Final	7.9264024e-003

Fonte: Autoria própria

Capítulo 7: Conclusões

A partir das informações apresentadas, fica evidente que os harmônicos são fenômenos que existem há bastante tempo, mas que somente nas últimas décadas têm se tornado uma preocupação frequente no que diz respeito à qualidade de energia. Diversos estudos têm sido realizados para tratar as distorções harmônicas, e os filtros desempenham um papel crucial no processamento de sinais elétricos.

Os filtros passivos, compostos por componentes eletrônicos como resistores, capacitores e indutores, são capazes de selecionar e suprimir frequências indesejadas do sinal elétrico, melhorando sua qualidade e reduzindo ruídos. Eles oferecem uma solução eficiente e econômica em muitas aplicações, desde o processamento de sinais até a telecomunicação e áudio.

Por outro lado, os filtros ativos, que foram o foco principal deste trabalho, possuem a vantagem de ajustar e otimizar os parâmetros de filtragem por meio de componentes ativos, como ganho, frequência de corte e características de atenuação. No entanto, sua complexidade de projeto e custos de montagem são mais elevados. Apesar disso, os filtros ativos têm apresentado resultados promissores, embora ainda sejam pouco difundidos no mercado. Softwares como o PSIM têm facilitado o estudo e simulação dos métodos de filtragem ativos.

Os principais métodos de filtragem ativa estudados, como o CIP e o SCC, mostraram-se soluções eficazes para a corrente do sistema analisado. Além disso, existem outras abordagens de filtragem ativa que valem a pena serem estudadas, como o método de Fryze ou o MSOGI. Um estudo adicional interessante seria a avaliação do custo-benefício de cada um desses métodos, com o objetivo de avaliar diferentes modelos de abordagem comercial.

Outro tema que merece análise é a comparação entre Compensação de Potência Instantânea (CIP) e Controle de Corrente Senoidal (SCC) em relação à distorção de tensão. Considerando que o objetivo da CIP é corrigir a potência ativa e o objetivo do SCC é corrigir a forma de onda da corrente, é importante observar que distorções na tensão podem persistir em ambos os métodos. Uma comparação para avaliar a eficácia de um em relação ao outro seria fundamental para destacar em quais situações cada método consegue manter um desempenho ótimo em seu propósito original, ao mesmo

tempo em que mantém um controle mais eficaz sobre a tensão distorcida.

Em suma, o estudo realizado demonstrou que tanto os filtros passivos quanto os filtros ativos desempenham um papel fundamental no tratamento das distorções harmônicas.

Os filtros passivos oferecem uma solução eficiente e econômica, enquanto os filtros ativos permitem uma maior flexibilidade e controle sobre os parâmetros de filtragem. Os resultados obtidos através do estudo dos métodos de filtragem ativa foram promissores, indicando seu potencial para aplicações futuras. Considerando a constante evolução tecnológica e a importância cada vez maior da qualidade de energia, o aprofundamento nesses estudos contribuirá para o desenvolvimento de soluções mais eficazes e eficientes na mitigação dos problemas relacionados às distorções harmônicas.

Capítulo 8: Referências

ACHA, E.; MADRIGAL, M. **Power Systems Harmônicas: Computer Modelling and Analysis**, 1. ed. John Wiley & Sons Ltd, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, ANEEL - **PRODIST – Módulo 8: Qualidade de Energia Elétrica, Revisão 02**, 2011.

AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. **Instantaneous power theory and applications to power conditioning**. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2017.

ALAMMARI, R.A., SOLIMAN, S.A., & EL-HAWARY, M.E. **Identification of Individual Types Of Harmonic Loads In An Electric Power System Bus**. *Electrical Power and Energy Systems* (2004).

ARGENTA, B. T., **Afundamentos De Tensão Provenientes De Faltas No Sistema Elétrico De Potência: Um Estudo De Caso**. Projeto de Diplomação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.

ARRILLAGA, J.; WATSON, N.R. **Power Systems Harmonics**, 2. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, **NBR 5410 – Instalações Elétricas de Baixa Tensão**, Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, G. T., ROMÃO, E. C., MENEGATTI, C. R., **Correção de distorções harmônicas em sistemas elétricos através de interferência destrutiva**, *Rev. Bras. Ensino Fís.* vol.41 no.3, São Paulo 2019 Epub Feb 04, 2019.

