

PROJETO DE ANÁLISE E DIMENSIONAMENTO DE UM FILTRO DE HARMÔNICAS PARA MITIGAÇÃO DE DISTORÇÕES NO QGBT DE UMA EXTRUSORA

ANALYSIS AND SIZING PROJECT OF A HARMONIC FILTER TO MITIGATE DISTORTIONS IN THE QGBT OF AN EXTRUDER

Diego Henrique Carvalho Roberto¹

Celso Cardoso de Lima Junior²

RESUMO

Este artigo aborda uma situação prática ocorrida na indústria de embalagens plásticas, destacando-se a importância da qualidade da energia elétrica em máquinas e acionamentos. Utilizando um analisador de qualidade de energia elétrica como ferramenta de monitoramento e medição de grandezas elétricas, foi possível observar a presença de tensões e correntes harmônicas com amplitudes superiores aos limites estabelecidos pelas normas vigentes (IEC61000-3-4 e IEEE-519). O projeto propõe o estudo e dimensionamento de filtros harmônicos para mitigar as distorções harmônicas presentes no quadro geral de baixa tensão de uma extrusora. As ordens das harmônicas a serem filtradas são as de 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordens, utilizando-se um modelo de filtro passivo sintonizado para uma frequência específica. Após o dimensionamento dos filtros, foram realizadas simulações utilizando os softwares PSIM® e MULTISIM® para garantir maior confiabilidade nos resultados. As simulações permitiram analisar as distorções nas formas de onda, sobrepor os resultados e extrair os dados espectrais de frequência. A análise dos resultados das simulações revelou os novos níveis de harmônicas de tensão e corrente para cada frequência, evidenciando a mitigação das distorções que estavam fora dos padrões normativos. Esses resultados sustentam a conclusão sobre a efetividade dos filtros propostos. Com base nesse estudo, é possível aprimorar a pesquisa com a construção e implementação prática dos filtros.

Palavras-chave: Qualidade de energia, distorções harmônicas, filtros harmônicos.

ABSTRACT

¹ Acadêmico do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Alto Vale do Rio do Peixe (UNIARP).

² Professor do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Alto Vale do Rio do Peixe (UNIARP).

email: celso@uniarp.edu.br

This article addresses a practical situation occurring in the plastic packaging industry, highlighting the importance of the quality of electrical energy in machines and drives. Using an electrical energy quality analyzer as a tool for monitoring and measuring electrical quantities, it was possible to observe the presence of harmonic voltages and currents with amplitudes greater than the limits established by current standards (IEC61000-3-4 and IEEE-519). The project proposes the study and design of harmonic filters to mitigate the harmonic distortions present in the general low voltage framework of an extruder. The orders of harmonics to be filtered are the 5th, 7th, 11th and 13th orders, using a passive filter model tuned to a specific frequency. After sizing the filters, simulations were carried out using the PSIM® and MULTISIM® software to ensure greater reliability in the results. The simulations allowed analyzing the distortions in the waveforms, superimposing the results and extracting the frequency spectral data. Analysis of the simulation results revealed new levels of voltage and current harmonics for each frequency, demonstrating the mitigation of distortions that were outside regulatory standards. These results support the conclusion about the effectiveness of the proposed filters. Based on this study, it is possible to improve research with the construction and practical implementation of filters.

Keywords: Power quality, harmonic distortions, harmonic filters.

INTRODUÇÃO

O termo "Qualidade da Energia", também conhecido como "Power Quality" em inglês, refere-se à energia elétrica fornecida com uma forma de onda senoidal pura, o que significa sem alterações em sua amplitude. Focar na qualidade da energia é uma consideração extremamente importante para toda as indústrias. Devido à sua importância, é essencial avaliá-la como um recurso fundamental para o funcionamento e desenvolvimento de uma infraestrutura bem construída (Pereira *et al*, 2020).

O conteúdo harmônico presente na tensão pode afetar negativamente os equipamentos que estão alimentados pela rede, como transformadores, cabos de alimentação, motores, capacitores e eletrônicos em geral, afetando com efeitos de aumento da corrente, elevação da resistência que conseqüentemente acarreta na perda da potência e no aquecimento do equipamento (Leão; Sampaio; Antunes, 2014).

