



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDA MARIA VANDERLEI SANTOS

Análise e Controle de Distorções Harmônicas Utilizando Modelagem com
Filtros Passivos.

Cabo de Santo Agostinho, PE

2024

FERNANDA MARIA VANDERLEI SANTOS

Análise e Controle de Distorções Harmônicas Utilizando Modelagem com
Filtros Passivos.

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à disciplina de Projeto
Final de Curso de Engenharia
Elétrica da Universidade Federal
Rural de Pernambuco, da Unidade
acadêmica do Cabo de Santo
Agostinho.

Orientador: Prof. Dr Denis Keuton
Alves.

Cabo de Santo Agostinho, PE

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S237a Santos, Fernanda Maria Vanderlei
Análise e controle de distorções harmônicas utilizando modelagem com filtros passivos. / Fernanda Maria Vanderlei Santos. - 2024.
61 f.
- Orientador: Denis Keuton Alves.
Inclui referências.
- Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, , Cabo de Santo Agostinho, 2024.
1. Carga não linear . 2. Distorções harmônicas . 3. Filtros passivos. 4. Qualidade de energia. I. Alves, Denis Keuton, orient. II. Título

CDD

FERNANDA MARIA VANDERLEI SANTOS

Análise e Controle de Distorções Harmônicas Utilizando Modelagem com
Filtros Passivos.

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica
do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco
para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 11/03/2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Denis Keuton Alves (Orientador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Prof. João Paulo Ramos Agra Mello (Avaliador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Prof. Marcel Ayres de Araujo (Avaliador)
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus.

A toda minha família por todo apoio e incentivo, em especial aos meus pais Fernando e Ana Claudia.

AGRADECIMENTOS

Desejo iniciar meus agradecimentos expressando minha profunda gratidão a Deus, fonte de força e orientação, por estar ao meu lado em todos os momentos.

Agradeço a minha família pelo imenso apoio ao longo da minha vida. Em especial, à memória da minha tia Rosilda, meu tio Gerson e minha avó Ana, que, embora não estejam fisicamente presentes para testemunhar a conclusão, têm um lugar especial em meu coração. Este trabalho é uma modesta homenagem e agradecimento por tudo que significaram em minha vida.

Agradeço ao Professor Dr. Denis Keuton Alves, meu orientador, pelo apoio e compreensão ao longo deste trabalho. Estendo meus agradecimentos aos amigos de jornada acadêmica, especialmente Edlane Cavalcante e Helton Bernardo, pelos momentos de companhia e estudo.

Por fim, agradeço a todos da Universidade que de alguma forma contribuíram com a minha trajetória.

RESUMO

Com a evolução da eletrônica de potência para o controle e a otimização de fluxos e processos industriais, desafios relacionados à qualidade da energia elétrica têm se tornado mais proeminentes, em especial a distorção harmônica. Portanto, compreender as principais causas, os impactos e as estratégias fundamentais de mitigação torna-se crucial para assegurar que um sistema elétrico opere com a máxima qualidade e eficiência. Em ambientes fabris, no qual são empregados inversores de frequência para controle de motores, retificadores não lineares que convertem uma corrente alternada em contínua com a finalidade de alimentar uma variedade de dispositivos eletrônicos, a presença de conteúdo distorcido em sinais de corrente e tensão tornou-se cada vez mais comum. Essas distorções podem resultar em problemas como superaquecimento de transformadores e cabos, falhas em equipamentos eletrônicos sensíveis, entre outros distúrbios. Assim, este trabalho propõe um estudo teórico e simulado sobre as distorções harmônicas presentes em uma carga com um retificador trifásico, o foco do estudo será a aplicação de um filtro passivo em derivação para atenuação do conteúdo harmônico do sistema. O emprego de filtros passivos oferece uma relação custo-benefício significativa, uma vez que o investimento necessário para sua implementação é relativamente baixo em comparação com outras abordagens. Além disso, esses filtros têm a capacidade selecionar e eliminar harmônicos específicos, que foram previamente calculados em projeto. Com o término deste estudo, almeja-se alcançar um sistema com índices harmônicos controlados, validando assim a eficácia da metodologia em análise.

Palavras-chaves: Carga não linear; distorções harmônicas; filtros passivos; qualidade da energia.

ABSTRACT

With the evolution of power electronics for the control and optimization of industrial flows and processes, challenges related to the quality of electrical energy have become more prominent, especially harmonic distortion. Therefore, understanding the main causes, impacts, and fundamental mitigation strategies becomes crucial to ensure that an electrical system operates with maximum quality and efficiency. In industrial environments, where frequency inverters are used for motor control and nonlinear rectifiers are employed to convert alternating current into direct current to power a variety of electronic devices, the presence of distorted content in current and voltage signals has become increasingly common. These distortions can result in problems such as overheating of transformers and cables, failures in sensitive electronic equipment, among other disturbances. Thus, this work proposes a theoretical and simulated study on harmonic distortions present in a load with a three-phase rectifier, with a focus on the application of a passive shunt filter to attenuate the harmonic content of the system. The use of passive filters offers a significant cost-benefit ratio, as the investment required for their implementation is relatively low compared to other approaches. Additionally, these filters have the ability to select and eliminate specific harmonics, which were previously calculated in the design phase. With the completion of this study, the aim is to achieve a system with controlled harmonic indices, thus validating the effectiveness of the methodology under analysis.

Keywords: Nonlinear load; harmonic distortions; passive filters; power quality.

FIGURAS

Figura 1: Características de uma carga linear.	18
Figura 2: Característica de uma carga não linear.	19
Figura 3: Composição harmônica de um sinal distorcido.	20
Figura 4: Correntes harmônicas de 3° ordem somadas ao neutro.	25
Figura 5: Corrente distorcida de um transformador em condição de saturação.	26
Figura 6: Resposta ideal do filtro (a) passa-alta; (b) passa-baixa; (c) passa- faixa; (d) rejeita-faixa.	29
Figura 7: Filtro passivo em série.	30
Figura 8: Filtro passivo em derivação.	31
Figura 9: Filtro passivo em derivação sintonizado.	32
Figura 10: Filtro passivo amortecido.	32
Figura 11: Topologia do filtro ativo em série.	34
Figura 12: Topologia do filtro em paralelo.	34
Figura 13: Sistema de estudo.	36
Figura 14: Tensão em PCC.	37
Figura 15: Corrente em PCC.	38
Figura 16: Espectro de tensão.	38
Figura 17: Distorção harmônica individual de tensão.	39
Figura 18: Espectro de corrente.	40
Figura 19: Distorção harmônica individual de corrente.	40
Figura 20: Sistema de estudo com filtro passivo para quinta harmônica	44
Figura 21: Corrente no ponto PCC após filtro passivo de quinta ordem.	45
Figura 22: Espectro de corrente	46
Figura 23: Distorção harmônica individual de corrente.	46
Figura 24: Sistema com filtro passivo de sétima ordem.	48
Figura 25: Corrente no ponto PCC após filtro passivo de sétima ordem.	49
Figura 26: Espectro de corrente	50
Figura 27: Distorção harmônica individual de corrente.	50
Figura 28: Espectro de corrente após a frequência de ressonância de quinta ordem.	52

Figura 29: Espectro de corrente após a frequência de ressonância de sétima ordem.	52
Figura 30: Sistema com distúrbio.	53
Figura 31: Corrente do sistema com distúrbio no ponto PCC.	54
Figura 32: Distorção individual de corrente	55

TABELAS

Tabela 1: Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)	22
Tabela 2: Limite de distorção de corrente para sistemas alimentados em 120V a 69kV	23
Tabela 3: Tensões trifásicas desequilibradas	37
Tabela 4: Resistência e indutância do sistema.....	37
Tabela 5: Distorção harmônica total de tensão.....	39
Tabela 6: Distorção harmônica total de corrente	40
Tabela 7: Relação I_{SC}/I_L	41
Tabela 8: Parâmetros para projeto do filtro passivo RLC série shunt.....	43
Tabela 9: Distorção harmônica total de corrente	46
Tabela 10: Relação I_{SC}/I_L	47
Tabela 11: Parâmetros para projeto do filtro passivo RLC série shunt para sétima ordem.....	47
Tabela 12: Distorção harmônica total de corrente.	50
Tabela 13 : Relação I_{SC}/I_L	51
Tabela 14 : Distorção harmônica de corrente.	51
Tabela 15 : Relação I_{SC}/I_L	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
EPE	Empresa de pesquisa energética
CC	Corrente contínua
CC	Corrente alternada
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
<i>PSIM</i>	<i>Power System Simulation</i>
PODIST	Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica
Rad/s	Radianos por segundo
DHT	Distorção Harmônica Total
DHI	Distorção Harmônica Individual
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
RLC	Resistência; Indutância; Capacitância
PCC	Ponto de conexão comum

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA	14
1.2 MOTIVAÇÃO.....	15
1.3 OBJETIVOS.....	16
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	16
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	18
2.1 HARMÔNICOS	18
2.2 CAUSAS E EFEITOS	23
2.2.1 Condutor neutro.....	24
2.2.2 Dispositivos de proteção.....	25
2.2.3 Transformadores	26
2.2.4 Motores elétricos	26
2.2.5 Capacitores	27
2.2.6 Ressonância.....	27
3 TÉCNICAS DE FILTRAGEM PARA MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS.....	28
3.1 DEFINIÇÃO DE FILTROS.....	28
3.2 FILTROS EM DERIVAÇÃO.....	30
3.3 FILTROS ATIVOS	33
3.4 FILTROS HÍBRIDOS.....	35
4 MODELAGEM DO SISTEMA	36
5 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	42
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	56
6.1 CONCLUSÕES GERAIS	56
6.2 TRABALHOS FUTUROS.....	57
REFERÊNCIA	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA

É incalculável a extrema importância que a energia elétrica exerce no presente contexto da sociedade, com a crescente modernização e automação de processos a demanda pelo fornecimento de energia elétrica vem aumentando. No ano de 2023, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) (2024) registrou um acréscimo em torno de 1912,1 MW de potência gerada (um total de 51 unidades geradoras entraram em funcionamento), distribuindo-se em 35 usinas eólicas, 13 centrais solares, 2 usinas termoelétricas e 1 pequena central hidrelétrica. Com o advento da ampliação mencionada, muitos são os fatores que influenciam na garantia da confiabilidade e qualidade da energia fornecida. A utilização da energia elétrica com padrões adequados de qualidade demanda um fornecimento de potência estável e níveis controlados de tensão (Silva, 2007).

Conforme estudo realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2023), as classes que mais consumiram energia elétrica no ano de 2022 foram o setor de transporte (35%) e o industrial (34%). Na indústria, é comum a presença significativa de equipamentos baseados na tecnologia fundamentada em eletrônica de potência, o que inclui a utilização de conversores e retificadores.

Para Junior (2015) os conversores de potência têm por finalidade a transformação de uma potência elétrica de uma forma para outra, em geral são usados em sistemas elétricos para controlar, modular e distribuir energia de forma eficiente e eficaz. Por meio do chaveamento de dispositivos semicondutores, é possível modificar as características de um sinal elétrico. Diversas aplicações se beneficiam desse processo. Os retificadores convertem a tensão alternada em tensão contínua, os inversores convertem a tensão contínua em tensão alternada, os conversores *boost* aumentam a tensão de entrada para uma saída com tensão mais alta, os conversores *buck* reduzem a tensão de entrada para uma saída com tensão mais baixa, e os conversores *buck-boost*, dependendo da condição de operação, podem fornecer uma saída com tensão mais alta ou mais baixa que a entrada. Esses dispositivos

viabilizam um controle eficaz do fluxo de energia. Todavia, um aspecto desfavorável é a sua característica não linear, no qual a relação entre a tensão aplicada e a corrente resultante não se adequam a um padrão proporcional, conforme definido pela Lei de Ohm. Essa condição impacta diretamente na qualidade da energia elétrica, uma vez que ocasionam a geração de harmônicos e distorções na forma de onda, prejudicando o desempenho eficiente dos equipamentos conectados à rede elétrica (Costa Neto, 2018).

A presença de distorções harmônicas pode resultar no superaquecimento de transformadores, motores e cabos, redução de eficiência e picos de corrente e tensão em uma instalação. Como maneira de padronizar níveis aceitáveis de harmônicos em instalações, normas internacionais como por exemplo a 6100-3-2 da Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC) e 519 do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) estabelecem diretrizes e critérios para limitar as distorções e garantir uma maior entrega de potência ativa a um sistema (Costa Neto, 2018).

Uma das abordagens para minimizar problemas de distorções harmônicas envolve o uso de filtros sintonizados em frequências dos harmônicos de ordem mais baixa. Esses filtros são projetados para atenuar seletivamente os harmônicos, melhorando assim a qualidade da energia elétrica e protegendo os equipamentos. A implementação bem-sucedida de filtros não só reduz os efeitos negativos dos harmônicos, como também melhora a confiabilidade operacional, reduzindo custos associados a falhas e manutenção (Silva, 2007).

Assim, propõe-se neste trabalho a análise e aplicação das principais técnicas de filtragem passiva para controle de distorções harmônicas para uma carga não linear desbalanceada.

1.2 MOTIVAÇÃO

Nos últimos anos, houve um significativo aumento na utilização de equipamentos na indústria que incorporam eletrônica de potência para gerenciar os processos de produção. Um exemplo notável disso são os inversores de frequência empregados nos sistemas de controle de motores elétricos, permitindo o controle mais eficiente da velocidade e do torque desses

motores. Concomitantemente a isso, surgiu a necessidade de controlar os harmônicos produzidos por esses equipamentos, uma vez que sua característica não linear tem um impacto direto na qualidade da energia elétrica da instalação. Com este fim, filtros elétricos são utilizados para mitigar ou reduzir as distorções harmônicas presentes em sistemas elétricos. Sua aplicação visa melhorar a qualidade da energia elétrica, reduzindo os impactos adversos causados pela presença de harmônicos (Nery e Hopner, 2016).

Existem diferentes tipos de filtros, cada um com sua aplicação específica. A escolha do filtro apropriado depende das características específicas do sistema, das frequências harmônicas presentes e dos requisitos da qualidade da energia. Baseando-se em estudos relacionados a esta temática, esse trabalho traz uma análise das principais técnicas para mitigar distorções harmônicas baseadas na aplicação de filtros.

