



Análise das Distorções Harmônicas em Ambiente Industrial

Analysis of Harmonic Distortions in Industrial Environment

Jeferson Aparecido Santana Silva

Graduando do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

Ronaldo Gomes Figueira

Orientador. Docente Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

Fabiana Florian

Coorientador. Docente Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Araraquara- UNIARA. Araraquara-SP.

Resumo: Em um cenário ideal, as instalações elétricas, deveriam ser caracterizadas por amplitudes de tensão e corrente que variam no tempo de forma puramente senoidal, periódica (no Brasil, 60 Hz) e sem defasagem entre si. No entanto, o contexto contemporâneo não tem, na maioria das situações, essa realidade. Fenômenos como distorções harmônicas, defasagem entre tensão e corrente, entre outros, tendem a gerar distúrbios que prejudicam o bom funcionamento e a durabilidade das instalações. O estudo tem como objetivo abordar o impacto das harmônicas nos sistemas elétricos industriais, com ênfase na identificação, análise e soluções para mitigar seus efeitos adversos. A pesquisa propõe a análise das distorções harmônicas em uma planta industrial, identificando os principais níveis de distorções e apresentando as soluções que podem ser adotadas para reduzir seus efeitos. Conclui-se que o controle das harmônicas é crucial para garantir a eficiência e a longevidade dos equipamentos industriais, além de assegurar a conformidade com as normas regulatórias.

Palavras-chave: distorções harmônicas; eficiência energética; filtros; qualidade de energia elétrica; transformadores.

Abstract: In an ideal scenario, electrical installations should be characterized by voltage and current amplitudes that vary over time in a purely sinusoidal, periodic fashion (in Brazil, 60 Hz) and without phase shift. However, in most situations, the contemporary context does not have this reality. Phenomena such as harmonic distortions, phase shift between voltage and current, among others, tend to generate disturbances that impair the proper functioning and durability of installations. This study aims to address the impact of harmonics on industrial electrical systems, with an emphasis on identifying, analyzing, and mitigating their adverse effects. The research proposes an analysis of harmonic distortions in an industrial plant, identifying the main levels of distortion and presenting solutions that can be adopted to reduce their effects. It is concluded that harmonic control is crucial to ensuring the efficiency and longevity of industrial equipment, in addition to ensuring compliance with regulatory standards.

Keywords: harmonic distortions; energy efficiency; filters, electrical power quality; transformers.

INTRODUÇÃO

Em 1971, com o aumento do preço do barril do petróleo, houve uma busca por fontes alternativas e uso consciente da energia, conforme mencionado por João Mamede Filho em seu livro *Instalações Elétricas Industriais*. Paralelamente a esse aumento de demanda, ocorreram avanços tecnológicos, especialmente na área da eletrônica de potência, que promoveram a difusão do uso de equipamentos classificados como “cargas não lineares”.

Esses dispositivos permitiram um controle mais preciso de máquinas indutivas em setores de grande consumo elétrico e proporcionaram maior eficiência energética, como demonstrado por Silva (2024). No entanto, essa evolução também trouxe efeitos indesejados que podem afetar negativamente os sistemas elétricos. Um desses efeitos é a distorção harmônica, que será o foco principal deste estudo.

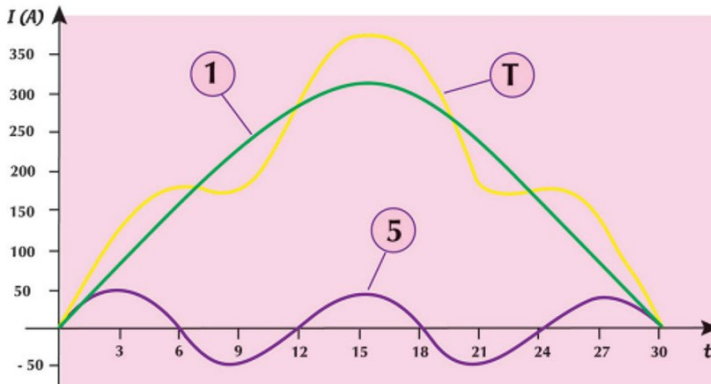
Para tratar do tema de qualidade da energia elétrica e das distorções harmônicas, é essencial considerar as normas reguladoras em vigor. No Brasil, as normas ABNT NBR 5410 de (Instalações Elétricas de Baixa Tensão publicada em 2004) e o PRODIST/Módulo 8 (Qualidade da Energia Elétrica), publicado pela ANEEL em dezembro de 2021, estabelecem parâmetros, limites e condições para a execução e manutenção das instalações elétricas, além de fornecerem diretrizes para a identificação de distorções.

O Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), disponibilizado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), define os parâmetros de qualidade da energia e será utilizado neste estudo como referência para a caracterização e os limites aceitáveis de distúrbios em uma instalação elétrica (ANEEL, 2021). De acordo com este Módulo, as distorções harmônicas são fenômenos relacionados às alterações da frequência fundamental, ocorrendo quando a forma de onda da corrente ou da tensão se desvia do padrão senoidal ideal. Essas distorções são compostas por sinais cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental e podem ser classificadas como “harmônicas de ordem ímpar, par ou nula”.

Entre as principais fontes de harmônicas em ambientes industriais, destacam-se os equipamentos que promovem a variação de velocidade em motores, como os drives de frequência variável (a exemplo, máquinas CNC), além de fontes de alimentação de computadores, retificadores, inversores e máquinas de solda inversoras.

A figura 1 ilustra a comparação entre a frequência da onda original e as harmônicas de 5ª ordem. A soma dessas componentes com a frequência fundamental resulta no ruído representado pelo sinal “T” (em amarelo).

Figura 1- Frequência.



Fonte: Moreno, 2019, p. 9.