Perante os efeitos negativos que as distorções harmônicas e os distúrbios advindo da falta de qualidade da energia elétrica “qual a solução eficaz e contundente para reverter as distorções harmônicas em determinado ponto da instalação?”.

Conseqüentemente, a presente pesquisa tem como objetivo principal realizar um projeto de dimensionamento para um filtro de harmônicas, destinado a mitigar os distúrbios preexistentes em uma máquina de extrusão de plástico. Esse esforço visa eliminar os inconvenientes decorrentes desses distúrbios, que têm se manifestado na forma de interrupções no funcionamento da máquina e na falha de componentes eletrônicos incorporados à mesma. Os objetivos específicos estruturam-se em:

- Realizar uma pesquisa bibliográfica;
- Fazer o acompanhamento da qualidade de energia do QGBT da extrusora através de um analisador de energia;
- Identificar as grandezas harmônicas presentes no QGBT;
- Dimensionar um filtro de harmônicas para as ordens harmônicas identificadas;
- Realizar simulações através do software MULTISIM® E PSIM®;
- Analisar e discutir os resultados.

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O capítulo abordará a conceitualização de cada elemento que compõem o presente trabalho, abordando todos os conceitos que norteiam o tema. Para elaboração do mesmo será utilizado obras de diversos autores como base de estudo e conceitos relevantes serão citados.

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

À medida que a energia elétrica se tornou parte essencial no dia-a-dia das pessoas e na medida que as tecnologias evoluíram, é natural que a qualidade energia se torne cada vez mais notável. Primeiramente preocupa-se com o fornecimento ininterrupto, sendo que a queda da mesma gera um grande transtorno a todos que utilizam continuamente, em seguida, mesmo que não haja interrupções preocupa-se com a qualidade da energia elétrica que é entregue ao consumidor já na forma de produto comercial, no entanto a percepção é pouco difusa, podendo ser identificada a partir de anomalias em alguns equipamentos (Mehl, 2011).

Desde a Resolução Normativa nº 1000/2021 a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica expeliu documentos por meio do PRODIST – Procedimentos de Distribuição da Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional que tem como objetivo normatizar e padronizar procedimentos e atividades relacionadas ao desempenho do sistema de distribuição elétrica (Santos, 2021).

Conforme o PRODIST (2021) o módulo oito aborda a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado. No que diz respeito à qualidade do produto, a seção 8.1 do referido módulo estabelece terminologia, caracteriza fenômenos, parâmetros e valores de referência relacionados à tensão em estado estacionário e a perturbações na forma de onda da tensão. Ela também estabelece métodos que permitem à ANEEL definir padrões para os indicadores de Qualidade da Energia Elétrica (QEE).

Em geral, as ocorrências relacionadas à qualidade da energia elétrica tornam-se aparentes quando um dispositivo alimentado pela rede elétrica não funciona conforme o esperado. Por exemplo, uma lâmpada que apresenta variações na intensidade de luz, um motor que sofre vibrações mecânicas, equipamentos que funcionam com superaquecimento, dispositivos de proteção que entram em ação de maneira inesperada, ou capacitores sujeitos a sobretensões ou sobrecorrentes podem indicar problemas de qualidade da energia elétrica (Deckmann; Pomilio, 2017).

Mehl (2011) abordou diversos aspectos que possibilitam a avaliação da qualidade da energia elétrica, incluindo a continuidade do fornecimento, os níveis de tensão, os desequilíbrios, as distorções harmônicas, as oscilações e as interferências nos sistemas de comunicação. No contexto das oscilações de tensão, esses distúrbios podem se manifestar como oscilações impulsivas, transitórias, variações no valor estável (de curta ou longa duração), desequilíbrios de tensão e distorções na forma de onda. Esses distúrbios representam desvios da forma de onda em relação ao ideal, que seria uma onda puramente senoidal.