1.3 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral projetar um filtro passivo para reduzir correntes harmônicas de ordens específicas em uma por meio de um sistema simulado, visando minimizar problemas associados à qualidade da energia elétrica. Dentre os objetivos específicos deste projeto, destacam-se:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre distorções harmônicas e as principais técnicas de filtragem utilizadas para melhorar a qualidade da energia;
- Realizar o cálculo e a modelagem matemática da topologia de filtros;
- Projetar um filtro passivo para o cenário de cargas não-lineares;
- Criar um modelo de simulação de filtro passivo no *PSIM* para o cenário de carga e obter resultados de simulação;
- Demonstrar a importância dos filtros elétricos em um sistema com carga não-linear.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho foi subdividido em 6 capítulos, sendo organizado da seguinte forma:

- No segundo capítulo, são apresentadas considerações sobre o estado da arte, oferecendo uma visão mais teórica sobre o tema. São discutidas definições de distorções harmônicas, as principais causas e efeitos.
- No terceiro capítulo, são abordadas as principais estratégias de filtragem para redução de distorções harmônicas.
- No quarto capítulo, destacam-se as propriedades do sistema de análise, considerando uma carga com características não lineares.
- No quinto capítulo, são apresentados os resultados e as discussões acerca do desempenho dos filtros passivos no sistema.
- No sexto capítulo, são expostas as conclusões desta monografia, além de abordar alguns temas para futuros desenvolvimentos de trabalhos.

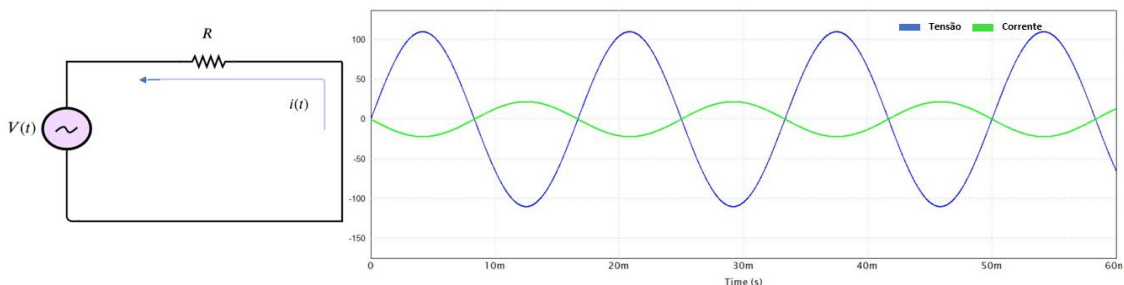
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 HARMÔNICOS

Conforme estabelecido pelo Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST), os harmônicos são fenômenos ligados a distorções nas formas de onda de tensão e corrente em comparação com a onda senoidal da frequência fundamental (ANEEL, 2020). Essas distorções, quando evidenciadas em sistemas elétricos de potência, constituem um desafio expressivo para a manutenção da qualidade da energia elétrica. No setor industrial, é comum encontrar equipamentos sensíveis e cargas não lineares (Dugan, 2024)

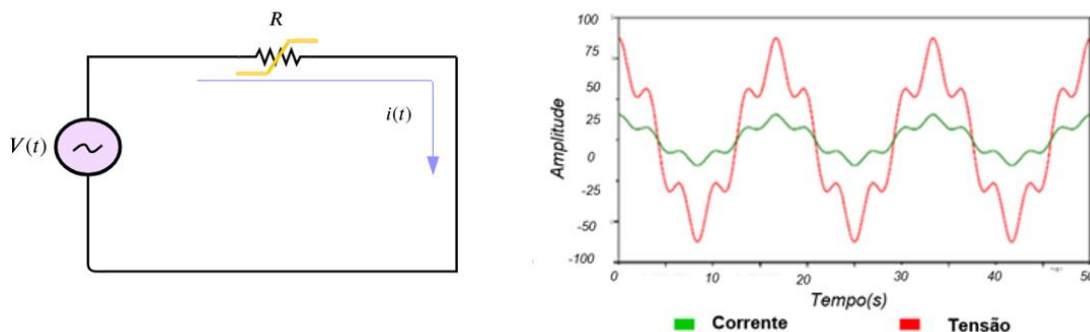
Segundo Lima (2016), as cargas lineares exibem uma corrente diretamente proporcional à tensão aplicada, sendo constituídas por resistores, indutores não saturáveis e capacitores de valores fixos. Por outro lado, as cargas não lineares apresentam a característica de distorcer a forma de onda da corrente consumida quando alimentadas com uma tensão senoidal. Essas cargas são geradas por elementos como compensadores estáticos, geradores e compensadores síncronos em menor escala, conversores de corrente contínua para corrente alternada e transformadores. Nas Figura 1 e 2 são ilustradas as características de uma carga linear e não-linear, respectivamente.

Figura 1: Características de uma carga linear.



Fonte: O autor, 2024.

Figura 2: Característica de uma carga não linear.

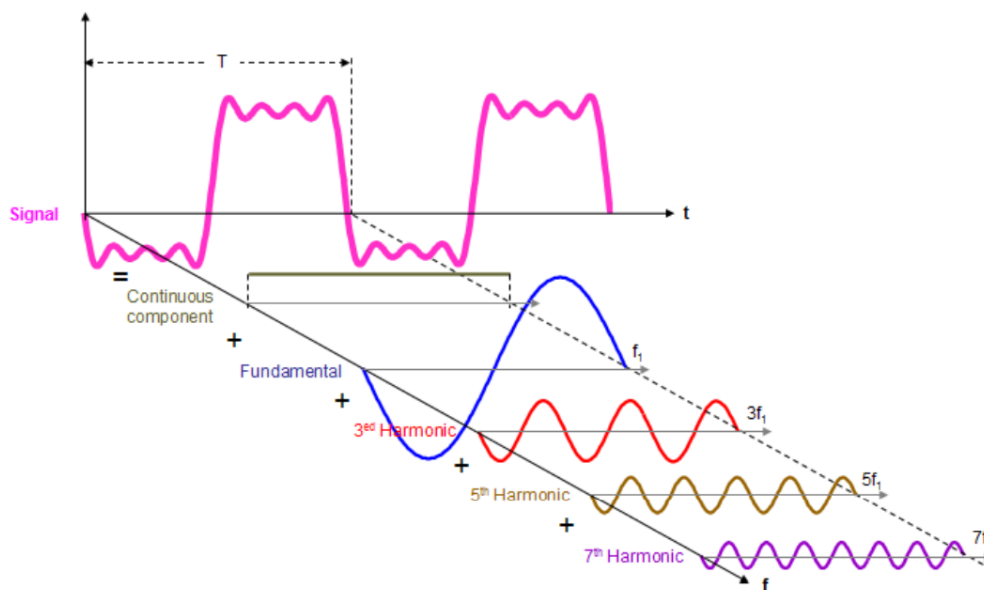


Fonte: Adaptado de Lima, 2016.

Na Figura 1 é possível observar uma relação de proporcionalidade entre as formas de ondas de tensão e corrente, ou seja, um comportamento considerado ideal. No entanto, na Figura 2, nota-se um sinal senoidal de corrente e tensão distorcido, esse sinal é composto pelo somatório dos múltiplos da frequência fundamental e afetam diretamente no rendimento do equipamento e na qualidade da energia da instalação.

Conforme Paixão Júnior (2018), uma forma de onda distorcida pode sempre ser representada como a sobreposição de uma forma de onda da frequência fundamental com outras formas de ondas de diferentes frequências e amplitudes harmônicas. Este comportamento pode ser observado na Figura 3, no qual o sinal distorcido é representado pelo somatório da frequência fundamental de 60 Hz (frequência fundamental adotada no Brasil) com as frequências múltiplas ímpares.

Figura 3: Composição harmônica de um sinal distorcido.



Fonte: Hernández, 2009.

A representação matemática do sinal ilustrado na Figura 3 é baseada no conceito das Séries de Fourier, desenvolvido por Joseph Fourier em 1822 por intermédio de sua obra "Teoria Analítica do Calor". Esse estudo sugere que uma função que se repete em um intervalo de tempo pode ser expressa como a soma de uma senoide fundamental. Nesse conjunto de termos, estão as harmônicas, representando múltiplos da frequência fundamental. Por meio da Série de Fourier, é viável estabelecer uma conexão entre as variáveis nos domínios do tempo e da frequência (Mattos, 2011). A série de Fourier pode ser representada, conforme:

$$x(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cdot \cos(n\omega t) + b_n \cdot \sin(n\omega t)], \quad (1)$$

no qual a_0 é conhecido como valor médio, a_n e b_n são coeficientes da série, n a ordem da harmônica, ω a velocidade angular em rad/s e t o tempo.

Em razão da distorção intrínseca decorrente da combinação da frequência fundamental e seus múltiplos, torna-se crucial o acompanhamento de indicadores conforme normas e padrões regulamentados. A detecção da presença de harmônicos pode ser realizada por análise individual ou total

destes componentes. Os parâmetros base para as distorções harmônicas totais e individuais devem ser analisados e monitorados para garantir o máximo de eficiência, segurança e qualidade da energia elétrica (Paixão Júnior, 2018).

De acordo com Souza (2021), o parâmetro mais convencional para avaliar as distorções harmônicas denomina-se de Distorção Harmônica Total (DHT) e representa a distorção resultante ao somatório das harmônicas existentes em um sinal. Similar à DHT, o indicador Distorção Harmônica Individual (DHI) mensura a magnitude harmônica em relação ao sinal fundamental. De acordo com o PRODIST módulo 8, a DHT e DHI para tensão e corrente podem ser definidas conforme:

$$DHI_V = \frac{V_n}{V_1} \times 100, \quad (2)$$

$$DHI_I = \frac{I_n}{I_1} \times 100, \quad (3)$$

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \times 100, \quad (4)$$

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100, \quad (5)$$

em que, n é a ordem harmônica, V_n é a tensão harmônica de ordem n , V_1 a tensão da componente fundamental, I_n corrente harmônica de ordem n e I_1 a corrente da componente fundamental.

Examinando as equações mencionadas para distorção harmônica individual e total, é possível inferir que, na inexistência de componentes harmônicos, o índice de distorção harmônica será zero, um comportamento considerado ideal para sistemas elétricos. A ANEEL (2020) estabeleceu limites de distorções harmônicas totais baseando-se na tensão nominal da instalação. Pode-se visualizar esses níveis limites percentuais na Tabela 1.

Tabela 1: Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} \leq V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} \leq V_n \leq 230\text{kV}$
$DHT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DHT_p_{95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DHT_i_{95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DHT_{95\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: ANEEL, 2020.

De acordo com a ANEEL (2020):

DHT_p = Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3.

DHT_i = Distorção harmônica total da tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3.

DHT_3 = Distorção harmônica total da tensão para as componentes múltiplas de 3.

Os 95% mencionados na Tabela 1 representam um índice utilizado para indicar que o valor do indicador correspondente foi ultrapassado em apenas 5% das 1008 leituras válidas. Para assegurar o controle e a estabilidade de uma instalação industrial, por exemplo, é essencial que a área técnica responsável supervisione e verifique se os valores de distorções totais estão abaixo dos limites estabelecidos pelo módulo 8 do PRODIST. Isso é crucial para garantir a confiabilidade operacional dos equipamentos e a eficiência máxima do recurso energético.

O IEEE (2014) definiu limites para distorções harmônicas nas correntes, considerando a divisão da corrente de curto-circuito máxima (I_{SC}) pela máxima corrente demandada da componente fundamental (I_L), relacionando, também, a ordem do harmônico. A Tabela 2 sumariza os limites estabelecidos para distorções harmônicas de corrente em sistemas com tensão de alimentação variando de 120 a 69.000 V.

Tabela 2: Limite de distorção de corrente para sistemas alimentados em 120V a 69kV.

I_{SC}/I_L	$3 \leq n \leq 11$	$11 \leq n \leq 17$	$17 \leq n \leq 23$	$23 \leq n \leq 25$	$35 \leq n \leq 50$	DHT
$< 20^c$	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

c impõe a quaisquer equipamentos a limitação ao índice de distorção de corrente, independente da sua capacidade de curto-circuito

A determinação da relação entre a corrente de curto-circuito com a corrente fundamental, pode ser expressa por:

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = \frac{V_{ef}/Z_s}{I_L}, \quad (6)$$

em que V_{ef} e I_L representam as tensões e correntes eficazes da componente fundamental no ponto de acoplamento comum (PAC) e Z_s é a impedância da rede.

2.2 CAUSAS E EFEITOS

As distorções harmônicas são predominantemente causadas por cargas não-lineares presentes em sistemas elétricos. Instalações que empregam retificadores, inversores, conversores e equipamentos eletrônicos, introduzem correntes harmônicas que, ao se combinarem, distorcem as formas de ondas de corrente e tensão. Em sistemas com carga monofásicas, a não-linearidade é identificada quando há acoplamento de fontes chaveadas, lâmpadas fluorescentes e pequenas fontes de alimentação ininterrupta (*Nobreaks*). Já em sistemas trifásicos, a não linearidade pode ser observada em dispositivos destinados à variação de velocidade e em grandes fontes de potência ininterrupta (Santos, 2007).

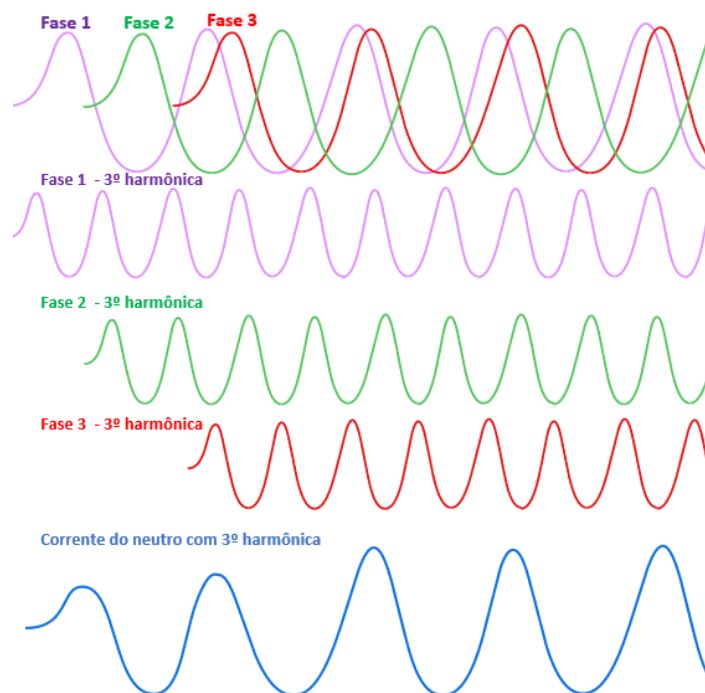
A existência de harmônicos pode gerar problemas no funcionamento otimizado de um sistema, afetando todos os equipamentos a ele conectados. A presença de um alto valor de distorção harmônica resulta em perdas significativas em vários dispositivos, comprometendo diretamente sua eficiência e desempenho. Em uma indústria com diversas linhas de produção, esse cenário pode se traduzir em um aumento nas paradas operacionais, demandando intervenções de manutenção corretiva nos sistemas para identificação dos defeitos e suas causas (Nascimento, 2007).