Este estudo tem como objetivo analisar a qualidade da energia elétrica em uma empresa do ramo de implementos agrícolas a fim de propor soluções tecnológicas que visam mitigar os impactos causados pelos distúrbios encontrados nesta empresa.

Foi realizada pesquisa bibliográfica, com abordagem descritiva e qualitativa. Utilizaram-se como termos de busca as palavras-chave: distorções harmônicas, qualidade de energia elétrica, eficiência energética, filtros e transformadores, por meio da plataforma Google Acadêmico. Outrossim, foi consultada a regulamentação vigente da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), especialmente o Anexo VIII da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Qualidade de Energia

Tendo em vista a constante variação de demanda e evolução de tecnologias dentro do sistema elétrico mundial, temas que se remetem à qualidade de energia elétrica, uso consciente, e políticas públicas, passam a estar em constante evidência para o setor.

No Brasil, a ABESCO (Associação Brasileira das Empresas de Serviço de Conservação de Energia) anualmente realiza o Congresso Brasileiro de Eficiência Energética, em que diversos especialistas e políticos (como deputados) discutem e apresentam projetos que visam a redução do desperdício, bem como uma melhor eficiência e maior difusão das chamadas energias verdes, entre outros.

Na 20ª edição do Congresso, realizada em setembro de 2024, considerando além dos cases que foram abordados, “[...] o Governo Federal aprovou a criação de uma Política Nacional de Transição Energética, onde o Brasil poderá receber cerca de R\$ 2 trilhões nos chamados investimento verdes, o que retifica a importância da eficiência energética no país” segundo o presidente da ABESCO, Bruno Herbert.

Dessa forma, estudos direcionados à mitigação de distúrbios, que geram desvios da forma de onda puramente senoidal na frequência fundamental, demonstram-se extremamente relevantes ao tema, como é o caso das Harmônicas, que podem gerar significativos danos a todo o sistema elétrico, seja ele industrial ou de distribuição.

Harmônicas

As Harmônicas podem ser caracterizadas como distúrbios ou distorções na forma de onda de corrente e tensão, que se somam à frequência fundamental, em que esta possui uma forma senoidal pura com frequência de 60hz, enquanto as demais ordens de distorções harmônicas contêm frequência que são múltiplos inteiros da fundamental, algo que mantém as características senoidais (figura 2).

Quando as diversas ordens de Harmônicas se somam à fundamental, resulta-se um sinal ruidoso, que foge das características do sinal ideal para a alimentação de componentes elétricos, o que tem a possibilidade de causar inúmeros problemas para as instalações e seus equipamentos.

Segundo Moreno (2019), existem três tipos de distorções harmônicas: as de ordem ímpares, as de ordem par, e as nulas. As ímpares são mais comuns de serem encontradas em instalações elétricas em geral, e as pares existem quando ocorrem desequilíbrios do sinal devido à presença de componente contínua, como em instalações alimentadas em corrente contínua (metrô, ferrovias etc.).

Figura 2 - Distorções harmônicas.

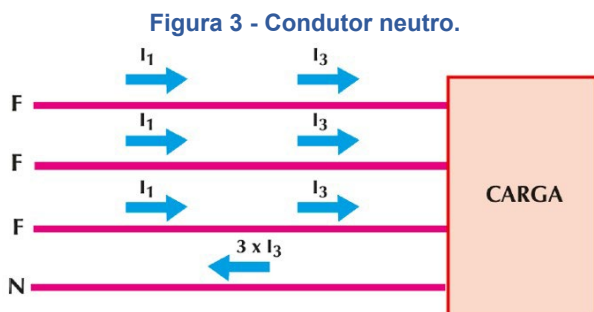
Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	$n \cdot 60$	-

Fonte: Moreno, 2019, p. 10.

Harmônicas de frequência positiva tendem a fazer motores (do tipo assíncronos trifásicos) girar no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando sobrecorrentes e aquecimentos sobre o motor, podendo reduzir sua vida útil.

As Harmônicas de sequência negativa, por sua vez, geram sobre o motor uma “indução” contrária à gerada pela frequência fundamental, causando também aquecimentos indesejados que impactam na eficiência e vida útil do motor.

Harmônicas de sequência nula (também conhecidas como homopolares) não geram efeitos no sentido de rotação do motor. Porém, somam-se algebricamente ao condutor neutro, (figura 3). Há a possibilidade de acarretar situações em correntes de terceira ordem, que circulariam sobre o condutor neutro, o que ocasionaria aquecimentos sobre ele e significativos impactos sobre bancos de capacitores.



Fonte: Moreno, 2019, p. 10.

Predominantemente, as Harmônicas são geradas pela utilização de cargas não lineares sobre o sistema elétrico.

As cargas lineares, de acordo com Moreno (2019), são caracterizadas pela utilização apenas de dispositivos resistivos, indutivos e capacitivos, os quais podem ser usados de forma isolada ou em conjunto. A utilização de algumas dessas cargas pode gerar defasagem entre a tensão e corrente (quando a carga passa a ser majoritariamente indutiva ou capacitiva), porém, não interfere sobre a forma de onda de sua alimentação (elétrica).