Conforme a IEEE (2014 *apud* Carvalho, 2018) harmônicos são correntes ou tensões que contêm frequências múltiplas da frequência fundamental, resultando em distorções na onda fundamental, gerando uma onda não senoidal. Para uma onda senoidal de 60 Hz, exemplos de harmônicos de ordem ímpar incluem, terceira ordem ($3 \times 60 \text{ Hz} = 180 \text{ Hz}$), quinta ordem ($5 \times 60 \text{ Hz} = 300 \text{ Hz}$), sétima ordem (420 Hz)

seguindo por diante. A presença de harmônicos interagindo com o sistema de distribuição elétrica pode causar distorções, perdas de tensão e problemas como superaquecimento e vibração excessiva em motores, aquecimento e ruído em transformadores, erros de frequência e afetação de campos magnéticos em torno de transformadores e interruptores.

HARMÔNICAS

As harmônicas assumem uma importância significativa na análise da qualidade da energia elétrica, as distorções harmônicas são geradas devido à presença de cargas não lineares no sistema elétrico, ou seja, dispositivos que consomem corrente de maneira não proporcional à forma da tensão aplicada. Para avaliar com precisão essa exceção, utilize-se uma ferramenta matemática conhecida como Série de Fourier. Essa técnica permite decompor formas de onda periódicas distorcidas em componentes de frequência múltipla da frequência fundamental, que, no sistema elétrico brasileiro, corresponde a 60 Hz (Leão; Sampaio; Antunes, 2014).

Lopez (2013) cita que uma carga linear é essencialmente definida por sua constância ôhmica, ou seja, sua resistência não varia em resposta às mudanças de tensão ou corrente aplicada. No caso de uma carga puramente resistiva, a frequência da tensão aplicada não influencia a corrente resultante; a resistência mantém seu valor inalterado independentemente da mudança na frequência. Em resumo, quando uma carga linear é alimentada por uma tensão senoidal de frequência constante, ela consome uma corrente também senoidal com a mesma frequência.

Por outro lado, uma carga não linear é caracterizada pelo fato de que, ao aplicar uma tensão aos seus terminais, ela retira da rede elétrica uma corrente que não segue um padrão senoidal. Isso ocorre porque o valor da resistência ôhmica da carga varia ao longo do tempo, não obedecendo à Lei de Ohm de maneira contínua, mas apenas em momentos específicos ou em pontos individuais da linha de carga (Lopez, 2013).

A transmissão harmônica representa a causa primordial do superaquecimento em dispositivos elétricos, resultando no comprometimento do isolamento e na diminuição de sua longevidade. Além disso, pode ocasionar o superaquecimento de equipamentos rotativos, transformadores e condutores elétricos, a queima de fusíveis,

o incremento das perdas em linhas de transmissão e o acionamento não intencional de relés de proteção (Kalair *et al.*, 2017 *apud* Rufino, 2019).

Nas palavras de Chapman (2002) os transformadores sofrem os impactos das harmônicas de duas maneiras distintas. Primeiramente, as perdas causadas pelas correntes de Foucault, que normalmente representam cerca de 10% das perdas sob carga total, aumentam de maneira exponencial com o quadrado da ordem das harmônicas. Em uma situação prática, quando um transformador opera com carga máxima e alimenta equipamentos eletrônicos, as perdas totais podem ser o dobro daquelas em uma carga linear equivalente. Isso resulta em um aumento específico na temperatura do transformador e, como consequência, em uma redução drástica da vida útil do equipamento. Em situações extremas como essa, a vida útil do transformador pode ser reduzida de aproximadamente 40 anos para apenas cerca de 40 dias. Felizmente, é importante destacar que poucos transformadores operam constantemente com carga máxima.

Chapman (2002) ressalta ainda o sobreaquecimento dos condutores de neutros, em um sistema trifásico, a forma de onda da tensão em cada fase, medida entre a fase e o neutro, está defasada em 120° . Isso significa que, quando cada fase possui a mesma carga, a soma das correntes no condutor neutro é nula. No entanto, quando as cargas não estiverem equilibradas, apenas a corrente resultante da soma das correntes de retorno fluirá pelo condutor neutro.