A seguir, serão pontuados alguns exemplos das consequências provocadas pela distorção harmônica.

2.2.1 Condutor neutro

Em um sistema trifásico equilibrado em configuração estrela (ideal), as tensões entre as fases e o neutro estão defasadas em 120° , e a corrente que flui pelo condutor neutro é nula. No entanto, se ocorrer desequilíbrio entre as correntes de fase, haverá uma corrente no condutor neutro devido à soma vetorial das correntes de fase. O neutro, como ponto de referência comum, transportará essa corrente para compensar o desequilíbrio e manter a lei de *Kirchhoff* das correntes. Ao considerar o comportamento harmônico do sinal de ordem múltipla de três nesse somatório, por exemplo, obtém-se uma corrente do neutro três vezes maior que a de fase. Como resultado, o condutor sofre aquecimento e desgaste, exigindo um dimensionamento com diâmetro maior que o usual. A Figura 4 ilustra a soma da corrente do neutro com a terceira harmônica.

Figura 4: Correntes harmônicas de 3º ordem somadas ao neutro.



Fonte: Adaptado de Santos, 2007.

2.2.2 Dispositivos de proteção

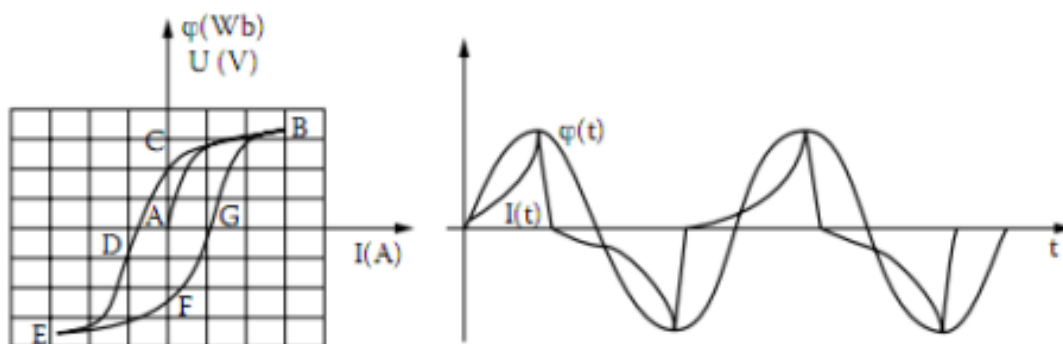
Os dispositivos de proteção desempenham o papel de detectar e indicar a presença de anomalias que possam comprometer a estabilidade operacional de um sistema elétrico. Projetados para identificar situações como sobrecorrente, curto-circuito, falhas à terra, entre outras, esses dispositivos tomam medidas para interromper ou isolar a parte afetada do sistema, contribuindo para a preservação da integridade do sistema elétrico (Anderson, 1999).

Na presença de distorções harmônicas, os sinais de entrada de certos dispositivos de proteção, como disjuntores, podem ser afetados. Isso pode resultar em falsos disparos devido à sobreposição dos harmônicos com a corrente fundamental. Esses disparos indevidos interrompem desnecessariamente o fornecimento de energia, prejudicando a operação do sistema e comprometendo sua segurança (Nery; Hopner, 2016).

2.2.3 Transformadores

Transformadores são dispositivos estáticos que, em regime permanente e sob condições normais de operação, não causam distorções significativas na rede elétrica. Contudo, quando esses equipamentos entram em condições de saturação, há um aumento considerável na contribuição harmônica (Lima, 2016). Em um transformador operando na região de saturação, a corrente de magnetização não linear é evidenciada, como ilustrado na Figura 5, destacando o comportamento distorcido do sinal da corrente.

Figura 5: Corrente distorcida de um transformador em condição de saturação.



Fonte: Rosa, 2006.

A presença de harmônicos em transformadores resulta em um acréscimo de aquecimento nos enrolamentos, envelhecimento prematuro dos materiais isolantes e geração de ruídos audíveis. Uma outra problemática associada à presença de harmônicos em transformadores é a indução de ressonância no sistema. Essa condição provoca picos de tensão e corrente (Nascimento, 2007).

2.2.4 Motores elétricos

Os motores elétricos desempenham a função fundamental de converter a energia elétrica em energia mecânica. Durante esse processo, eles podem operar em condições não-lineares, especialmente quando sujeitos a variações de carga ou quando acionados por dispositivos eletrônicos de controle de velocidade (Júnior, 2021).

Dentre os principais impactos gerados pelos harmônicos de tensão e corrente, incluem-se o aquecimento decorrente das perdas ôhmicas no estator,

o aumento das correntes parasitas no ferro resultando em perdas no núcleo do motor, vibrações que contribuem para o desgaste prematuro dos rolamentos, redução na eficiência operacional, instabilidade, baixo fator de potência, e outros problemas associados (Souza, 2021).

2.2.5 Capacitores

Os capacitores são comumente empregados na filtragem do conteúdo harmônico em sistemas elétricos. À medida que a frequência do sistema aumenta, a impedância do capacitor diminui, possibilitando que ele absorva uma parte da corrente harmônica. Essas correntes podem surgir em situações em que o capacitor é utilizado para filtrar harmônicos, o que pode levar à condução de correntes harmônicas não previstas originalmente no projeto do sistema. Essa passagem de corrente não planejada pode resultar em problemas como superaquecimento e redução da vida útil do capacitor, acarretando perdas significativas para o sistema. (Texeira, 2009).

2.2.6 Ressonância

A ressonância é um fenômeno em que a amplitude de uma oscilação é amplificada significativamente quando uma força externa é aplicada em sua frequência natural ou próxima a ela. Nos sistemas elétricos, a ressonância pode ocorrer quando a reatância indutiva tem o mesmo valor que a reatância capacitiva. Esse fenômeno pode-se apresentar tanto em configurações em série quanto em paralelo. Na ressonância em série, o sistema reflete uma corrente alta e uma tensão mínima para uma impedância baixa, o que pode causar sobrecargas e danos aos componentes. Já na ressonância em paralelo, tanto a corrente quanto a tensão são elevadas na frequência de ressonância, resultando em sobretensões no sistema (Neves Neto, 2023).

3 TÉCNICAS DE FILTRAGEM PARA MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS

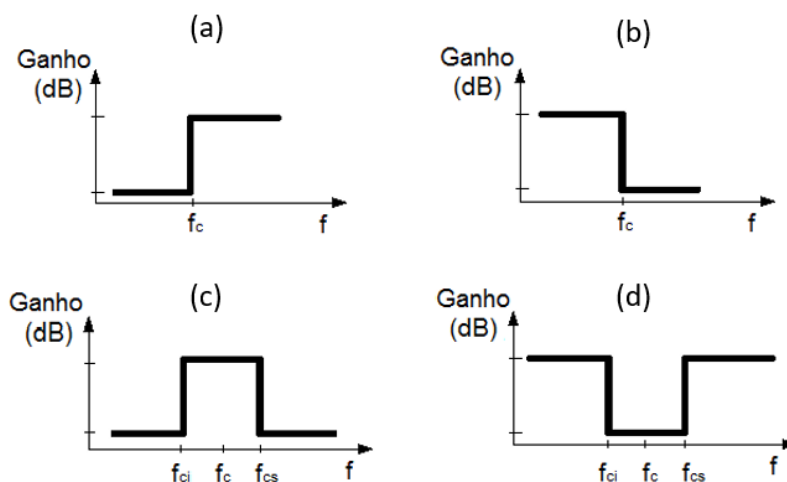
Uma abordagem frequente para mitigar o conteúdo harmônico no sistema elétrico é o emprego de filtros elétricos. Mediante uma análise da corrente e tensão da instalação, torna-se factível o projeto de um filtro sintonizado para uma frequência específica (Souza, 2021).

3.1 DEFINIÇÃO DE FILTROS ELÉTRICOS

Os filtros elétricos são dispositivos projetados para selecionar, separar ou eliminar harmônicos específicos de um sistema elétrico, com o objetivo de melhorar a qualidade da energia. Empregados em uma variedade de contextos, como sistemas industriais, instalações comerciais e residenciais, esses filtros garantem que apenas as frequências indesejadas, como os harmônicos, sejam filtradas, enquanto a corrente elétrica fundamental permanece sem distorções. Os filtros podem ser categorizados em três tipos principais, de acordo com a potência. Filtros de baixa potência são destinados a dispositivos de consumo reduzido ou portáteis. Projetados para eliminar ruídos de alta frequência ou filtrar frequências específicas em sinais de baixa potência, esses filtros são fundamentais para garantir a integridade do sinal em aplicações sensíveis. Filtros de média potência encontram aplicação em sistemas eletrônicos de médio porte, como amplificadores de áudio, fontes de alimentação industriais ou equipamentos de comunicação. Construídos com componentes mais robustos, como indutores de maior potência e capacitores de alta capacitância, esses filtros proporcionam uma filtragem eficaz em sistemas de potência intermediária. Filtros de alta potência são empregados em situações que demandam altas correntes e tensões, como sistemas de distribuição de energia elétrica. Projetados com componentes robustos, como indutores de núcleo ferromagnético, capacitores de alta tensão e resistores de potência, esses filtros oferecem uma filtragem eficiente em sistemas de grande escala. Esses filtros desempenham um papel crucial na garantia da qualidade e estabilidade dos sistemas elétricos, ao mesmo tempo em que protegem os equipamentos contra distorções e danos provocados por harmônicos e outras irregularidades na rede elétrica. (Cunha, 2023).

Antes de discutir as principais técnicas de filtragem, é essencial pontuar as características fundamentais de seletividade dos filtros. Quanto à resposta em frequência, esses filtros são classificados como passa-alta, passa-baixa, passa-faixa e rejeita-faixa, conforme ilustrado na Figura 6 (Oliveira, 2015).

Figura 6: Resposta ideal do filtro (a) passa-alta; (b) passa-baixa; (c) passa-faixa; (d) rejeita-faixa.



Fonte: Oliveira, 2015.

Os filtros passa-alta, cuja característica ideal de resposta em frequência está ilustrada na Figura 6 (a), têm por objetivo rejeitar sinais com frequência abaixo da frequência de corte f_c . Por sua vez, os filtros passa-baixa, com resposta em frequência ideal representada na Figura 6 (b), possibilitam a passagem de sinais até a frequência de corte e atenuam as frequências superiores. Quanto aos filtros passa-faixa com resposta em frequência ideal apresentada na Figura 6 (c), permitem a passagem de sinais entre a frequência de corte inferior f_{ci} e frequência de corte superior f_{cs} . Já os filtros rejeita-faixa possibilitam a passagem de sinais fora da faixa delimitada pelas frequências inferior e superior com resposta em frequência ideal ilustrada na Figura 6 (d) (Oliveira, 2015).

Quanto à sua configuração, destacam-se dois tipos de filtros: o filtro de ligação em derivação e o filtro em ligação série. O filtro em série previne a chegada de frequências indesejadas a um equipamento específico, porém, devido à passagem de toda a corrente do circuito em que está inserido, demanda componentes robustos, resultando em custos mais elevados. Em

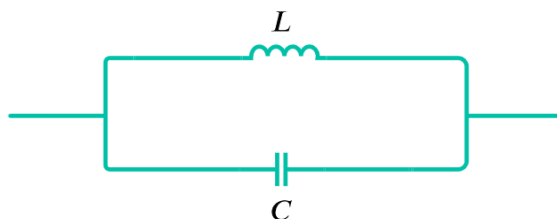
contrapartida, o filtro *em derivação* desvia as correntes harmônicas do sistema para o aterramento, sendo uma opção mais econômica (Cunha, 2023).

3.2 FILTROS PASSIVOS

Os filtros passivos são compostos por elementos passivos como resistores, indutores e capacitores. Projetados com uma frequência de corte específica, esses filtros operam até uma faixa de frequência determinada. Em geral, são configurados para eliminar uma ordem específica de harmônicas desejada. A implementação de um filtro passivo requer uma análise detalhada do sistema, assegurando sua eficácia ao longo do tempo sem sofrer modificações indesejadas. Além disso, esses dispositivos são de construção simples e apresentam baixo custo (Júnior, 2021).

A disposição dos filtros pode variar conforme o nível de distorção harmônica a ser reduzido. Entre as opções disponíveis, destacam-se as configurações em série, que têm a característica de topologia rejeita-faixa, ou em derivação, que apresentam a topologia passa-faixa. As Figuras 7 e 8 apresentam as duas configurações possíveis.

Figura 7: Filtro passivo em série.



Fonte: O autor, 2024.

Figura 8: Filtro passivo em derivação.



Fonte: O autor, 2024.

Os filtros passivos em série são utilizados para bloquear a passagem de frequências indesejadas na rede elétrica, sendo inseridos entre a fonte e a carga. Sua configuração implica na formação de um circuito paralelo composto por um capacitor e um indutor. Essa abordagem é considerada dispendiosa devido ao custo associado aos componentes de alta potência e à forma como é integrada ao sistema. Por outro lado, o filtro em paralelo, desvia as correntes harmônicas para o sistema de aterramento, possui sua topologia alinhada em paralelo à carga, resultando em uma melhoria na qualidade da energia elétrica com um investimento mais acessível quando contrastado com o filtro passivo em série (Lima, 2016).

Na atualidade, a configuração mais adotada é a disposição em derivação, podendo ser sintonizada ou amortecida. Os filtros paralelos sintonizados são ajustados para a frequência em que as reatâncias indutivas e capacitivas se equiparam, apresentando uma estrutura simples composta por um resistor (R), um capacitor (C) e um indutor (L) em série. Essa metodologia é aplicada em frequências harmônicas que exibem consideráveis amplitudes. Uma característica marcante é sua capacidade de contribuir para a correção do fator de potência, uma vez que, para frequências inferiores à frequência de corte, a impedância do filtro adota um comportamento capacitivo (Oliveira, 2015), conforme representado na Figura 9.