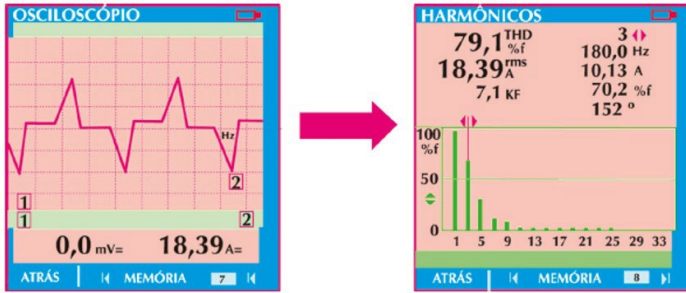
Cargas não lineares, por sua vez, são equipamentos que se utilizam de tiristores para exercer um controle sobre a carga, como por exemplo, as fontes de luminárias de LED, que através de diodos, retificam o sinal alternado da alimentação entregando uma tensão C.C. sobre os LED's, podendo controlar sua eficiência luminosa. Há também os inversores de frequência, que, com auxílio de IGBT's, convertem a tensão alternada da alimentação para uma tensão "contínua" e depois aplicam pulsos de PWM sobre outro conjunto de IGBT (alimentados pela tensão contínua antes retificada), com o intuito de variar a frequência da tensão elétrica que sai do inversor para um motor de corrente alternada, e dessa forma, controlar sua velocidade.

Espectro Harmônico

Para analisar e quantificar um sinal ruidoso contendo distorções harmônicas (sejam elas de tensão e/ou corrente), torna-se fundamental decompor este sinal por meio de série de Fourier (método matemático capaz de separar todas as distintas frequências de um sinal). Sob este prisma, a decomposição deste sinal em suas componentes harmônicas, pode ser representado graficamente por meio de barras, no qual cada barra indica uma harmônica com sua respectiva frequência, valor eficaz e defasagem. Esse espectro harmônico tem como objetivo a representação da forma de onda no domínio da frequência. Na prática, costuma-se restringir o número de harmônicas analisadas em, por volta, de 40, pois raramente as harmônicas acima dessa ordem têm relevância suficiente para afetar o funcionamento de uma instalação ou equipamento. Em sistemas elétricos, que operam predominantemente com corrente alternada, o espectro exibe apenas harmônicas de ordem ímpar e nulas, enquanto as harmônicas de ordem par são observadas em instalações que apresentam sinais deformados em corrente contínua.

A figura 4 representa, graficamente, uma onda com grande deformação (do lado esquerdo) e seu Espectro Harmônico em forma de gráfico à direita, em que as barras representam as amplitudes das correntes que compõem esse sinal, salientando que a primeira barra corresponde à frequência fundamental, enquanto as demais barras representam as diferentes ordens de distorção harmônica encontradas no sinal.

Figura 4 - Onda com grande deformação.



Fonte: Moreno, 2019, p. 11.

Taxa de distorção harmônica Total (THD)

Através dos valores de cada ordem de distorção harmônica, utilizando-se de procedimentos quantitativos, é possível obter indicadores que demonstrem sua influência sobre a frequência fundamental.

Dentro de uma perspectiva ideal, os sistemas elétricos apresentariam índices de distorção (THD) próximos à zero. Porém, no Brasil ainda não existem limites padronizados para o valor de THD em instalações internas dos consumidores. Como alternativa, é recomendável seguir os limites máximos estipulados pela norma IEEE 519, que define dois tipos de THD: um relacionado à tensão (THDV) e outro à corrente (THDI), as quais medem, respectivamente, a proporção que as formas de onda de tensão e corrente estão distorcidas em relação a uma senoide perfeita.

Distorção Harmônica de Tensão Total (THDV OU THDU)

Equação 1

$$THDV = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h \max} V_h^2}{V_1^2}} * 100\%$$

Distorção Harmônica de Corrente Total (THDI)

Equação 2

$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h \max} I_h^2}{I_h^2}} * 100\%$$

A distorção na corrente, representada por THDI, é causada pelas cargas conectadas à instalação. Já a distorção na tensão (THDU), é resultado da ação da fonte de energia, que se deforma devido à circulação das correntes distorcidas no sistema.

Como complemento ao abordado, a tabela a seguir foi baseada na norma IEEE 519 e refere-se ao nível máximo de distorção de corrente harmônica em porcentagem, para sistemas elétricos com tensão de alimentação entre 120V e 69KV.

Tabela 1 - Sistemas elétricos.

Máxima distorção de corrente Harmônica em% I(I)						
Ordem da harmônica individual (harmônicas ímpares)						
I(cc)/I(L)	<11	11≤ h <17	17≤ h <23	23≤ h <35	35≤ h	TDD
<20	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
As harmônicas pares são limitadas a 25% dos limites das harmônicas ímpares indicadas acima						
*Todo equipamento de geração está limitado a esses valores de distorção de corrente independentemente da relação I(cc)/I(L)						
Onde:						
I(cc): Máxima corrente de curto-circuito no ponto de conexão						
I(L): Máxima corrente de projeto (da componente fundamental) no ponto de conexão						

Fonte: IEEE 519, n.d.

Valor eficaz de um sinal harmônico

Determinar o valor eficaz de um sinal é fundamental para selecionar corretamente os componentes de um circuito, como cabos, transformadores e dispositivos de proteção. Quando as formas de onda de corrente apresentam distorções – ou seja, incluem harmônicas de várias ordens (1ª, 2ª, 3ª, 4ª, ..., n) –, o valor eficaz total do sinal pode ser obtido ao somar as contribuições de todas essas componentes.

Equação 3

$$I_{rms} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}$$

De forma semelhante, em sinais de tensão distorcidos, o valor eficaz é determinado a partir das componentes harmônicas de ordem 1 até n, conforme exemplificado abaixo:

Equação 4

$$U_{rms} = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_n^2}$$

Fator de potência e $\cos\varphi$

É comum tratar o fator de potência (fp) e o cosseno de φ ($\cos\varphi$) como sinônimos. No entanto, apenas é correto quando os sinais elétricos são senoidais puros, não tendo a existência de harmônicas no circuito. O fator de potência total (fp) é definido como a razão entre a potência ativa e a potência aparente de um sinal periódico com distorções:

Equação 5

$$fp = \frac{P(W)}{S(VA)}$$

Já o $\cos\varphi$, é calculado individualmente para cada componente harmônica senoidal, como a razão entre a potência ativa e a potência aparente dessa componente:

Equação 6

$$\cos\varphi = \frac{P_{hn}(W)}{S_{hn}(VA)}$$

Na prática, costuma-se medir o $\cos\varphi$ da componente fundamental e o fator de potência total do sinal distorcido. Se houver grande diferença entre esses dois valores, indicará a presença significativa de harmônicas na corrente e/ou na tensão. Esse fenômeno pode causar o aquecimento excessivo nas instalações e, principalmente, falhas em bancos de capacitores. Por outro lado, valores próximos de fp e $\cos\varphi$ sinalizam uma baixa presença de harmônicas no sistema.

