

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS

***CÂMPUS* ITUMBIARA**

CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

MAX VICTOR FIDELES CUNHA

**INVESTIGAÇÃO DOS ÍNDICES HARMÔNICOS NA EMPRESA STEMAC
E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM VISTAS À CONSTRUÇÃO DE
FILTRO ATIVO**

**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: Max Victor Fideles Cunha

Matrícula: 20162040070226

Título do Trabalho: Investigação Dos Índices Harmônicos Na Empresa Stemac E Simulação Computacional Com Vistas À Construção De Filtro Ativo.

Autorização - Marque uma das opções

1. (X) 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, 25 / 05 / 2023.
Local Data

Max Victor Fideles Cunha

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

MAX VICTOR FIDELES CUNHA

**INVESTIGAÇÃO DOS ÍNDICES HARMÔNICOS NA EMPRESA STEMAC
E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM VISTAS À CONSTRUÇÃO DE
FILTRO ATIVO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Banca Examinadora do Curso Bacharelado em
Engenharia Elétrica, em cumprimento às exigências
legais como requisito parcial à obtenção do título de
Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de
Freitas (IFG)

**ITUMBIARA-GO
2023**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

C972i Cunha, Max Victor Fideles.
 Investigação dos índices harmônicos na empresa STEMAC e
 simulação computacional com vistas à construção de filtro
 ativo. / Max Victor Fideles Cunha. -- Itumbiara, 2023.
 75p. : il.

 Trabalho de conclusão de curso (Bacharel em Engenharia
 Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia
 de Goiás, Câmpus Itumbiara, 2023.

 Orientador: Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas.

 1. Engenharia elétrica. 2. Filtros elétricos ativos. 3.
 Energia elétrica - Qualidade. I. Título. II. Freitas, Marcos
 Antônio Arantes de. 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

Max Victor Fideles Cunha

INVESTIGAÇÃO DOS ÍNDICES HARMÔNICOS NA EMPRESA STEMAC E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL COM VISTAS À
CONSTRUÇÃO DE FILTRO ATIVO

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 16 de Maio de 2023, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcos Antônio Arantes de Freitas - Orientador

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Olívio Carlos Nascimento Souto - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Prof. Dr. Victor Régis Bernardeli - Membro interno

Instituto Federal de Goiás, Câmpus Itumbiara

Itumbiara – GO

2023

Documento assinado eletronicamente por:

- **Olívio Carlos Nascimento Souto**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 16/05/2023 10:47:35.
- **Marcos Antonio Arantes de Freitas**, DIRETOR(A) GERAL - CD2 - CP-ITUMBIA, em 16/05/2023 10:45:49.
- **Victor Regis Bernardeli**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLÓGICO, em 16/05/2023 10:19:40.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 16/05/2023. 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: 408699

Código de Autenticação: 5912c1d58d



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)

DEDICATÓRIA

*Ao meu saudoso avô, José Bento Silva †,
minha saudosa mãe, Jucelena Fidelis Silva †, que
hoje repousam em Cristo, e minha avó, Maria
Helena Silva, que apesar da vida simples sempre
me incentivaram a focar nos estudos.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, a Deus por ter me fornecido força, discernimento, saúde e fé em todos os caminhos que tenho trilhado, e estar comigo na conclusão desta importante etapa em minha vida.

Aos meus familiares, que apesar de minha ausência devido aos estudos, estavam me apoiando, incentivando a trilhar o caminho do conhecimento, me proporcionando um ambiente de suporte que me possibilitou a obter várias conquistas, e esta é uma delas. Em particular a imensurável gratidão aos meus avós, José Bento Silva † e Maria Helena Silva, minha querida tia Kelly Cristina Silva e minha saudosa mãe Jucelena Fidelis Silva †.

A todos os amigos que fiz durante estes anos no IFG, dedicando horas a fimco aos estudos, compartilhando conhecimentos e sonhos, em especial Arthur Borges Pedó, Elisabete da Silva Costa, Getúlio Santiago dos Santos Júnior, Leocádio Narciso de Souza Filho e Renan Moreira Soares. Também aos meus amigos de longa data, Guilherme Silva Dias e Mateus Gouveia da Silva.

Ao meu professor, orientador e grande amigo, Marcos Antônio Arantes de Freitas, que ao longo da minha graduação sempre esteve disposto a me auxiliar, demonstrando grande carisma e empatia para com seus alunos, e a todos os meus professores que contribuíram para a amadurecimento dos meus conhecimentos nestes longos anos de faculdade.

E, por fim, aos professores Olívio Carlos Nascimento Souto e Victor Regis Bernardeli pelas completções após à apresentação da defesa desse trabalho de conclusão de curso. Deixo aqui meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo de caso sobre a qualidade da energia elétrica na Stemac Grupo Geradores, uma empresa de venda e assistência técnica de geradores localizada em Itumbiara. Para o estudo, um analisador de qualidade de energia e potência foi acoplado ao principal alimentador da empresa, permitindo a coleta de sinais da rede elétrica por uma semana. O objetivo é analisar esses sinais usando técnicas matemáticas no âmbito da engenharia elétrica para identificar distúrbios presentes na rede e propor soluções para mitigá-los. Os resultados da análise indicarão se a inserção de um filtro ativo é uma opção viável para melhorar a qualidade da energia elétrica na empresa. Os filtros ativos são uma solução cada vez mais utilizada para melhorar a qualidade do sistema elétrico, e este trabalho descreverá seu funcionamento, vantagens e as razões para seu crescente uso. Além disso, serão analisados os índices harmônicos e realizadas simulações computacionais com o objetivo de construir um filtro ativo capaz de atender às exigências estabelecidas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) em relação aos níveis elétricos. Com a conclusão deste estudo, espera-se contribuir para o aprimoramento da qualidade da energia elétrica na Stemac Grupo Geradores e auxiliar outras empresas do setor a enfrentar problemas semelhantes.

Palavras-chave: Qualidade de Energia, Índices Harmônicos, Filtros Ativos, Eficiência Energética.

ABSTRACT

This paper presents a case study on the quality of electrical energy at Stemac Grupo Geradores, a company located in Itumbiara that specializes in the sale and technical assistance of generators. An electrical energy and power quality analyzer was connected to the company's main feeder, allowing for the collection of electrical signals for a week. The study aims to analyze these signals using mathematical techniques in the field of electrical engineering to identify any disturbances present in the network and propose solutions to mitigate them. The results of the analysis will indicate whether the use of an active filter is a viable option for improving the quality of electrical energy at the company. Active filters are becoming increasingly popular as a solution to improving the quality of the electrical system, and this paper will describe their operation, advantages, and reasons for their growing use. Additionally, harmonic indices will be analyzed and computer simulations will be carried out in order to construct an active filter capable of meeting the requirements set by the National Electric Energy Agency with regard to electrical levels. This study is expected to contribute to the improvement of the quality of electrical energy at Stemac Grupo Geradores and help other companies in the industry tackle similar problems.

Keywords: *Power Quality, Harmonic Indices, Active Filters, Energy Efficiency.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Comparação entre uma carga linear e carga não-linear no domínio do tempo.....	16
Figura 2- Forma de onda de tensão trifásica ideal em 60Hz.	22
Figura 3- Distorção de corrente causada por uma carga não-linear.	22
Figura 4- Circuito retificador monofásico com filtro capacitivo.....	23
Figura 5 - Formas de onda de tensão e corrente em um retificador.....	23
Figura 6 - Distorções Harmônicas.	26
Figura 7- Representação da Série de Fourier de uma forma de onda distorcida.	26
Figura 8- A Relação entre os domínios do tempo e frequência. a) Coordenadas tridimensionais mostrando tempo, frequência e amplitude. b) Vista no domínio do tempo. c) Vista no domínio da frequência.	27
Figura 9- Correntes harmônicas que fluem através da impedância do sistema resultam em tensões harmônicas na carga.	28
Figura 10- Propagação de harmônicas (geradas por uma carga não-linear) em sistemas de potência.....	28
Figura 11- Comportamento do sinal elétrico por tipo de carga.	29
Figura 12 - Triângulo de potências.	30
Figura 13- Relação das componentes da potência aparente.	32
Figura 14- a) Sistema assimétrico; b) Sistema desequilibrado.....	33
Figura 15- Conjunto de componentes simétricas e sistema original.	34
Figura 16- Soma dos fasores das componentes simétricas.....	34
Figura 17- Resposta dos filtros ideais.....	44
Figura 18- Resposta dos filtros reais.	44
Figura 19- Resposta em frequência dos filtros reais em dB.	45
Figura 20- Descrição básica dos quatro principais tipos de filtro.	46
Figura 21- Circuito do filtro passa-baixa 1ª ordem.	48
Figura 22- Circuito do filtro passa-alta 1ª ordem.	49
Figura 23- Resposta do filtro passa-baixa Butterworth.	50
Figura 24- Resposta do filtro passa-baixa Chebyshev.....	52
Figura 25- Circuito de um filtro ativo passa-baixa 1ª ordem.	53
Figura 26 - Circuito de um filtro ativo passa-baixa de 2ª ordem.....	54

Figura 27- Diagrama de blocos de filtros ativos de 5ª e 6ª ordens.	56
Figura 28 - Conexão do analisador com o sistema de distribuição trifásico.	57
Figura 29- Transformador utilizado para coleta dos dados.	58
Figura 30- Instalação dos instrumentos de medição do analisador de energia.	58
Figura 31- Tensão média diária.	59
Figura 32- Tensão média presente no neutro.	60
Figura 33 - Tensão de fase dia 29/05.	61
Figura 34- Corrente média diária.	62
Figura 35- Corrente dia 29/05.	62
Figura 36 - Forma de onda de tensão trifásica registrada.	63
Figura 37 - Tensão harmônica de 5ª e 7ª ordem.	64
Figura 38 - Tensão harmônica de 3ª e 9ª ordem.	64
Figura 39 - Amplitude percentual por ordem harmônica.	65
Figura 40 - Forma de onda de corrente trifásica registrada.	66
Figura 41 – Correntes harmônicas de fase de 3ª e 9ª ordem.	67
Figura 42 - Correntes harmônicas de fase de 5ª e 11ª ordem.	68
Figura 43 - Correntes de neutro harmônica de 3ª, 5ª, 9ª e 11ª ordem.	69
Figura 44 – Corrente harmônica percentual por ordem.	70
Figura 45 - Fator de potência dia 29/05.	72
Figura 46 - Fator de potência registrado.	73
Figura 47 - Potência reativa capacitiva registrada.	74
Figura 48 - Potência harmônica dia 29/05.	74
Figura 49 - Configuração típica do filtro ativo paralelo.	77
Figura 50 - Diagrama de blocos da estratégia de controle do filtro ativo.	79
Figura 51 - Detector de tensão de sequência positiva fundamental.	81
Figura 52 - Diagrama de blocos do circuito PLL.	81
Figura 53 - Carga simulada no Simulink/Matlab®.	82
Figura 54 - Conexão do filtro ativo no sistema.	83
Figura 55 - Correntes de fase na rede.	83
Figura 56 - Corrente de referência e compensação.	84
Figura 57 - Harmônicos de sequência zero.	85

Figura 58 - Harmônicos de sequência positiva e negativa.	85
Figura 59 - Harmônicos totais de corrente.	86
Figura 60 - Fator de potência do sistema simulado.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ordens harmônicas.	25
Tabela 2 - Limites para os desequilíbrios de tensão.	36
Tabela 3- Terminologia.	39
Tabela 4- Limites de distorções harmônicas totais de tensão.	40
Tabela 5 - Parâmetros a e b para filtros Butterworth.	54
Tabela 6 - Médias de tensões fase-neutro e desequilíbrio diário.	60
Tabela 7 - Correntes médias e desequilíbrio diário.	61
Tabela 8 - DTT de tensão.	65
Tabela 9 - Limites de distorções de correntes para sistemas alimentados em 120V a 69kV.	71
Tabela 10 - Corrente máxima demandada e relação <i>ISIL</i>	71
Tabela 11 - Parâmetros dos componentes da carga simulada.	82

LISTA DE ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Engenharia Elétrica
DB	Decibel
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PLL	<i>Phase-Locked-Loop</i>
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
SEP	Sistema Elétrico de Potência
DTT	Distorção Harmônica Total

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	15
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	15
1.2	OBJETIVOS.....	16
1.2.1	<i>Objetivo Geral</i>	<i>16</i>
1.2.2	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>17</i>
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1	CONSIDERAÇÕES INICIAS.....	19
2.2	QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA (QEE).....	19
2.3	CARGAS NÃO LINEARES	21
2.3.1	<i>Harmônicos</i>	<i>24</i>
2.3.2	<i>Fator de Potência</i>	<i>29</i>
2.3.3	<i>Componentes simétricas</i>	<i>32</i>
2.4	PRODIST	37
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	40
3	FILTROS PARA MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS	42
3.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	42
3.2	FILTROS ELÉTRICOS	42
3.3	FILTROS PASSIVOS	47
3.3.1	<i>Filtro Passa-Baixa</i>	<i>48</i>
3.3.2	<i>Filtro Passa-Alta</i>	<i>49</i>
3.4	FILTROS ATIVOS	49
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
4	REGISTRO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS NA EMPRESA STEMAC	57
4.1	REGISTRO	57
4.2	ANÁLISE	59
4.2.1	<i>Valores de tensão e corrente.....</i>	<i>59</i>
4.2.2	<i>Distorções Harmônicas de Tensão.....</i>	<i>63</i>
4.2.3	<i>Distorções Harmônicas de Corrente</i>	<i>66</i>
4.2.4	<i>Fator de Potência</i>	<i>72</i>
4.3	CONSIDERAÇÕES FINAIS	75
5	SIMULAÇÃO DO FILTRO ATIVO PROPOSTO	77

5.1	ESTRATÉGIA DE CONTROLE	77
5.1.1	<i>Detector de Sequência Positiva</i>	80
5.2	RESULTADOS DA SIMULAÇÃO	82
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	87
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	89

1 INTRODUÇÃO

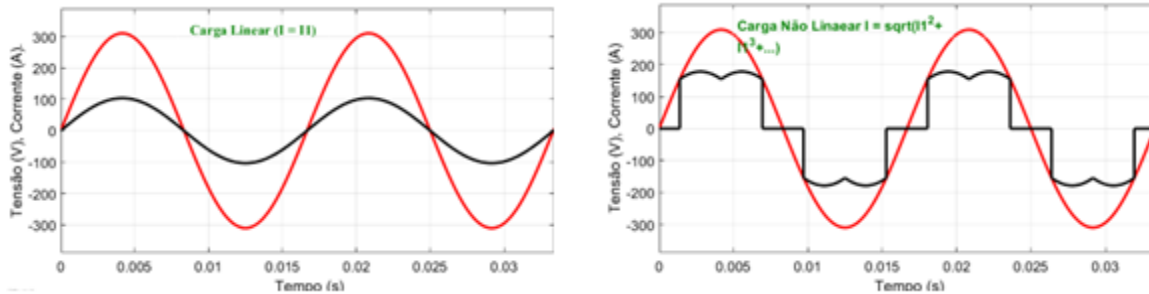
1.1 Considerações Iniciais

A energia elétrica é essencial para melhorar a qualidade de vida e aumentar a capacidade econômica de um país. É fundamental que um país se preocupe com o crescimento de sua produção energética e com a qualidade e eficiência desta energia. No Brasil, a preocupação em relação à eficiência energética recebeu uma atenção inicial em 1984, quando o suprimento de energia elétrica passou a ser crítico e o governo federal criou o Programa Brasileiro de Etiquetagem, conduzido pelo INMETRO, com o objetivo de informar os consumidores sobre a eficiência dos equipamentos e, a partir de 2009, das edificações e influenciar sua decisão de compra, induzindo a melhoria da eficiência do parque consumidor (BRASIL, 2019).

Ao longo dos anos, esses programas promoveram um aumento da eficiência energética e uma maior conscientização da importância de hábitos adequados no uso de energia. Os efeitos desses programas foram observados progressivamente. A indústria tem investido cada vez mais na automação e acionamentos eletrônicos de dispositivos e máquinas, visando aumentar a produção.

No entanto, como aponta (ROCHA, 2016), parece paradoxal que a ênfase no aumento da eficiência energética tenha conduzido ao uso intensivo da eletrônica de potência, o que, por sua vez, tem causado um aumento considerável das cargas não-lineares instaladas no Sistema Elétrico de Potência (SEP). Esses dispositivos semicondutores chaveados fornecem uma resposta rápida, mas, eventualmente, podem causar distorções nos sinais de tensão e corrente do sistema. A Figura 1 exemplifica a distorção no sinal de corrente presente em uma carga não-linear.

Figura 1- Comparação entre uma carga linear e carga não-linear no domínio do tempo.



Fonte: Próprio autor

À medida que a demanda por energia elétrica cresce e a indústria investe em automação e dispositivos eletrônicos, a presença de cargas não-lineares no Sistema Elétrico de Potência aumenta. Portanto, considerando a importância do assunto e a necessidade de encontrar maneiras de mitigar problemas relacionados à qualidade de energia, estudos e investigações envolvendo tópicos relacionados devem ser incentivados. O desenvolvimento de novas tecnologias e dispositivos para melhorar a qualidade de energia tem recebido cada vez mais atenção nos últimos anos, pois oferecem uma solução eficaz para mitigar distorções harmônicas causadas por cargas não lineares.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é de grande relevância, uma vez que a qualidade da energia elétrica é fundamental para garantir a operação segura e eficiente de equipamentos industriais, além de impactar diretamente nos custos de produção. Nesse sentido, a investigação dos índices harmônicos presentes na empresa Stemac, filial Itumbiara, pode proporcionar a oportunidade de se implementar soluções seletivas para correção dos componentes harmônicos e fator de potência.

Para realizar essa investigação, será utilizada uma ferramenta importante: o analisador de qualidade de potência e energia trifásico Fluke Modelo 435-II. Com ele, será possível realizar a coleta de dados que permitirá a análise da qualidade da energia elétrica utilizada pela Stemac. Com base nessas informações, serão realizadas simulações, utilizando Matlab™/Simulink®, afim de definir um filtro ativo capaz mitigar os problemas de distorção harmônica identificados na coleta de dados.

É válido destacar que o estudo da qualidade da energia elétrica é fundamental para todas as indústrias que utilizam equipamentos elétricos e eletrônicos em sua produção, uma vez que as cargas não-lineares são cada vez mais comuns em função do uso crescente de dispositivos eletrônicos e da automação industrial

Por fim, a investigação dos índices harmônicos na filial Itumbiara da Stemac, bem como a implementação de um filtro ativo, pode ser um importante passo para a empresa no sentido de melhorar sua qualidade da energia elétrica, o que pode aumentar a vida útil dos equipamentos e reduzir as paradas para manutenção.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Instalação do medidor de qualidade de potência e energia trifásico no alimentador da empresa Stemac;
- Coleta e análise dos dados elétricos;
- Definição da topologia de filtro ativo para mitigação dos harmônicos em setor industrial;
- Simulação, testes e ajustes do sistema completo envolvendo Fonte + Carga + Inversor PWM (Filtro Ativo) + Controladores;

A análise da qualidade de energia em uma empresa é a primeira contribuição deste trabalho, que se utiliza de ferramentas de análise de sinal para realizar estudos detalhados dos dados coletados. A segunda contribuição é a demonstração da importância técnica dos filtros

ativos, que são capazes de filtrarem a energia e injetar correntes de compensação seletivas. Além disso, este trabalho tem como objetivo expandir a área de pesquisa do candidato em qualidade de energia e sua importância no sistema elétrico de potência.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

A qualidade adequada da energia elétrica desempenha um papel fundamental na operação confiável e eficiente de equipamentos e sistemas elétricos. Neste capítulo, será explorado a importância da qualidade da energia e os desafios associados a ela. Analisaremos as cargas não lineares e seus impactos, como os harmônicos e as componentes simétricas, que introduzem distorções indesejáveis na forma de onda e afetam a eficiência do sistema.

Além disso, será abordado o PRODIST, em particular seu módulo 8, como referência para estabelecer critérios e regulamentações que visam melhorar a qualidade da energia elétrica fornecida. Este capítulo visa adentrar neste importante tema e explorar soluções para garantir uma energia elétrica de qualidade

2.2 Qualidade da Energia Elétrica (QEE)

O termo “qualidade da energia” inclui uma gama de fenômenos, abrangendo áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas relacionados com a comunicação em redes de transmissão de dados. Dessa forma, devem ser divulgados e reconhecidos por todos os setores envolvidos com o consumo, transmissão e geração de energia elétrica. A interpretação destes fenômenos, principalmente as distorções de tensões e correntes, localizadas tanto nos PACs (ponto de acoplamento comum) como também dentro das instalações dos próprios consumidores de energia, está associada diretamente à correção do fator de potência, racionalização da energia e aumento da produtividade (PAULILO, 2013).

Segundo (MIKKILI; PANDA, 2018), qualidade de energia é definida como "qualquer problema de energia manifestado em tensão, corrente ou desvio de frequência que leva a danos,

mau funcionamento e operação indevida do equipamento do consumidor”. A má qualidade da energia elétrica causa muitos danos ao sistema, e tem um impacto econômico negativo sobre as concessionárias e consumidores. Para (SCHIPMAN; DELINCÉ, 2010) podem ser definidos os seguintes fatores que contribuem para uma baixa qualidade de energia:

- Poluição harmônica, pois causa stress extra nas redes e faz com que as instalações funcionem menos eficientemente;
- Desequilíbrio de carga, uma vez que as cargas desequilibradas podem resultar em desequilíbrio de tensão excessivo causando tensão em outras cargas conectadas à mesma rede, e levando a um aumento da corrente de neutro e a um aumento da tensão de neutro para terra.

Ainda de acordo com (SCHIPMAN; DELINCÉ, 2010) as possíveis consequências da má qualidade de energia são:

- Falhas inesperadas no fornecimento de energia elétrica (Disjuntores desarmando, fusíveis queimando);
- Falha, mau funcionamento ou aquecimento excessivo do equipamento (transformadores, motores), levando à redução de sua vida útil;
- Danos a equipamentos sensíveis (computadores, sistemas de controle da linha de produção);
- Penalidades impostas pelas concessionárias porque o circuito polui demais a rede de alimentação.

Importante então destacar que a responsabilidade para uma energia elétrica de qualidade não é somente das concessionárias, o consumidor pode contribuir na poluição do sistema elétrico. Conforme abordado nas considerações iniciais deste trabalho, cargas não-lineares presentes no circuito elétrico dos consumidores tendem a gerar sinais de correntes distorcidas promovendo a distorção da onda de tensão.

A presença de distorções harmônicas no sistema elétrico de potência deve ser vista como indesejável, pois propicia gastos financeiros desnecessários para concessionárias e consumidores. Se por um lado a empresa perde pela parada de produção, a concessionária perde no faturamento. Os harmônicos ainda de maneira geral, são responsáveis por perdas ôhmicas, por solicitações

anormais de isolamento e pela má operação de equipamentos (GARCIA, 2010). Ainda de acordo com (ROCHA, 2016), um baixo fator de potência também caracteriza uma pobre qualidade da energia da instalação, pois a circulação de uma potência reativa causa perdas por efeito Joule nos condutores e transformadores. Também, a potência reativa ocupa espaço da seção do condutor reduzindo a capacidade de transferir potência ativa.