A distorção harmônica está sempre presente em maior ou menor grau em sistemas elétricos. Em geral, tanto os harmônicos de corrente quanto os de tensão devem ser controlados apenas quando excedem os limites regulatórios. Portanto, existem diversas soluções disponíveis para a mitigação de harmônicas, porém, a escolha adequada depende das características específicas de cada situação (Leão; Sampaio; Antunes, 2014). Para Lopez (2013) existem várias estratégias disponíveis para abordar os problemas causados pelas harmônicas:

- Assegurar uma disposição equilibrada das cargas que geram harmônicas na instalação, visando obter correntes senoidais;
- Incorporar impedâncias, como reatores de linha, e identificar as fontes de correntes harmônicas para reduzir suas magnitudes;

- Implementar filtros passivos de harmônicas para controlar frequências harmônicas específicas;
- Introduzir filtros ativos de harmônicas para mitigar ou eliminar tanto o fator de potência indesejado quanto as harmônicas;
- Utilizar transformadores projetados para suportar os efeitos das harmônicas;
- Empregar transformadores que realizem a inserção da comutação de fase nas harmônicas e controlem as impedâncias de sequência zero;
- Aplicar os procedimentos descritos no IEEE 519 - "Requisitos e Práticas Recomendadas para o Controle de Harmônicas em Sistemas Elétricos".

Filtro Passivo

Nas palavras de Tapia (2018) uma maneira eficaz de mitigar os efeitos da distorção harmônica, é através da incorporação de reatores. Esses filtros passivos podem ser instalados em duas configurações principais: em derivação (shunt) ou em série com o conversor de potência, com o objetivo de filtrar as harmônicas presentes no sistema.

Os filtros passivos fazem uso de componentes passivos, tais como indutores, capacitores e resistores. Esses componentes não têm capacidade de amplificar a energia do sinal, e a faixa de frequência efetiva para a filtragem de harmônicos é geralmente limitada a cerca de 3000 Hz. Uma forma comum de caracterizar esses filtros é considerando suas faixas de passagem (DAS, 2015 *apud* Gimack, 2019).

O princípio de funcionamento desse filtro permite que apenas as correntes harmônicas programadas sejam desviadas, tornando sua implementação viável e eficaz. Existem duas categorias principais de filtros harmônicos shunt: os sintonizados e os amortecidos. Dentre os filtros passivos paralelos, os tipos mais comuns incluem os filtros de sintonia simples, os de dupla sintonia e os amortecidos de 2ª ordem (Leão, 2014 *apud* Oliveira, 2015).

Os filtros de sintonia simples, também conhecidos como filtros shunt ressonantes, são notáveis por sua capacidade de operar como filtros passa-faixa. Isso

significa que eles controlam a impedância de maneira seletiva para uma frequência específica que se deseja filtrar, direcionando assim as correntes indesejadas para o sistema de aterramento. Esses filtros são amplamente usados na prática e são especialmente eficazes na mitigação de harmônicas que têm amplitudes significativas, geralmente abrangendo as harmônicas mais baixas, como a 3ª, 5ª, 7ª, 9ª, 11ª e 13ª. Uma das características notáveis desses filtros é sua contribuição para a correção do fator de potência. Isso ocorre porque, para frequências comportadas abaixo da sintonia do filtro, sua impedância é de maneira capacitiva, o que ajuda a melhorar o fator de potência do sistema (Oliveira, 2015).

MEMORIAL DE CÁLCULOS PARA DIMENSIONAMENTO DE UM FILTRO PASSIVO

Iniciando o dimensionamento do filtro (Oliveira, 2015, p.51) cita que:

O fator de qualidade (Q) é determinante para a escolha da largura da banda passante e na determinação do grau de seletividade do filtro. A Equação 20 revela o dimensionamento da resistência (R) do circuito com base no valor do indutor (L), capacitor (C) e fator de qualidade.

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q} \quad (20)$$

De acordo com as informações de Moreno (2001), os valores típicos de Q (fator de qualidade) em instalações de baixa tensão costumam variar entre 20 e 80. Nota-se que valores mais elevados de Q tendem a resultar em menores distorções harmônicas no sistema. Quando possível, é aconselhável realizar dimensionamentos para diversos valores de Q, a fim de avaliar qual abordagem é a mais apropriada tanto tecnicamente quanto economicamente em cada cenário. No entanto, caso se opte por utilizar um único valor, um Q de 50 geralmente representa um compromisso satisfatório entre o desempenho e o custo do filtro.