Fator de desclassificação de transformadores (K)

Como disserta Moreno (2019), subestações são particularmente sensíveis às correntes harmônicas, acarretando aquecimento excessivo e falhas nos seus equipamentos. Tradicionalmente, a potência nominal e a dissipação térmica de um transformador são calculadas assumindo que as cargas são lineares (sem harmônicas). No entanto, em prática, os transformadores quase sempre operam com correntes distorcidas, o que eleva a temperatura interna e aumenta o risco de falha.

Existem dois fatores úteis para considerar a presença de harmônicas em transformadores: um voltado para transformadores já instalados e outro usado no dimensionamento de novos transformadores.

Fator K para transformadores existentes

O fator de desclassificação K de um transformador em operação indica o quanto sua potência máxima deve ser reduzida devido à presença de correntes harmônicas. A fórmula mais comum para calcular esse fator é:

Equação 7

$$K = \frac{I_{pico}}{I_{rms}\sqrt{2}} = \frac{FC}{\sqrt{2}}$$

Em vista disso, a potência máxima que esse transformador pode fornecer é, pois, ajustada para:

Equação 8

$$S_{max} = \frac{S_{nom}}{K}$$

Para aplicar essa fórmula, deve-se medir o valor de pico e o valor eficaz da corrente elétrica em cada fase do transformador, calcular a média desses valores e, em seguida, utilizar a equação acima. Equipamentos específicos para análise de harmônicas tornam essa medição mais prática e precisa. Como exemplo, supõe-se que um transformador de 1.000 kVA (S_{nom}) tenha fator $K = 1,2$. Assim, sua nova potência máxima permitida será:

Equação 9

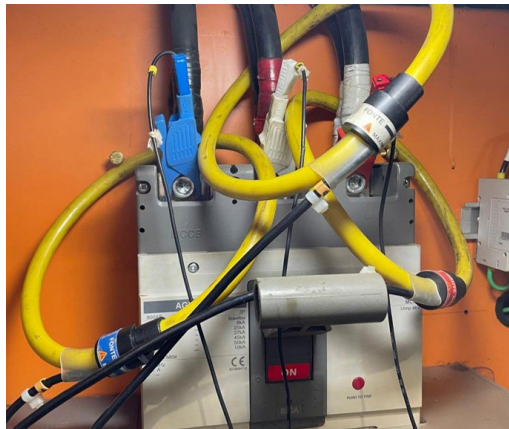
$$S_{max} = \frac{1000}{1,2} = 833kVA$$

É válido e importante ressaltar que esta fórmula fornece uma estimativa aproximada, pois não são consideradas todas as harmônicas. Ainda assim, ela oferece uma positiva aproximação da potência segura que pode ser fornecida por um transformador sujeito à distorção de corrente.

ANÁLISE DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA EMPRESA DO RAMO DE IMPLEMENTOS AGRÍCOLAS

Para a realização deste estudo, foram selecionados dois setores de uma indústria do ramo de implementos agrícolas, que possuem equipamentos com relevante potência de cargas não lineares instaladas. Onde foram coletadas medições de grandezas físicas de forma cíclicas e analisadas conforme direcionado pelas normas vigentes.

A análise da qualidade de energia elétrica foi realizada mediante a instalação de um “Registrador de grandezas elétricas” com um conjunto de alicates flexíveis, para medição de corrente elétrica, de 190mm de diâmetro (figura 5) e a relação de transformação à 300/5A, escala de tensão de 1:1.

Figura 5 - Registrador de grandezas elétricas.

Fonte: autoria própria.

Para atender às recomendações indicadas no Módulo 8 da Prodist, de como gerar indicadores de qualidade de energia (itens 79 ao 88) o registrador foi configurado para realizar, de forma cíclica, a cada 2 minutos uma medição sobre o sistema e armazenar essas leituras de forma consecutiva em um período de 7 dias por ponto de coleta de dados. No sétimo dia, os dados contidos no registrador foram coletados para serem analisados com o auxílio do software “ANAWIN” disponibilizado pelo fabricante do registrador.

Esta coleta de dados teve como objetivo obter os seguintes dados:

- Valores médios (fase-neutro) para tensão, corrente THDv e THDi;
- Valores máximos para tensão, corrente THDv e THDi;
- Valores totalizados medidos: Para consumo ativo, reativo e fator de potência;
- Geração do Espectro Harmônico, utilizando-se do software “ANAWIN”;

O setor 1 é um setor composto, em sua maioria, por máquinas CNC's (Comando Numérico Computadorizado) como Tornos, Centros de usinagem, Centro de Torneamento e Corte a Plasma. Sua potência instalada é de aproximadamente 288 kW, sendo alimentado por um transformador de 300kVA em 220V.

Como causas que motivaram o estudo da qualidade de energia nesse setor, há as falhas repentinas e sem origem aparentes em máquinas. Como base de exemplo, um centro de usinagem que apresenta em certos períodos o erro “Falha no suprimento de energia”, trazendo a necessidade de a operação desligar a máquina e ligá-la novamente para voltar à execução de seu processo e compressores que apresentam excesso de aquecimento, que ocasionam falhas indesejadas.