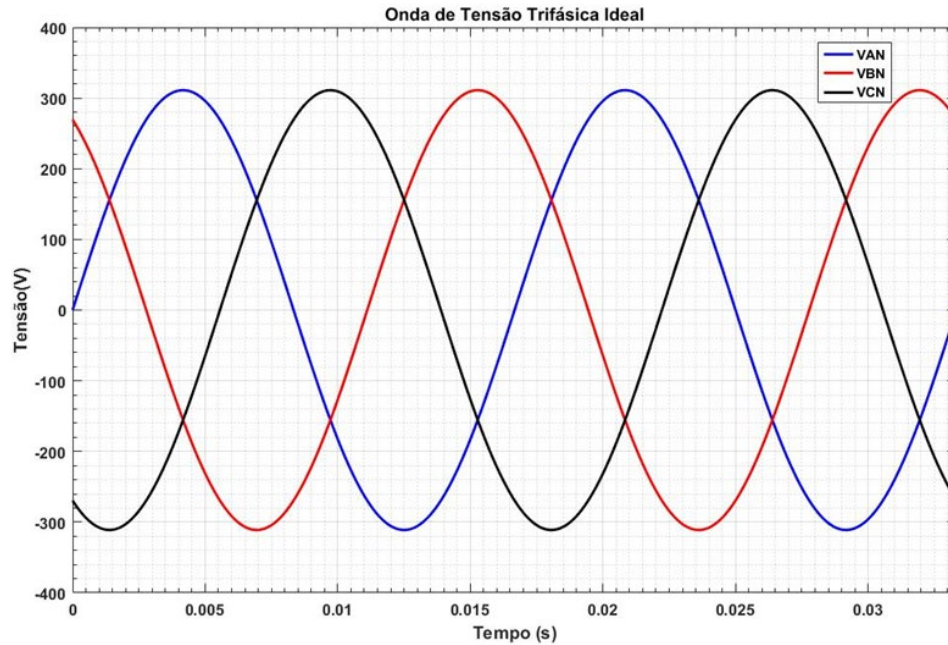
A solução mais empregada para atenuação de harmônicos é a utilização de filtros que são classificados em passivos, ativos e híbridos. Os filtros passivos consistem da combinação de capacitores, resistores e indutores (RC, RL, LC). Os filtros ativos possuem elementos ativos como amplificador operacional realimentado, combinado com capacitores e resistores. Já os filtros híbridos são compostos pela combinação dos filtros passivos e ativos (OLIVEIRA, Wagner José Nascimento de., 2016).

No que se trata de normatização e padronização referente a QEE fornecida pelas concessionárias de energia, a autarquia responsável por isto é a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que por meio dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST) no seu módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, estabelece a qualidade do produto, serviço e do tratamento de reclamações. Sobre este módulo, ele será abordado com mais detalhes mais a frente neste trabalho.

2.3 Cargas Não Lineares

Os parâmetros para uma qualidade de energia ideal em uma fonte de tensão ao alimentar uma carga elétrica trifásica, consiste em uma amplitude condizente com a carga, tensões defasadas em 120° e operando em 60 Hz. A Figura 2 mostra o comportamento da onda de tensão seguindo as condições ideais supracitadas, que normalmente são entregues por unidades geradoras de energia.

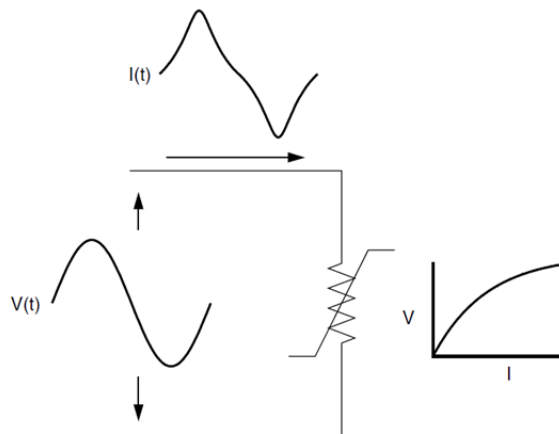
Figura 2- Forma de onda de tensão trifásica ideal em 60Hz.



Fonte: Próprio autor

Quando aplicado esta tensão ideal em uma carga elétrica, as características desta carga definem a forma de onda de corrente sobre ela, podendo ocasionar alterações de magnitude, fase e frequência nos níveis de tensão. Se a forma de onda de corrente permanecer se comportando igual a onda de tensão, senoidal, dizemos que esta carga é linear, caso ocorra uma deformação na onda de corrente, esta carga é denominada não-linear. Isto é apresentado na Figura 3.

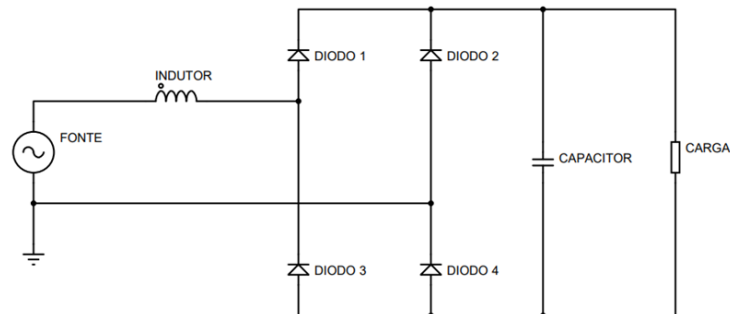
Figura 3- Distorção de corrente causada por uma carga não-linear.



Fonte: (DUGAN *et al.*, 2004)

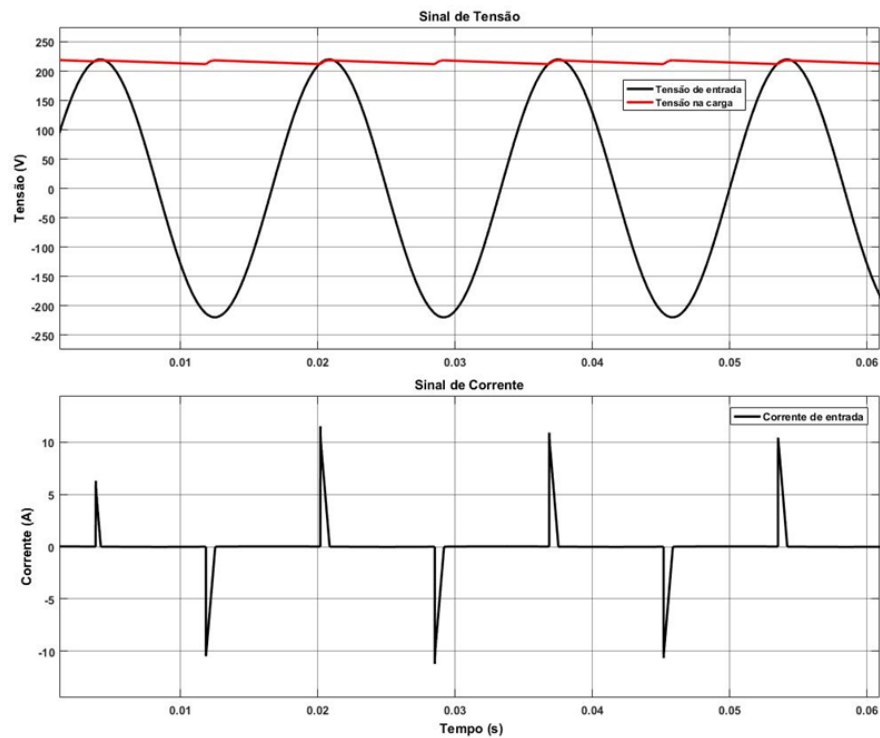
Computadores são cargas não-lineares assim como televisores, inversores, fornos a arco, máquinas de solda, etc. Segundo (KUSKO; THOMPSON, 2007) o retificador, para conversão de corrente alternada em corrente contínua, é a carga não-linear mais comum encontrada em sistemas elétricos. Na Figura 4 é mostrado o circuito de um retificador monofásico com filtro capacitivo e na Figura 5 é apresentada as formas de onda de tensão na entrada e na carga assim como a corrente de entrada.

Figura 4- Circuito retificador monofásico com filtro capacitivo.



Fonte: Próprio autor

Figura 5 - Formas de onda de tensão e corrente em um retificador.



Fonte: Próprio autor

Na Figura 5 vemos que ao fornecer uma tensão senoidal para o retificador, ele consegue entregar uma tensão próxima à uma corrente contínua para a carga, porém ocasiona uma grande deformação na corrente de entrada do retificador. Logo conclui-se que este retificador monofásico é uma carga não-linear.

2.3.1 Harmônicos

A palavra “harmônico” foi originalmente definida em acústica, significando a vibração de um fio ou uma coluna de ar, com frequência múltipla e diferente da fundamental, provocando uma distorção na qualidade do som resultante (GARCIA, 2010). Os Harmônicos no âmbito da engenharia elétrica são sinais de correntes ou tensões senoidais múltiplas inteiras da frequência fundamental no qual o SEP opera.

A equação 2.1 descreve o comportamento de um sinal elétrico senoidal, no caso do Brasil a frequência f é igual a 60Hz.

$$V = V_{m\tilde{a}x} \times \text{sen}(n2\pi ft + \phi) \quad (2.1)$$

Adotando $2\pi f$ como ω na equação 2.1, temos:

$$V = V_{m\acute{a}x} \times \text{sen}(n\omega t + \phi) \quad (2.2)$$

Onde:

$V_{m\acute{a}x}$: Amplitude do sinal;

n : Ordem harmônica;

t : Tempo amostrado;

ω : velocidade angular em radianos por segundo;

ϕ : Ângulo de fase em radianos.

Por exemplo, ao utilizar a fundamental de 60Hz diz-se que a 2ª componente harmônica seria 120Hz (2x60Hz), que a 3ª componente harmônica seria 180Hz (3x60Hz), que a 4ª componente harmônica seria 240Hz (4x60Hz) e assim por diante, conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1- Ordens harmônicas.

Ordem	1ª	2ª	3ª	4ª	5ª	6ª	7ª	8ª	9ª
Frequência	60Hz	120Hz	180Hz	240Hz	300Hz	360Hz	420Hz	480Hz	530Hz

Fonte: Próprio Autor

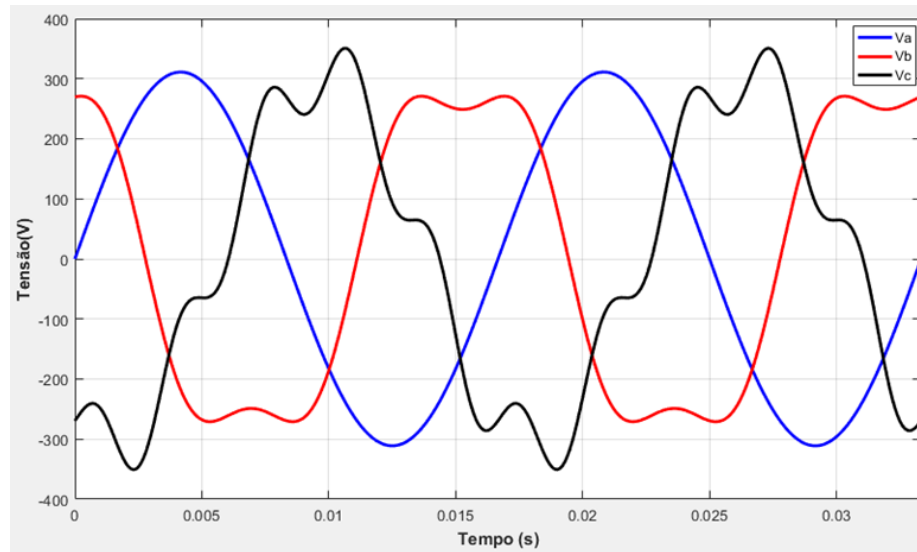
Qualquer forma de onda periódica e distorcida pode ser expressa como uma soma de ondas de senoides e/ou cossenoides. Esta noção é referida como Série de Fourier, que foi descoberta pelo matemático e físico francês Joseph Fourier. Na Figura 6 é apresentado uma onda ideal em azul descrita pela equação 2.3, em vermelho temos a mesma onda, porém foi somado ao seu sinal uma componente harmônica de 3ª ordem com 20% da amplitude da tensão nominal conforme equação 2.4. E por fim na onda em preto, tem-se o mesmo da onda em vermelho, porém com uma componente de 5ª ordem conforme equação 2.5.

$$V_a = (\sqrt{2} * 220) * \text{sen}(\omega t) \quad (2.3)$$

$$V_b = (\sqrt{2} * 220) * \text{sen}\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) + (0,2 * \sqrt{2} * 220) * \text{sen}(3 * \omega t) \quad (2.4)$$

$$V_c = (\sqrt{2} * 220) * \text{sen}\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) + (0,2 * \sqrt{2} * 220) * \text{sen}(5 * \omega t) \quad (2.5)$$

Figura 6 - Distorções Harmônicas.

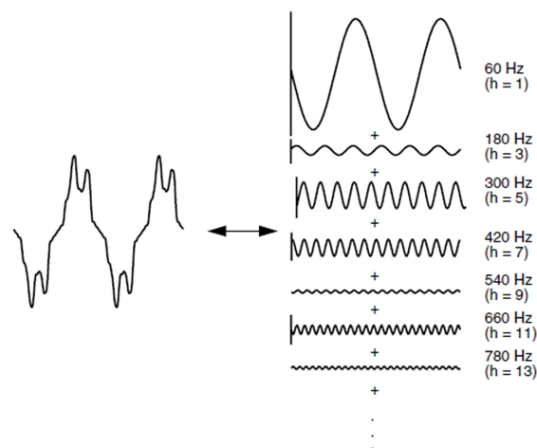


Fonte: Próprio autor

Nota-se pela Figura 6 como um exemplo de que cada ordem harmônica promove distorções diferentes na onda resultante, e o grau de deformação depende da amplitude da componente harmônica. Quanto maior a amplitude da componente harmônica, maior será a distorção na onda resultante. Por tais problemas supracitados, há a necessidade de parâmetros que definem limites e controle de harmônicos no sistema elétrico de potência.

A Figura 7 mostra um sinal periódico não senoidal como sendo a soma de sinais senoidais com componentes harmônicas da fundamental de 60Hz.

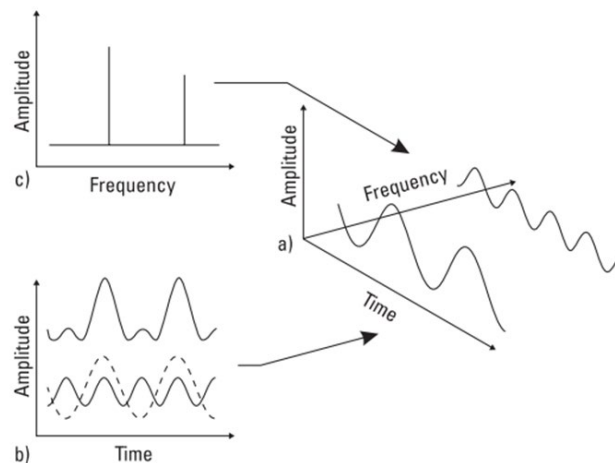
Figura 7- Representação da Série de Fourier de uma forma de onda distorcida.



Fonte: (DUGAN *et al.*, 2004)

Outro ponto importante para análise sobre componentes harmônicos é a representação no domínio da frequência. A Figura 8-a apresenta um gráfico tridimensional mostrando dois sinais senoidais.

Figura 8- A Relação entre os domínios do tempo e frequência. a) Coordenadas tridimensionais mostrando tempo, frequência e amplitude. b) Vista no domínio do tempo. c) Vista no domínio da frequência.

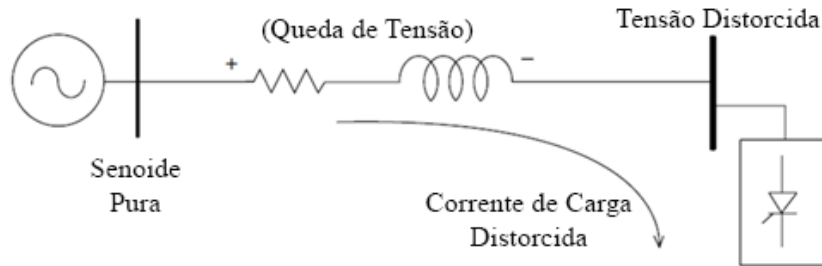


Fonte: (AGILENT TECHNOLOGIES, 2000)

Até aqui neste trabalho todos os sinais apresentados foram mostrados no domínio do tempo, conforme ilustrado pela Figura 8-b onde pode-se ver as ondas senoidais. A Figura 8-c apresenta o que é chamado de domínio da frequência, cada onda senoidal está separada para cada sinal de entrada como uma linha vertical, seu valor representa sua amplitude e sua posição representa sua frequência. Este domínio da frequência é chamado de espectro do sinal e cada linha vertical da onda senoidal do espectro é chamado de componente do sinal total.

Suponha uma fonte de tensão puramente senoidal, na existência de um conjunto de cargas não-lineares que drenam uma corrente distorcida da rede. Esta corrente elétrica que passará pela impedância série do sistema causa uma queda de tensão para cada ordem harmônica presente no seu sinal, gerando uma tensão distorcida na carga. Conforme Figura 9.

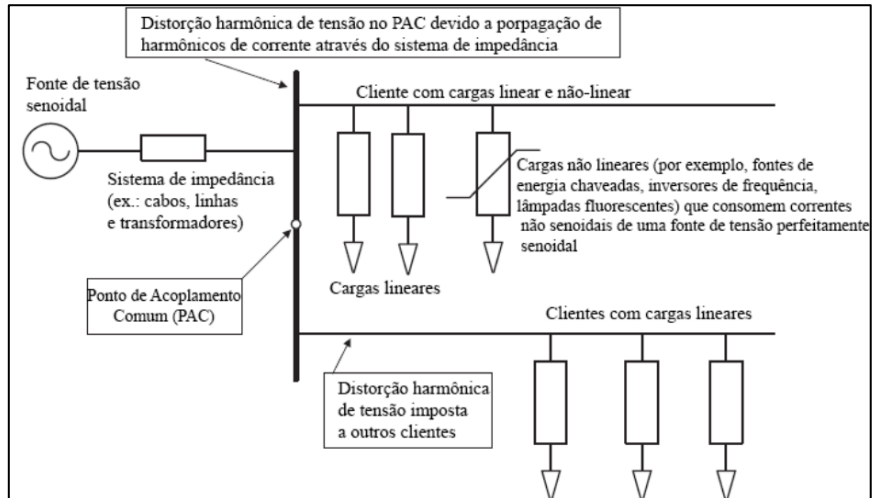
Figura 9- Correntes harmônicas que fluem através da impedância do sistema resultam em tensões harmônicas na carga.



Fonte: (DUGAN *et al.*, 2004) (Adaptada pelo próprio autor)

Além disto, de acordo com (FUCHS; MASOUM, 2008) devido à impedância do sistema elétrico, qualquer corrente (ou tensão) harmônica resultará na geração e propagação de tensão (ou corrente) harmônicas e afeta todo o sistema de energia, isto é apresentado pela Figura 10.

Figura 10- Propagação de harmônicas (geradas por uma carga não-linear) em sistemas de potência.



Fonte: (FUCHS; MASOUM, 2008)(Adaptada pelo próprio autor)

Assim, as distorções harmônicas de tensões serão impostas a outros consumidores conectados ao mesmo ponto de acoplamento comum (PAC) devido aquele consumidor que possui cargas não-lineares.

2.3.2 Fator de Potência

Quando falamos sobre eficiência energética e qualidade da energia um parâmetro muito importante é o fator de potência. É ele que determina o quanto de potência útil está sendo utilizada no sistema. A potência elétrica em sistemas elétricos pode ser calculada pelo produto da tensão e corrente, conforme equação 2.6.

$$P = V \times I \quad (2.6)$$

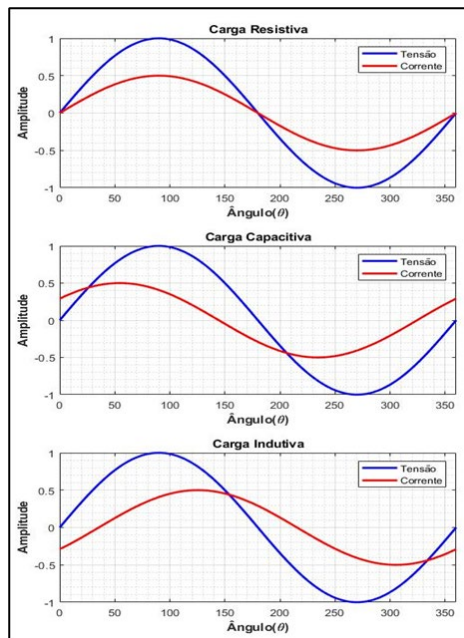
P: Potência;

V: Tensão;

I: Corrente.

Isto aplica-se a sistemas de corrente contínua ou a cargas puramente resistivas, porém as cargas presentes no sistema elétrico contêm características capacitivas e indutivas, e ao alimentar uma carga com corrente alternada, ocorre um desfasamento angular entre a onda de tensão e corrente que pode ser observado na Figura 11.

Figura 11- Comportamento do sinal elétrico por tipo de carga.



Fonte: Próprio autor

Nota-se que na carga resistiva o sinal de corrente está sincronizado angularmente com o sinal de tensão, ou pode-se dizer que está em ‘fase’ com o sinal de tensão. Na carga capacitiva o sinal de corrente está adiantado em relação ao sinal de tensão, enquanto que na carga indutiva atrasado. Assim, a equação 2.6 não descreve a potência elétrica na presença de cargas indutivas e capacitivas em corrente alternada, surgindo assim três potências: potência ativa (P), potência reativa (Q) e potência aparente (S). As três são apresentadas nas equações a seguir.

$$P = V \times I \times \cos(\theta) \quad (2.7)$$

$$Q = V \times I \times \sin(\theta) \quad (2.8)$$

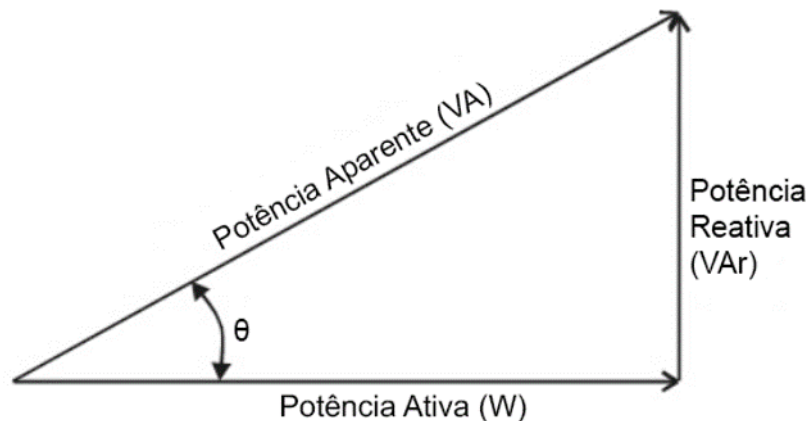
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.9)$$

Onde:

θ : diferença angular do sinal de tensão e corrente ($\theta_v - \theta_i$)

A potência reativa, determinada em VAr (Volt-Amper reativo), não realiza trabalho, mas é necessária e consumida na geração do campo eletromagnético responsável pelo funcionamento de motores, transformadores e geradores. Já a potência que realiza trabalho é a potência ativa, determinada em W (Watts) e é a potência utilizada para conversão de energia elétrica em energia cinética, térmica entre outras. Por fim, a potência aparente, dada em VA (Volt-Amper), é a composição das potências P e Q , conforme apresentado na equação 2.9. A Figura 12 apresenta o triângulo de potência que relaciona as três potências presentes num circuito elétrico.

Figura 12 - Triângulo de potências.



Fonte: Próprio autor

A equação 2.10 apresenta o fator de potência (FP).

$$FP = \cos(\theta) = \frac{P}{S} \quad (2.10)$$

O fator de potência é intimamente ligado ao tipo de carga e sua resposta ocasionada no desfasamento angular, conforme Figura 11 e equação 2.10. Ele varia de zero à um, podendo estar adiantado ou atrasado. Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1 indutivo ou 1 e 0,92 capacitivo, de acordo com regulamentação vigente (ANEEL, 2020).

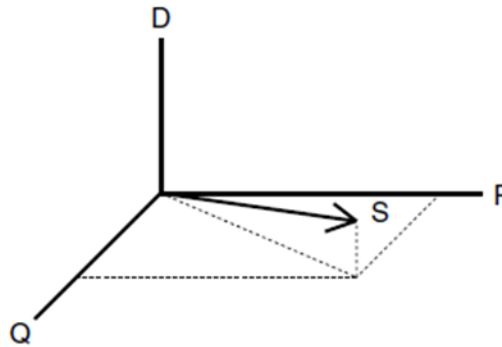
Na presença de distorções harmônicas, o fator de potência terá contribuição de toda a potência ativa, incluindo a potência fundamental e frequências harmônicas. Devido a presença de harmônicas a equação 2.9 não será válida. Assim, a equação 2.11 considera estas distorções no fator de potência.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.11)$$

Onde D representa todos os produtos cruzados de tensão e corrente em diferentes frequências, que não produzem potência média (DUGAN *et al.*, 2004). A

Figura 13 apresenta uma representação de como seria uma relação entre as potências, assim como foi apresentado pela Figura 12 dos triângulos de potências.