De acordo com a explicação apresentada por Hsia (2001 *apud* Oliveira, 2015), os filtros harmônicos têm a capacidade de contribuir significativamente para a correção do fator de potência, fornecendo uma porcentagem considerável de energia reativa. Ao instalar o capacitor Qcom em um sistema que já possui uma carga real

(P), é possível realizar a correção do fator de potência, passando de pf_0 para pf_1 . A equação 21 apresenta a forma de calcular a potência reativa.

$$Q_{com} = P \times (\tan(\cos^{-1} pf_0) - \tan(\cos^{-1} pf_1)) \quad (21)$$

Onde (Oliveira, 2015 p. 52):

“ Q_{com} é a potência reativa do capacitor instalado; P é a potência ativa da carga; pf_0 é o fator de potência antes da instalação do capacitor; pf_1 é o fator de potência depois da instalação do capacitor”.

Na situação de instalação de um único filtro de sintonia específica, a capacidade do filtro pode ser determinada usando a seguinte Equação 22 (Oliveira, 2015):

$$Q_f = Q_{com} \quad (22)$$

Nas palavras de Oliveira (2015) quando se trata de múltiplos filtros de sintonia única operando em paralelo, a estimativa da capacitância correspondente para cada ordem harmônica (h) pode ser obtida de forma aproximada utilizando a Equação 23:

$$Q_{fh} = Q_{com} \times \frac{I_h}{\sum I_h} \quad h = 2, 3, \dots \quad (23)$$

Onde (Oliveira, 2015 p. 53):

“ I_h denota a corrente harmônica da frequência h ; Q_{fh} representa a capacidade correspondente ao filtro harmônico da respectiva frequência.

Após determinar a potência reativa do capacitor para cada frequência harmônica, conforme estabelecido na Equação 23, a próxima etapa envolve o cálculo da ordem harmônica de sintonia, como descrito na Equação 24. A partir desses valores de ordem harmônica, as reatâncias capacitivas e indutivas do filtro podem ser calculadas com base nas Equações 25 e 26 (Oliveira, 2015).

$$hr^2 = h5^2 = (h - d)^2 \quad (24)$$

Onde (Oliveira, 2015 p. 54):

“ h é a ordem harmônica a ser filtrada; d é o fator de dessintonia, considerado 3% neste projeto; hr é a ordem harmônica de dessintonia”.

$$Qf1 \cong \frac{(V)^2}{(Xc1 - Xl1)} \quad (25)$$

Onde (Oliveira, 2015 p. 55):

“QF1 é a potência projetada para o capacitor; VL é a tensão de linha da rede; Xc1 é a reatância capacitiva do filtro na frequência fundamental; Xl1 é a reatância indutiva do filtro na frequência fundamental”.

$$Xl1 = \frac{Xc1}{hr^2} \quad (26)$$

Oliveira (2015) após o cálculo das reatâncias capacitiva e indutiva do filtro, representadas como XC,1 e XL,1, é possível determinar o valor da reatância efetiva do filtro na frequência fundamental (XF,1). A reatância XF,1 pode ser obtida somando as reatâncias indutiva e capacitiva, visto que elas estão em série, representando um circuito equivalente. Além disso, XF,1 pode ser determinada utilizando a Equação 25, bastando substituir os valores da tensão da rede trifásica e a potência reativa correspondente.

$$Qf1 = \frac{(Vl)^2}{Xf1}$$

Onde: XF1 é a reatância efetiva do filtro na frequência fundamental.

Após encontrar o valor de XC,1, usa-se a Equação 27 para achar o valor do capacitor do filtro, explicitado abaixo:

$$Xc1 = \frac{1}{2\pi fC} \quad (27)$$

Considerando, o π igual a 3,141593; C é a capacitância; f (frequência da rede) igual a 60 Hz.