Valores médios medidos no período:

Tensão Fase Neutro eficaz:

Fase A-132,36V; Fase B-131,60V; Fase C-131,81V

Corrente de linha eficaz:

Fase A-174,44A; Fase B-164,40A; Fase C-197,58A

Distorção Harmônica total de Tensão:

Fase A-2,60%; Fase B-3,49%; Fase C-3,53%

Distorção Harmônica Total de Corrente:

Fase A-20,05%; Fase B-29,09%; Fase C-21,42%

Valores máximos medidos no período:

Tensão Fase Neutro eficaz:

Fase A-135,18V; Fase B-133,56V; Fase C-134,02V

Corrente de linha eficaz:

Fase A-437,24A; Fase B-446,74A; Fase C-455,95A

Distorção Harmônica total de Tensão:

Fase A-3,50%; Fase B-5,20%; Fase C-5,90%

Distorção Harmônica Total de Corrente:

Fase A-59,70%; Fase B-68,30%; Fase C-54,30%

Frequência: 60,12 Hz

Demanda Fora ponta: 165,02kW

Demanda ponta: 132,54kW

Valores Totalizados medidos:

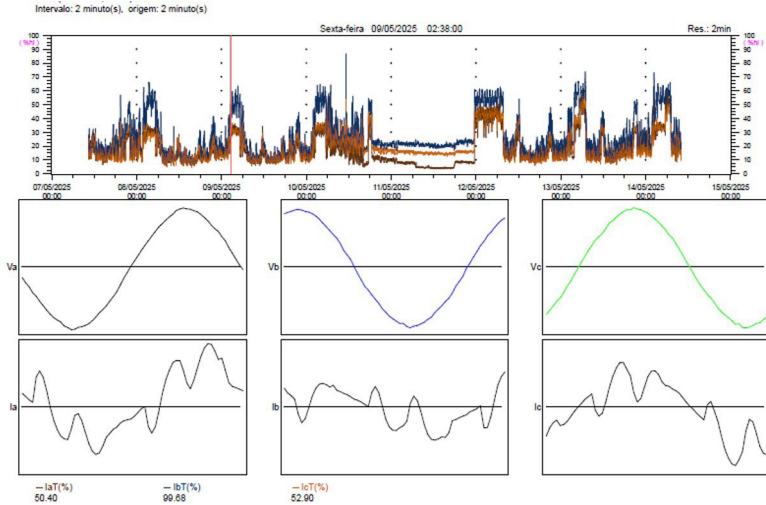
Consumo ativo total: 11.154 kWh

Consumo reativo total: 2.644,7 kWh

Fator de potência: 97,3% indutivo

A figura 5 retrata, na parte superior, o gráfico da THDi obtido através das medições durante os 7 dias; já a parte inferior demonstra em sequência seis quadros, cada um com a forma de onda medida em um ciclo de tensão ou de corrente de cada fase (V_a , $I_a - V_b$, $I_b - V_c$, I_c) a partir de um determinado instante, em que é possível constatar que a forma de onda, a qual deveria ser puramente senoidal, encontra-se com adição de distorções harmônicas, o que “desregula” a forma de onda fundamental.

Figura 5 - Gráfico da THDi.

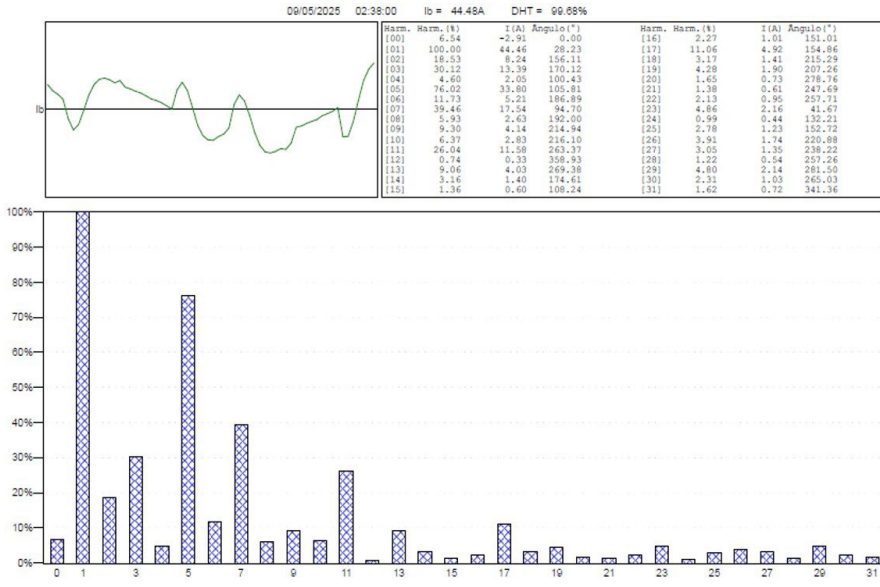


Fonte: autoria própria.

A figura 6 tem como objetivo de escolha demonstrar o espectro harmônico extraído da corrente da fase B em um dos instantes de maior distorção (às 02:38:00 h do dia 09/05/2025).

É possível observar que, no instante analisado, foi constatado uma THDi de 99,68%. Para as normas nacionais, ainda não existe um limite estipulado, porém, tendo como base a IEEE 519, deveria ser de no máximo 4%.

Figura 6 - Espectro harmônico de corrente.



Fonte: autoria própria.

O setor 2, por sua vez, é composto por: máquinas de solda (fontes Mig-Mag inversoras e eletrônicas); dois compressores de ar, um com motor síncrono de 100 HP com controle de partida e funcionamento por inversor de frequência, e outro com motor de 40CV e partida com Soft- Starter; circuitos de iluminação com 120 luminárias de LED (modelo “High Bay” com 136W de potência por luminária); entre outras cargas. Ademais, o setor possui uma potência instalada de aproximadamente 649kW e faz parte de um circuito alimentado por um transformador de 500kVA em 380V.