Figura 13- Relação das componentes da potência aparente.



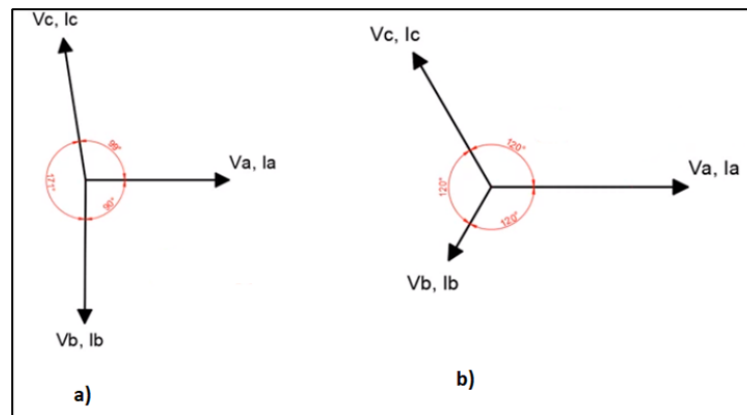
Fonte: (DUGAN *et al.*, 2004)

2.3.3 Componentes simétricas

Em sistemas ideais os parâmetros elétricos de tensão e corrente devem ser balanceados, possuindo o mesmo módulo e defasados entre si de 120° para sistemas trifásicos. Porém isto não está presente no sistema elétrico de potência, principalmente quando mais se afasta de centrais geradoras e se aproxima de consumidores finais.

No SEP pode-se ter sistemas assimétricos, desequilibrados e desbalanceados. Em sistemas assimétricos os fasores possuem o mesmo módulo, porém os ângulos de defasagem são distintos, já em sistemas desequilibrados, onde os fasores possuem os módulos diferentes, mas o mesmo desfasamento angular entre si. É apresentado pela Figura 14 a representação da corrente e tensão em fasores para sistemas assimétricos e desequilibrados.

Figura 14- a) Sistema assimétrico; b) Sistema desequilibrado.



Fonte: (LIMA, 2021)

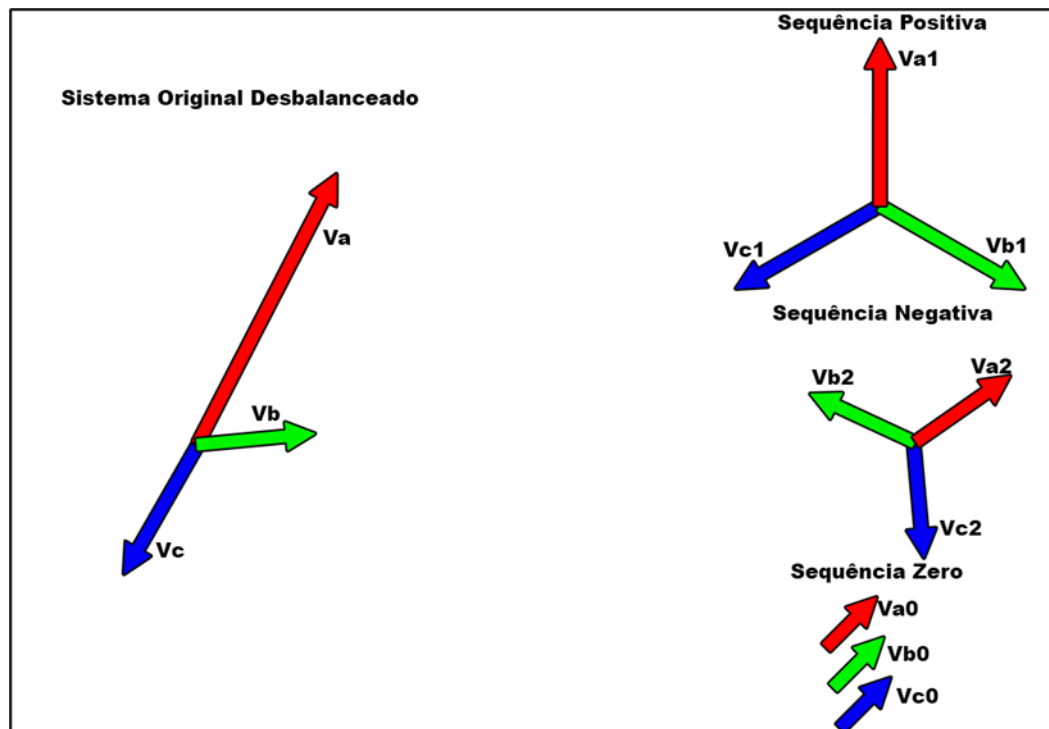
Em sistemas desbalanceados tanto os módulos quanto o defasamento angular dos fasores são distintos. Um dos métodos utilizados para análise em sistemas com desequilíbrio é o método das componentes simétricas. Proposto por C.L. Fortescue em 1918, as componentes simétricas são capazes de transformar sistemas de n fasores desequilibrados em $n-1$ fasores equilibrados de n fases balanceadas e um sistema de fase zero, chamados de sequência positiva, negativa e zero.

- Componentes de sequência positiva: São três fasores iguais em módulo, 120° defasados entre si e com a mesma sequência de fase dos fasores originais;
- Componentes de sequência negativa: São três fasores iguais em módulo, 120° defasados entre si e com a sequência de fase contrária dos fasores originais;
- Componentes de sequência zero: São três fasores iguais em módulo e sem defasagem entre si.

Com isto, pode-se decompor as tensões/correntes de fase em componentes simétricas. Na Figura 15 são ilustradas as componentes simétricas separadas dos fasores das fases do sistema

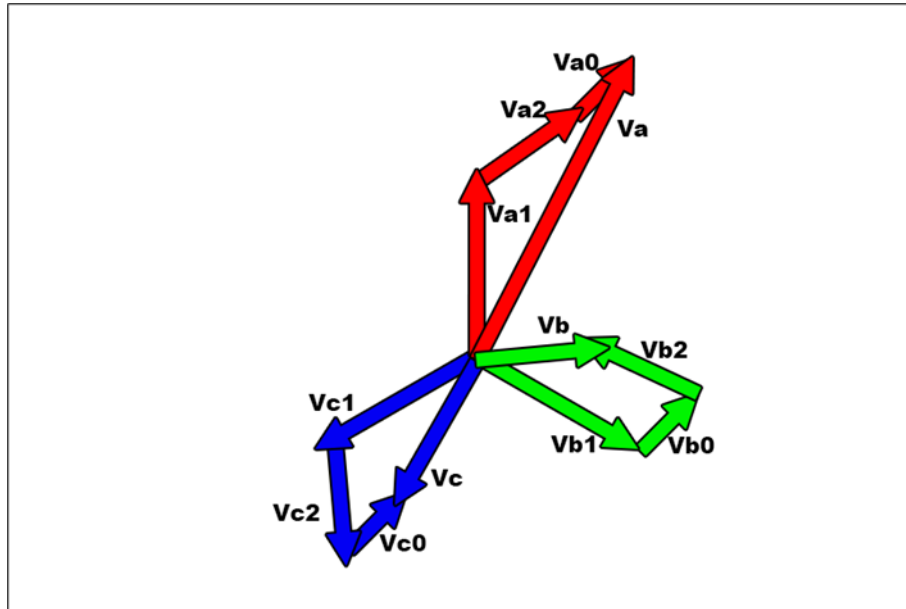
original desbalanceado e na Figura 16 demonstra que cada um dos fasores de fase de um sistema desbalanceado será a soma dos seus respectivos componentes de sequência.

Figura 15- Conjunto de componentes simétricas e sistema original.



Fonte: Próprio autor

Figura 16- Soma dos fasores das componentes simétricas.



Fonte: Próprio autor

Assim, a soma fasorial matematicamente é descrita como:

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_b = \dot{V}_{b1} + \dot{V}_{b2} + \dot{V}_{b0} \\ \dot{V}_c = \dot{V}_{c1} + \dot{V}_{c2} + \dot{V}_{c0} \end{cases}$$

Uma maneira de determinar os valores das tensões do sistema original a partir de apenas uma fase das componentes de sequência é a utilização do operador a , o qual é um fasor de módulo unitário com ângulo de 120° , conforme descrito abaixo:

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

$$a^2 = 1 \angle -120^\circ$$

Assim, as tensões de fase do sistema original podem ser definidas como:

$$\begin{cases} \dot{V}_a = \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_b = a^2 \dot{V}_{a1} + a \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_c = a \dot{V}_{a1} + a^2 \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \end{cases}$$

Na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix}$$

A partir das tensões do sistema desbalanceado é possível determinar as componentes de sequência fazendo o processo inverso, apresentado abaixo:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

As componentes harmônicas presentes em um circuito desbalanceado apresentam impactos distintos de acordo com sua ordem devido à sua característica de componente simétrica.

- Harmônicos de ordem $3n + 1$: São de sequência positiva;
- Harmônicos de ordem $3n - 1$: São de sequência negativa;
- Harmônicos de ordem $3n$: são de sequência zero.

A expressão para o cálculo do desequilíbrio de tensão definido pelo (ANEEL, 2020) é dado por:

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (2.12)$$

Onde:

FD : Fator de desequilíbrio de tensão;

V_- : Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental;

V_+ : Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental

Em relação os limites estabelecidos pelo PRODIST no seu módulo 8, os valores máximos desejáveis para o indicador de desequilíbrio de tensão no sistema de distribuição são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão Nominal	
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: (ANEEL, 2020)

Para (OLIVEIRA, 2011), o desequilíbrio de tensão pode provocar problemas indesejáveis na operação de equipamentos, dentre os quais podemos destacar os motores de indução trifásicos (MIT).

2.4 PRODIST

Os Procedimentos de Distribuição - PRODIST são uma série de documentos elaborados pela ANEEL que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O PRODIST é dividido em 11 módulos:

- Módulo 1 – Introdução: são definidos os objetivos, a aplicabilidade e a composição dos Módulos do PRODIST
- Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição: estabelece as diretrizes, os requisitos mínimos de informações necessárias para os estudos e definir critérios básicos para troca de informações entre os diversos agentes envolvidos no planejamento da expansão do sistema de distribuição;
- Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição: estabelece as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso, ao sistema de distribuição, e define os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão, aplicando-se aos novos acessantes bem como aos existentes;

- Módulo 4 – Procedimentos Operativos do Sistema de Distribuição: estabelece que as distribuidoras e demais agentes formulem os planos e programas operacionais dos sistemas de distribuição, bem como controle da carga em situação de emergência, previsão de carga e controle da qualidade do suprimento de energia elétrica;
- **Módulo 5** – Sistemas de Medição: estabelece os requisitos mínimos para medição das grandezas elétricas do sistema de distribuição aplicáveis ao faturamento, à **qualidade da energia elétrica**, ao planejamento da expansão e à operação do sistema de distribuição;
- Módulo 6 – Informações Requeridas e Obrigações: define e detalha como as informações serão trocadas entre os acessantes e as distribuidoras de energia, estabelecendo obrigações para atender os procedimentos, critérios e requisitos dos módulos técnicos;
- Módulo 7 – Cálculo de Perdas na Distribuição: estabelece a metodologia, os procedimentos para a obtenção das informações, bem como os indicadores para avaliações das perdas no sistema de distribuição de energia elétrica;
- **Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica:** estabelece os parâmetros mínimos e máximos das grandezas referente à QEE, dos sistemas de distribuição, **a metodologia de medição**, e caracteriza as **perturbações na forma de onda de tensão**, bem como a qualidade do produto e do serviço prestado;
- Módulo 9 – Ressarcimento de Danos Elétricos: estabelece os procedimentos, a forma de apuração a serem observadas pelas distribuidoras na análise de processos de ressarcimento e caracteriza como proceder quanto a resposta ao consumidor no caso de ocorrência de danos elétricos;
- Módulo 10 – Sistema de Informação Geográfico Regulatório: estabelece o conjunto mínimo de informações da distribuidora de energia, as quais compõem o sistema de informações geográficas regulatórias, o padrão de estrutura das informações (requisitos mínimos) e o formato dos arquivos digitais, o prazo e a forma de envio destas informações, bem como a forma de uso e divulgação destas informações(FLUKE, 2019);

- Módulo 11 – Fatura de Energia Elétrica e Informações Suplementares: estabelece os procedimentos a serem observados na emissão das faturas de energia elétrica; define quais informações e sobre a forma de apresentação nas faturas e informações suplementares quanto da opção pela fatura eletrônica e da opção pelo resumo da mesma.

Para o desenvolvimento deste trabalho percebe-se então a importância dos procedimentos e padronizações contidas no PRODIST Módulo 8, visto que ao abordar sobre metodologia de medição, perturbações na forma de onda de tensão e corrente, e a qualidade da energia elétrica é necessário segui-la.

Referente à instrumentação e metodologia de medição, estabelece alguns pontos, entre eles estão:

- As leituras devem ser obtidas por meio de equipamentos que operem segundo o princípio da amostragem digital;
- Um único instrumento de medição poderá ser utilizado para medir todos os fenômenos da qualidade do produto;
- O conjunto de leituras para gerar os indicadores da qualidade do produto de regime permanente deve compreender o registro de 1008 leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada.

Referente às distorções harmônicas, a Tabela 3 sintetiza a terminologia aplicável ao cálculo das distorções e a Tabela 4 consta os limites para as distorções harmônicas totais.

Tabela 3- Terminologia.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DIT_3\%$

Tensão harmônica de ordem h	V_h
Tensão fundamental medida	V_1
Ordem harmônica máxima	$hmáx$

Fonte: (ANEEL, 2020)

Tabela 4- Limites de distorções harmônicas totais de tensão.

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} \leq V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n \leq 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_P 95\%$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_i 95\%$	7,5%	6,0%	4,0%
$DIT_3 95\%$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (ANEEL, 2020)

Os 95% descritos na tabela 4 é um índice usado para descrever que o valor do indicador respectivo foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas. Para o cálculo de distorções harmônicas individuais e totais é utilizada a equação 2.13 e 2.14, respectivamente. Estas e as demais equações para cálculos de ordens harmônicas específicas podem ser encontradas em (ANEEL, 2020).

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.13)$$

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.14)$$

Todos os valores descritos na Tabela 4 são os limites que correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

2.5 Considerações Finais

A qualidade da energia elétrica é uma preocupação crescente na indústria e nas residências, devido ao aumento do uso de cargas não lineares e da sensibilidade dos equipamentos eletrônicos a distúrbios elétricos. Neste capítulo, foi explorado os conceitos

fundamentais relacionados à qualidade da energia, e identificado que cargas não lineares, como retificadores, são fontes significativas de harmônicos, que podem causar distorções na forma de onda e interferências prejudiciais

Nesse contexto, é crucial adotar medidas para mitigar os problemas relacionados à qualidade da energia elétrica e garantir um fornecimento adequado. Conforme mencionado no capítulo, uma abordagem recomendada para lidar com essa questão é a implementação de normas e regulamentos específicos, como o módulo 8 do PRODIST, que foi citado anteriormente.

Em suma, a qualidade da energia elétrica desempenha um papel crucial na operação confiável e eficiente de sistemas elétricos. Compreender os desafios associados às cargas não lineares e implementar soluções adequadas são passos importantes para garantir a qualidade adequada da energia elétrica, promovendo o bom funcionamento de equipamentos e sistemas elétricos em geral.

3 FILTROS PARA MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS

3.1 Considerações Iniciais

O presente capítulo tem como objetivo apresentar uma solução fundamental para mitigar harmônicos: os filtros elétricos. Será abordada em detalhes a função desempenhada por esses dispositivos na redução dos harmônicos indesejados na rede elétrica.

Além disso, serão discutidas as tecnologias utilizadas na implementação desses filtros, incluindo filtros passivos e ativos, destacando suas características. Com essa análise, pode-se ter uma compreensão abrangente sobre como os filtros elétricos desempenham um papel essencial na melhoria da qualidade da energia elétrica, garantindo um fornecimento mais confiável e eficiente.

3.2 Filtros Elétricos

O verbo filtrar nos dá a ideia de separar, segregar, selecionar algo de maior valia para um determinado propósito que esteja misturado ou inserido em um mesmo meio de outro componente que não seja de interesse. Podemos citar exemplos, como o filtro de barro brasileiro famoso ao redor do mundo por filtrar, separar, com excelência a água potável de outras impurezas que possam estar presentes no líquido.

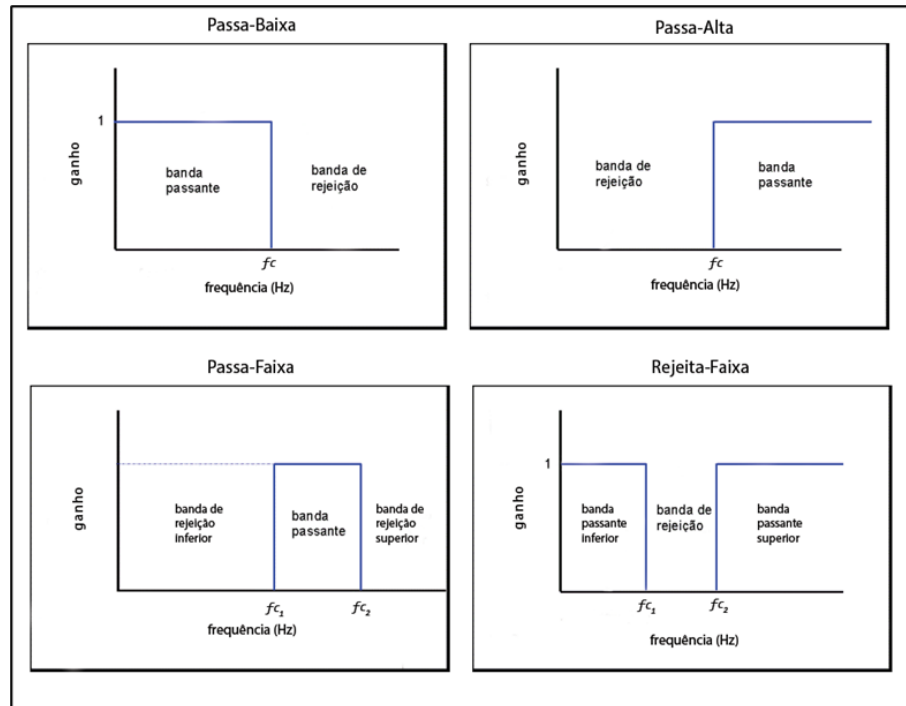
Dito isso, e deixado claro que ao adotar a aplicação de um filtro, seja ele por qual meio for para atingir um fim, o mesmo será inserido em um ambiente com vários elementos e selecionará deste meio apenas o que for de interesse. Ao olhar para o contexto deste trabalho, tratando sobre harmônicos presentes na energia elétrica e suas consequências negativas em um circuito conforme apresentados anteriormente, precisa-se então de um filtro, no sentido etimológico da palavra, para selecionar o objeto de interesse, os sinais elétricos que possuem a componente harmônica fundamental de 60Hz.

Os filtros aplicados ao setor de energia elétrica são circuitos capazes de permitir a passagem de certas frequências enquanto bloqueia, ou podemos dizer, atenua outras frequências. Assim, um filtro pode extrair frequências importantes de sinais elétricos que também contenham frequências indesejáveis ou irrelevantes. Antes de adentrar mais detalhadamente sobre filtros elétricos e seus tipos quanto à tecnologia empregada, é necessário apresentar as suas características básicas de seletividade, ou seja, os tipos de filtros quanto à função executada, segundo (ARAÚJO, 2019), são apenas quatro tipos básicos de filtros:

- Filtro Passa-Baixas (PB): permite somente a passagem de frequências abaixo de uma determinada f_c (frequência de corte). As frequências superiores são atenuadas;
- Filtro Passa-Altas (PA): permite somente a passagem de frequências acima de uma determinada f_c . As frequências inferiores são atenuadas;
- Filtro Passa-Faixa (PF): permite somente a passagem de frequências numa faixa delimitada pela frequência de corte inferior f_{c1} e outra superior f_{c2} . As frequências situadas abaixo de f_{c1} ou acima de f_{c2} são atenuadas;
- Filtro Rejeita-Faixa (RF): permite somente a passagem de frequências abaixo frequência de corte inferior f_{c1} e/ou acima da frequência de corte superior f_{c2} . As frequências delimitadas por f_{c1} e f_{c2} são atenuadas.

A Figura 17 apresenta a resposta ideal para os filtros supracitados: passa-baixa, passa-alta, passa-faixa e rejeita-faixa, utilizando gráficos que relacionam frequência e ganho, onde o ganho é a relação do sinal de saída pelo sinal de entrada. Cabe salientar que os termos “baixa” e “alta” não se referem a nenhum valor absoluto de frequência, mas sim valores relativos em relação à frequência de corte.

Figura 17- Resposta dos filtros ideais.

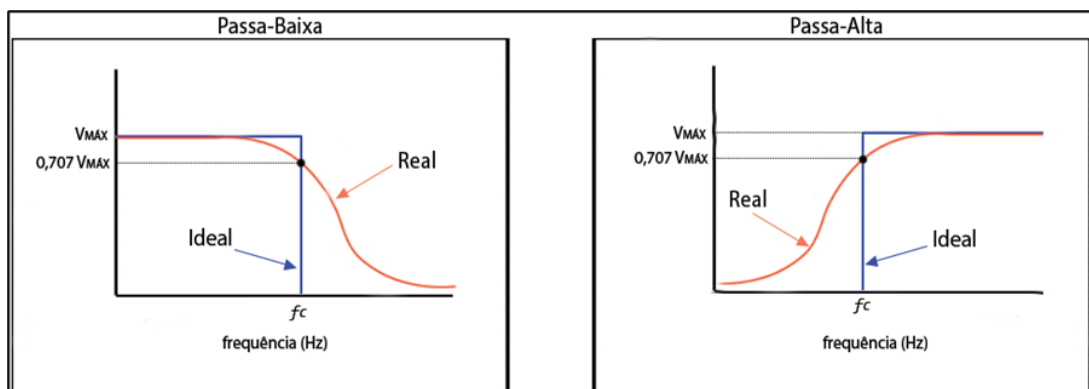


Fonte: Próprio Autor

Porém este comportamento ideal não acontece na realidade devido a reatâncias presentes em elementos capacitivos e indutivos que variam de acordo com a frequência elétrica.

A Figura 18 apresenta a resposta de frequência real em filtros passa-baixa e passa-alta. As frequências acima da f_c , no passa-baixa, e abaixo da f_c , no passa-alta, não são rejeitadas imediatamente pelo filtro.

Figura 18- Resposta dos filtros reais.