BAGGINI, A., **Handbook of Power Quality**, 1. ed. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd, 2008.

BOYLESTAD, L. R., **Introductory Circuit Analysis, tenth edition**. Pearson Education, 2003.

DOMIJAN, A.; EMBRIZ-SANTANDER, E. **"Harmonic mitigation techniques for the improvement of power quality of adjustable speed drives (ASDs)"**, *Applied Power Electronics Conference and Exposition*. APEC '90, Conference Proceedings 1990.

DOUGHERTY, G. J.; STEBBINS, L. W. **Power quality: a utility and industry perspective**. *IEEE Textile, Fiber and Film Industry Technical Conference*, 1997.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W., **Electrical Power Systems Quality**, 2. ed. McGraw-Hill Companies, 2004.

FERREIRA, J. F. V.; **Uma Nova Abordagem à Filtragem de Harmônicos de Sequência Zero Através de Dispositivos Eletromagnéticos.** Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

FITZGERALD, A. E.; JR., Charles K.; UMANS, S. D., **Máquinas Elétricas: Com introdução à eletrônica de potência**, 6. ed. McGraw-Hill Companies, 2008.

FOURIER, J. B., **Théorie analytique de la chaleur**, Firmin Didot, Paris, 1822.

GERS, J. M., **Voltage transients originated by switching power electronic converters.** IEEE Transactions on Industrial Electronics 53.6, 2006.

IEEE, **Standard for Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** New York, 1995.

IEEE, **Power and Energy Society, Standard for Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality.** New York, 2014.

IEEE, **Standard for Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.** New York, 1992.

JANG, G., **Voltage sags and transient disturbances in industrial power systems: A comprehensive overview.** IEEE Transactions on Industry Applications 49.5 (2013)

KEY T. S., LAI J. S. **Comparison of Standards and Power Supply Design Options for Limiting Harmonic Distortion,** IEEE Trans. on Ind. Appl., Jul./Aug 1993.

LIEW, A.C. **Excessive neutral current in three-phase fluorescent lighting circuit.** IEEE Transaction Industrial Applications, (1989).

OLIVEIRA, W.N, **Projeto de filtros passivos para a redução de correntes nas Subestação de 2x300 kVA da Estação Elevatória de Água do Jiqui**, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2015.

POMILIO, J. A.; DECKMANN, S. M. **Condicionamento de Energia Elétrica e Dispositivos FACTS.** Campinas: UNICAMP, 2009.

POWERCONTROL. **O QUE SÃO HARMÔNICOS?** <<https://powercontrol.pt/pt/o-que-sao-harmonicos>>. Acesso em: 25 de jul. de 2023

POWERSIM Inc. **Powersim.** Disponível em: <https://powersimtech.com/>. Acesso em: 02 jun. 2023.

FRANCO, R. S., **Especificação de Um Filtro Ativo para Correção Instantânea do Fator de Potência para Ondas Não-Senoidais Utilizando a Teoria da Potência Complexa Instantânea**, Instituto Federal Goiano - IFG Julho de 2011.

RAHMAN, S. A., **An overview of power quality problems in electrical power system.** 2011 IEEE Power Engineering and Automation Conference. IEEE, 2011.

ROCHA, C. X., **Geração Seletiva de Corrente de Referência Trifásica usando Método MultiRessonante para Filtro Ativo de Potência,** Universidade Federal de Uberlândia – UFU 2018.

SUBJAK J., MCQUIKIN J., **Harmonics - Causes, Effects, Measurements, and Analysis : An update.** IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. 26, No. 5, PP 1034 - 11:142, Nov./Dec. 1990.

SUTHAR, D.P. PANDYA, S.N. KESHAWALA, R.P., **Comparison of Different Control Strategies for Shunt Active Power Filter,** 2018.

TONG, L., **Frequency variations due to wind power integration in isolated power systems.** IEEE Transactions on Sustainable Energy 8.4, 2017

VILEFORT, L. S., **Estudo das transformadas de Clarke, Park e a Máquina Simétrica Trifásica,** Universidade Federal de Uberlândia, 2012.