Com o valor de XL,1, é utilizado a Equação 28, que encontrasse abaixo, para calcular a grandeza da indutância do filtro.

$$Xl1 = 2\pi fL \quad (28)$$

Uma vez obtidos os valores de L e C, essas informações são igualmente utilizadas para determinar o fator de qualidade a ser aplicado no circuito. Usando a

Equação 20, é possível calcular os valores dos resistores que devem ser instalados em série, conforme abordado por Oliveira (2015).

$$R = \frac{\sqrt{L}}{Q} \quad (20)$$

DELIMITAÇÕES METODOLÓGICAS

A pesquisa decorreu por meio da abordagem qualitativa, a natureza da pesquisa é aplicada qual tem finalidade de gerar a solução necessária para sanar a problemática do tema e qual pode ser aplicado na prática e o procedimento é experimental.

Para a realização do projeto foi utilizado um analisador de energia modelo DMI MP3000R, onde o mesmo foi conectado aos barramentos do quadro geral de baixa tensão de uma extrusora de plástico, para obtenção dos dados foi feito acompanhamento por um período de sete dias, período esse suficiente para formar a média das maiores incidência de distorções harmônicas para que o filtro seja dimensionado com maior eficiência.

Coletados os seguintes dados do analisador: tensão, corrente, potência ativa, potência aparente, potência reativa total, fator de potência e distorção harmônica total da corrente (DHTi) em cada fase, com base nesses dados foi possível identificado qual a ordem da harmônica que mais afeta a qualidade da energia no QGBT da extrusora, pode-se iniciar os cálculos de dimensionamento do filtro e em seguida fazer a montagem do mesmo via software.

Através dos softwares PSIM® e MULTISIM® foi possível simular o funcionamento do filtro, os softwares permitem fazer a simulação da forma de onda que foi analisada na extrusora, com a inserção de todos os dados fundamentais e seus distúrbios encontrado, a partir disso foi efetuado diversos testes para comprovar o funcionamento dos filtros.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para fazer o monitoramento e medição das grandezas elétricas instantâneas presentes no circuito de baixa tensão da máquina, dados indispensáveis para a elaboração do projeto, foi utilizado um analisador de energia elétrica modelo DMI MP3000R da empresa ISSO. A Figura 1 apresenta o referido analisador.

Figura 1 - Analisador de energia elétrica DMI MP3000R:



Fonte: O autor (2023).

Para iniciar a etapa de dimensionamento dos componentes do filtro de harmônicas fez-se necessário fazer a análise dos dados obtidos na primeira etapa. Com base nos resultados obtidos, procedeu-se à comparação entre os índices de distorção harmônica de corrente e tensão coletados pelo analisador de energia e os índices estabelecidos pelas normas da IEC e do IEEE. Como resultado, foi criada a Tabela 1, que efetua a comparação dos valores de tensão e corrente, respectivamente.

Tabela 1 - Comparação dos dados de Distorção Harmônica Individual de Corrente com as normas vigentes:

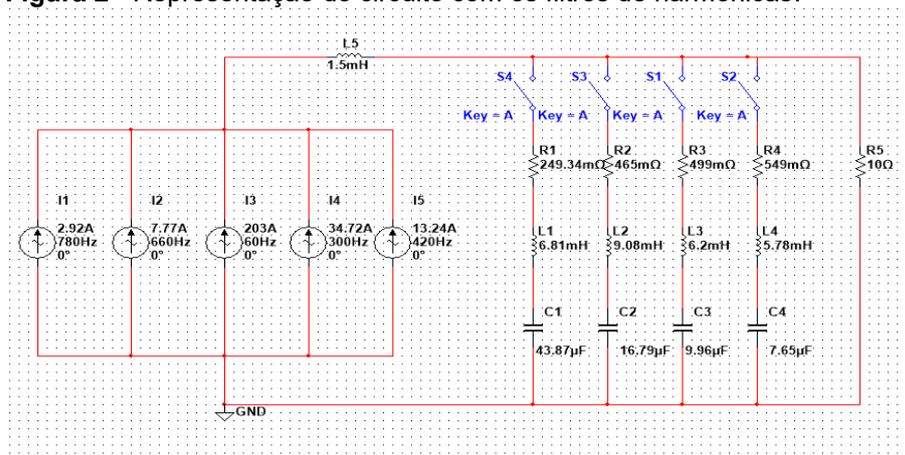
Distorções Harmônicas de Corrente por fase e ordem					Normas	
Ordem Harmônica	In/I1 Fase A	In/I1 Fase B	In/I1 Fase C	Média	IEC61000 - 3 - 4	IEEE - 519
3	1,91%	2,87%	2,82%	2.53%	21.6%	15%
5	16,65%	18,44%	17,04%	17.37%	10,7%	15%
7	6,41%	6,87%	6,24%	6,51%	7,2%	15%
9	0,36%	0,52%	0,42%	0.43%	3,8%	15%