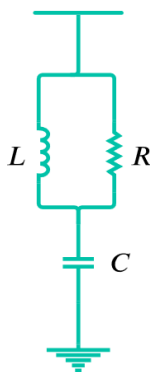
Figura 9: Filtro passivo em derivação sintonizado.



Fonte: O Autor, 2024.

Um filtro passivo em derivação amortecido é um tipo de filtro elétrico que utiliza componentes passivos para atenuar determinadas frequências em um sinal elétrico. O termo amortecido refere-se à capacidade do filtro de reduzir a amplitude das frequências selecionadas de forma gradual, em vez de rejeitá-las abruptamente. Isso é alcançado pela combinação adequada dos componentes do filtro para criar uma resposta de frequência que suavemente atenua as frequências indesejadas, sem introduzir picos ou ressonâncias indesejadas. Os filtros passivos amortecidos são amplamente utilizados em várias aplicações, como processamento de sinais, telecomunicações e eletrônica de potência. Sua estrutura compreende um capacitor em série com um circuito em derivação, que inclui um resistor e um indutor (Morais, 2011), conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Filtro passivo amortecido.



Fonte: O autor, 2024.

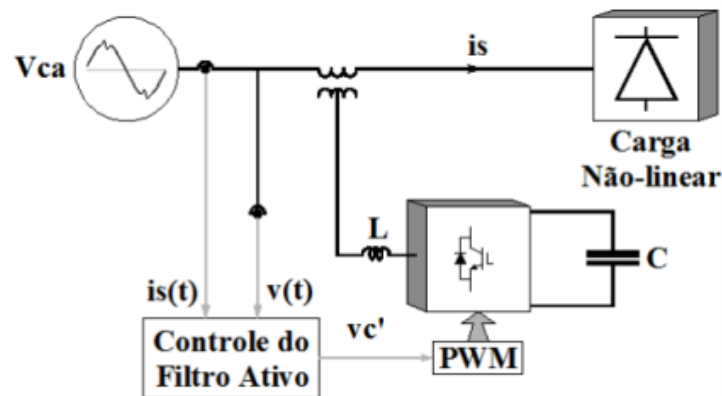
A interação entre os componentes representados na Figura 10 resulta em uma impedância seletiva em relação à frequência, permitindo uma atenuação eficaz de harmônicas específicas. O filtro passivo amortecido geralmente apresenta uma função de transferência que decai gradualmente com o aumento da frequência, resultando em uma atenuação progressiva e suave das frequências indesejadas, sem picos evidentes em torno da frequência de ressonância. Em contraste, o filtro passivo sintonizado exibe uma função de transferência com um pico na frequência de ressonância, o que significa uma atenuação mais significativa nessa frequência específica. Fora da frequência de ressonância, a atenuação é menos acentuada em comparação com o filtro passivo amortecido (Morais, 2011).

3.3 FILTROS ATIVOS

Os filtros ativos eletrônicos de médio e alto sinais são dispositivos eletrônicos projetados para mitigar as correntes harmônicas em sistemas elétricos. Por meio da eletrônica de potência, esses filtros têm a capacidade de gerar sinais que cancelam ativamente as harmônicas presentes na carga. Distinguem-se por oferecer um controle dinâmico que se adapta às mudanças nas condições de carga, proporcionando uma correção eficiente ao cancelar os sinais harmônicos. Além disso, esses filtros ativos operam em uma ampla faixa de frequências, tornando-os adequados para ambientes em que as condições harmônicas podem variar significativamente (Souza, 2021).

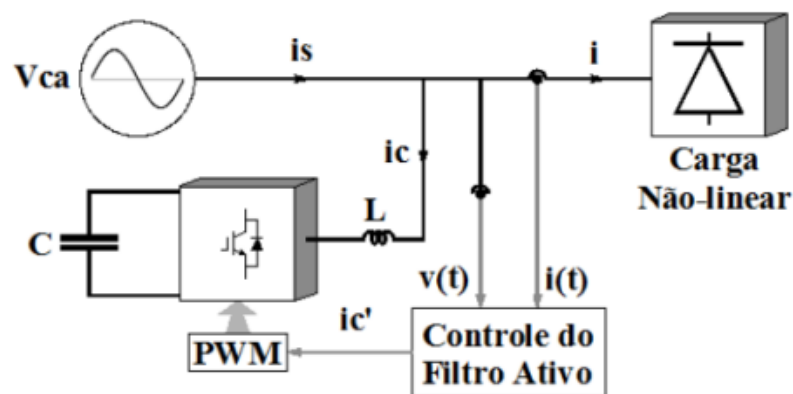
A configuração dos filtros ativos pode ser em série ou em paralelo no sistema. No caso de um filtro em série, seu funcionamento é similar a uma fonte de tensão controlada, ela irá remover as harmônicas de tensão da carga. Por outro lado, os filtros em paralelo assemelham-se a uma fonte de corrente controlada, eliminando as harmônicas de corrente para a carga e proporcionando uma corrente de alimentação completamente senoidal. As Figuras 11 e 12 representam as topologias mencionadas (Oliveira, 2015).

Figura 11: Topologia do filtro ativo em série.



Fonte: Moraes, 2011.

Figura 12: Topologia do filtro em paralelo.



Fonte: Moraes, 2011.

Na Figura 11, nota-se que o sinal proveniente da fonte exibe distorção. No entanto, a disposição estratégica do filtro entre a fonte e a carga garante que o sinal de tensão que alcança a carga não seja distorcido, uma vez que o filtro trabalha na eliminação das tensões harmônicas. Já na Figura 12 observa-se um sinal de tensão com formato senoidal ideal. O filtro ativo em paralelo atua como um curto-circuito para os componentes harmônicos de corrente gerados pela carga, eliminando efetivamente essas distorções no fluxo entre a fonte e a carga (Moraes, 2011).

Os filtros ativos em série têm como limitação não eliminar a corrente distorcida da carga para a fonte, enquanto os filtros ativos em paralelo não conseguem eliminar harmônicos de tensão na rede que alimenta a carga. Para contornar essas limitações e ter controle sobre ambas as distorções, é adotado

o filtro ativo híbrido, que combina as características dos filtros ativos em série e em paralelo. Dessa forma, a melhoria na qualidade da energia ocorre tanto para a carga, em relação à tensão fornecida, quanto para a fonte, em relação à corrente que flui por ela. (Morais, 2011).

3.4 FILTROS HÍBRIDOS

O filtro híbrido é composto pela combinação de filtros ativos e passivos, conectados à mesma carga. Essa configuração é considerada uma solução abrangente, buscando unir as vantagens das duas tecnologias. Ao aproveitar o controle dinâmico e adaptável dos filtros ativos, juntamente com a eficácia na eliminação de harmônicas específicas proporcionada pelos filtros passivos, essa abordagem visa otimizar a eficiência do sistema de filtragem. Por exemplo, em aplicações de áudio, um filtro híbrido pode ser usado para atenuar certas frequências indesejadas enquanto amplifica outras, permitindo um controle preciso sobre o espectro de frequência do sinal de áudio. Da mesma forma, em sistemas de comunicação, os filtros híbridos podem ser empregados para filtrar ruídos e interferências, garantindo uma transmissão de sinal mais clara e confiável. Assim, oferece uma solução mais flexível e eficaz na gestão de distorções harmônicas (Júnior, 2021).

4 MODELAGEM DO SISTEMA

Em ambientes industriais, a integração de retificadores é indispensável para a transformação de corrente alternada em corrente contínua, garantindo um fornecimento estável e apropriado da energia elétrica para diversos equipamentos e processos. Essa conversão desempenha um papel fundamental a respeito da eficiência, controle e operação confiável de dispositivos que requerem corrente contínua, contribuindo, assim, para a eficácia das operações industriais. Além disso, é importante ressaltar que os retificadores exercem um papel significativo na geração de harmônicos. Durante o processo de conversão, os retificadores podem introduzir distorções harmônicas na rede elétrica devido à sua natureza não-linear, destacando a importância de estratégias adequadas para mitigar esses efeitos indesejados (Morais, 2011).

Neste capítulo, será realizado um estudo de caso que envolve uma carga fictícia composta por um resistor e um indutor, conectada a um retificador trifásico. Além disso, uma análise da condição atual do modelo, seguida de uma discussão sobre a necessidade de implementar filtros para mitigar os efeitos prejudiciais dos harmônicos presentes no sistema. A Figura 13 representa o circuito que será analisado.

Figura 13: Sistema de estudo.



Fonte: O autor, 2024.

A Tabela 3 contém detalhes sobre as características da tensão de alimentação do sistema. A fonte está desequilibrada e com uma defasagem de 120 graus entre as fases.

Tabela 3: Tensões trifásicas de fase.

V_A	V_B	V_C
227,14 V	229,48 V	229,35 V

Fonte: O autor, 2024.

Na Tabela 4 são apresentadas as resistências e indutâncias da linha e carga.

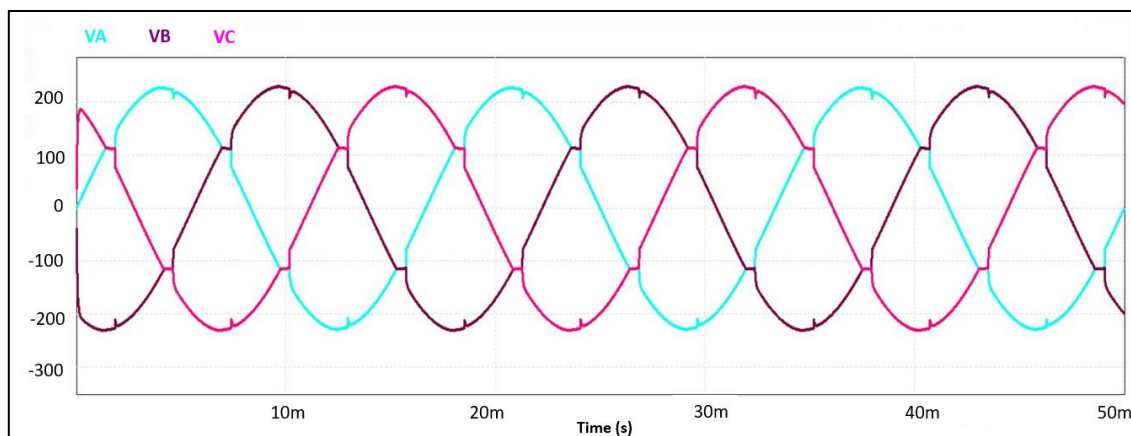
Tabela 4: Resistências e indutâncias do sistema.

R_S	L_S	R_C	L_C
56m Ω	92m H	4k Ω	250 μ H

Fonte: O autor, 2024.

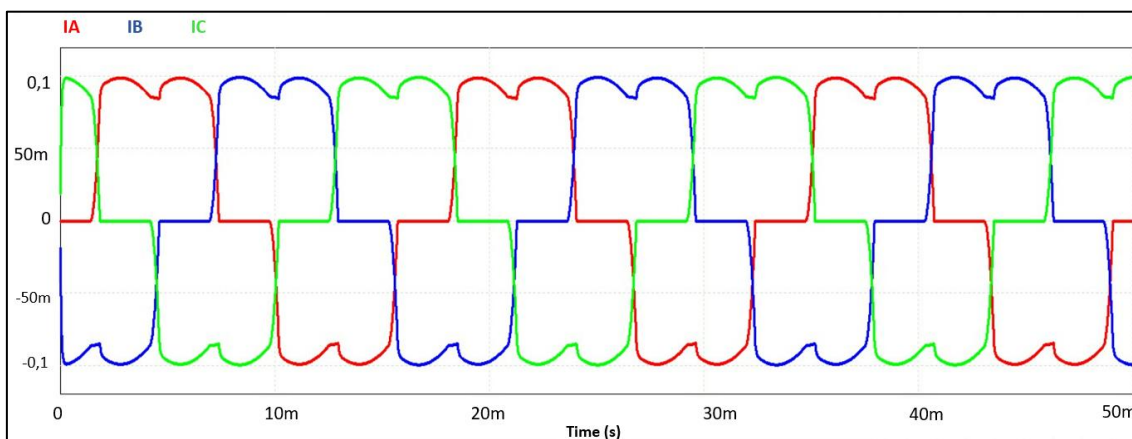
Ao utilizar o *software PSIM* para representar o circuito da Figura 13, é possível gerar as curvas de tensão e corrente observadas a partir do Ponto de Conexão Comum (PCC), essas curvas estão representadas pela Figura 14 e Figura 15.

Figura 14: Tensão em PCC.



Fonte: O autor, 2024.

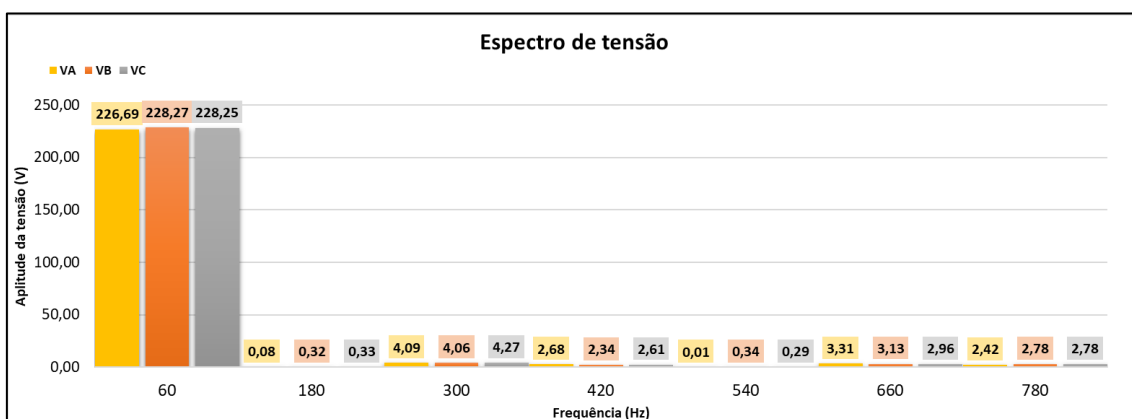
Figura 15: Corrente em PCC.



Fonte: O autor, 2024.