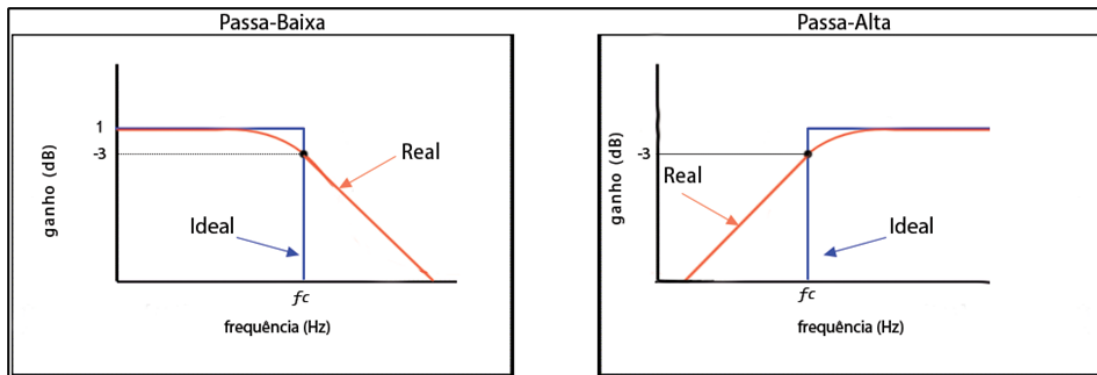
Fonte: Próprio Autor

Nota-se que na resposta real do sinal em frequência, no valor da frequência de corte há uma atenuação do sinal de 70,7% do sinal de entrada. Outra maneira de mensurar a atenuação de um sinal é sua resposta em decibel (dB). É apresentado na Figura 19 esta resposta em dB. Adotando um valor de $V_{m\acute{a}x}$ igual a 1, fazendo a transformação para seu valor em decibel (dB), temos na frequência de corte uma atenuação:

$$A_v = 0,707 V_{m\acute{a}x}$$

$$G_{dB} = 20 \log_{10}(A_v) = -3 \text{ dB}$$

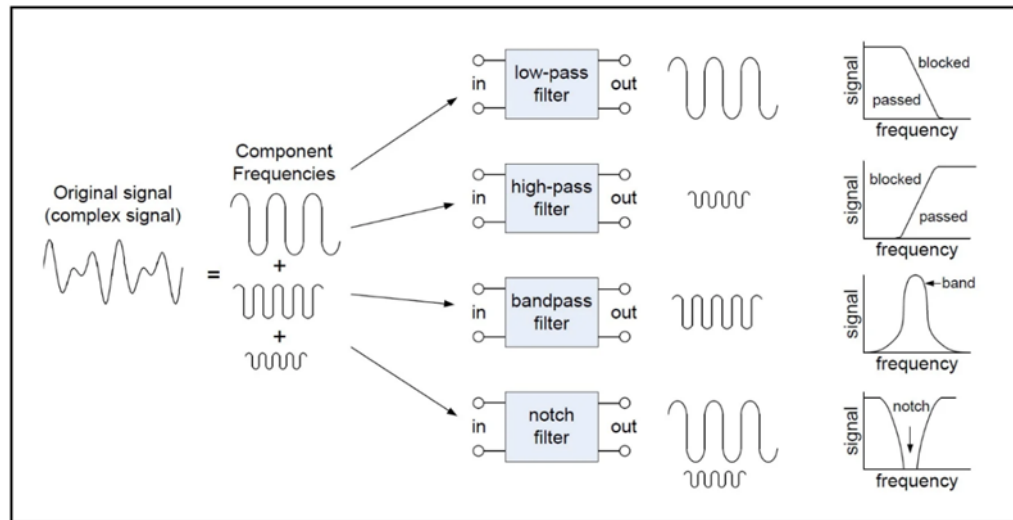
Figura 19- Resposta em frequência dos filtros reais em dB.



Fonte: Próprio Autor

Recapitulando o fato que um sinal com forma de onda distorcida pode ser definido pela soma de suas componentes de frequência. Tratando sobre energia elétrica, as componentes de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental de 60Hz é chamada de harmônicos. Conforme apresentado a seguir na Figura 20, os filtros podem ser projetados para atuar na seletividade da frequência fundamental e mitigar as componentes harmônicas indesejáveis.

Figura 20- Descrição básica dos quatro principais tipos de filtro.



Fonte: (DAVIS, 2017)

Em relação ao seu esquema, existem dois tipos de filtro, o filtro em ligação *shunt* e o filtro em ligação série. O tipo série impede que frequências indesejadas atinja um determinado equipamento, mas por estar sujeito à passagem de toda a corrente do circuito em que será instalado, necessitando de componentes robustos, levando à um maior custo na adoção deste tipo de filtro. Por outro lado, o tipo *shunt* possui um menor custo, se tornando mais comum.

O filtro harmônico shunt promove o desvio das correntes harmônicas do sistema para o sistema de aterramento, proporcionando uma melhoria na qualidade da energia elétrica dos circuitos de carga. Como consequência, a instalação elétrica e os equipamentos conectados ao sistema são beneficiados, reduzindo danos pela atenuação na circulação das correntes harmônicas. Seu princípio de funcionamento submete apenas a passagem das correntes harmônicas projetadas, viabilizando sua implantação (OLIVEIRA, Wagner José Nascimento de., 2016).

Os filtros quanto à sua tecnologia empregada, podem ser classificados como: filtros passivos, filtros ativos e filtros híbridos. Neste capítulo será abordado os dois primeiros. Outro ponto importante para um filtro é a sua ordem, a qual interfere na resposta em frequência. Para (PERTENCE, 2003) em termos matemáticos, a ordem de um filtro é o número de pólos existentes na função transferência do mesmo, já em termos físicos diz que a ordem de um filtro é dada pelo número de redes de atraso presentes em sua estrutura. Assim, pode-se ter em um mesmo filtro

mais de um circuito de desvio, caracterizando a sua ordem, fazendo o mesmo aumentar a sua taxa de atenuação e se aproximando de um filtro ideal.

3.3 Filtros Passivos

Estes filtros são compostos por elementos passivos como resistores (R), capacitores (C) e indutores (L), os tornando os mais comuns para atenuação de componentes harmônicas.

Eles são comumente usados e são relativamente baratos em comparação com outros meios para eliminar a distorção harmônica. Entretanto, eles têm a desvantagem de potencialmente interagirem negativamente com o sistema de energia, e é importante verificar todas as possíveis interações do sistema quando eles são projetados. Eles são empregados ou para desviar as correntes harmônicas da linha ou para bloquear seu fluxo entre as partes do sistema, ajustando os elementos para criar uma ressonância em uma frequência selecionada (DUGAN *et al.*, 2004).

Neste capítulo é explicado apenas filtros RC, para tanto é apresentado a equação 3.1 que mostra que a partir de uma f_c definida é possível determinar os valores dos componentes do circuito de um filtro RC. Já a equação 3.2 apresenta a reatância capacitiva.

$$f_c = \frac{1}{2\pi RC} \quad (3.1)$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \quad (3.2)$$

Fazendo $f \cong 0$ Hz:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \cong \infty \Omega$$

Já para frequências muito altas, a reatância capacitiva é:

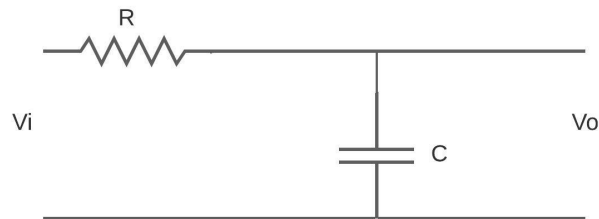
$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \cong 0 \, \Omega$$

Abaixo será apresentado filtros passivos RC passa-baixa e passa-alta.

3.3.1 Filtro Passa-Baixa

Em um filtro passa-baixa RC, o capacitor fica em paralelo com a carga. A Figura 21 apresenta o circuito para um filtro de 1ª ordem.

Figura 21- Circuito do filtro passa-baixa 1ª ordem.



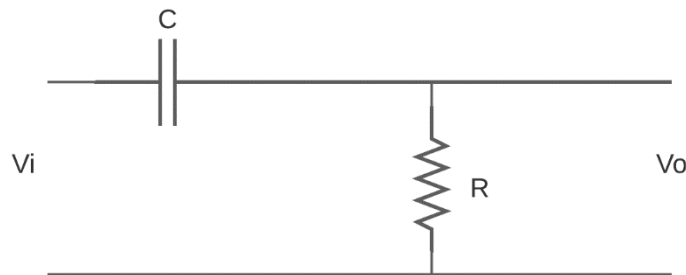
Fonte: Próprio autor

Conforme seu próprio nome remete, um filtro passa-baixa deve permitir que a passagem de baixas frequências. Fazendo uso da equação 3.2, podemos ter noção do comportamento do circuito. Para baixas frequências, o capacitor no circuito apresentado na Figura 21 se comporta como um circuito aberto permitindo toda a passagem do sinal para a carga, enquanto para altas frequência o mesmo se comporta como um curto-circuito impedindo a passagem de frequências acima do valor da f_c . Sua respectiva resposta em frequência característica foi apresentada pela Figura 18.

3.3.2 Filtro Passa-Alta

Em um filtro passa-alta o capacitor fica em série com a carga. A Figura 22 apresenta o circuito para um filtro de 1ª ordem.

Figura 22- Circuito do filtro passa-alta 1ª ordem.



Fonte: Próprio autor

Para altas frequências, o capacitor se comporta como um curto-circuito permitindo toda a passagem do sinal amostrado acima da frequência de corte, enquanto para baixas frequências o capacitor se comporta como um circuito aberto, realizando assim a mitigação de todo o sinal abaixo da f_c . Sua respectiva resposta em frequência característica foi apresentada pela Figura 18.

3.4 Filtros Ativos

Os filtros ativos são constituídos por elementos passivos como indutores, e principalmente por resistores e capacitores, e diferente dos filtros passivos, se utilizam de elementos ativos como amplificadores operacionais que são capazes de realizarem ganho em relação ao sinal de entrada.

Conforme dito anteriormente, os filtros são separados de acordo com a sua função e sua tecnologia empregada. Nos filtros ativos eles são divididos em relação à sua função-resposta, podendo ser: Butterworth ou Chebyshev.

O filtro Butterworth, fornece uma resposta com uma faixa de transição suave com uma banda passante e banda de rejeição planas. Segundo (SCHUBERT; KIM, 2016), muitas vezes são chamados de filtros planos, e são indiscutivelmente o tipo mais comum de filtro eletrônico. Na equação 3.3 é apresentada a função resposta de um filtro Butterworth passa-baixa.

$$|H(j\omega)| = \frac{K_{PB}}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_c}\right)^{2n}}} \quad (3.3)$$

Onde:

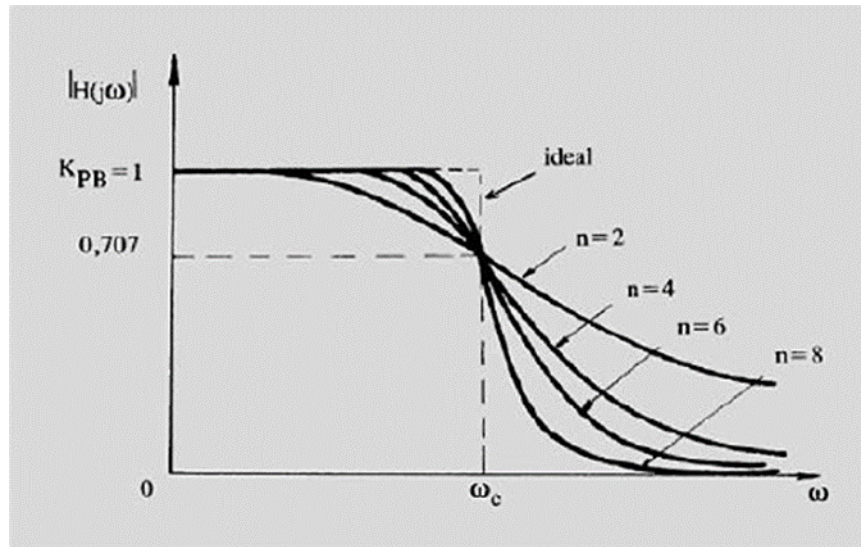
K_{PB} : ganho do filtro quando a frequência ω é nula;

ω_c : frequência de corte;

n : ordem do filtro (onde $n=1,2,3,4\dots$).

Lembrando que quanto maior a ordem do filtro maior será sua aproximação de uma resposta ideal. É apresentado pela Figura 23 a resposta do filtro Butterworth fazendo $K_{PB}=1$ e variando a ordem do filtro.

Figura 23- Resposta do filtro passa-baixa Butterworth.



Fonte: (PERTENCE, 2003)

Em decibéis, para $\omega \geq \omega_c$:

$$|H(j\omega)|(dB) \cong 20 \log(K_{PB}) - 20n \log\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \quad (3.4)$$

Assim, a taxa de atenuação do filtro Butterworth é:

$$TA = -20n \log \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \quad (3.5)$$

O filtro Chebyshev possui uma função-resposta diferente, levando à uma resposta também diferente, possuindo *ripples* (ondulações) na sua banda passante ou na sua banda de rejeição sendo assim essa característica uma de suas desvantagens. A sua vantagem é que a sua transição próxima à frequência de corte será mais aguda em relação ao Butterworth, ambos possuindo a mesma ordem e estrutura de implementação. Na equação 3.6 é apresentado a função resposta para um filtro Chebyshev passa-baixa.

$$|H(j\omega)| = \frac{K_{PB}}{\sqrt{1 + E^2 C_n^2 \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right)}} \quad (3.6)$$

Onde:

C_n : polinômio de Chebyshev;

E : constante que define amplitude dos *ripples*;

Uma característica do filtro Chebyshev é que a ordem do filtro é igual ao número de *ripples*, porém a amplitude dos *ripples* (PR) depende do valor da constante E . As ondulações são devido ao polinômio de Chebyshev, que é uma cossenóide, conforme equação 3.7.

$$C_n(\omega) = \cos (n \cos^{-1}(\omega)) \quad (3.7)$$

O ganho em decibéis para $\omega \geq \omega_c$ é dado:

$$|H(j\omega)|(dB) \cong 20 \log(K_{PB}) - 20 \log E - 6(n - 1) - 20n \log \left(\frac{\omega}{\omega_c} \right) \quad (3.8)$$

A taxa de atenuação do filtro Chebyshev é dada por:

$$TA = -20\log E - 6(n - 1) - 20n\log\left(\frac{\omega}{\omega_c}\right) \quad (3.9)$$

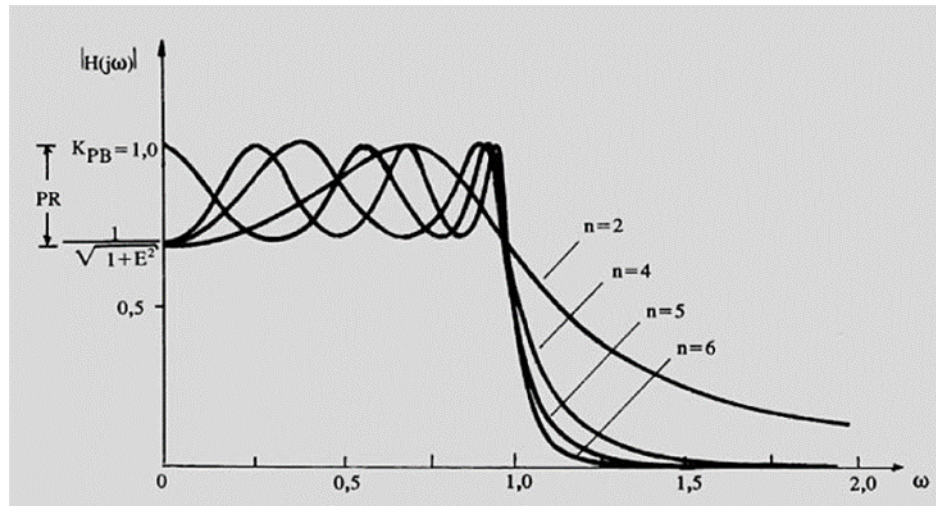
Onde E e PR são:

$$E = \sqrt{10^{\frac{PR}{10}} - 1} \quad ; (0 < E < 1) \quad (3.10)$$

$$PR(dB) = 20\log\sqrt{1 + E^2} \quad (3.11)$$

A Figura 24 apresenta a resposta de um filtro passa-baixa Chebyshev.

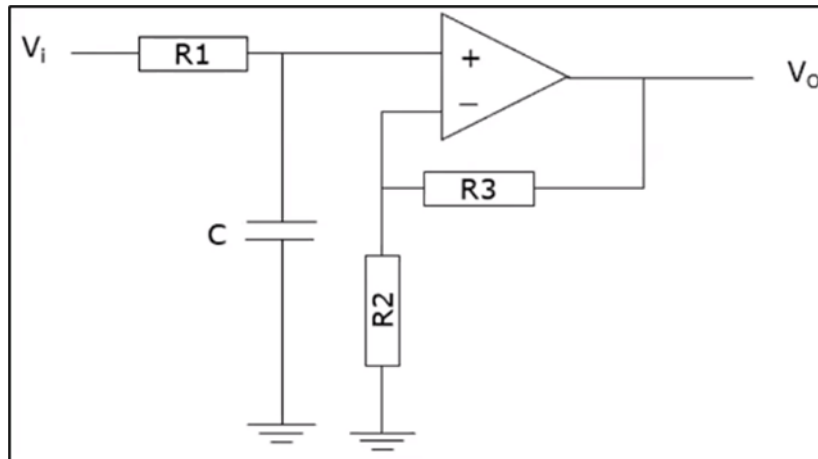
Figura 24- Resposta do filtro passa-baixa Chebyshev.



Fonte: (PERTENCE, 2003)

O circuito de um filtro ativo passa-baixa de 1ª ordem que utiliza a estrutura de fonte de tensão controlado por tensão, é apresentado pela Figura 25, e pode-se perceber a semelhança com os circuitos dos filtros passivos mostrado na Figura 21 conectado à porta positiva do amplificador operacional.

Figura 25- Circuito de um filtro ativo passa-baixa 1ª ordem.



Fonte: (PRZYSIADA, 2021)

O ganho K deste circuito é:

$$K = 1 + \frac{R_3}{R_2} \quad (3.12)$$

E as resistências são dadas por:

$$R_1 = \frac{1}{b\omega_c C} ; \quad R_2 = \frac{K}{K-1} R_1 ; \quad R_3 = K R_1.$$

Onde b é uma constante que depende do tipo da função-resposta (Butterworth ou Chebyshev). Para filtro de primeira ordem o valor $b = 1$, para filtro com ordens $n \geq 2$ o valor de b é obtido através de tabelas, de acordo com a respectiva função resposta. A Tabela 5 apresenta os valores a e b para filtros Butterworth de acordo com a sua ordem n .

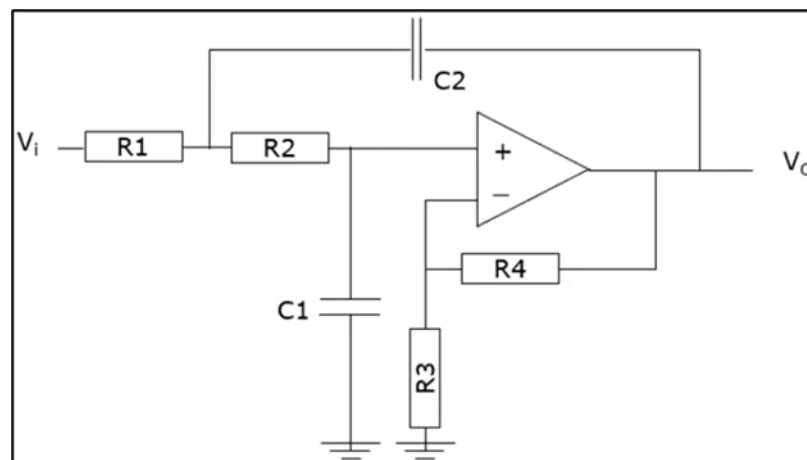
Tabela 5 - Parâmetros a e b para filtros Butterworth.

n	a	b
2	1,414214	1
3	1,000000	1
	—	1
4	0,765367	1
	1,847759	1
5	0,618034	1
	1,618034	1
	—	1
6	0,517638	1
	1,414214	1
	1,931852	1
7	0,445042	1
	1,246980	1
	1,801938	1
	—	1
8	0,390181	1
	1,111140	1
	1,662939	1
	1,961571	1

Fonte: (PERTENCE, 2003)

O circuito de um filtro ativo passa-baixa de 2ª ordem é apresentado pela figura 27.

Figura 26 - Circuito de um filtro ativo passa-baixa de 2ª ordem.



Fonte: (PRZYSIADA, 2021)

O ganho é definido por:

$$K = 1 + \frac{R_4}{R_3} \quad (3.15)$$

Os capacitores são definidos por:

$$C_2 = \frac{10}{f_c} \mu \quad (3.16)$$

$$C_1 \leq \frac{[a^2 + 4b(K-1)]C_2}{4b} \quad (3.17)$$

Os valores para as resistências são definidos por:

$$R_1 = \frac{2}{\left[aC_2 + \sqrt{a^2C_2^2 + 4b(K-1)C_2^2 - 4bC_1C_2} \right] \omega_c} \quad (3.18)$$

$$R_2 = \frac{1}{bC_1C_2R_1\omega_c^2} \quad (3.19)$$

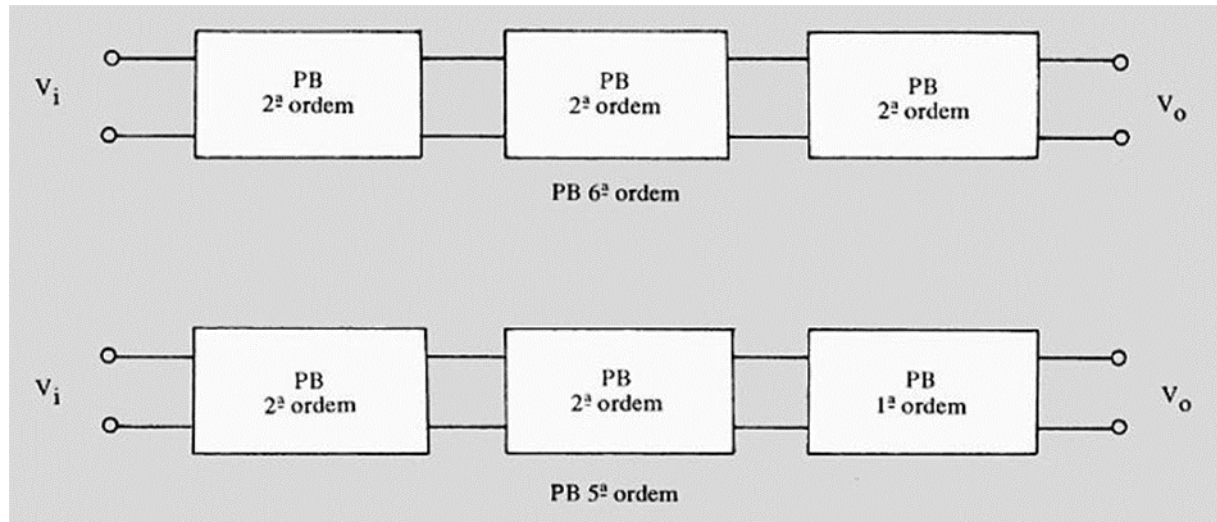
$$R_3 = \frac{K(R_1 + R_2)}{K-1} \quad (3.20)$$

$$R_4 = K(R_1 + R_2) \quad (3.21)$$

Se $K = 1$, R_3 deverá ser aberto e R_4 será um curto.

Para se obter filtros ativos com ordens superiores é necessário fazer associação de filtros em cascata, sejam de 1ª ou 2ª ordens. A Figura 27 apresenta em forma de diagrama de blocos como é feita a associação em cascata para filtros passa-baixa de 5ª e 6ª ordens.

Figura 27- Diagrama de blocos de filtros ativos de 5ª e 6ª ordens.