11	3,81%	3,95%	3,68%	3,81%	3,1%	7%
13	2,78%	3,13%	2,87%	2,92%	2%	7%

Fonte: O autor (2023).

Os valores que estão em destaque correspondem a valores que fogem dos limites da norma, sendo assim, é dimensionado um filtro passivo para as harmônicas de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem, sendo a 7ª ordem opcional para o projeto pois não ultrapassou os limites, porem chegam próximos. As equações utilizadas para o dimensionamento foram seguidas conforme Moreno (2003), sendo os resultados obtidos elementos expostos junto do circuito elaborado via software a seguir. A figura a seguir apresenta o circuito via MULTISIM o qual assemelha-se com o circuito montado via PSIM, sendo que respeitou-se as características encontradas na rede, propondo-se a elaboração do projeto.

Figura 2 - Representação do circuito com os filtros de harmônicas:



Fonte: O autor (2023).

Após a montagem dos circuitos em ambos os softwares foi feita análise minuciosa dos resultados obtidos e em seguida elaborado duas tabelas para expor de forma mais detalhada as diferenças obtidas nos níveis de distorções do circuito, a Tabela 2 apresenta os resultados via MULTISIM e a Tabela 3 os resultados via PSIM.

Tabela 2 - Resultados MULTISIM:

SIMULAÇÕES VIA MULTISIM®
ORDENS HARMÔNICAS

SEM FILTROS				COM FILTROS			
5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a
34,72A	13,74A	7,77A	2,92A	2,59A	1,81A	1,17A	0,43A

Fonte: O autor (2023).

Tabela 3 - Resultados PSIM:

SIMULAÇÕES VIA PSIM®							
ORDENS HARMÔNICAS							
SEM FILTROS				COM FILTROS			
5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a	5 ^a	7 ^a	11 ^a	13 ^a
31,19A	13,10A	6,25A	2,77A	2,94A	2,26A	1,82A	0,63A

Fonte: O autor (2023).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através da utilização de um analisador de qualidade de energia elétrica instalado em uma máquina de extrusão de plástico, foi possível analisar que em seus principais barramentos contém elevados níveis de corrente harmônica. Pensando em mitigar esses níveis de harmônicas que foi elaborado este estudo.

Os dados obtidos pelo analisador de energia foram avaliados e estudados sendo eles a base do projeto. A fim de se escolher a melhor forma de mitigar as distorções e saber mais sobre o assunto, foi feito um estudo avançado sobre o tema, citado e referenciado diversos autores os quais constituem a fundamentação teórica.

O modelo de filtro que ofereceu maiores vantagens relacionadas a outros, foi o filtro passivo sintonizado o qual é dimensionado para mitigar harmônicas de apenas uma sintonia. Aliando os dados do analisador com os estudos de diversos autores foi dimensionado quatro filtros, sendo eles para 5^a, 7^a, 11^a e 13^a ordem harmônica. A partir do dimensionamento dos filtros, foram utilizados dois softwares para a simulação dos filtros inseridos no circuito elétrico. Foi retirado dos simuladores os níveis de distorções atuais e comparado entres eles.

Os resultados obtidos através das simulações foram satisfatórios, a forma de onda que apresentava grandes distorções, foi atenuada para uma forma de onda senoidal quase perfeita, as análises dos dados obtidos mostram que onde havia maior

incidência de distorção foi atenuado mais que 90% do sinal, analisado em ambos os softwares. Contudo, foi possível trazer os elevados níveis a níveis normalizados.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério de Minas e Energia **Regras e Procedimentos de Distribuição (Prodist)**. Brasília DF: Ministério de Minas e Energia, 08 fev. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 05 set. 2023.