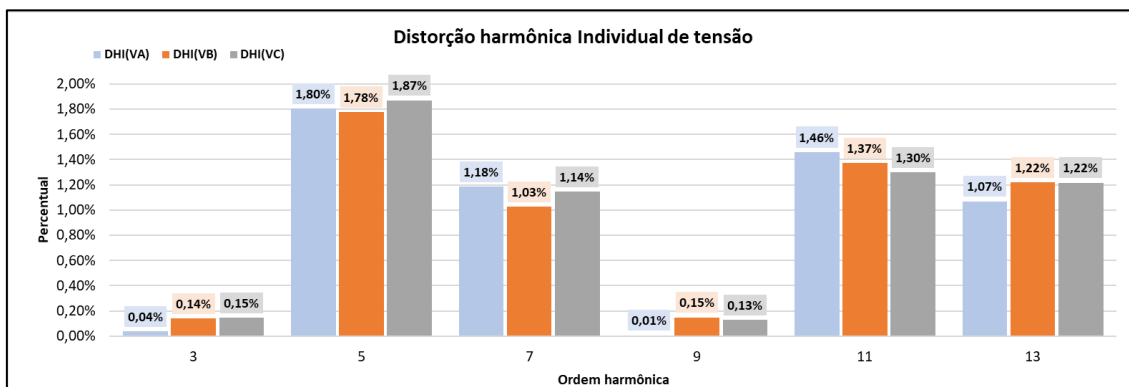
Ao examinar as Figura 14 e Figura 15, torna-se evidente a presença de distorções nos sinais de tensão e corrente. Essas distorções são devido à natureza não linear do retificador trifásico conectado à carga do sistema. Diante disso, torna-se essencial analisar os índices de distorções harmônicas e avaliar a necessidade de empregar técnicas específicas para mitigar esses problemas associados a distorções harmônicas, visando melhorar a qualidade da energia. A Figura 16 apresenta a amplitude dos harmônicos de tensão e a Figura 17 a distorção individual de tensão.

Figura 16: Espectro de tensão.



Fonte: O autor, 2024.

Figura 17: Distorção harmônica individual de tensão.



Fonte: O autor, 2024.

A DHT_V deste sistema está listada na Tabela 5.

Tabela 5: Distorção harmônica total de tensão

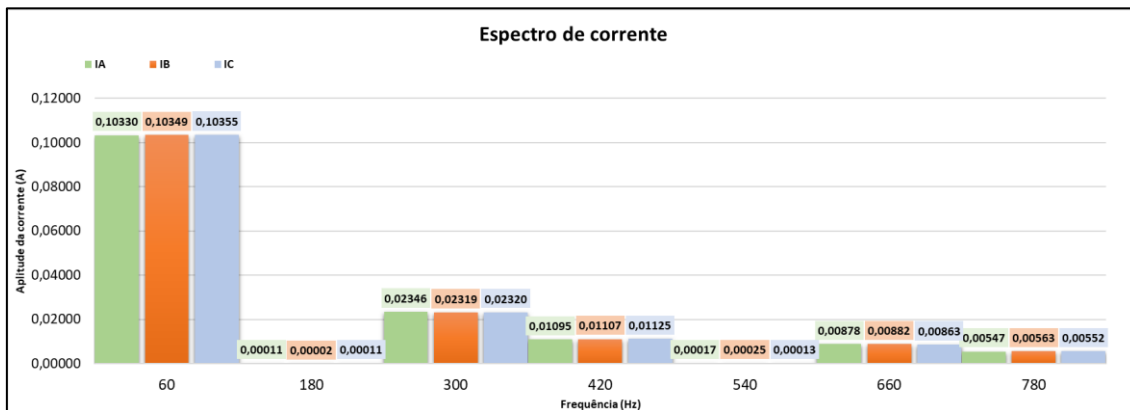
DHT_{VA}	DHT_{VB}	DHT_{VC}
2,82%	2,76%	2,83%

Fonte: O autor, 2024.

Ao examinar os dados da Tabela 5 e compará-los com os limites de Distorção Harmônica Total de tensão fornecidos na Tabela 1, observa-se que, para uma tensão nominal inferior a 1000 V, o valor de DHT_V deve ser até 10%. Dado que os valores obtidos na Tabela 4 estão abaixo de 10%, não será necessário recorrer a técnicas de mitigação de distorção harmônica de tensão.

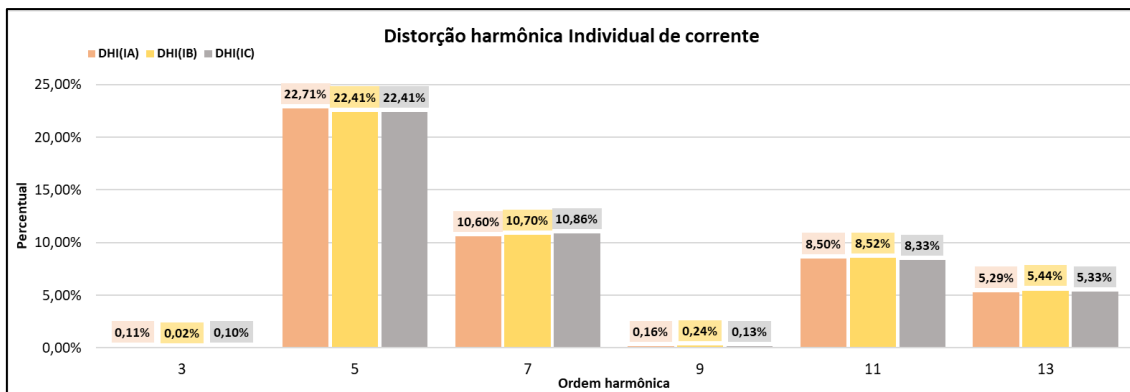
Outro aspecto que requer análise é a distorção harmônica de corrente, para proporcionar uma compreensão de como o sinal de corrente foi alterado devido à presença de uma carga com características não lineares. As Figura 18 e Figura 19 apresentam respectivamente o espectro de corrente e distorção harmônica individual de corrente.

Figura 18: Espectro de corrente.



Fonte: O autor, 2024.

Figura 19: Distorção harmônica individual de corrente.



Fonte: O autor, 2024.

A DHT_I deste sistema está listada na Tabela 6.

Tabela 6: Distorção harmônica total de corrente

DHT_{Ia}	DHT_{Ib}	DHT_{Ic}
26,99%	26,81%	26,79%

Fonte: O autor, 2024.

Antes de realizar a comparação entre os valores obtidos na Tabela 6 com a Tabela 2, é necessário determinar a relação I_{SC}/I_L , em que é preciso determinar os valores de Z_s , V_{ef} e I_L utilizando as expressões a seguir:

$$Z_s = R_s + jX_s = 56 \times 10^{-3} + j \times (2 \times \pi \times 60 \times 92 \times 10^{-3}), \quad (7)$$

$$Z_s = 34,68 \angle 89,90. \quad (8)$$

$$V_{efA} = \frac{V_{pA \text{ fundamental}}}{\sqrt{2}} = \frac{226,69}{\sqrt{2}} = 160,294 \text{ V}, \quad (9)$$

$$V_{efB} = \frac{V_{pB \text{ fundamental}}}{\sqrt{2}} = \frac{228,27}{\sqrt{2}} = 161,411 \text{ V}, \quad (10)$$

$$V_{efC} = \frac{V_{pC \text{ fundamental}}}{\sqrt{2}} = \frac{228,25}{\sqrt{2}} = 161,397 \text{ V}, \quad (11)$$

$$I_{LA} = \frac{I_{pA \text{ fundamental}}}{\sqrt{2}} = \frac{0,10330}{\sqrt{2}} = 0,0730 \text{ A}, \quad (12)$$

$$I_{LB} = \frac{I_{pB \text{ fundamental}}}{\sqrt{2}} = \frac{0,10349}{\sqrt{2}} = 0,0731 \text{ A}, \quad (13)$$

$$I_{LC} = \frac{I_{pC \text{ fundamental}}}{\sqrt{2}} = \frac{0,10349}{\sqrt{2}} = 0,0732 \text{ A}, \quad (14)$$

Com os parâmetros calculados, torna-se possível determinar a relação entre I_{SC}/I_L para cada fase do sistema, a Tabela 7 apresenta esses resultados.

Tabela 7: Relação I_{SC}/I_L

I_{SCA}/I_{LA}	I_{SCB}/I_{LB}	I_{SCC}/I_{LC}
63,316	63,670	63,577

Fonte: O autor, 2024.

Ao comparar os valores obtidos na Tabela 7 de I_{SC}/I_L , que estão situadas na faixa de 50 a 100 da Tabela 2, observa-se que o percentual máximo permitido para a distorção harmônica de corrente total seria de 12%. Nota-se, entretanto, que os valores calculados de distorção na Tabela 6 ultrapassaram esse limite. Analisando a Figura 19, a quinta, sétima e décima terceira ordem apresentam percentuais de distorção individual bastante elevados. Portanto, torna-se crucial a implementação de técnicas de filtragem para reduzir e aprimorar a qualidade da energia no sistema.

5 SIMULAÇÕES, RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para mitigar as distorções harmônicas de corrente optou-se por empregar um filtro em derivação sintonizado também conhecido como passivo RLC série *shunt*. Essa escolha fundamenta-se na capacidade desse tipo de filtro em atenuar correntes harmônicas específicas, especialmente quando o objetivo é eliminar harmônicos de ordem inferior a décima sétima harmônica. Além disso, sua aplicação requer um investimento inicial relativamente baixo em comparação com outras abordagens para a redução do conteúdo harmônico em um sistema elétrico.

A fase inicial do processo de projeto envolve a definição dos valores de resistência, indutância e capacitância para o filtro ressonante. O ponto de partida será a minimização da quinta harmônica, a qual deve ser reduzida para menos de 10%, para um I_{SC}/I_L entre 50 e 100. De acordo com Morais (2011) é possível modelar (6) em função da constante de distorção K para obter a uma função simplificada para determinação do valor da resistência, através da expressão a seguir:

$$R = \frac{KI_1}{I_{pn}^2 - K^2I_1^2} \times R_s KI_1 \pm \sqrt{(R_s I)^2 + (n\omega L_s)^2 \times (I_{pn}^2 - K^2I_1^2)}, \quad (15)$$

em que I_1 é a corrente da componente fundamental, I_{ph} a corrente eficaz da componente harmônica, R_s é a resistência de linha, L_s a indutância de linha, ω a frequência angular fundamental e K a constante de distorção que pode ser calculada utilizando a razão entre a corrente harmônica específica sobre a corrente fundamental. Como deseja-se encontrar um valor para a resistência do filtro pode-se utilizar o valor máximo permitido para a distorção harmônica conforme dados da Tabela 6 (Morais, 2011).

A indutância é determinada pela expressão a seguir:

$$L = \frac{RQ}{n\omega}, \quad (16)$$

em que Q é o fator de qualidade, que determina a faixa de sintonia, os valores usuais para filtros sintonizados com frequências baixas, até a décima terceira ordem, variam entre 20 e 60 (Texeira, 2009). Ao realizar as simulações foi identificado que adotar $Q = 50$ proporcionava-se um resultado mais satisfatório.

Já a capacitância é determinada pela equação a seguir:

$$C = \frac{1}{n\omega RQ} \quad (17)$$

Por meio de (15), (16) e (17), é viável determinar os valores de resistência, indutância e capacitância para o projeto do filtro passivo em paralelo. Os resultados desses cálculos são apresentados na Tabela 8.

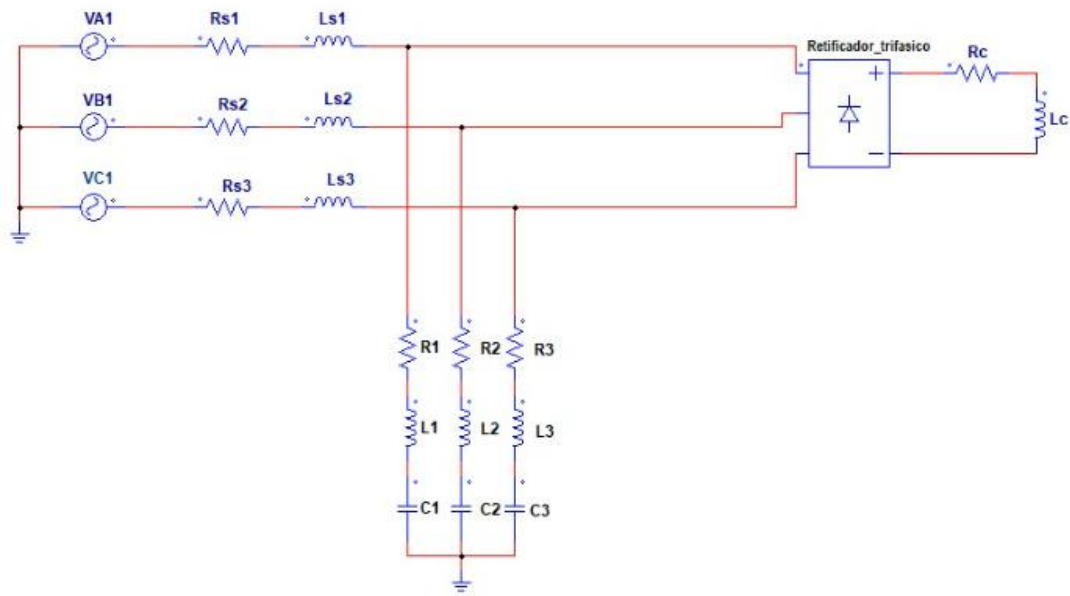
Tabela 8: Parâmetros para projeto do filtro passivo RLC série *shunt*

Linha	R	L	C
Linha 1	173,363 Ω	4,600 H	61,123 ηF
Linha 2	173,365 Ω	4,600 H	61,123 ηF
Linha 3	173,365 Ω	4,600 H	61,123 ηF

Fonte: O autor, 2024.