Fonte: (PERTENCE, 2003)

O ganho de filtros superiores em associação em cascata é definido pela multiplicação dos ganhos de cada estágio, logo faz-se necessário dividir o ganho de cada estágio para que o conjunto todo tenha o ganho definido para o filtro. Assim, para um filtro com m estágios e ganho total do filtro K_T , temos para um ganho K individual em cada estágio:

$$K = \sqrt[m]{K_T} \quad (3.22)$$

3.5 Considerações Finais

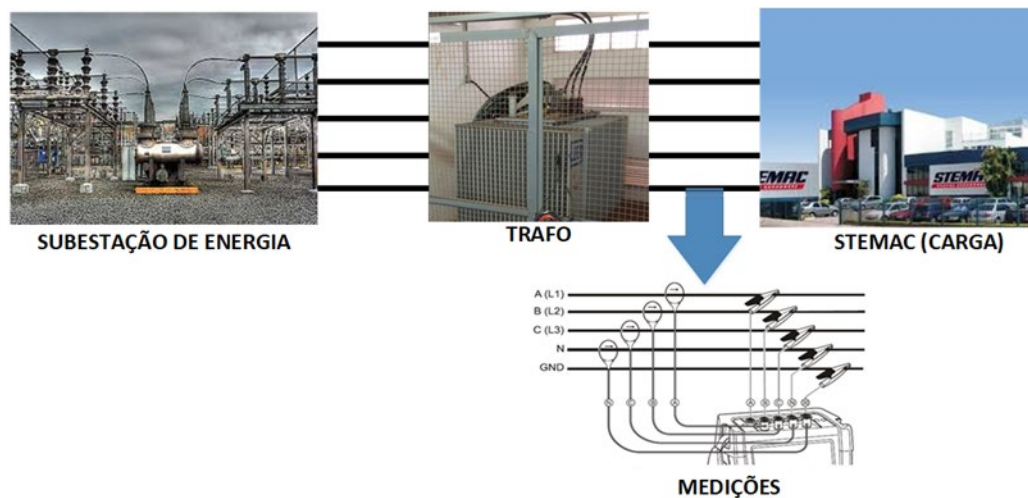
Ao longo deste capítulo, foi explorada uma solução fundamental para mitigar os harmônicos indesejados na rede elétrica: os filtros elétricos. A função desempenhada por esses dispositivos na redução dessas distorções foi discutida em detalhes, assim como as tecnologias utilizadas na implementação dos filtros passivos e ativos. Conclui-se que a utilização adequada dos filtros elétricos é um passo essencial para alcançar uma energia elétrica de alta qualidade, beneficiando tanto os fornecedores quanto os consumidores finais.

4 REGISTRO E ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS NA EMPRESA STEMAC

4.1 Registro

. O diagrama de blocos da Figura 28 mostra, de forma sucinta, a metodologia que foi empregada para a coleta dos dados. A subestação de energia é alimentada com tensão de 13,8 kV, que passa por um transformador (Trafo) abaixador, e que posteriormente alimenta a carga.

Figura 28 - Conexão do analisador com o sistema de distribuição trifásico.



Autor: Próprio Autor

Assim, os dados foram obtidos em situação normal de operação de um (01) alimentador instalado na empresa, embora na localidade existam outros alimentadores. Foi analisado o circuito de maior carga, que é aquele alimentado por um transformador com tensão de 13,8kV no seu primário, e em seu secundário 380V, fase/fase, com esquema de ligação delta/estrela aterrado, e com potência aparente de 1500kVA. Este transformador é representado na Figura 29.

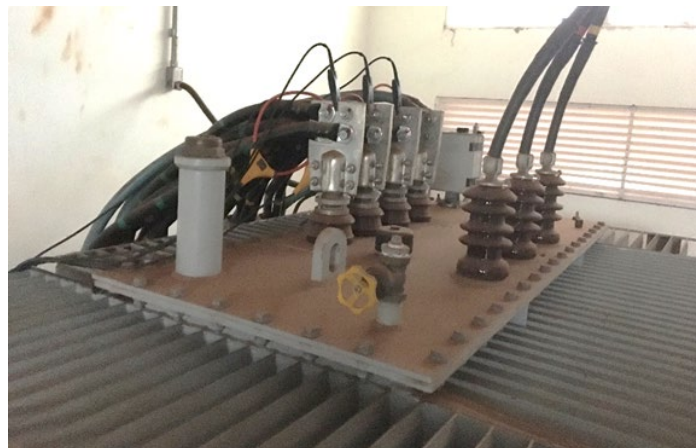
Figura 29- Transformador utilizado para coleta dos dados.



Fonte: Próprio autor

A instalação do analisador de qualidade de energia trifásico, modelo Fluke 435, para registro dos sinais elétricos da empresa foi feita conectando-o no lado de baixa tensão do transformador já mencionado. A Figura 30 exibe como foi realizada a instalação dos instrumentos de medição para coleta dos sinais elétricos. Percebe-se o uso da sonda de corrente em volta de cada fase. Para os sinais de tensão, percebe-se as garras jacaré também conectadas em cada uma das fases e neutro, conforme as instruções presentes no manual do fabricante.

Figura 30- Instalação dos instrumentos de medição do analisador de energia.



Fonte: Próprio autor

Os registros se iniciaram no dia 28/05/2020, às 16:46 e foram concluídos no dia 04/06/2020, às 16:45. Todos os parâmetros elétricos coletados possuem, igualmente, um total de 10.080 registros, índice superior aos 1.080 registros, solicitados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tendo 1 minuto de diferença entre cada amostra.

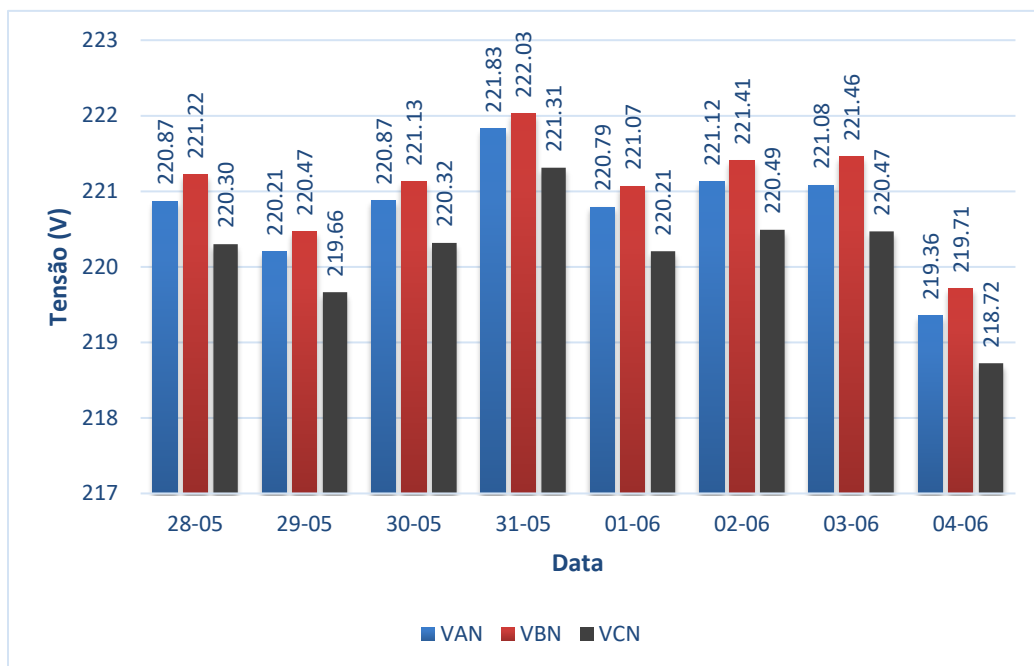
Como as amostras de todos os dias apresentam um padrão, será apresentado no corpo do trabalho para visualização os gráficos dos dados colhidos no dia 29/05/2020, pois foi neste dia que foram registrados os sinais de tensão e corrente.

4.2 Análise

4.2.1 Valores de tensão e corrente

Na figura abaixo é apresentada a tensão média diária para cada dia registrado.

Figura 31- Tensão média diária.



Fonte: Próprio autor

Nota-se que em todos os dias, a fase C possui o menor valor de tensão, discriminando que nesta fase apresenta um maior consumo de potência, ocasionando esta queda de tensão. Na Tabela 6 é apresentado os mesmos valores da Figura 31, mas com acréscimo do valor percentual total de desbalanceamento de tensão do sistema. Também seguindo a média dos dados obtidos de cada um dos dias.

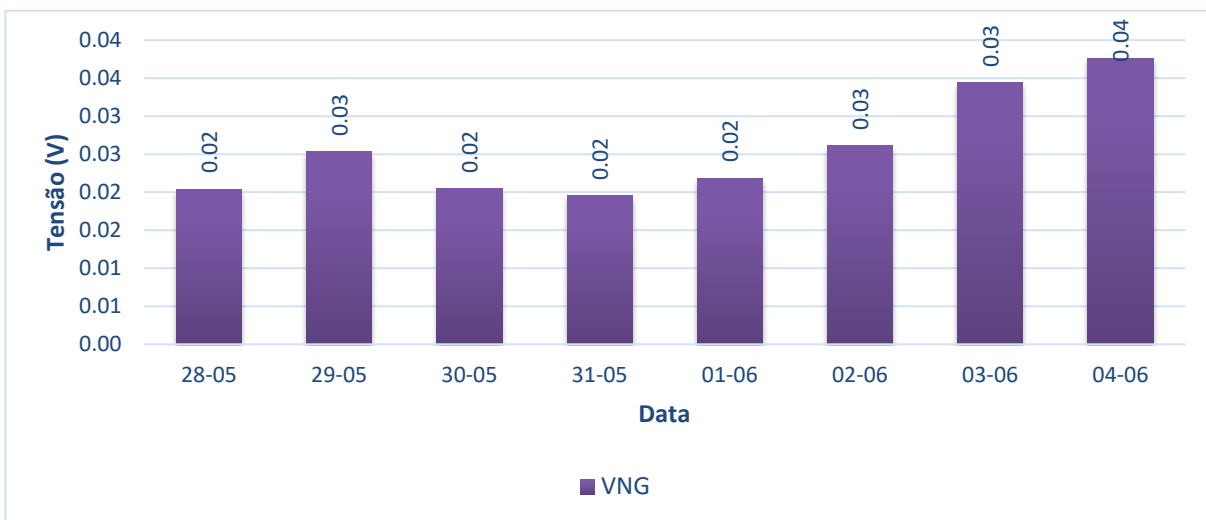
Tabela 6 - Médias de tensões fase-neutro e desequilíbrio diário.

Dia	VAN (V)	VBN (V)	VCN (V)	Desequilíbrio (%)
28-05	220,87	221,22	220,30	0,22
29-05	220,21	220,47	219,66	0,20
30-05	220,87	221,13	220,32	0,20
31-05	221,83	222,03	221,31	0,18
01-06	220,79	221,07	220,21	0,22
02-06	221,12	221,41	220,49	0,23
03-06	221,08	221,46	220,47	0,24
04-06	219,36	219,71	218,72	0,26

Fonte: Próprio autor

É evidenciado um baixo desequilíbrio de tensão, que está dentro do recomendado pela ANEEL, que é de 2% e que foi evidenciado na Tabela 2. Porém este desequilíbrio pode ser um dos fatores que contribui para o surgimento de tensão no neutro conforme é apresentado na Figura 32.

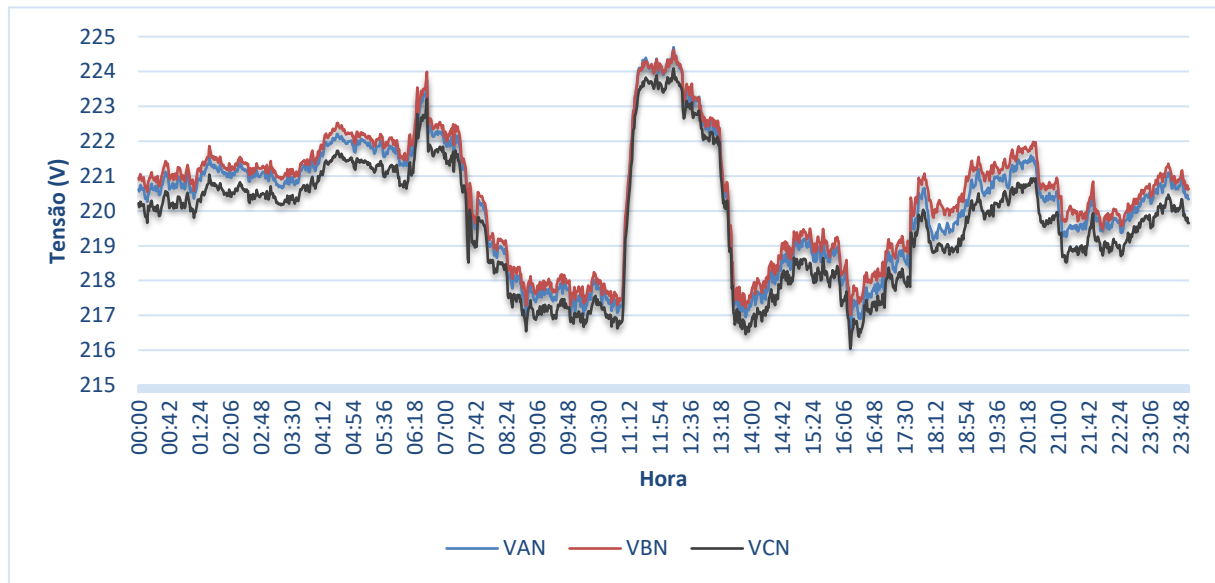
Figura 32- Tensão média presente no neutro.



Fonte: Próprio autor

A Figura 33 apresenta os valores de tensão de fase durante todo o dia 29/05/2020.

Figura 33 - Tensão de fase dia 29/05



Fonte: Próprio autor

Nota-se que a fase C possui a menor tensão durante o dia todo, possuindo uma queda de tensão maior que as demais fases principalmente nos períodos noturnos onde há uma menor demanda.

As correntes médias de cada fase e neutro são apresentadas na Tabela 7 juntamente com o percentual de desequilíbrio de corrente.

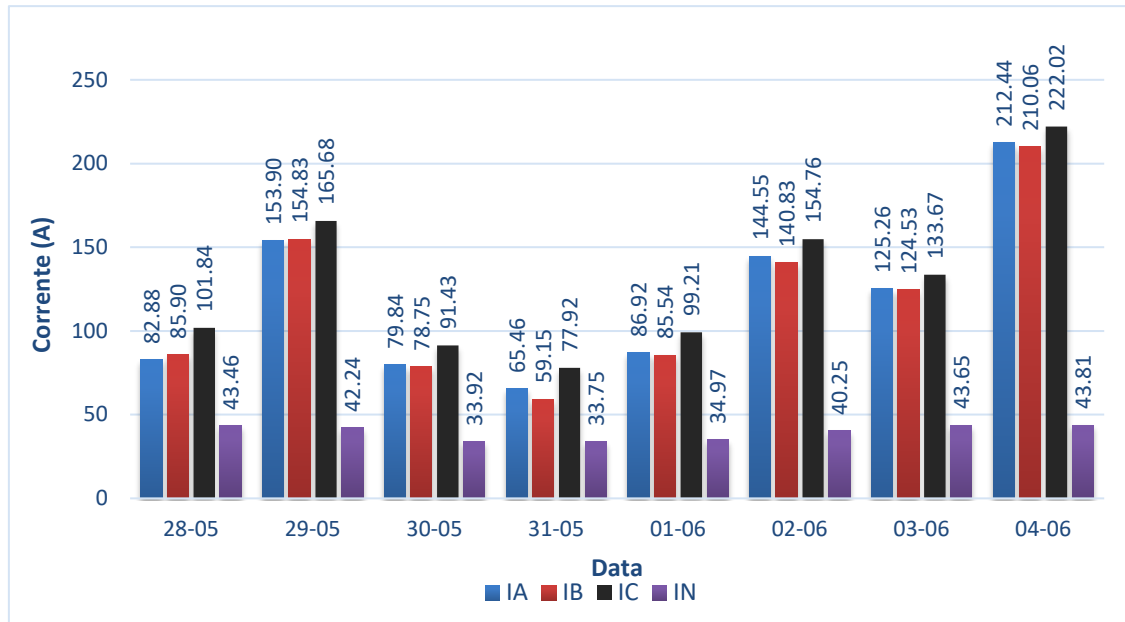
Tabela 7 - Correntes médias e desequilíbrio diário.

Dia	IA (A)	IB (A)	IC (A)	IN (A)	Desequilíbrio (%)
28-05	82,88	85,90	101,84	43,46	6,61
29-05	153,90	154,83	165,68	42,24	5,88
30-05	79,84	78,75	91,43	33,92	7,39
31-05	65,46	59,15	77,92	33,75	7,87
01-06	86,92	85,54	99,21	34,97	7,40
02-06	144,55	140,83	154,76	40,25	6,07
03-06	125,26	124,53	133,67	43,65	7,45
04-06	212,44	210,06	222,02	43,81	6,32

Fonte: Próprio autor

A Figura 34 apresenta os dados da Tabela 7, retirando o desequilíbrio percentual, em gráfico de colunas para uma melhor visualização.

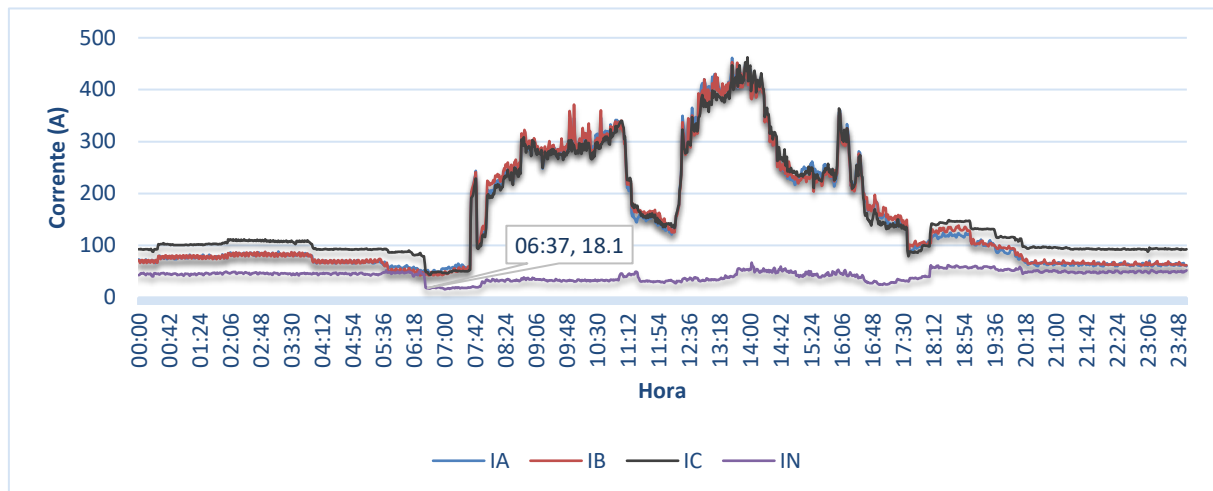
Figura 34- Corrente média diária.



Fonte: Próprio Autor

Há um valor alto de corrente no neutro do sistema analisado, podendo ser decorrente do desequilíbrio de cargas em cada uma das fases conforme apresentado pela Figura 31, Tabela 6 e Tabela 7, também podendo ser causado por distorções harmônicas, visto que as mesmas causam transferência de potência que vão ocasionar queda de tensão, além de circulação de corrente pelo neutro. A Figura 35 apresenta os valores de corrente de fase durante todo o dia 29/05/2020.

Figura 35- Corrente dia 29/05.



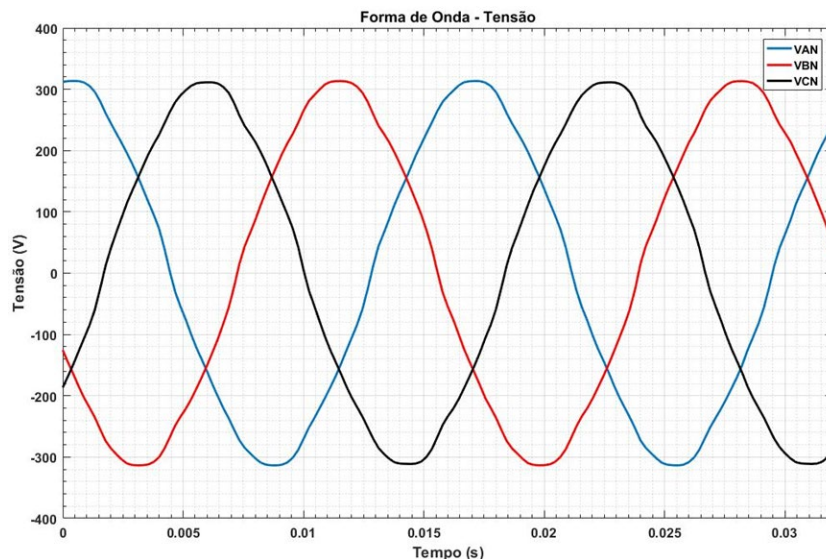
Fonte: Próprio autor

Conforme apresentado pela Figura 33, ao ter uma maior queda de tensão na fase C durante o período noturno, percebe-se pela Figura 35 que realmente há uma maior corrente circulando por esta fase durante o período citado. Além disto, percebe-se uma corrente no neutro elevada nestes horários onde possui um maior desequilíbrio de tensão, que decai no momento em que a corrente da fase C também diminui às 06:37, porém durante o horário comercial, das 7:30 às 18:00, onde apresenta um consumo mais equilibrado de cargas, a corrente IN ainda permanece alta, podendo ser decorrente da presença de cargas não lineares na indústria.

4.2.2 Distorções Harmônicas de Tensão

O sinal de tensão trifásica assim como o de corrente foram registrados na data 29/05/2020 às 12h12min52s e é apresentada com valor de pico na Figura 36.

Figura 36 - Forma de onda de tensão trifásica registrada.

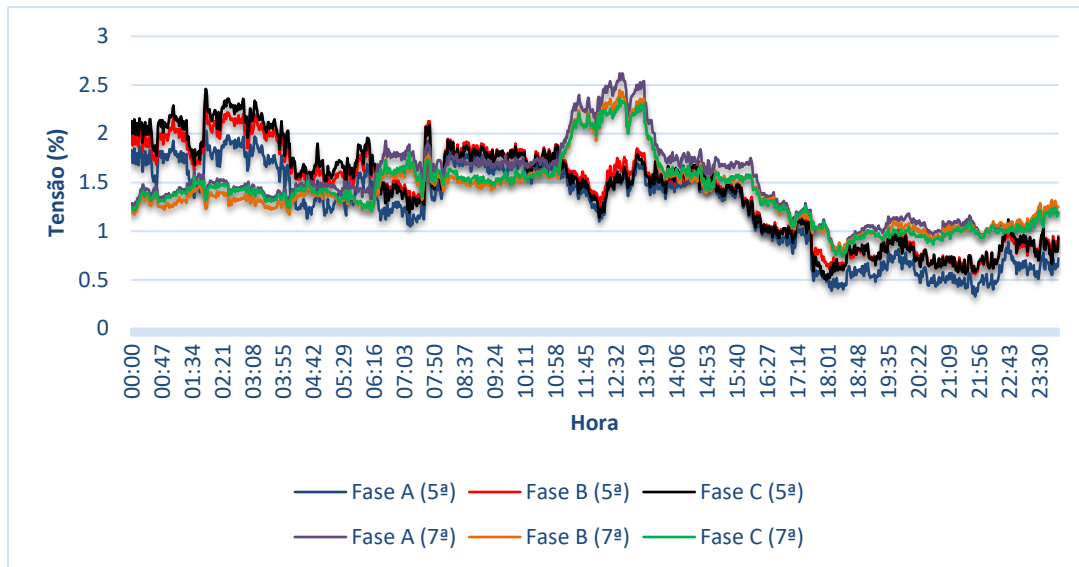


Fonte: Próprio autor

A Figura acima demonstra a presença de pequenas distorções na forma de onda, pois não é uma onda de tensão trifásica ideal conforme já apresentado na Figura 2.

De acordo com os dados apresentados pela Figura 33, no momento do registro do sinal de tensão da Figura 36, a componente harmônica de 7ª ordem possui a maior amplitude, sendo seguida pela de 5ª ordem. Ambas são apresentadas na Figura 37.