CHAPMAN, David. **Harmônicas Causas e Efeitos**. Cap 3.1. São Paulo – SP: Copper Development Association. 2002. PROCOBRE. Disponível em: <http://abccobre.org.br/wp-content/uploads/2021/11/qe07-guia-3-1-harmnicas-causas-efeitos.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2023.

DECKMANN, Sigmar Maurer; POMILIO, José Antenor. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. 2017. Universidade Estadual De Campinas - Faculdade De Engenharia Elétrica e de Computação. São Paulo. 2017. Disponível em: <https://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a1.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2023.

GIMACK, Worlen Ferreira. **Projeto de Filtros Passivos Aplicado em Instalações Industriais**. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processos) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: https://www.repositorio.ufpa.br/jspui/bitstream/2011/13761/1/Dissertacao_ProjetoFiltrosHarmonicos.pdf. Acesso em: 03 ago. 2023.

IEEE. Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems. **IEEE Power and Energy Society**, 2014. (Revision of IEEE Std 519-1992). Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459>. Acesso em: 15 set. 2023.

LEÃO, Ruth Pastôra Saraiva; SAMPAIO, Raimundo Furtado; ANTUNES, Fernando Luiz Marcelo, **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Editora Ltda., 2014.

LOPEZ, Ricardo Aldabó. **Qualidade na energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2013.

MEHL, Ewaldo L.M. **Qualidade da energia elétrica**. 2011. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Paraná – UFPR, Curitiba, 2011. Disponível em: <https://www.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/qualidade-energia.pdf>. Acesso em: 05 set. 2023.

MORENO, Hilton. **Harmônicas nas instalações elétricas: Causas, efeitos e soluções.** 1ª ed. São Paulo: PROCOBRE, 2001. Livro eletrônico. Disponível em: <https://abcoBRE.org.br/manual-de-harmonicas/>. Acesso em: 15 set. 2023.

OLIVEIRA, Wagner José Nascimento de. **Projeto de Filtros Passivos para a Redução de Correntes Harmônicas na Subestação de 2x300 kVA Da Estação Elevatória de Água do Jiqui.** 2015. Trabalho de Conclusão de Curso (Mestrado Profissional em Energia 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: 05 set. 2023.

PEREIRA, José LR et al. **Análise do impacto da qualidade de energia na operação de relés de proteção utilizando simulações digitais em tempo real.** Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE, v. 1, n. 1, 2020. Disponível em: <https://www.periodicos.unis.edu.br/index.php/mythos/article/view/448/369>. Acesso em: 08 ago. 2023.

RUFINO, Carlos Antônio Júnior. **Extração de harmônicos, inter e sub-harmônicos utilizando Análise de Componentes Independentes.** 2019. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras/MG, 2019. Disponível em: http://repositorio.ufla.br/jspui/bitstream/1/35022/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_Extra%c3%a7%c3%a3o%20de%20harm%c3%b4nicos%2c%20inter%20e%20sub-harm%c3%b4nicos%20utilizando%20an%c3%a1lise%20de%20componentes%20independentes.pdf. Acesso em: 03 ago. 2023.

SANTOS, Lilian de Fátima Costa. **Análise dos aspectos regulatórios e de normatização nos procedimentos de ressarcimentos por danos elétricos.** 2021. Dissertação (Mestre em Ciências em Engenharia de Energia) - Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI, Itajubá, 2021. Disponível em: <https://docplayer.com.br/217421863-Universidade-federal-de-itajuba-unifei-programa-de-pos-graduacao-em-engenharia-de-energia-lilian-de-fatima-costa-santos.html>. Acesso em: 14 ago. 2023.

TAPIA, José Mario Cruz. **Comportamento da distorção harmônica de corrente na rede em um conversor de frequência em função da variação da carga mecânica no motor.** 2018. 81 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/10122>. Acesso em: 15 set. 2023.