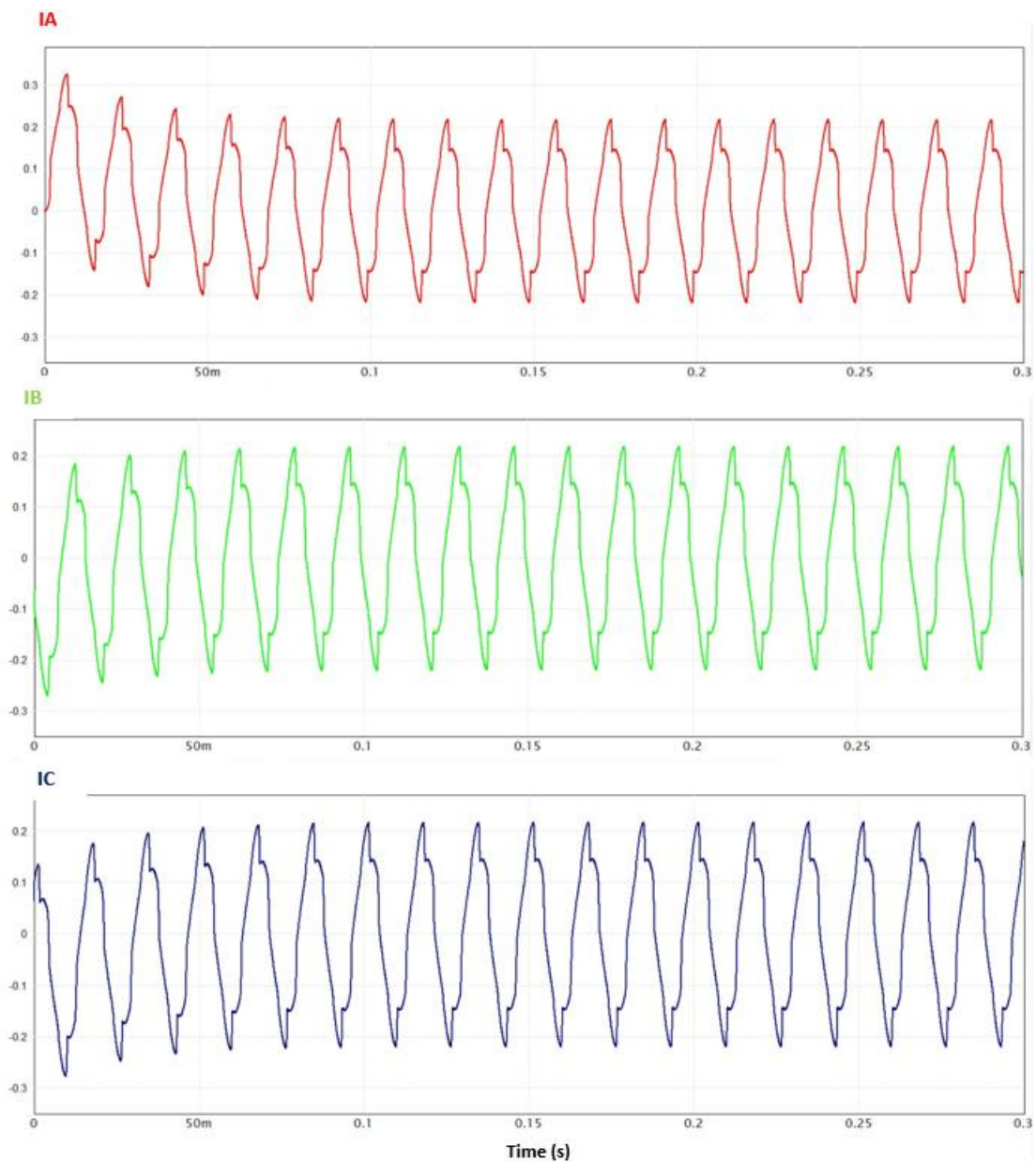
Em uma aplicação prática podem ser utilizados os valores comerciais de 180 Ω para o resistor e 68 ηF para o capacitor. No entanto, para o indutor, será necessário solicitar um projeto específico para obter a indutância de 4,6 H. Com base nos dados fornecidos na Tabela 8, realizou-se uma simulação por meio do *software PSIM* considerando o sistema da Figura 13 com a inclusão do filtro passivo RLC série *shunt*. A Figura 20 ilustra o circuito com a inserção filtro instalado para a quinta harmônica. Por sua vez, na Figura 21 é exibida a forma de onda da corrente, com um medidor de corrente colocado em série com a fonte e o filtro.

Figura 20: Sistema de estudo com filtro passivo para quinta harmônica



Fonte: O autor, 2024

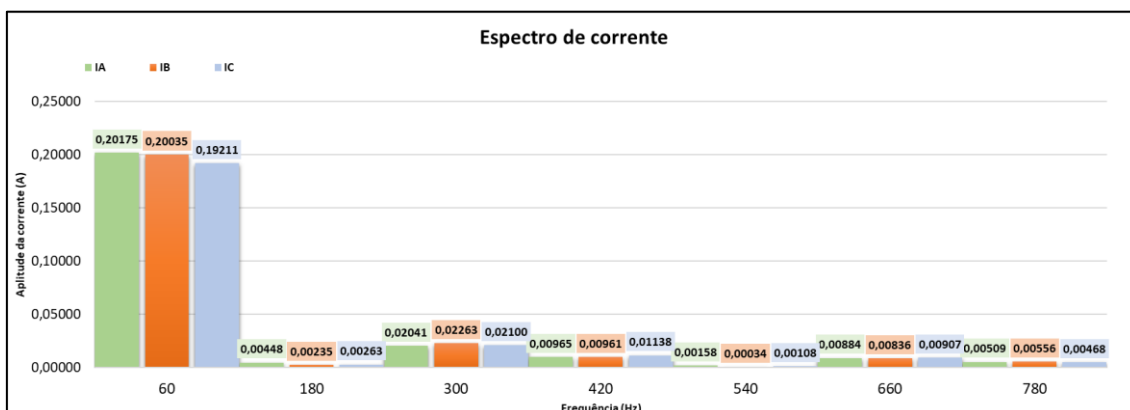
Figura 21: Corrente no ponto PCC após filtro passivo de quinta ordem.



Fonte: O autor, 2024.

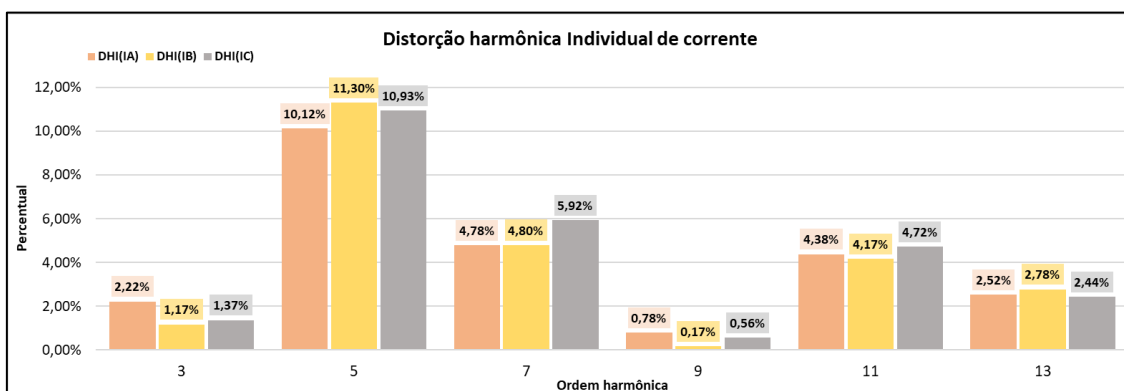
De acordo com a Figura 21, é possível observar que ainda há a presença de distorção no sinal de corrente. Com isso, é relevante analisar as amplitudes dos harmônicos, assim como os índices de distorções harmônicas individuais de corrente. A Figura 22 apresenta o espectro de corrente a e Figura 23 as distorções individuais de corrente.

Figura 22: Espectro de corrente



Fonte: O autor, 2024.

Figura 23: Distorção harmônica individual de corrente.



Fonte: O autor, 2024.

A DHT_I após a inserção do filtro é listada na Tabela 9.

Tabela 9: Distorção harmônica total de corrente

DHT_{IA}	DHT_{IB}	DHT_{IC}
12,50%	13,31%	13,6%

Fonte: O autor, 2024.

A relação I_{SC}/I_L para cada fase do sistema, está expressa na Tabela 10.

Tabela 10: Relação I_{SC}/I_L

I_{SCA}/I_{LA}	I_{SCB}/I_{LB}	I_{SCC}/I_{LC}
32,399	32,8526	34,259

Fonte: O autor, 2024.

Ao comparar os valores obtidos na Tabela 10 de I_{SC}/I_L que se encontra na faixa entre 20 e 50 estabelecidos na Tabela 2, observa-se que o percentual máximo permitido para a distorção harmônica de corrente total é de 8%, foi possível reduzir os índices de distorções quando comparamos com a Tabela 6, mas não o suficiente para ficar dentro dos limites toleráveis para distorção de corrente. Portanto, torna-se relevante a implementação do filtro para o sétimo harmônico.

Utilizando (15), (16) e (17), é possível calcular os valores de resistência, indutância e capacitância para o projeto do filtro passivo em paralelo destinado à sétima ordem. Os resultados desses cálculos são sumarizados na Tabela 11.

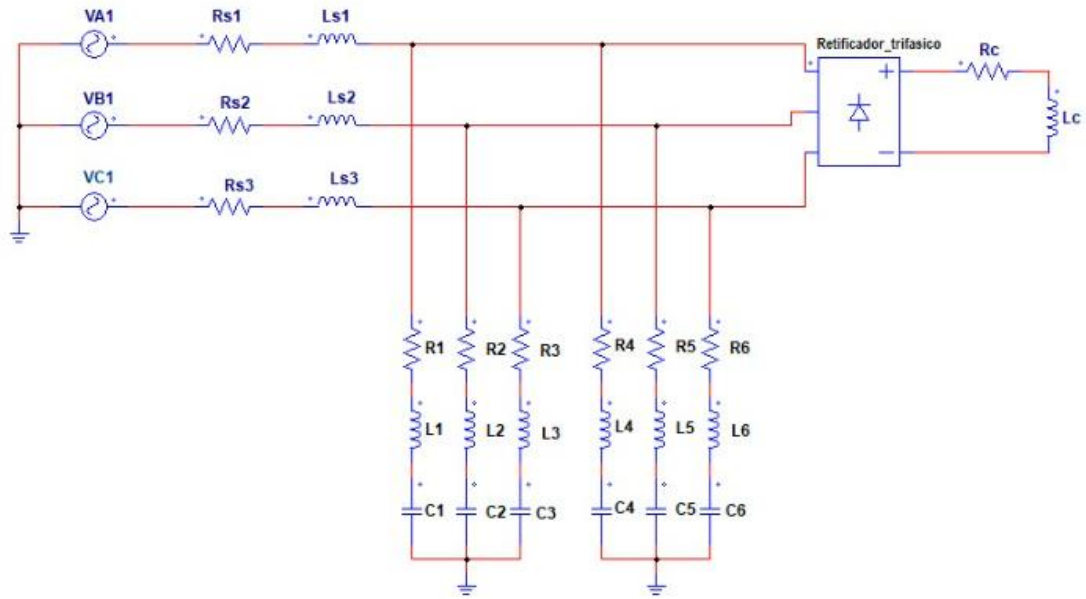
Tabela 11: Parâmetros para projeto do filtro passivo RLC série shunt para sétima ordem

Linha	R	L	C
Linha 1	242,587 Ω	4,598 H	31,257 ηF
Linha 2	242,586 Ω	4,598 H	31,255 ηF
Linha 3	242,572 Ω	4,598 H	31,259 ηF

Fonte: O autor, 2024.

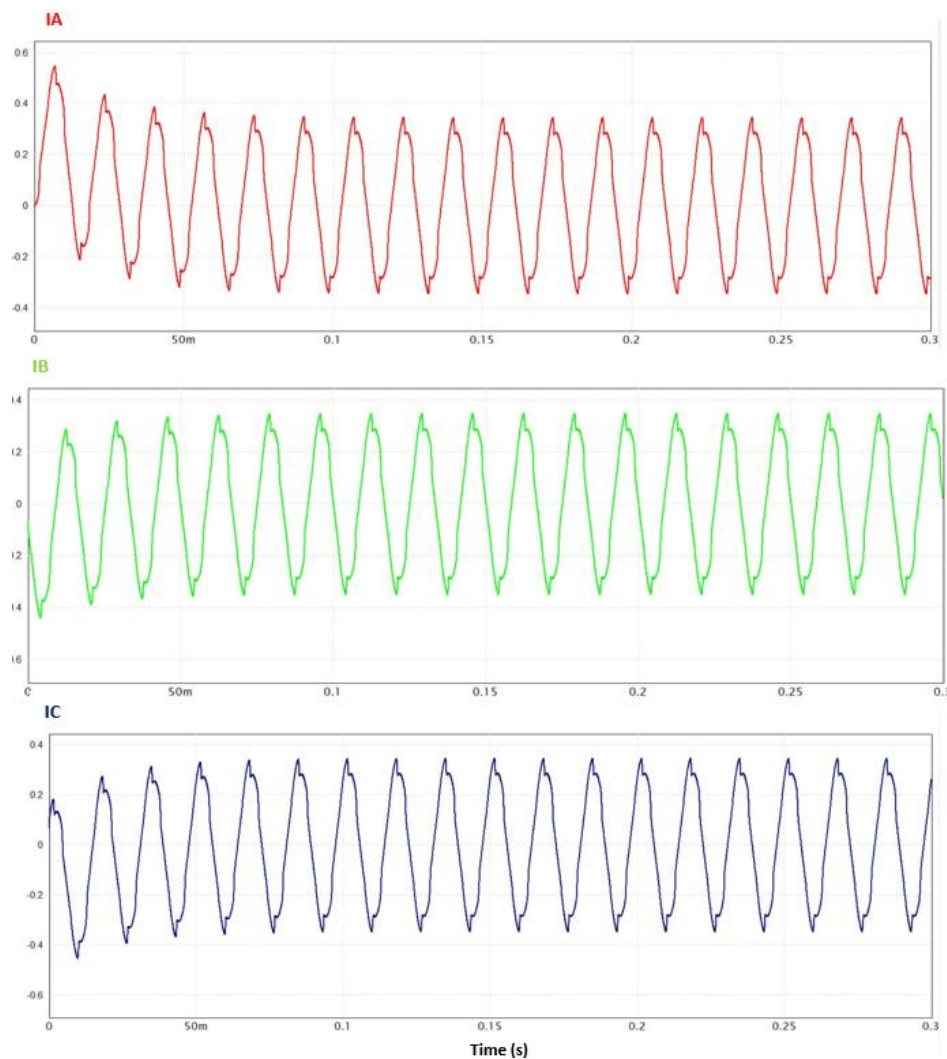
Em uma aplicação prática podem ser utilizados os valores comerciais de 250 Ω para o resistor e 33 ηF para o capacitor. No entanto, para o indutor, será necessário solicitar um projeto específico para obter a indutância de 4,6 H. A partir dos dados fornecidos pela Tabela 11, será realizado uma simulação no *PSIM*, considerando o sistema da Figura 20 com a inclusão do filtro passivo RLC série *shunt* para a sétima harmônica. A Figura 24 ilustra o circuito em análise. Por sua vez, na Figura 25 é exibida a forma de onda da corrente, com um medidor de corrente colocado em série com a fonte e o filtro.