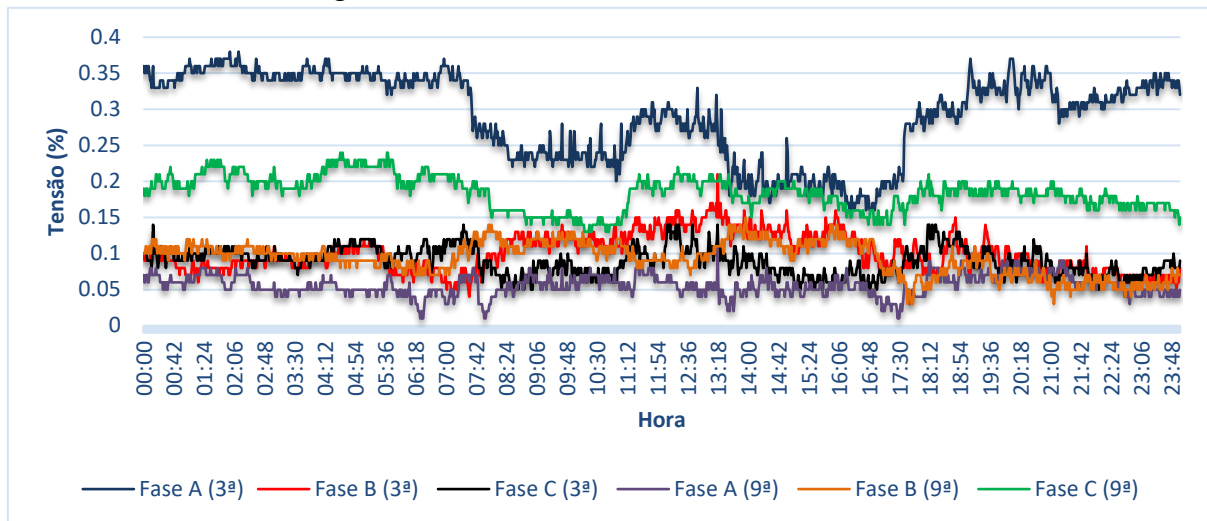
Figura 37 - Tensão harmônica de 5ª e 7ª ordem.



Fonte: Próprio autor

É apresentado na Figura 38 os registros das componentes harmônicas de 3ª e 9ª ordem, as quais são tensão de sequência zero. Nota-se que durante todo o dia 29/05/2020 esteve com valores próximos a 0%.

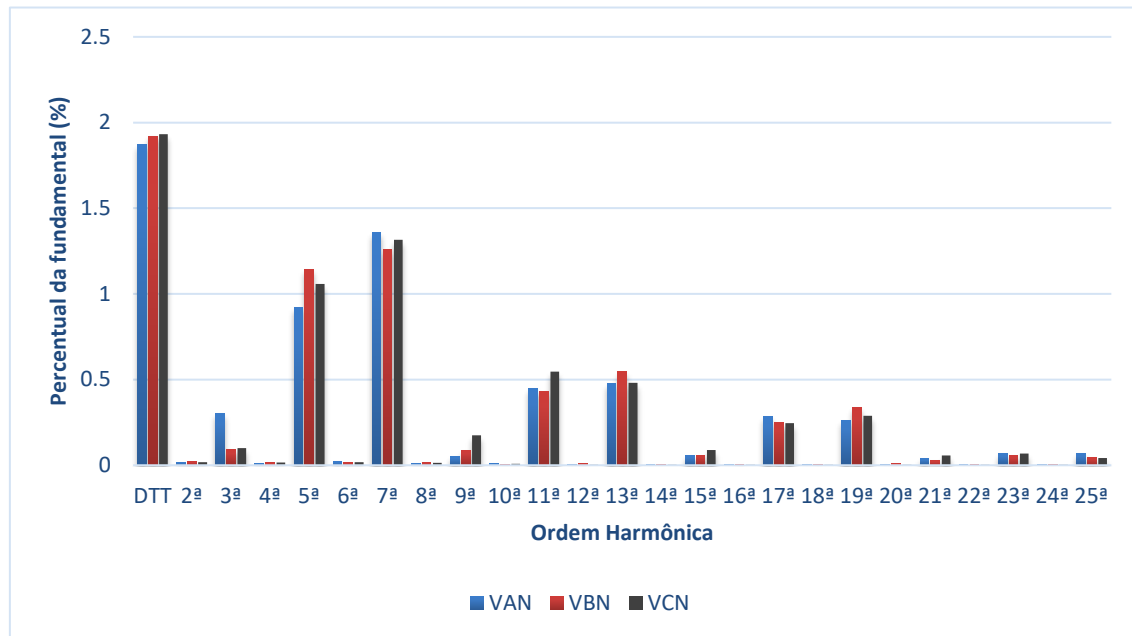
Figura 38 - Tensão harmônica de 3ª e 9ª ordem.



Fonte: Próprio autor

A Figura 39 apresenta as componentes harmônicas até a 25ª ordem com suas respectivas amplitudes, juntamente com a DTT para efeito comparativo, agrupando as três fases por cada ordem, sendo os valores médios de todas as amostras registradas. Podemos constatar que as componentes de ordem par possuem uma amplitude desprezível em relação as de ordem ímpar.

Figura 39 - Amplitude percentual por ordem harmônica.



Fonte: Próprio autor

O destaque é para as componentes de 5ª e 7ª ordem devido à alta amplitude comparada com as demais, porém não ultrapassam o recomendado pelo PRODIST para níveis de tensão entre 1kV e 69 kV, que é de 6% para componentes harmônicas ímpares não múltiplas de 3, conforme apresentado anteriormente na Tabela 4. O valor de DTT de tensão registrado em 5% das 10080 amostras, são apresentadas na Tabela 8, juntamente com o valor recomendado pelo PRODIST.

Tabela 8 - DTT de tensão.

AN	BN	CN	NG	PRODIST
1,34%	1,34%	1,34%	5,7%	8%

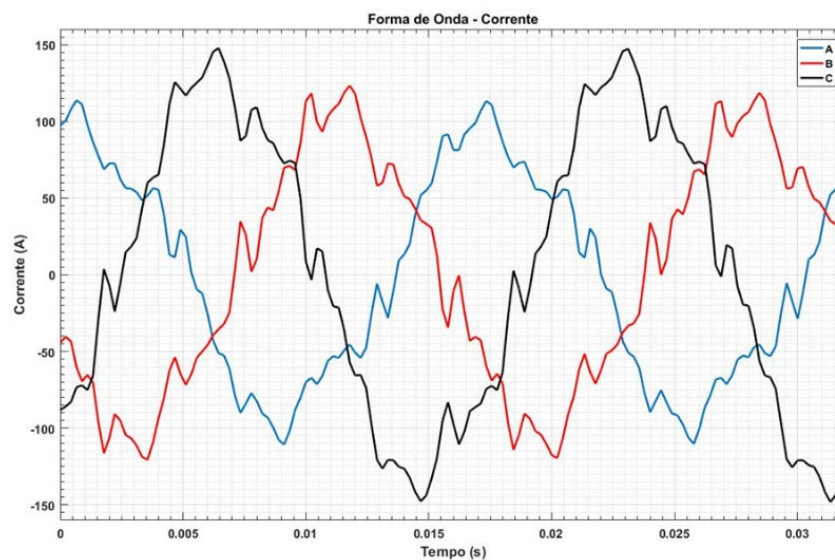
Fonte: Próprio autor

Pode-se concluir que em relação às distorções harmônicas totais de tensão, os valores mensurados na Stemac estão dentro do limite recomendado pela ANEEL no módulo 8 do PRODIST.

4.2.3 Distorções Harmônicas de Corrente

Conforme dito no início do tópico anterior, o sinal de corrente trifásica foi registrado no 29/05/2020 às 12h12min52s e é apresentada na Figura 40.

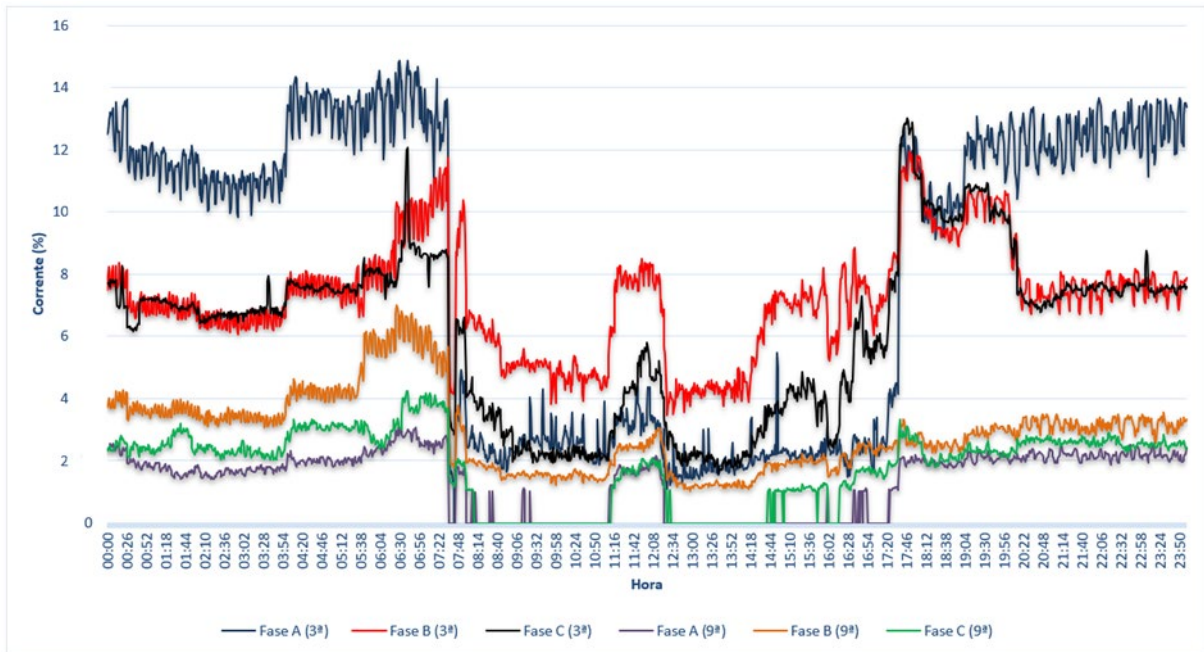
Figura 40 - Forma de onda de corrente trifásica registrada.



Fonte: Próprio autor

A figura acima mostra que há a presença de distorções harmônicas no sinal trifásico de corrente, afetando totalmente sua forma de onda. Para análise de corrente serão apresentados os gráficos dos registros realizados ao longo do dia 29/05/2020, de acordo com sua componente harmônica. A Figura 41 apresenta as componentes de sequência zero.

Figura 41 – Correntes harmônicas de fase de 3ª e 9ª ordem.



Fonte: Próprio autor

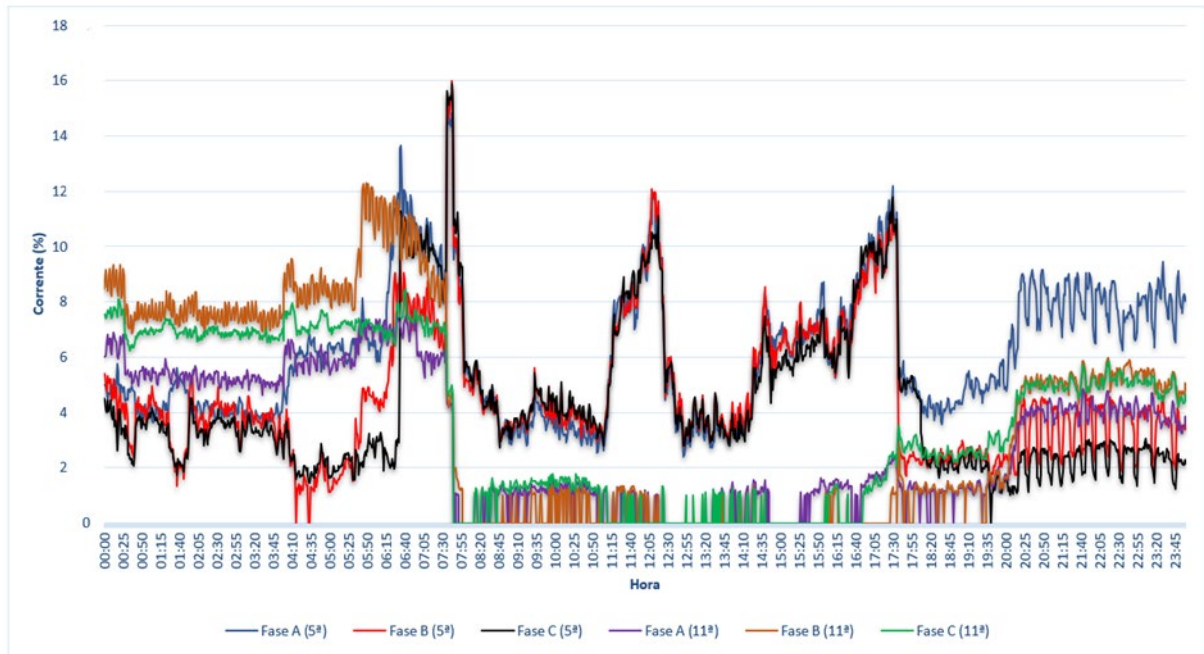
Na figura nota-se que durante o período fora do horário comercial, temos que as componentes harmônicas de sequência zero principalmente de 3ª ordem possuem valores altos destacando-se na fase A, e que no horário de trabalho caiu consideravelmente. Assim, conforme mostrado na Figura 35, as correntes no neutro registradas no período noturno são altas não somente devido ao desequilíbrio de tensão causado principalmente pela fase C, mas também pela presença destas ordens harmônicas de sequência zero.

Já durante o dia, quando há um equilíbrio de cargas, a corrente no neutro não decai porque ainda há a presença de componentes harmônicas no circuito. Como pode-se notar na Figura 41 em relação à 3ª ordem. Enquanto na fase A, as componentes decaem aproximadamente 10% em relação a corrente nominal de sua respectiva fase, a fase B há uma redução de apenas 2%. Já em relação às componentes de 9ª ordem, durante o expediente de maior consumo, seus valores são praticamente mitigados.

As componentes de sequência negativa, 5ª e 11ª ordem, são apresentados pela Figura 42. Os valores de 5ª ordem possuem alguns picos durante o ligamento e/ou desligamento de grandes cargas devido aos horários característicos, por ser uma ordem de sequência negativa pode

ocasionar um campo magnético que tende a frear máquinas girantes enquanto as mesmas tentam acelerar, e a acelerar as máquinas enquanto as mesmas tentam frear.

Figura 42 - Correntes harmônicas de fase de 5ª e 11ª ordem.

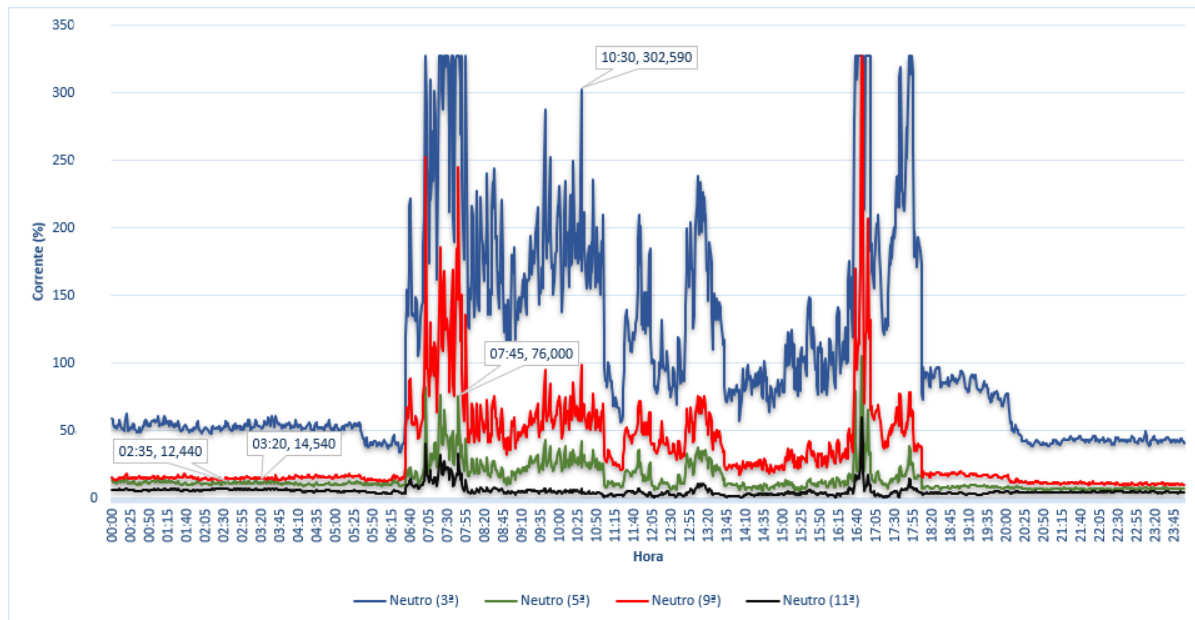


Fonte: Próprio autor

Ao observar a Figura 41 e Figura 42, percebe-se que as deformações na onda de corrente registrada e apresentada pela Figura 40 foram ocasionadas principalmente por componentes harmônicas de 5ª e 3ª ordem.

Na Figura 43 é apresentado as correntes harmônicas de componentes de sequência negativa e zero presentes no neutro.

Figura 43 - Correntes de neutro harmônica de 3ª, 5ª, 9ª e 11ª ordem.

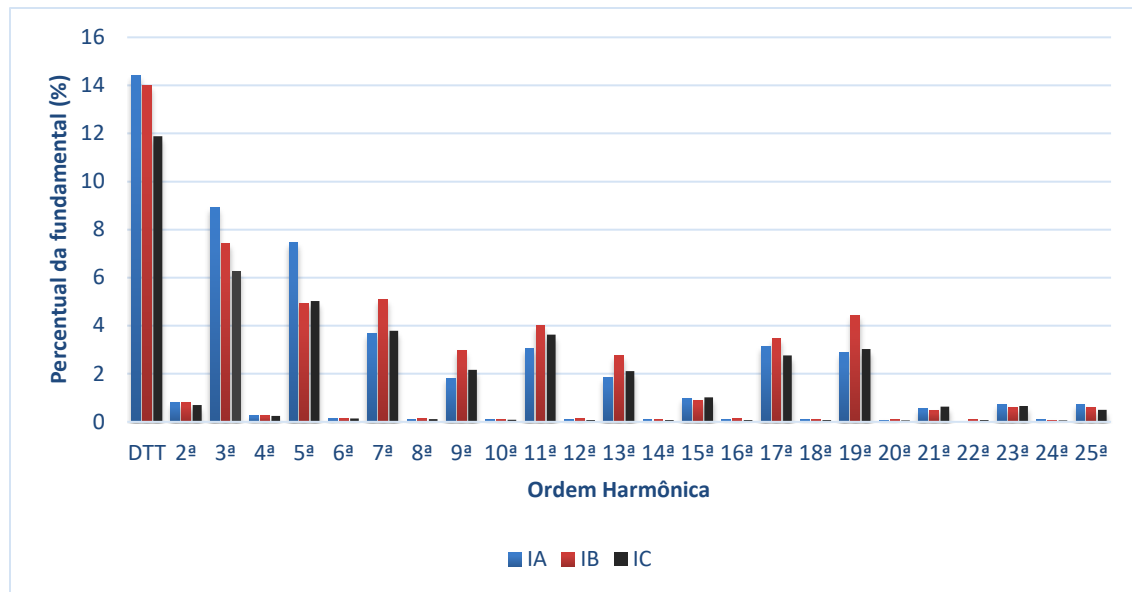


Fonte: Próprio autor

Nos horários noturnos, a componente de 3ª ordem chega a ser 50% do valor da corrente fundamental que percorre o neutro, enquanto a 9ª ordem tem aproximadamente 14%. Ao iniciar a jornada de trabalho, onde há maior consumo de potência, enquanto nas fases o percentual harmônico de sequência zero cai em relação à corrente fundamental que passa pela fase, apresentado na Figura 41, o percentual harmônico no neutro aumenta drasticamente, chegando a valores superiores a 300% para o 3º, 150% para o 9º e 76% para o 5º harmônico.

A Figura 44 apresenta todas as componentes registradas, até a 25ª ordem, agrupando as três fases por cada ordem harmônica.

Figura 44 – Corrente harmônica percentual por ordem.



Fonte: Próprio autor

A Figura 44 confirma que os maiores percentuais no sistema são de componentes harmônicas de 3ª e 5ª ordens com maior presença na fase A, porém em frequências mais altas de 420Hz até 1140Hz a fase com maior percentual é a fase B. Apesar da fase C possuir o maior consumo de corrente e queda de tensão, é a que menos insere harmônicos no sistema, conforme apresentado na Figura 31 e Figura 34.

O PRODIST não cita sobre distorções harmônicas de corrente, para a análise foi utilizado os limites de distorções de correntes no ponto de acoplamento recomendados pelo IEEE na norma 519-2014, que trata sobre práticas recomendadas e requisitos para controle de harmônicos no sistema elétrico de potência.

Os limites são calculados a partir da demanda do cliente, e é utilizado a razão entre as correntes de curto-circuito máxima (I_{SC}) e a máxima corrente demandada (I_L) (apenas a componente fundamental) pela carga no ponto de acoplamento. A Tabela 9 mostra os limites de distorções harmônicas de corrente para sistemas com tensão de alimentação entre 120 a 69000 volts.

Tabela 9 - Limites de distorções de correntes para sistemas alimentados em 120V a 69kV.

Maximum harmonic current distortion in percent of I_L						
Individual harmonic order (odd harmonics) ^{a, b}						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
$20 < 50$	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
$50 < 100$	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
$100 < 1000$	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Fonte: (IEEE, 2014)

A seguir será calculado a corrente de curto-circuito da indústria seguindo equação 4.1.

$$I_{SC} = \frac{S}{Z_{\%} V_L \sqrt{3}} \quad (4.1)$$

Onde:

S : Potência nominal do transformador;

$Z_{\%}$: Impedância percentual do transformador;

V_L : Tensão de linha.

$$I_{SC} = \frac{1500 \times 10^3}{(0,06) 380 \sqrt{3}} = 37,983 \text{ kA}$$

A máxima corrente demandada no ponto de conexão sob condições de operação normal de carga foi registrada no dia 29/05 das 13:45. A Tabela 10 apresenta os valores das correntes máximas demandadas nas três fases juntamente com a relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$.

Tabela 10 - Corrente máxima demandada e relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$.

Fase	Corrente (A)	I_{cc}/I_L
A	682,80	55,62
B	708	53,64
C	534	71,12

Fonte: Próprio autor

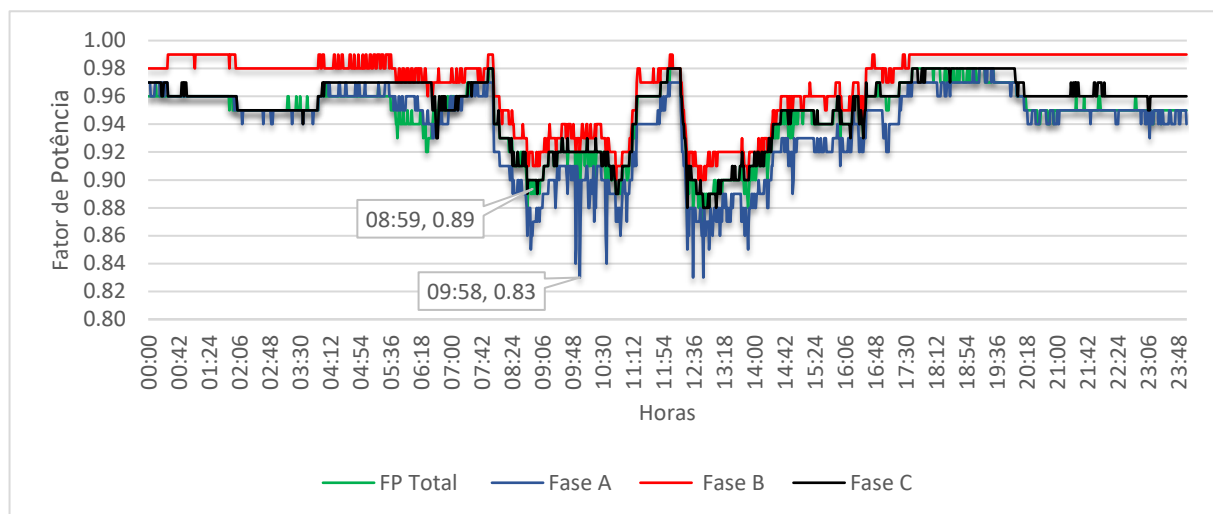
Nos dados mensurados e apresentados pela Figura 44, percebe-se que as distorções harmônicas totais das fases A e B ultrapassaram os limites recomendados da IEEE 519-2014, em seus respectivos valores para a relação da corrente de curto-circuito e corrente demandada calculada. Enquanto a recomendação para distorção total de corrente é de 12%, o registrado nas fases A e B foram de 14,41%, 13,97% respectivamente, sendo recomendado assim o emprego de um método para mitigação de harmônicos.