Entre as causas que levaram a realização da análise de distorção harmônica neste setor, está a existência de corrente de retorno sobre o neutro e o fato de haver equipamentos não lineares instalados no setor.

Valores médios medidos no período:

Tensão Fase Neutro eficaz:

Fase A-225,92V; Fase B-223,76V; Fase C-227,75V

Corrente de linha eficaz:

Fase A-165,68A; Fase B-145,63A; Fase C-157,96A

Distorção Harmônica total de Tensão:

Fase A-2,64%; Fase B-3,28%; Fase C-3,05%

Distorção Harmônica Total de Corrente:

Fase A-12,39%; Fase B-13,70%; Fase C-14,45%

Frequência: 60,00Hz

Valores máximos medidos no período:

Tensão Fase Neutro eficaz:

Fase A-231,31V; Fase B-230,35V; Fase C-233,88V

Corrente de linha eficaz:

Fase A-536,56A; Fase B-417,58A; Fase C-450,55A

Distorção Harmônica total de Tensão:

Fase A-4,50%; Fase B-5,50%; Fase C-4,70%

Distorção Harmônica Total de Corrente:

Fase A-43,00%; Fase B-49,50%; Fase C-46,70%

Frequência: 60,14 Hz

Demanda Fora ponta: 245,09kW

Demanda ponta: 163,58kW

Valores Totalizados medidos:

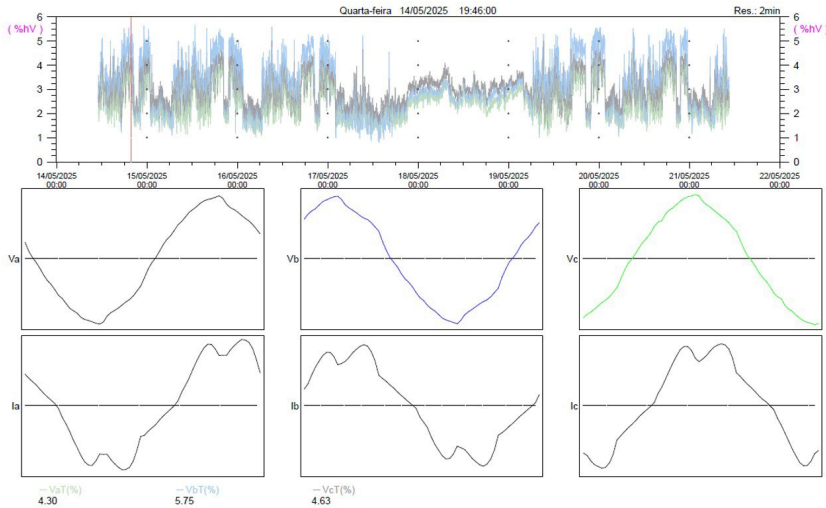
Consumo ativo total: 15.377 kWh

Consumo reativo total: 7.599,5 kWh

Fator de potência: 89,6% indutivo.

Observando, em sequência, a imagem 7, constata-se que, para setor industrial estudado, em nenhum momento das medições os limites de THDv previstos no módulo 8 da PRODIST foram excedidos. Desta forma, o THDv encontra-se dentro dos padrões aceitáveis.

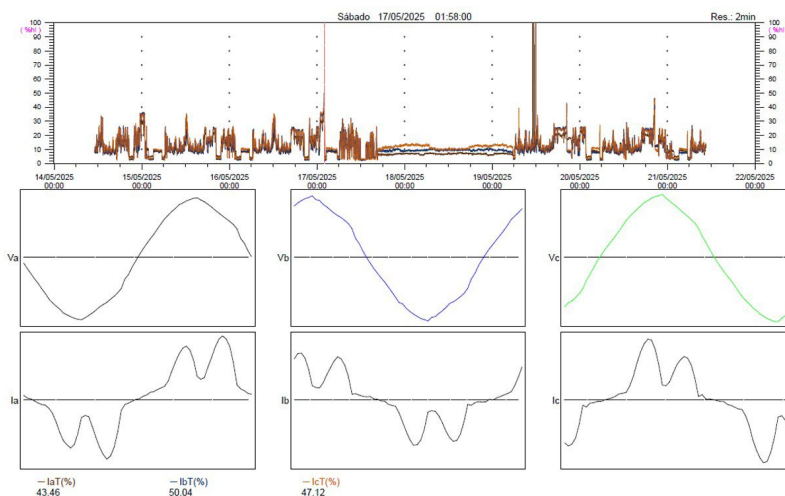
Figura 7 - Gráfico de DHTv no setor 2.



Fonte: autoria própria.

No entanto, observando o gráfico de THDi da figura 8 constata-se que os níveis de distorção harmônica sobre a corrente, encontrasse continuamente elevados se considerarmos a norma IEC 519. Tendo uma THDi média em torno de 14% com momentos que chegam a 40%, gerando notórias distorções na forma de onda.