Figura 24: Sistema com filtro passivo de sétima ordem.



Fonte: O autor, 2024.

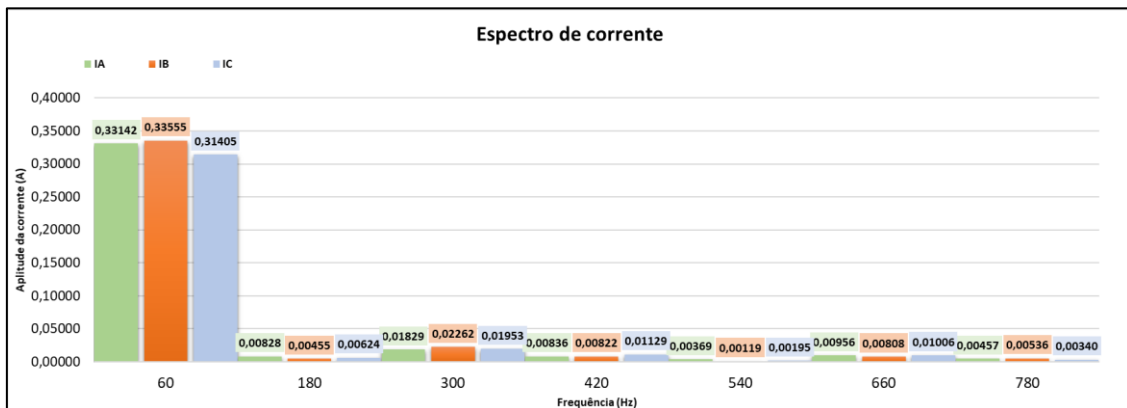
Figura 25: Corrente no ponto PCC após filtro passivo de sétima ordem.



Fonte: O autor, 2024.

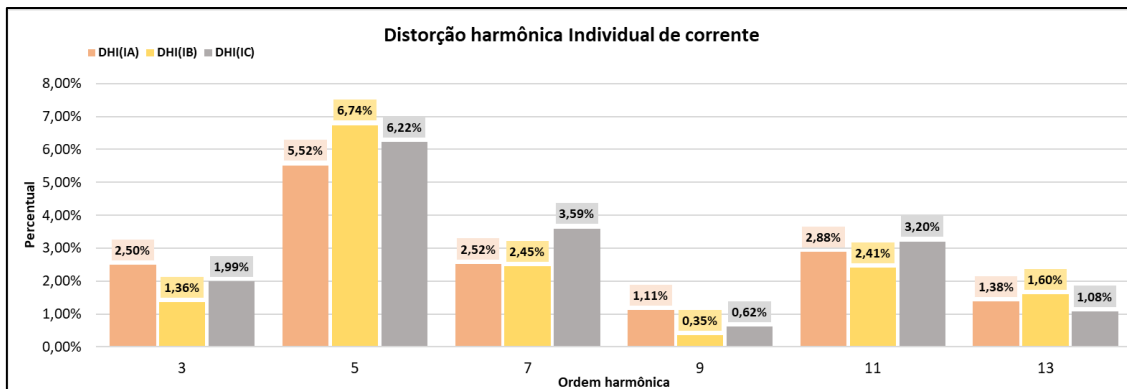
Comparando a Figura 25 com a Figura 21, nota-se que a curva de corrente apresenta uma menor distorção harmônica. No entanto, é crucial analisar as amplitudes dos harmônicos e seus índices de distorções para determinar se estão abaixo dos valores máximos estabelecidos por norma. A Figura 26 ilustra as amplitudes de corrente e a Figura 27 as distorções individuais de corrente.

Figura 26: Espectro de corrente



Fonte: O autor, 2024.

Figura 27: Distorção harmônica individual de corrente.



Fonte: O autor, 2024.

A DHT_i deste sistema está documentada na Tabela 12, detalhando seus valores.

Tabela 12: Distorção harmônica total de corrente.

DHT_{IA}	DHT_{IB}	DHT_{IC}
7,38%	7,58%	7,89%

Fonte: O autor, 2024.

A relação I_{SC}/I_L para cada fase do sistema, está expressa na Tabela 13.

Tabela 13 : Relação I_{SC}/I_L .

I_{SCA}/I_{LA}	I_{SCB}/I_{LB}	I_{SCC}/I_{LC}
20,723	20,4802	21,813

Fonte: O autor, 2024.

Ao comparar os valores obtidos na Tabela 13 de I_{SC}/I_L que se encontra na faixa entre 20 e 50 estabelecidos na Tabela 2, observa-se que o máximo permitido para a distorção harmônica de corrente total é de 8%. Nota-se, que os valores calculados na Tabela 13 estão bem próximos do valor limite admissível. A forma de onda ainda possui distorções harmônicas, porém dentro dos limites estipulados por norma.

Um aspecto importante a ser examinado, refere-se ao desempenho do filtro na ocorrência da ressonância, para a aplicação dos filtros passivos *shunt* de quinta e sétima ordens, a frequência de ressonância pode ser calculada pela seguinte equação:

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{(L_{filtro} + L_{linha}) \times C_{filtro}}} \quad (18)$$

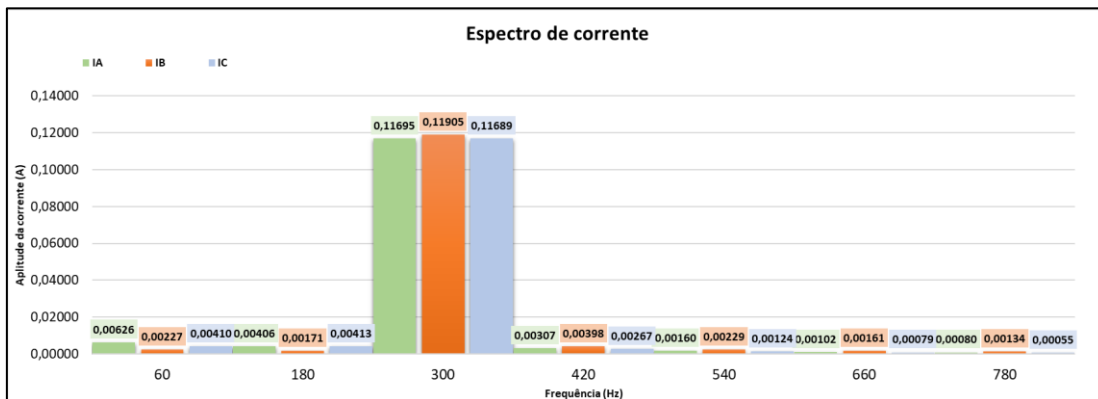
Logo, as frequências individuais de ressonância para o filtro shunt serão:

$$f_{r5} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(4,6 + 92 \times 10^{-3}) \times 61,123 \times 10^{-9}}} = 297,193 \text{ Hz} \quad (19)$$

$$f_{r7} = \frac{1}{2\pi\sqrt{(4,598 + 92 \times 10^{-3}) \times 31,255 \times 10^{-9}}} = 415,69 \text{ Hz} \quad (20)$$

Alterando a frequência do sistema da Figura 24 para $f_{r5} = 297,193 \text{ Hz}$, a amplitude do sinal da corrente no ponto entre a fonte e o filtro está representada pela Figura 28.

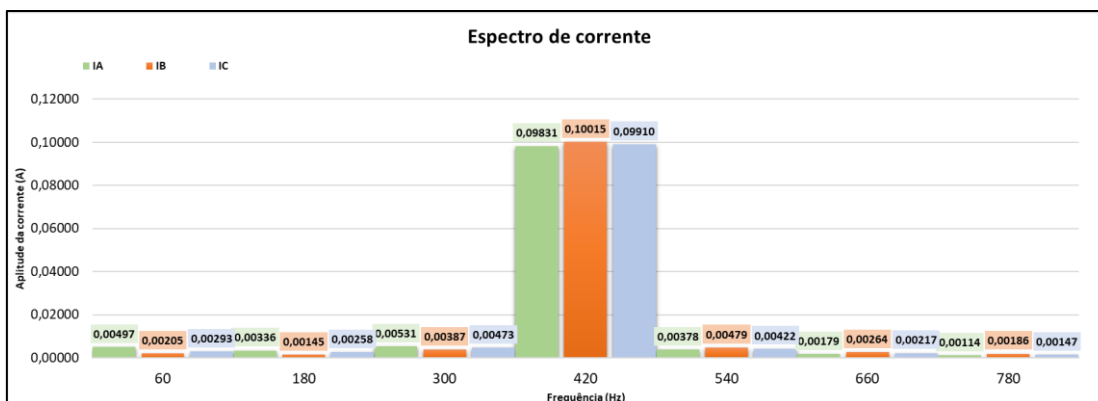
Figura 28: Espectro de corrente após a frequência de ressonância de quinta ordem.



Fonte: O autor, 2024.

Modificando a frequência do sistema da Figura 24 para $f_{r7} = 415,69 \text{ Hz}$, a resposta para a amplitude do sinal da corrente no ponto entre a fonte e o filtro é ilustrada pela Figura 29.

Figura 29: Espectro de corrente após a frequência de ressonância de sétima ordem.

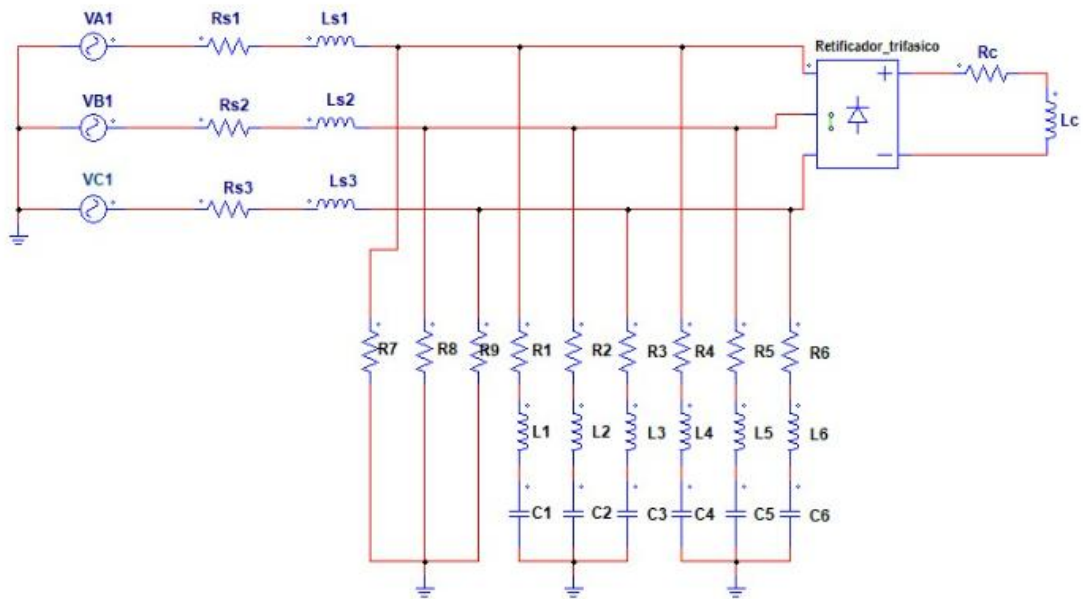


Fonte: O autor, 2024.

Analisando as Figuras 28 e 29, observa-se que a amplitude da corrente na frequência de ressonância, tanto para a quinta quanto para a sétima harmônica, foi amplificada. Esse comportamento comprometeria a confiabilidade do projeto, uma vez que, em uma aplicação real, a instalação estaria sujeita a sobreaquecimento dos equipamentos, queima de equipamentos sensíveis e uma distribuição inadequada de potência.

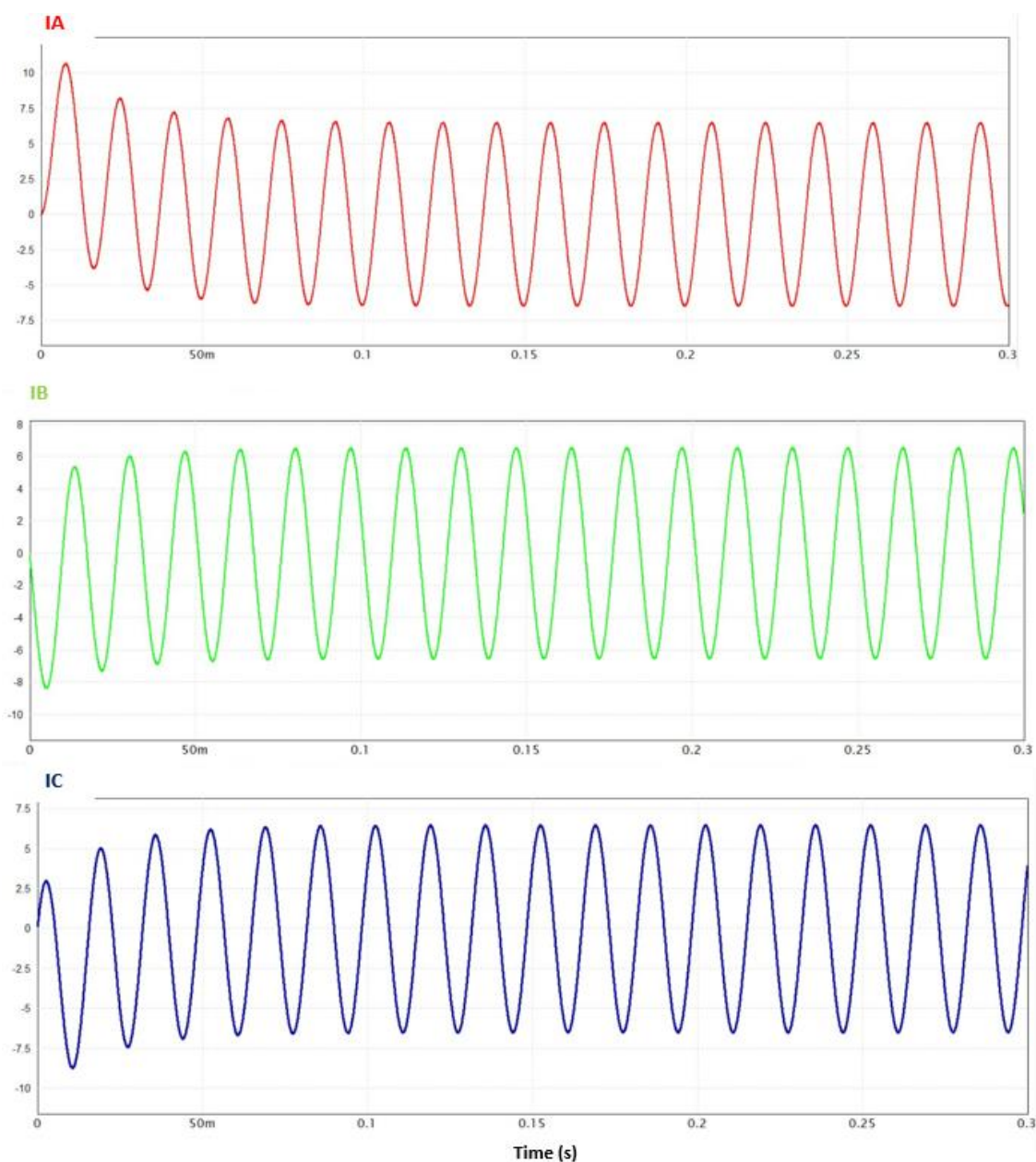
Outra condição analisada foi a ocorrência de um distúrbio no sistema, foi inserido uma resistência de 5Ω , em paralelo a carga e o filtro com o objetivo de simular uma falta, as Figuras 30 e 31 representam respectivamente o sistema com o distúrbio e a resposta da curva da corrente.