Vale lembrar que a indústria não apresenta um consumo próximo ao que foi definido e contratado como demanda junto à concessionária. Na ocorrência de um maior consumo de corrente demandada, haverá uma redução na relação apresentada na Tabela 10, podendo ocasionar assim a ultrapassagem dos limites recomendados pela IEEE 519-2014 para a distorção harmônica total na fase C e das componentes harmônicas individuais.

4.2.4 Fator de Potência

Na análise do fator de potência diário, percebe-se pela Figura 45 que o fator de potência fica acima da norma durante os períodos noturno, onde há o menor consumo de energia.

Figura 45 - Fator de potência dia 29/05



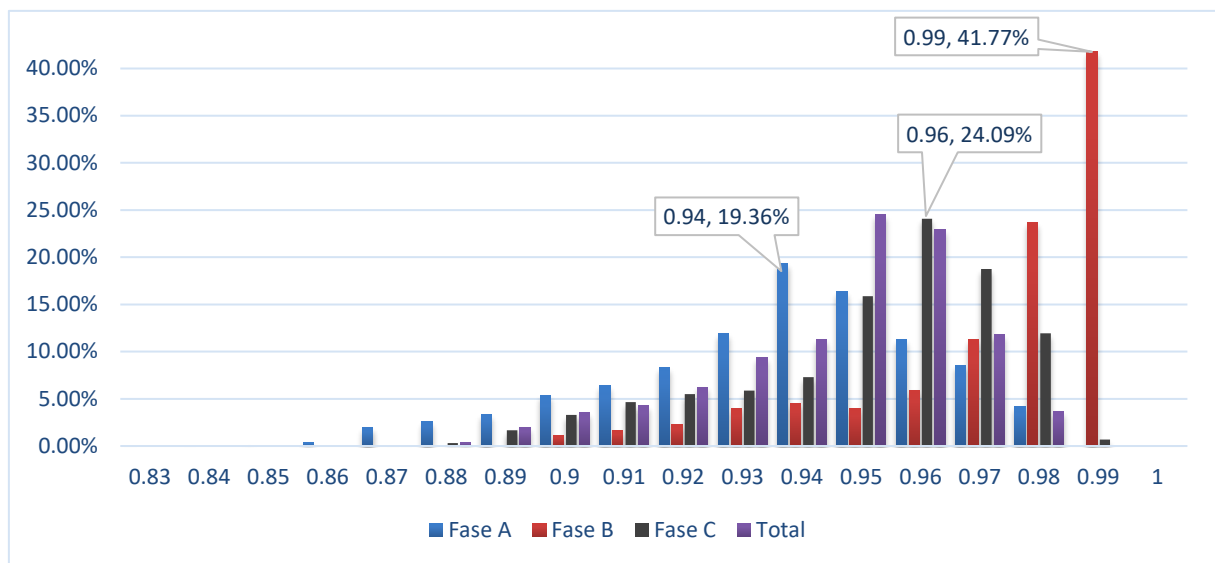
Fonte: Próprio autor

Ao iniciar a jornada de trabalho próximo às 8 horas da manhã, momento que aumenta o consumo de energia, o fator de potência decai, ficando abaixo de 0,92, principalmente a fase A, com o fator mais baixo.

Observa-se que às 8:59 o fator de potência total registra 0,89, num momento em que as três fases aparentam uma queda no fator de potência. Em outro momento a fase A chega a registrar um valor de 0,83, caracterizando um grande consumo de potência reativa neste instante. Ao comparar com a Figura 35 nota-se que o baixo fator de potência está diretamente ligado ao aumento de corrente consumida.

A figura 47 apresenta o fator de potência percentualmente em relação as 10080 amostras. O fator de potência total obteve 0,95 em 24,5% dos registros, enquanto a fase B teve 41,77% dos registros em 0,99 e a fase C de 24,09% para 0,96.

Figura 46 - Fator de potência registrado.

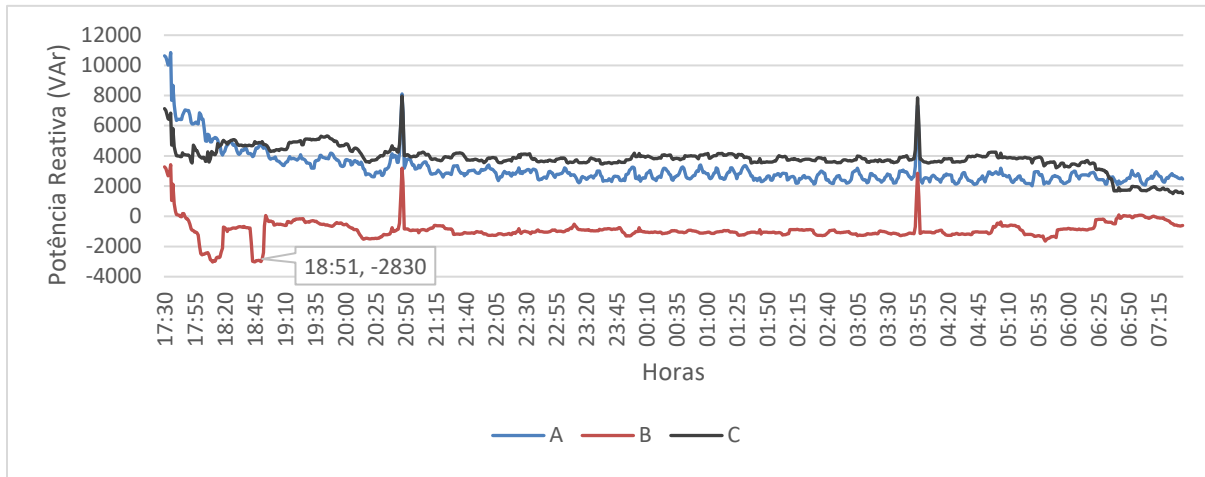


Fonte: Próprio autor

Já para a fase A, tem-se um maior número de registros de 19,36% para um fator de potência de 0,94, apresentando o pior fator de potência entre os maiores registros percentuais em comparação às demais fases. Em relação aos registros abaixo do estabelecido pela ANEEL de 0,92 para o fator de potência, a fase com o pior fator de potência foi a fase A, com 1,92% de registros para 0,87 e 6,37% para 0,91. A justificativa para um maior fator de potência para a fase B, é o fato de que em vários momentos foram registrados potência reativa capacitiva na fase, com

maior concentração nos períodos de menor demanda. É apresentado na Figura 47 o momento onde o maior índice de potência reativa capacitiva registrada para a fase B, ocorrendo entre os dias 03/06/2020 para o dia 04/06/2020.

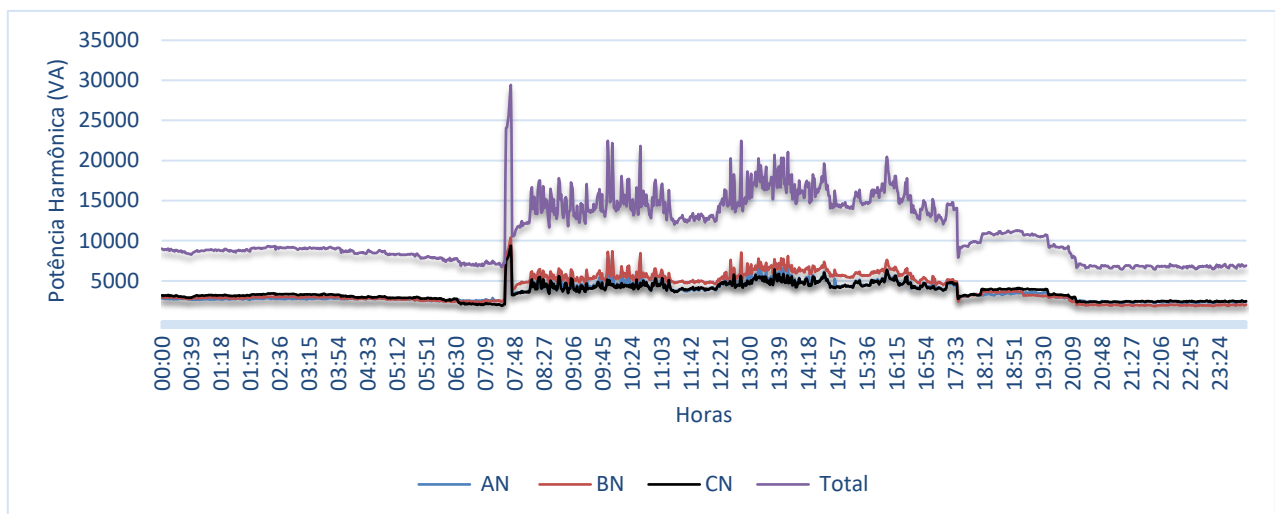
Figura 47 - Potência reativa capacitiva registrada.



Fonte: Próprio autor

A potência harmônica presente no sistema também foi registrada e é apresentada Figura 48, mostrando que conforme o consumo de energia aumenta, aumenta também a transferência de potência harmônica.

Figura 48 - Potência harmônica dia 29/05.



Fonte: Próprio autor

No início da jornada de trabalho próximo às 8 horas nota-se um pico de transferência de potência harmônica que pode ser causada por equipamentos que solicitam correntes harmônicas de 5ª ordem, pois é o mesmo instante em que há o pico de corrente desta ordem conforme apresentado pela Figura 42, a mesma chegando aproximadamente a 16% da corrente fundamental, e quase 30 kVA de potência harmônica total.

4.3 Considerações finais

Após os dados apresentados em todas as figuras e tabelas neste capítulo pode-se chegar em algumas conclusões. Nos períodos noturnos que não há grande consumo de energia, há um desequilíbrio de tensão causado por maior potência demandada na fase C nestes momentos, porém a corrente que surge no neutro nestes horários é devido a presença de correntes harmônicas de sequência zero na rede, conforme apresentado na Figura 41.

Nos períodos de maior demanda, os percentuais harmônicos em relação à corrente e tensão fundamental nas fases tendem a diminuir, porém é também neste mesmo momento em que se intensifica o percentual harmônico, principalmente componentes de sequência zero como harmônicos de 3ª e 9ª ordens, no neutro do circuito. O fator de potência decai principalmente nestes momentos de alta demanda, ficando abaixo do permitido em norma, retomando valores permitidos nos períodos noturnos.

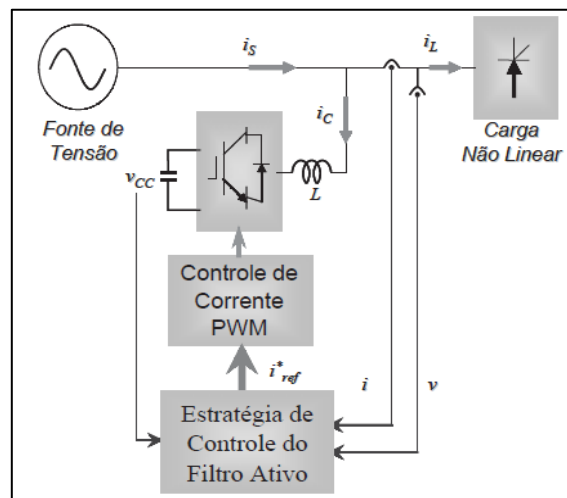
Vale ressaltar que a Stamac registra, até o momento da coleta dos dados apresentados, uma demanda muito abaixo da demanda contratada pela empresa, conforme demonstrado nas faturas de energia da mesma nos últimos quatro anos. Além de pagar por uma demanda não utilizada acarretando em dinheiro gasto sem um fim, ao aumentar o consumo de energia, trará ainda mais efeitos negativos ao circuito, pois aumentará os percentuais harmônicos no neutro, resultando em uma corrente mais alta em um condutor que não foi projetado para tal valor de corrente, bem como um fator de potência resultante nas fases e total mais baixo, podendo acarretar em maiores perdas ôhmicas, queima de equipamentos, além de multas imposta pela concessionária de energia pelo consumo excessivo de reativo.

Dito isto, faz-se necessário inicialmente realocar as cargas que possibilite um menor desequilíbrio de tensão nos períodos noturnos, apesar de ser o fator que menos impacta na qualidade da energia do sistema elétrico da indústria. O filtro a ser simulado no capítulo seguinte tem como objetivo trazer uma alternativa para a mitigação de componentes harmônicas bem como possibilitando a correção do fator de potência.

5 SIMULAÇÃO DO FILTRO ATIVO PROPOSTO

A presença de cargas não-lineares no sistema elétrico solicita correntes distorcidas com características harmônicas provocando distorções na tensão no PAC, afetando outras cargas que estiverem conectadas no mesmo ponto. Este fato, apresentado no capítulo 3, demonstra que o equipamento a ser utilizado para mitigação de problemas relacionados a distorções harmônicas deverá ser conectado em pontos do sistema de distribuição. O filtro ativo proposto será conectado em paralelo com uso de uma estratégia de controle, que definem correntes de referência, e inserirem no sistema correntes de compensação para que se tenha no PAC correntes e tensão senoidais e balanceadas, mesmo que as tensões e correntes estejam desbalanceadas e com distorções. É apresentado na Figura 49 a configuração típica do filtro ativo paralelo.

Figura 49 - Configuração típica do filtro ativo paralelo.



Fonte: (AREDES *et al.*, 2003)

5.1 Estratégia de Controle

Há algumas estratégias de controle do filtro ativo para a determinação das correntes de compensação, para a simulação foi selecionada a teoria p-q. Esta teoria consegue analisar no

domínio do tempo a potência instantânea de um sistema elétrico, realizando a transformação das fases a, b, c em eixos $\alpha\beta$, conhecida também como transformada Clarke. Como a carga a ser simulada está em um circuito alimentado a três fios, as componentes de sequência zero da transformada Clarke serão suprimidas. Em 5.1 é apresentada a transformada Clarke para a tensão, e de forma similar em 5.2 para a corrente, definindo assim as correntes de linha e tensões instantâneas.

$$\begin{bmatrix} V'_\alpha \\ V'_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V'_a \\ V'_b \\ V'_c \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

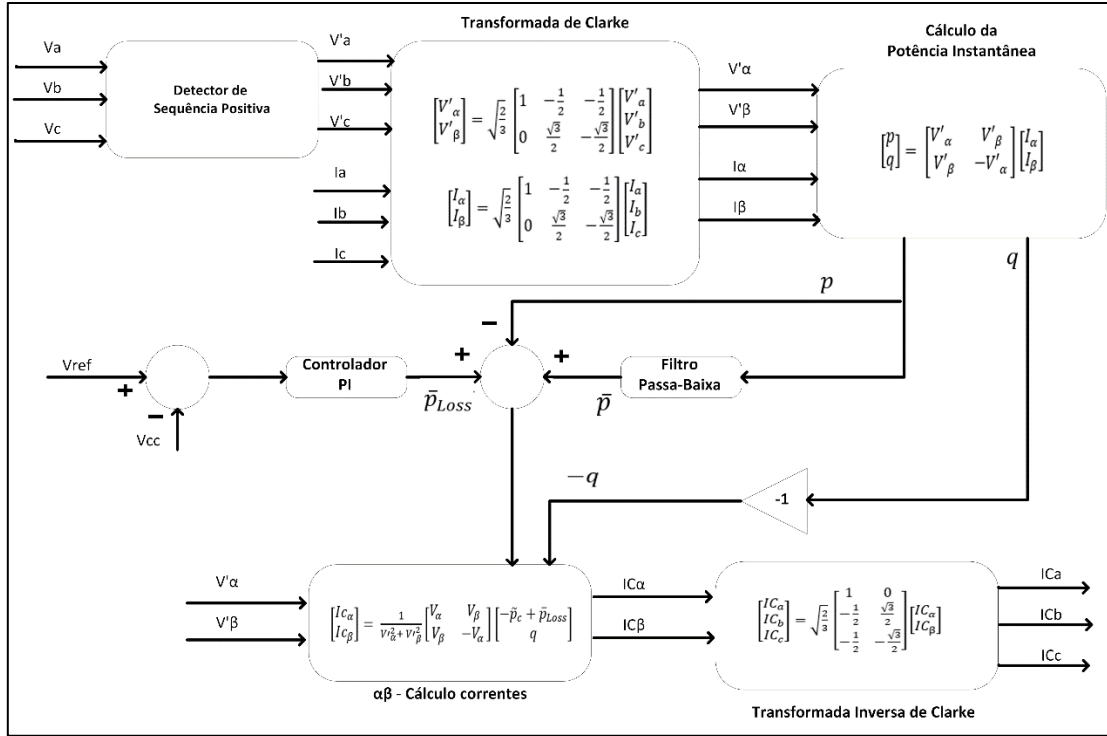
$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

É a partir das tensões de fase e correntes de linhas instantâneas, que é possível calcular a potência real instantânea p e a potência imaginária instantânea q , definidas por 5.3.

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V'_\alpha & V'_\beta \\ V'_\beta & -V'_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

A Figura 50 apresenta o diagrama de blocos da estratégia de controle do filtro ativo proposta por (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2006) e (AREDES *et al.*, 2003), e que foi seguido com base para a simulação neste trabalho.

Figura 50 - Diagrama de blocos da estratégia de controle do filtro ativo.



Fonte: (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2006)(Adaptada pelo próprio autor)

Após realizar o cálculo das potências instantâneas, a seleção da potência ativa instantânea de interesse $\bar{p}$ foi selecionada utilizando um filtro ativo passa-baixa Butterworth de 5ª ordem, com a frequência de corte em 60Hz, pela linearidade em sua resposta em frequência. A componente CA da potência ativa de compensação $-\tilde{p}_c$ foi obtida por meio da equação (5.4), que terá somente o valor da potência ativa instantânea que será mitigada.

$$-\tilde{p}_c = p - \bar{p} \quad (5.4)$$

Já as correntes de referência que serão entregues ao inversor PWM são definidas por 5.5.

$$\begin{bmatrix} I_{C\alpha} \\ I_{C\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{V'^2_\alpha + V'^2_\beta} \begin{bmatrix} V'_\alpha & V'_\beta \\ V'_\beta & -V'_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p}_c + \tilde{p}_{Loss} \\ q \end{bmatrix} \quad (5.5)$$

Se filtro ativo absorve uma potência de sequência negativa média da carga, terá que suprir a mesma quantidade de potência de sequência positiva média ao sistema de potência para manter a tensão CC constante. Ao ter um desequilíbrio no fluxo de potência, o filtro ativo irá absorver ou fornecer uma potência de sequência negativa contida em $\bar{p}$, causando variação no capacitor CC, usando então um controlador PI para manter a tensão CC próxima à do referencial para o inversor PWM, por isto é utilizado o p_{loss} nos cálculos das correntes de referência, para providenciar um balanço de potência devido à compensação de erros que ocorrem durante as respostas transientes do filtro ativo paralelo.

É utilizada então a transformada inversa de Clarke, para entregar ao inversor PWM as correntes de referência em termos do eixo abc . Transformada Inversa de Clarke:

$$\begin{bmatrix} IC_a \\ IC_b \\ IC_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} IC_\alpha \\ IC_\beta \end{bmatrix} \quad (5.6)$$

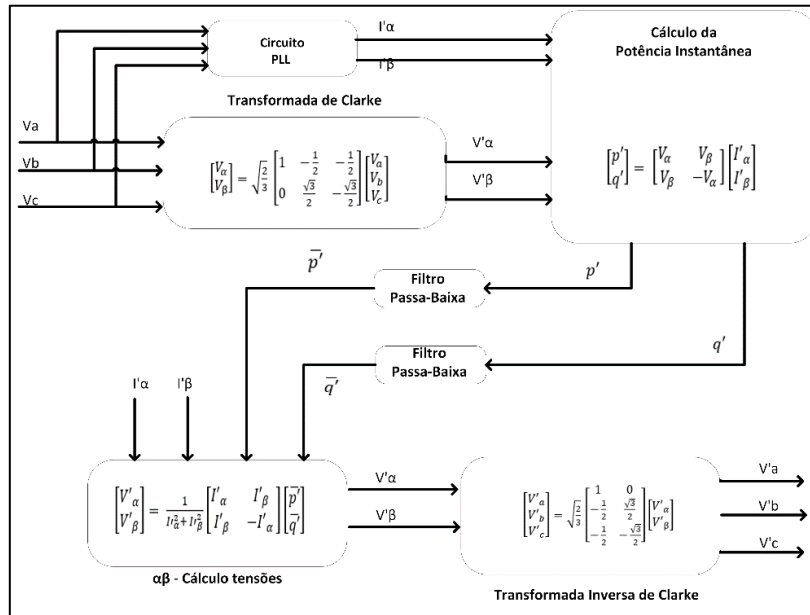
O ponto inicial do diagrama de blocos apresentado pela Figura 50 é o detector de sequência positiva de tensão. Para se ter correntes que sejam senoidais e balanceadas, o filtro ativo deve compensar todos os componentes harmônicos bem como as componentes fundamentais que diferem da corrente fundamental de sequência positiva, fazendo com que o filtro permita apenas as correntes da carga de sequência positiva que esteja em fase com a tensão de sequência positiva.

5.1.1 Detector de Sequência Positiva

As tensões trifásicas V_a , V_b e V_c no terminal da carga consistem principalmente pela componente de sequência positiva, mas podem ser desbalanceadas, contendo componentes de sequência negativa e zero na frequência fundamental. Também podem conter harmônicos de

qualquer componente de sequência. Na Figura 51 é apresentado o diagrama de blocos do detector de tensão de sequência positiva fundamental.

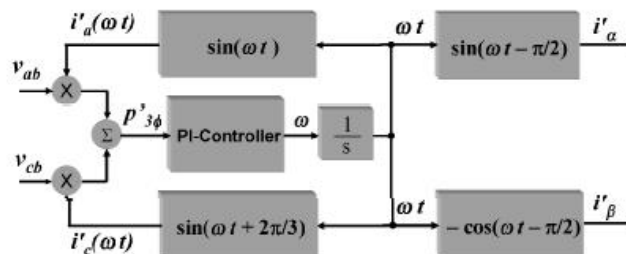
Figura 51 - Detector de tensão de sequência positiva fundamental.



Fonte: Fonte: (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2006)(Adaptada pelo próprio autor)

A detecção da componente de sequência positiva da fundamental é necessária para a estratégia de controle p-q apresentado na Figura 50. Com o detector, apenas a parte ativa da componente de sequência positiva da fundamental, a qual produz potência média real (onde se tem a corrente fundamental de sequência positiva em fase com a tensão fundamental de mesma sequência), é fornecida pela fonte. O circuito PLL rastreia continuamente a frequência fundamental das tensões medidas no sistema, e é apresentado pela Figura 52.

Figura 52 - Diagrama de blocos do circuito PLL.



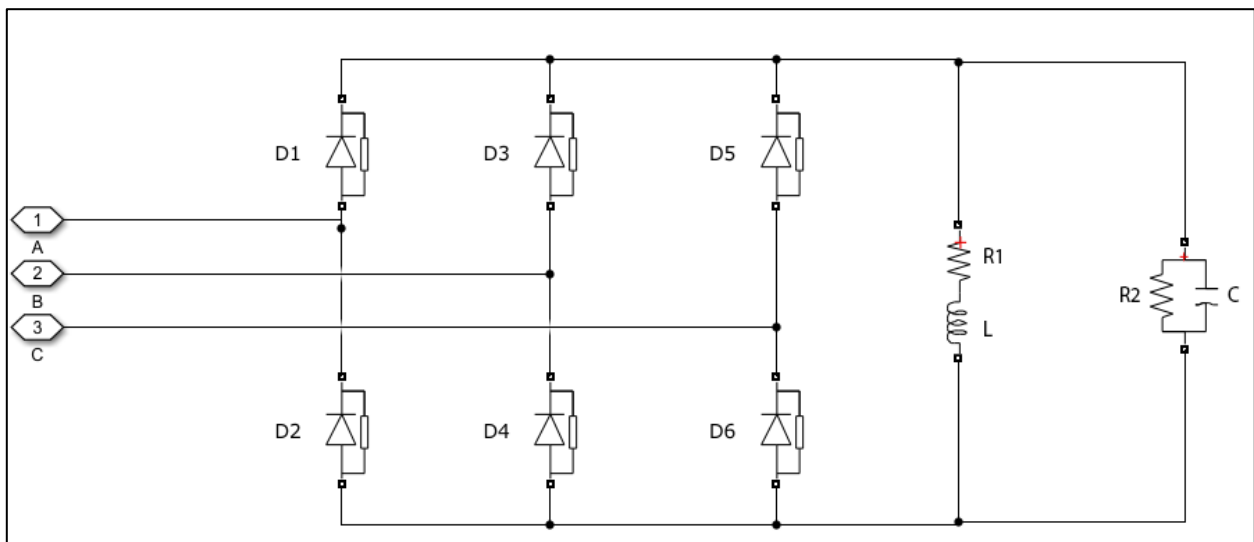
Fonte: (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2006)

Este circuito é capaz de determinar automaticamente a frequência e o ângulo de fase da componente de sequência positiva fundamental dos sinais de entrada trifásico, que no caso são as tensões fornecida pela fonte de energia.