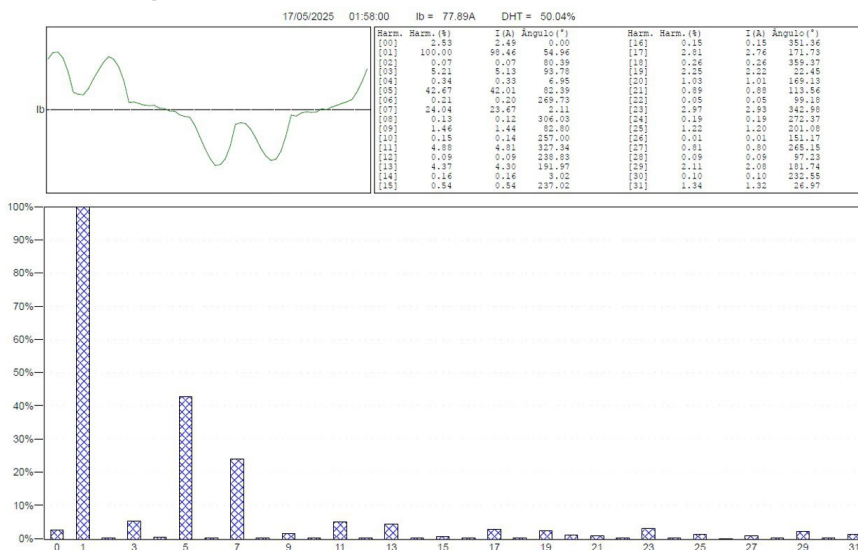
Figura 8 - Gráfico de DHTi no setor 2.



Fonte: autoria própria.

Em contínuo, a imagem 9 demonstra o Spectro harmônico em um dos momentos de pior DHTi, o que certifica as ordens da distorção que mais impactam no sistema: as de 3ª, 5ª e 7ª ordem.

Figura 9 - Espectro harmônico de corrente no setor 2.



Fonte: autoria própria.

PROPOSIÇÃO DE MELHORIAS PARA MITIGAÇÃO DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS

A análise detalhada dos dados coletados nos setores 1 e 2 da planta industrial revelou níveis críticos de distorção harmônica, especialmente nas ordens de terceira e quinta. A Distorção Harmônica Total de Corrente (THDi) chegou a atingir valores de até 99,68%, superando em grande escala o limite recomendado pela norma IEEE 519, que estipula valores de referência entre 5% e 20%, conforme o nível de tensão do sistema (IEEE, 2014).

Diante do exposto, foram elaboradas propostas de intervenção com base em documentos técnicos consolidados, como os guias da Leonardo Energy, e normas internacionais, para restabelecer os níveis de qualidade da energia elétrica.

Aplicação de Filtros Passivos Sintonizados

Diante dos resultados obtidos, em que se evidenciou a predominância das harmônicas de terceira, quinta e sétima ordem, a utilização de filtros passivos sintonizados surge como uma solução técnica eficaz e economicamente viável para mitigar essas distorções.

Filtros passivos são circuitos compostos por elementos indutivos e capacitivos (LC), projetados para apresentar impedância mínima em uma frequência harmônica específica, funcionando como “caminhos preferenciais” para a circulação das correntes harmônicas e, assim, impedindo que essas retornem à rede de alimentação. A forma mais comum de implementação é o circuito LC série, também denominado “Circuito Receptor Sintonizado”, cuja frequência de ressonância é definida conforme a equação 10, sintonizada para as ordens harmônicas alvo (Fassbinder, 2003).

Equação 10

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

Quando aplicado corretamente, o tipo de filtro comentado apresenta baixa impedância para a frequência harmônica de interesse, desviando a corrente gerada pela carga e impedindo sua circulação pelas instalações e pela rede. A ação resulta em significativa redução da Distorção Harmônica Total (THD) da corrente e, por consequência, da tensão, o que traz melhorias à qualidade da energia elétrica no ponto de conexão.

Em ensaios práticos, como o apresentado por Fassbinder (2003), foi demonstrado que filtros projetados para 150 Hz e 250 Hz, quando aplicados em paralelo a cargas com distorção provocada por dimmers e televisores, reduziram o THD da corrente de 61% para aproximadamente 37%, com grande contribuição dos circuitos sintonizados para terceira e quinta harmônicas. Tais resultados demonstram a efetividade dos filtros, mesmo em condições de desequilíbrio entre as fases ou em redes monofásicas.

Para o cenário do presente estudo, recomenda-se a instalação de dois circuitos receptores sintonizados: um para 150 Hz (terceira harmônica) e outro para 250 Hz (quinta harmônica). A seleção cuidadosa dos componentes reativos (indutores e capacitores) trazer atenção não apenas à frequência de ressonância, mas também à qualidade dos materiais envolvidos, a fim de evitar perdas por histerese e correntes parasitas, as quais comprometem a eficiência do filtro e elevam a dissipação térmica. A escolha de reatores com baixa resistência ôhmica é fundamental para garantir um alto fator de qualidade (Q), o que reflete maior seletividade e eficácia na filtragem das harmônicas (Fassbinder, 2003).

Além disso, destaca-se que a implementação de filtros passivos pode ser combinada com a função de compensação reativa. Capacitores dessintonizados (com reatores em série) não apenas corrigem o fator de potência; também evitam situações de ressonância com a rede elétrica, um risco comum em instalações que utilizam capacitores simples sem controle harmônico.

Por fim, é essencial considerar o local de instalação dos filtros – centralizado ou distribuído – conforme as características da planta. Filtros distribuídos tendem a apresentar melhor desempenho técnico, pois atuam diretamente na origem das distorções, reduzindo as correntes harmônicas locais e minimizando a circulação destas pelo sistema. No entanto, essa abordagem exige maior investimento e

cuidados com o projeto para evitar interações indesejadas entre os filtros (Fassbinder, 2003). Já os filtros passivos sintonizados, apresentam-se como uma solução robusta, eficiente e acessível para o controle das harmônicas de terceira e quinta ordem, promovendo melhor desempenho dos sistemas elétricos e contribuindo para a conformidade com normas de qualidade de energia.

Aplicação de Filtros Ativos de Harmônicas

Mediante a análise realizada, e considerando um cenário com maior investimento para mitigação das distorções encontradas, outra solução seria a implementação de filtros ativos de harmônicas, os quais apresentam excelente desempenho na atenuação seletiva e dinâmica dessas componentes indesejadas.