Figura 30: Sistema com distúrbio.



Fonte: O autor, 2024.

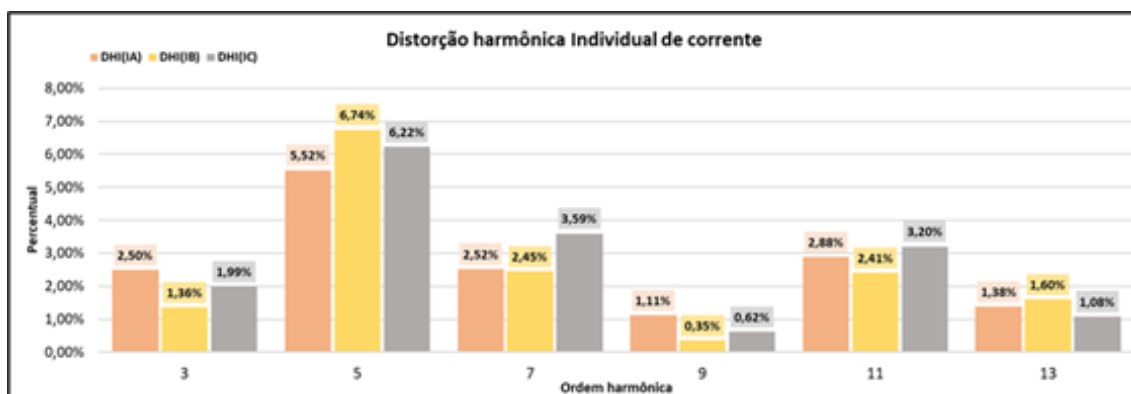
Figura 31: Corrente do sistema com distúrbio no ponto PCC.



Fonte: O autor, 2024.

Comparando a Figura 25 com a Figura 21, nota-se que a curva de corrente apresenta uma menor distorção harmônica. No entanto, é crucial analisar as amplitudes dos harmônicos e seus índices de distorções para determinar se estão abaixo dos valores máximos estabelecidos por norma. A Figura 32 ilustra as distorções individuais de corrente.

Figura 32: Distorção individual de corrente



Fonte: O autor, 2024.

A DHT_i deste sistema está documentada na Tabela 14, detalhando seus valores.

Tabela 14: Distorção harmônica total de corrente.

DHT_{IA}	DHT_{IB}	DHT_{IC}
4,31%	1,62%	2,78%

Fonte: O autor, 2024.

A relação I_{SC}/I_L para cada fase do sistema, está expressa na Tabela 15.

Tabela 15 : Relação I_{SC}/I_L .

I_{SCA}/I_{LA}	I_{SCB}/I_{LB}	I_{SCC}/I_{LC}
1,007	0,977	1,072

Fonte: O autor, 2024.

Ao comparar os valores obtidos na Tabela 15 de I_{SC}/I_L que se encontra menor que 20 estabelecidos na Tabela 2, observa-se que o máximo permitido para a distorção harmônica de corrente total é de 5%. Nota-se, que os valores calculados na Tabela 14 estão abaixo do valor limite admissível. Um resultado muito satisfatório para o filtro projetado.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES GERAIS

A presença de distorções harmônicas em sistemas que possuem cargas não-lineares tornou-se cada vez mais frequente em instalações industriais. A compreensão aprofundada dos conceitos associados às distorções harmônicas, incluindo suas causas e efeitos, é fundamental para desenvolver estratégias eficazes de mitigação desses efeitos indesejados.

Dentre as várias abordagens de filtragem disponíveis para suprimir o conteúdo harmônico, para este estudo, foi escolhido simular o comportamento de um filtro passivo ressonante RLC por meio do *software PSIM*, em resposta a uma carga com elevado conteúdo harmônico de corrente. Percebeu-se que, após a implementação do filtro para mitigação dos harmônicos de quinta e sétima ordem, a curva da corrente ainda exibia distorções, porém dentro do limite estabelecido pelo IEEE para distorções harmônicas de corrente. Dessa forma, o projeto realizado se mostrou eficaz para mitigação do conteúdo harmônico em um sistema controlado. O filtro não atenuou uma harmônica específica, mas sim várias harmônicas do sistema, pode-se atribuir esse comportamento a resposta não linear da carga. Cargas não lineares, como retificadores, podem gerar uma ampla gama de frequências harmônicas devido ao seu comportamento dinâmico. Quando um filtro é projetado para atenuar as harmônicas, ele pode não ser seletivo o suficiente para apenas uma frequência, resultando na atenuação de várias harmônicas simultaneamente. Isso ocorre porque as características de impedância do filtro podem afetar as frequências harmônicas de maneira mais ampla do que o esperado.

Durante a simulação do sistema em condições de ressonância, notou-se que o resultado não foi satisfatório, pois houve uma significativa amplificação do sinal de corrente. Isso ocorreu porque a frequência de excitação coincidiu com a frequência natural do sistema, resultando em um considerável aumento da corrente devido à transferência de energia entre o indutor e o capacitor. Como resultado, foram observados picos indesejados de corrente, o que pode levar a sobrecargas nos componentes do sistema e possíveis danos em uma aplicação prática.

Conclui-se, portanto, que o sistema possui limitações, uma vez que o filtro passivo *shunt* foi projetado para uma condição específica simulada. Na ocorrência de quaisquer alterações na carga, na linha ou na fonte de alimentação poderá haver comprometimento em relação a eficácia da eliminação do conteúdo harmônico do sistema.

6.2 TRABALHOS FUTUROS

Com o intuito de dar continuidade ao trabalho apresentado, são sugeridas algumas melhorias:

- incluir a resposta em frequência do sistema;
- analisar o fator de potência e rendimento do sistema;
- incluir uma técnica de filtragem para atenuação da ressonância no sistema;
- adicionar ao projeto um sistema de monitoramento das grandezas elétricas, possibilitando maior confiabilidade e acompanhamento acerca da eficácia da técnica de filtragem;
- aplicar a metodologia em um estudo de caso real;
- realizar um estudo comparativo entre a técnica de filtragem passiva e ativa, ressaltando o custo *versus* benefícios entre ambas.

REFERÊNCIA

ANDERSON, Paul M. **Power System Protection**. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 1999. Disponível em:

<https://ia600305.us.archive.org/6/items/POWERSYSTEMPROTECTIONP.M.Anderson/POWER%20SYSTEM%20PROTECTION%2C%20P.%20M.%20Anderson.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2024.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Módulo 8 – Qualidade da Energia, 2021. Disponível em:

<https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2021956.html>. Acesso em: 20 fev. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, **Atlas de Eficiência Energética Brasil 2023**, disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2023>. Acesso em: 20 jan. 2024.

COSTA NETO, Antônio, **Análise e Desenvolvimento de um Retificador Trifásico de 12 Pulsos com Autotransformador e Conversores SEPIC Isolados**. 2018. 130 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/20804/3/AnaliseDesenvolvimentoRetificador.pdf>. Acesso em: 08 jan. 2024.

CUNHA, Max Victor Fideles. **Investigação dos índices harmônicos na empresa SETEMAC e simulações computacionais com vistas à construção de filtro ativo**. 2023. 94 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Itumbiara, 2023. Disponível em: https://repositorio.ifg.edu.br/bitstream/prefix/1609/1/tcc_Max%20Victor%20Fideles%20Cunha.pdf. Acesso em: 27 jan. 2024.

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

ERY, Allan; HOPNER, Felipe Sourient. **Análise de Distorções Harmônicas em Planta Industrial Modelada por Fontes de Corrente**. 2016. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10021/2/CT_COELE_2016_2_08.pdf. Acesso em: 27 jan.2024.

HERNÁNDEZ, J.L.; CASTRO; M.A, CARPIO, J.; Colmenar, A. **Harmonics in Power Systems**. International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Valencia, v. 1, n.7, p.1-5, 2009. Disponível em: <https://icrepq.com/ICREPQ'09/P1.pdf>. Acesso em: 02 jan. 2024.

IEEE, Institute of Electrical and Electronic Engineers. **Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.** IEEE Std 519-2014 (Revision of IEEE Std 519-1992). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459>. Acesso em: 05 jan. 2024.

ISONI, Marcos. **A moderna “Eficientização” energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas.** São Paulo, 2005. (Apostila). Disponível em: https://www.conectconsult.com.br/arquivos/eficiencia_energetica_e_seus%20possiveis_efeitos_sobre Equipamentos_e_instalacoes_eletricas.pdf. Acesso em 20 jan. 2024.

JUNIOR, Sergio Luis Brockveld. **Embasamento teórico para o projeto de um inversor de frequência.** 2015. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecatrônica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. Disponível em: <https://core.ac.uk/reader/30406540>. Acesso em: 04 jan. 2024.

LIMA, Diorge De Souza. **Desenvolvimento de um simulador de redes elétricas para estudo da propagação de harmônicos.** 2016. 110 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2016. Disponível em: https://bdtd.ibict.br/vufind/Record/UFPA_cc843645a49dc0402a890fe41c72d152. Acesso em: 20 jan. 2024.

MATTOS, Márcio Moura de. **Estudo do fator K em transformadores a seco.** 2011. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/65619/000864745.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2024.

MORAIS, Ernande Eugenio Campelo. **Estudo e projeto de filtros passivos para atenuação de harmônicos em instalações elétricas industriais.** 2011. 137 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011. Disponível em: <https://docplayer.com.br/23078782-Estudo-e-projeto-de-filtros-passivos-para-atenuacao-de-harmonicos-em-instalacoes-eletricas-industriais.html>. Acesso em: 20 jan. 2024.

MORENO, Hilton. **Como calcular filtros passivos de harmônicas.** 2. ed. São Paulo: Potência Educação, 2021. Disponível em: <https://revistapotencia.com.br/wp-content/uploads/2021/11/E-book-Filtro-de-Harmonic-2a-ed..pdf>. Acesso em: 27 jan. 2024.

MOURA JÚNIOR, Maurílio de Paula. **Análise de Qualidade de Energia em Partida de Motores Elétricos de Indução Trifásicos: comparação dos métodos de partidas.** 2021. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Centro Universitário do Sul de Minas, Varginha, 2021. Disponível em:

<http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/2225/1/TCC%20%20-%20MAURILIO%20MOURA.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2024.

NASCIMENTO, Claudionor Francisco do. **Determinação do conteúdo harmônico de corrente baseada em redes neurais artificiais para cargas não lineares monofásicas**. 2007. 202 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18133/tde-27082007-170845/publico/Claudionor.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2024.

NERY, Allan; HOPNER, Felipe Sourient. **Análise de distorções harmônicas em planta industrial modelada por fontes de corrente**. 2016. 118 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/10021/2/CT_COELE_2016_2_08.pdf. Acesso em: 27 jan. 2024.

NEVES NETO, João Cardoso das. **Investigação da Frequência de Ressonância com Compensação Reativa Através da Análise da Qualidade de Energia Elétrica em Instalações Elétricas Hospitalares com Equipamento Radiológicos**. 2023. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-31072023-151149/publico/JoaoCardosodasNevesNetoCorr23.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2024.

OLIVEIRA, Wagner José Nascimento de. **Projeto de filtros passivos para a redução de corrente harmônica na subestação de 2X300kVA da estação elevatória de água do Jiqui**. 2015. 143 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015. Disponível em: https://repositorio.ufrn.br/bitstream/123456789/20366/1/WagnerJoseNascimentoDeOliveira_DISSERT.pdf. Acesso em: 15 fev. 2024.

PAIXÃO JÚNIOR, Ulisses Carvalho. **Comparação entre Regressão linear, redes neurais artificiais e árvores de regressão para quantificação do impacto harmônico de múltiplas cargas em redes elétricas de distribuição**. 2018. 151 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2018. Disponível em: <http://repositorio.ufpa.br/jspui/handle/2011/1045>. Acesso em: 27 jan. 2023.

Recorde na expansão da geração: matriz elétrica brasileira teve aumento de 10,3 GW em 2023. Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/recorde-na-expansao-da-geracao-matriz-eletrica-brasileira-teve-aumento-de-10-3-gw-em-2023>. Acesso em: 6 jan. 2024.

ROSA, Francisco C. De La. **Harmonics and Power Systems**. 1. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. Disponível em:

<https://www.taylorfrancis.com/books/mono/10.1201/9781420004519/harmonics-power-systems-francisco-de-la-rosa>. Acesso em: 10 jan. 2024.

SANTOS, Felipe Menezes Ferreira dos. **Qualidade de Energia - Comparação das Normas IEC 61000 - 3 - 2 e IEEE 519**. 2007. 57 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <https://pantheon.ufrj.br/bitstream/11422/7077/1/monopoli10000459.pdf>. Acesso em: 27 jan. 2024.

SILVA, Marina Mariana Davi da, **Distorção e Filtro de Harmônicos na Alimentação de Conversores CA/CC por Rede CA e Gerador Síncrono**. 2007. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2007092501.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2024.

SOUZA, Allan Gustavo de. **Análise de Distorções Harmônicas na Estação de Recalque de Água Tratada do Bairro Centro de Itajaí**. 2021. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, Itajaí, 2021. Disponível em: https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/2648/Allan_Gustavo_de_Souza%20-%20TCC.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 27 jan. 2024.

TEXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise de Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de um Sistema Industrial**. 2009. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/BUOS-8CJHGU>. Acesso em: 15 jan. 2024.