5.2 Resultados da simulação

A carga simulada escolhida foi um retificador trifásico devido ao seu alto conteúdo harmônico e à sua presença comum em instalações industriais. Embora não seja semelhante à carga presente na Stemac, a escolha foi feita com o objetivo de gerar um conteúdo harmônico em situação precária em comparação com o apresentado no capítulo 4. A Figura 53 apresenta a carga no Simulink, e os valores para seus respectivos componentes estão disponíveis na Tabela 11 abaixo.

Figura 53 - Carga simulada no Simulink/Matlab®.



Fonte: Próprio autor

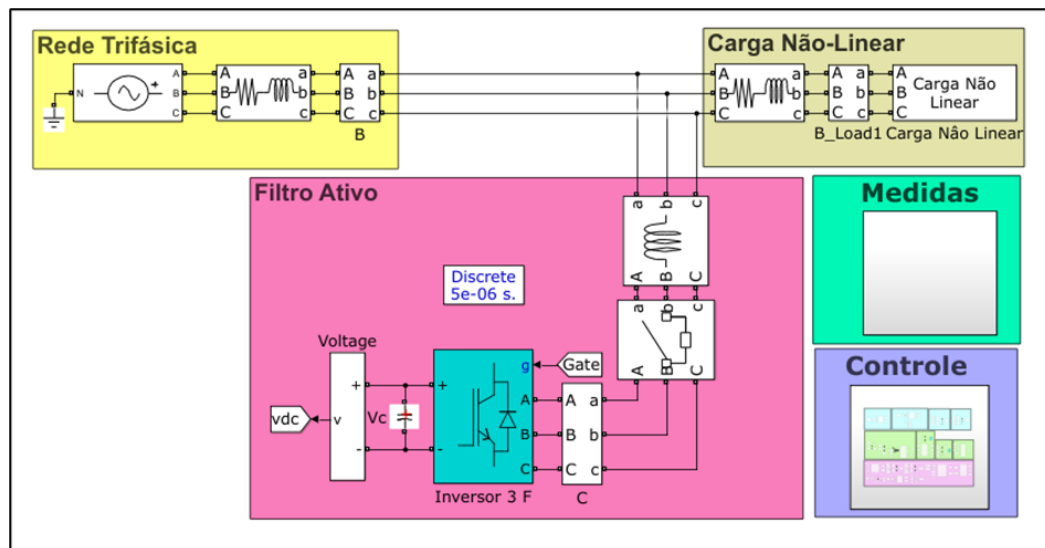
Tabela 11 - Parâmetros dos componentes da carga simulada.

R1 (Ω)	R2 (Ω)	L (mH)	C (μF)
60	8	20	4700

Fonte: Próprio autor

É apresentado pela Figura 54 como o filtro ativo paralelo foi conectado ao sistema simulado.

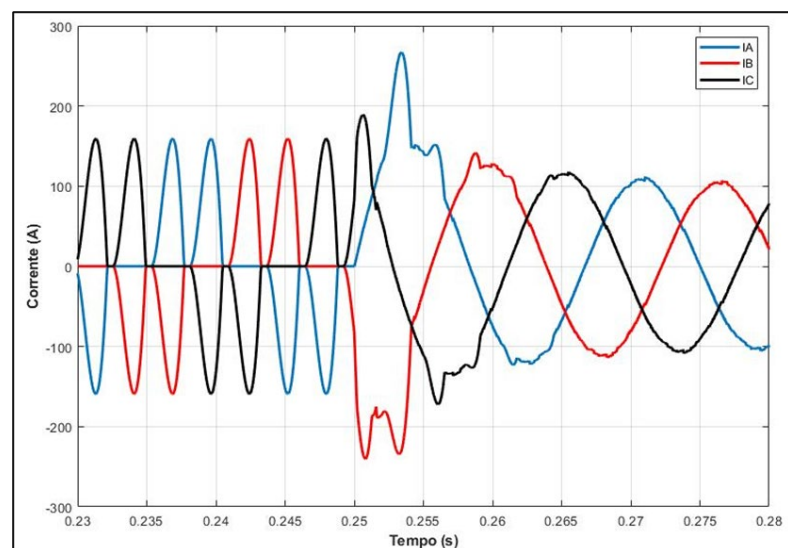
Figura 54 - Conexão do filtro ativo no sistema.



Fonte: Próprio autor

O filtro entra em operação no sistema no instante de 0,25 segundos na simulação, a Figura 55 apresenta as correntes de fases na rede.

Figura 55 - Correntes de fase na rede.

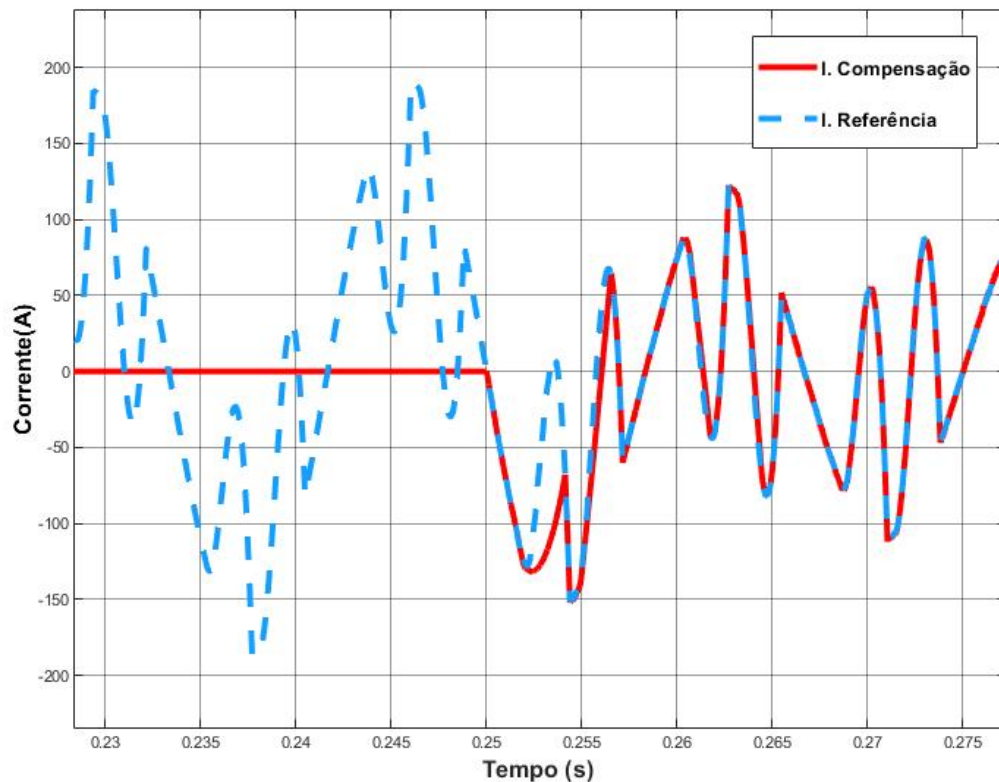


Fonte: Próprio autor

Nota-se que antes do filtro entrar em operação as correntes possuem o mesmo comportamento da carga, não possuindo formas senoidais e conforme será apresentado mais a frente, possuem alto conteúdo harmônico. Nos primeiros instantes há uma pequena variação nas formas de onda devido ao período transitório para a entrada do filtro, e após a inserção das correntes de compensação, as correntes de fase demonstram formas senoidais.

A seguir na Figura 56 é apresentado a corrente de referência em azul, e a corrente de compensação gerada pelo filtro ativo é apresentada em vermelho.

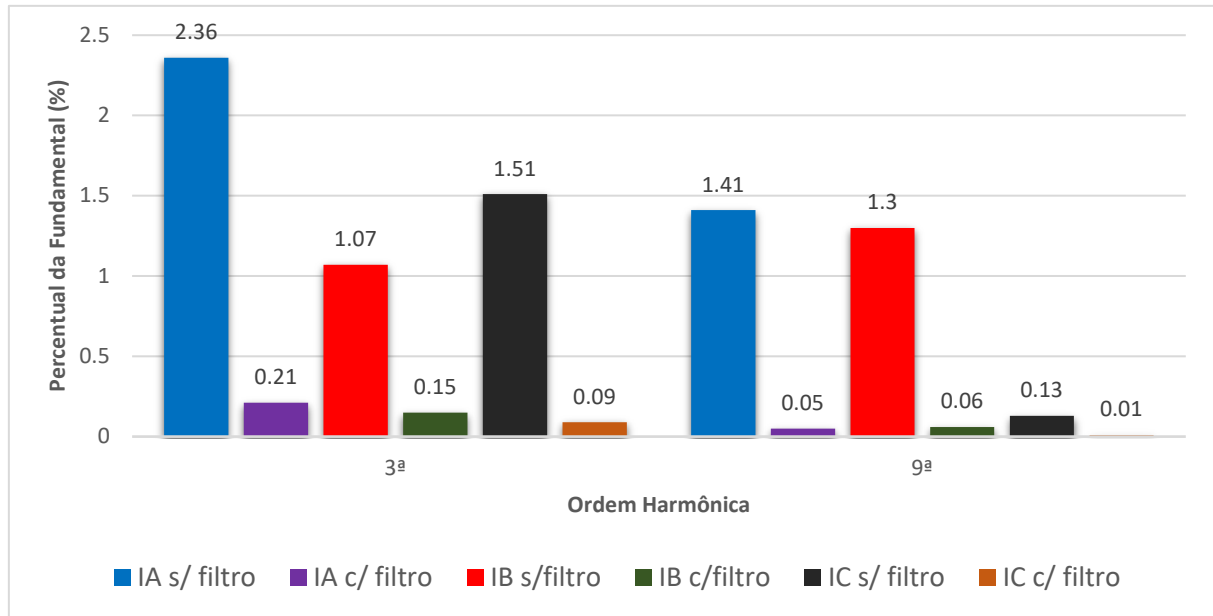
Figura 56 - Corrente de referência e compensação.



Fonte: Próprio autor

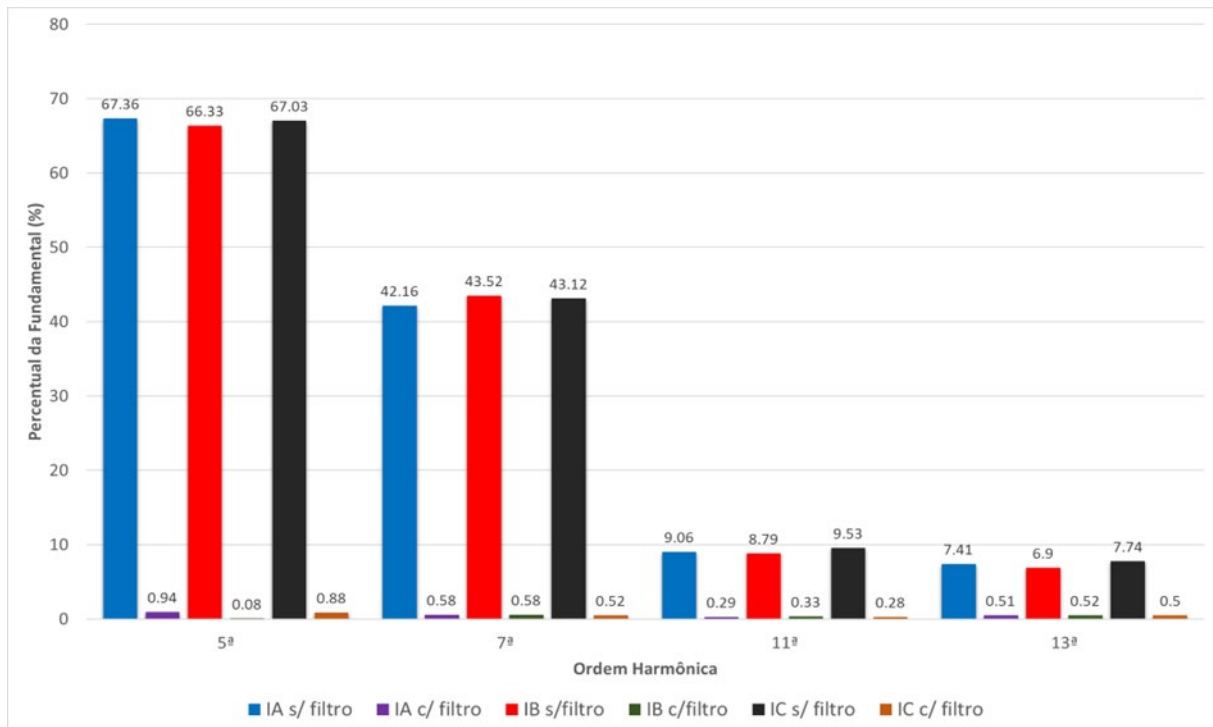
Sobre o conteúdo harmônico das correntes apresentadas na Figura 55, a Figura 57 apresenta as componentes de sequência zero e a Figura 58 mostra o percentual harmônico de sequência positiva e negativa presente na corrente da rede com e sem a presença do filtro ativo.

Figura 57 - Harmônicos de sequência zero.



Fonte: Próprio autor

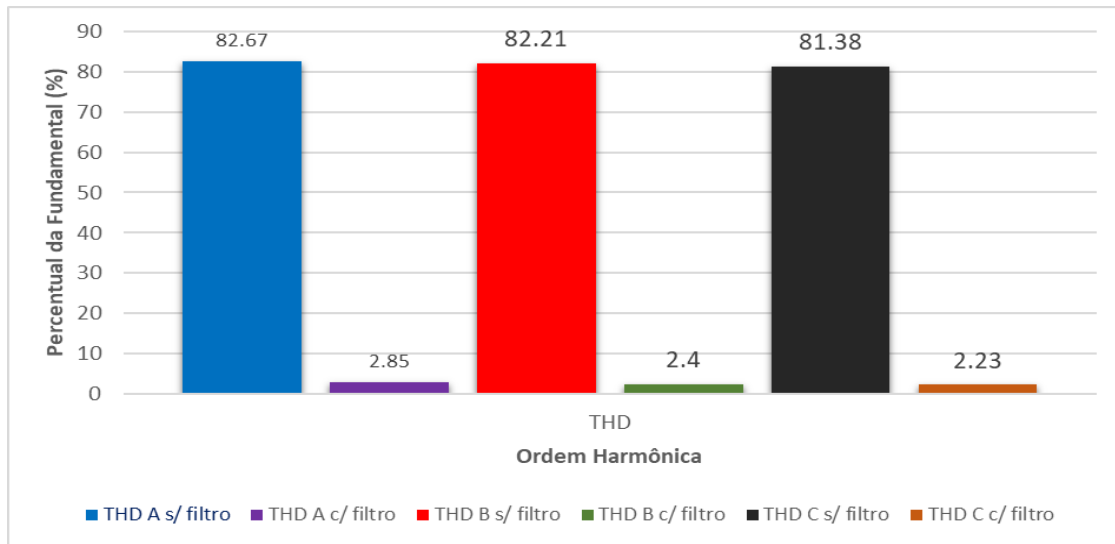
Figura 58 - Harmônicos de sequência positiva e negativa.



Fonte: Próprio autor

Por fim, a Figura 59 apresenta a distorção harmônica total de corrente, também com e sem a atuação do filtro ativo.

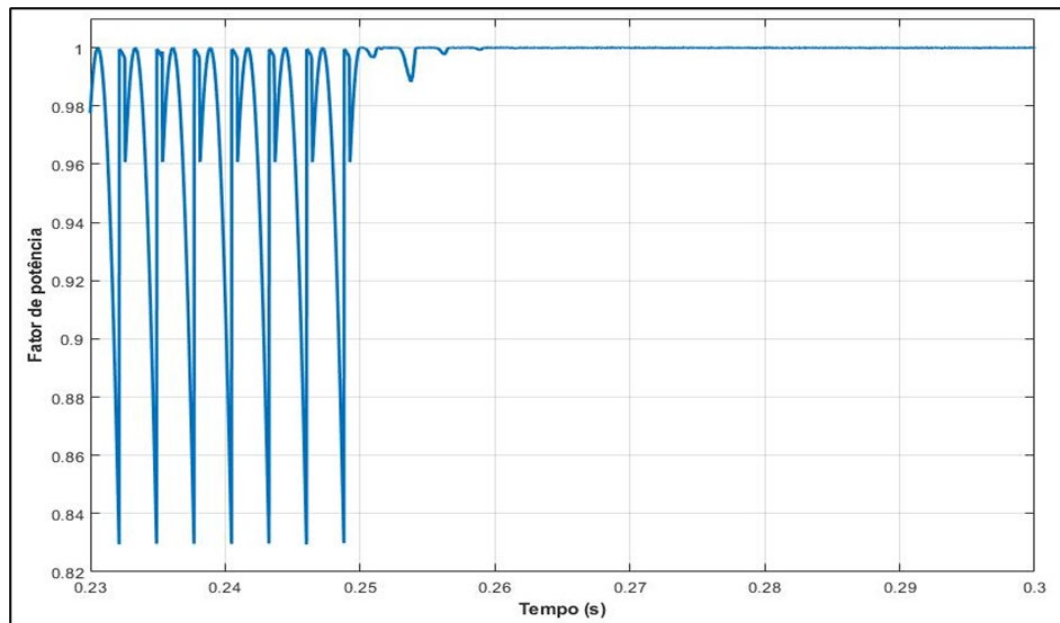
Figura 59 - Harmônicos totais de corrente.



Fonte: Próprio autor

O fator de potência foi calculado considerando apenas a parte da componente fundamental, e é apresentado na Figura 60.

Figura 60 - Fator de potência do sistema simulado.



Fonte: Próprio autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho, foram apresentadas considerações teóricas acerca da qualidade da energia elétrica, incluindo questões normativas e limites recomendados para um sistema com qualidade de energia insatisfatória, com distorções harmônicas totais consideráveis e baixo fator de potência, principalmente devido às potências harmônicas.

É importante destacar que a qualidade de energia elétrica é um fator crítico para a indústria, uma vez que distorções harmônicas podem causar danos significativos em equipamentos elétricos e eletrônicos, além de afetar a eficiência energética do processo industrial. Falhas em sistemas de controle e automação, queima prematura de motores elétricos, redução na vida útil de equipamentos e outros problemas podem ser causados pela má qualidade da energia elétrica.

Foi possível constatar que a baixa demanda de energia elétrica por parte da indústria nos períodos noturnos está relacionada com a concentração de componentes de sequência zero nas fases, e nos momentos de maiores consumos, com os harmônicos de sequência positiva e negativa, que podem ocasionar trepidações e mal funcionamento em máquinas rotativas.

Com o objetivo de mitigar o conteúdo harmônico e corrigir o fator de potência, justificou-se o emprego do filtro ativo simulado no capítulo 5, uma proposta eficaz para solucionar tais efeitos negativos presentes no circuito da indústria. Essa solução permitirá que a indústria apresente uma maior economia financeira devido à diminuição manutenção/queima de equipamentos ocasionadas por harmônicos e pelo não recebimento de multa por não possuir um fator de potência abaixo do estabelecido em norma.

Conclui-se, portanto, que, além da análise do circuito, é importante realizar inspeções e medições corretas, a fim de garantir a qualidade da energia em processos industriais. O filtro ativo simulado apresentou-se como uma alternativa viável e eficaz para a correção de fator de potência e mitigação de harmônicos, trazendo benefícios significativos para a indústria.

Para trabalhos futuros são sugeridos a simulação do filtro considerando as componentes de sequência zero bem como simulando o filtro na presença de outras cargas não-lineares. É

sugerido também que se realize simulações e análises na aplicação de outras topologias de filtros ativos e estratégias de controle.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGILENT TECHNOLOGIES. **The Fundamentals of Signal Analysis**, Application Note 243. Agilent Technologies, 2000.

AKAGI, Hirofumi; WATANABE, Edson Hirokazu; AREDES, Maurício. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. IEEE Press, 2007.

ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília: Aneel, 2020.

ARAÚJO, Celso José Faria de. **Filtro de Frequências**. 2019.

AREDES, M; NETO, J.A Moor; SIQUEIRA, M.J.V; MONTENEGRO, J.C. **Filtros Ativos Paralelos: Um Enfoque Quanto a Eficácia de Três Estratégias de Controle**. Anais do II CITENEL/2003, 2003.

DAVIS, Nick. **An Introduction to Filters**. 2017. Disponível em: <https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/an-introduction-to-filters/>. Acesso em: 18 dez. 2021.

DUGAN, Roger C.; MCGRANAGHAN, Mark F.; SANTOSO, Surya; BEATY, H. Wayne. **Electrical Power Systems Quality**. 2ª ed. McGraw-Hill Education, 2004.

FUCHS, Ewald; MASOUM, Mohammad. **Power Quality in Power Systems and Electrical Machines**. 2ª ed.: Elsevier, 2008.

GARCIA, Flávio R. **Harmônicos Em Sistemas Elétricos De Potência**. 2010.

IEEE. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**. IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992). 2014.

KUSKO, Alexander; THOMPSON, Marc T. **Power Quality in Electrical Systems**. McGraw-Hill Education, 2007.

LIMA, Thales. **Análise de Sistemas Elétricos Utilizando Componentes Simétricas**. 2021. 1 videoaula (24 min 43 seg). Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=aly8jrxNyY>.

MIKKILI, Suresh; PANDA, Anup Kumar. **Power Quality Issues: Current Harmonics**. CRC Press, 2018.

FLUKE. **O que é PRODIST?** Fluke Academy of Certified Training. Disponível em: https://www.flukeacademy.com.br/blog/post/13/o_que_é_prodist. Acesso em: 18 nov. 2020.

OLIVEIRA, José Eduardo Alves de. **Modelagem de um motor de indução trifásico operando com tensões desequilibradas por meio de redes neurais artificiais**. Unesp, 2011. 125 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/87193>.

OLIVEIRA, Wagner José Nascimento de. Instalação de filtros passivos para a redução de correntes harmônicas na subestação de 600 kVA de Estação Elevatória de Água. In: Anais do VI Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.20906/cps/sbse2016-0350>.

PAULILO, Gilson. **Qualidade de energia - Capítulo 1: Conceitos gerais sobre qualidade da energia**. O Setor Elétrico, 2013. 7 p.

PERTENCE JÚNIOR, Antônio. **Eletrônica Analógica: Amplificadores Operacionais e Filtros Ativos**. Bookman, 2003. 308 p.

PRZYSIADA, Felipe. **Filtros Ativos - Função Resposta e Projeto**. 2021. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=RM1lp8BPfnw&t=5s> Acesso em: 06 mar. 2023

ROCHA, Joaquim Eloir. **Qualidade da Energia Elétrica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2016.

SCHUBERT, Thomas F.; KIM, Ernest M. **Fundamentals of electronics: Book 3** active filters and amplifier frequency response. Synthesis Lectures on Digital Circuits and Systems, vol. 11, 2016.

SHIPMAN, Kurt.; DELINCÉ, François. **The Importance of Good Power Quality**. ABB Power Quality Products.

STEMAC. **Stemac Grupo Geradores - Estrutura**. Disponível em: <http://www.stemac.com.br/estrutura.aspx>. Acesso em: 6 mar. 2023.