Ao contrário dos filtros passivos, que possuem ressonância fixa e são eficazes apenas para frequências específicas, os filtros ativos atuam por meio de dispositivos eletrônicos de potência, como os IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistors), combinados com controladores digitais (DSP), capazes de detectar e injetar correntes compensatórias em tempo real, anulando as harmônicas geradas pelas cargas e mantendo a forma de onda da corrente de alimentação praticamente senoidal (Karve, 2002).

Essa tecnologia permite, a título de ilustração, que o sistema de filtragem atue exclusivamente sobre as harmônicas de 3ª e 5ª ordem, conforme a necessidade identificada, maximizando a eficiência do dispositivo e reduzindo o consumo energético do próprio filtro. Conforme relatado por Karve (2002), a aplicação de filtros ativos em cargas do tipo PC (personal computer) permitiu a redução da Distorção Harmônica Total da Corrente (DHTi) de 92,6% para apenas 2,9%, com redução de até 21% na corrente eficaz. Em cargas com elevados níveis de 5ª e 7ª harmônicas, como os acionamentos de velocidade variável, foi observada uma redução de DHTi de 124% para 13,4%, o que evidencia a alta efetividade da tecnologia também em ambientes industriais.

Ademais, filtros ativos apresentam as seguintes vantagens técnicas, conforme sistematizado no guia:

- Capacidade de adaptação automática às variações no espectro harmônico da carga;
- Ausência de risco de ressonância com o sistema elétrico;
- Possibilidade de atuação seletiva por ordem harmônica;
- Operação contínua mesmo em regime de sobrecarga parcial, sem degradação dos componentes;
- Contribuição na melhoria do fator de potência da instalação (Karve, 2002).

Outrossim, a flexibilidade de instalação desses filtros é um diferencial relevante. Eles podem ser conectados de forma centralizada, no ponto de acoplamento comum (PCC), para compensação global das correntes harmônicas, ou de forma distribuída, próximos às cargas poluentes, assegurando compensação localizada com maior precisão e eficiência. Configurações em cascata ou derivação

permitem escalabilidade e redundância, adaptando-se tanto a expansões de carga quanto à realocação de equipamentos sem a necessidade de reconfiguração da infraestrutura elétrica (Karve, 2002).

Portanto, a adoção de filtros ativos de harmônicas se mostra uma solução moderna, precisa e adaptável ao problema de distorção de terceira e quinta ordem identificados, atendendo aos requisitos de qualidade de energia e às exigências normativas vigentes.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir do objetivo proposto que foi abordar o impacto das harmônicas nos sistemas elétricos industriais, com ênfase na identificação, análise e soluções para mitigar seus efeitos adversos este trabalho evidenciou índices significativos das distorções harmônicas de terceira e quinta ordem nos sistemas elétricos industriais, em que se afeta diretamente a confiabilidade e a vida útil de equipamentos. Através do estudo de caso, foi possível verificar a necessidade de intervenções técnicas para mitigar as consequências.

As soluções propostas, envolvendo filtros passivos sintonizados e filtros ativos de harmônicas, mostraram-se tecnicamente viáveis e eficientes, oferecendo caminhos complementares para o controle da qualidade da energia. Ambas as soluções contribuem para a conformidade normativa e para a melhoria da eficiência energética, tendo como escolha dentre elas a depender do orçamento disponível, perfil da carga e grau de flexibilidade requerido.

Com este propósito, o presente estudo reforça a importância do monitoramento contínuo da qualidade da energia elétrica como ferramenta estratégica para a sustentabilidade operacional e energética das indústrias, sobretudo diante do crescimento no uso de cargas não lineares.

REFERÊNCIAS

ABESCO. **Release Congresso COBEE**. Disponível em: <https://www.abesco.com.br/tabelas-de-consumo-/release-congresso--cobee>. Acesso em: 16 abr. 2025.

DESMET, Jan; BAGGINI, Angelo. **Dimensionamento do neutro em instalações com harmônicas**. Guia 3.5.1. Leonardo Power Quality Initiative, jun. 2003. Disponível em: <https://abcobre.org.br/wp-content/uploads/2021/12/qe14-guia-3-5-1-dimensionamento-neutro-instalacoes-com-harmnicas.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2025.

FASSBINDER, Stefan. **Filtros passivos harmônicas**. Guia 3.3.1. Leonardo Power Quality Initiative, jun. 2003. Disponível em: <https://abcobre.org.br/wp-content/uploads/2021/12/qe11-guia-3-3-1-filtros-passivos-harmnicas.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2025.

GARCIA, Flávio Resende. **Harmônicos em sistemas industriais: uma cooperação entre concessionária e consumidor**. O Setor Elétrico, jul. 2008. Disponível em: <https://abccobre.org.br/wp-content/uploads/2022/01/qet01-harmonicos-sistemas-industriais-cooperacao-concessionaria-consumidor.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2025.

MAMEDE FILHO, João. **Instalações elétricas industriais**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2019.

MORENO, Hilton. **Harmônicas nas instalações elétricas: causas, efeitos e soluções**. São Paulo: Procobre, 2019.

OLESKOVIEZ, Mário. **Qualidade da energia elétrica**. 2007. 80 f. Apostila utilizada na disciplina “Qualidade da Energia Elétrica – SEL0409”, 2º semestre de 2023 – ministrada pelo Prof. Dr. Mário Oleskoviez. São Carlos: LAMQEE – Laboratório de Análise e Monitoramento da Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7971204/mod_resource/content/1/Apostila.pdf. Acesso em: 10 nov. 2024.

SILVA, Fernando Victor da. **Estudo de cargas não lineares na qualidade de energia elétrica**. Trabalho de Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá, 2024. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/1f017a3b-00b8-44fc-a18f-04f6e1f17b91/content>. Acesso em 29 abr. 2025.