

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Renata Berwanger Schmidt

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA:  
DISTRORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA USINA  
SIDERÚRGICA**

Porto Alegre  
2022

Renata Berwanger Schmidt

# **ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA: DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM UMA USINA**

Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Tiarajú dos Reis Loureiro.

Porto Alegre  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Renato e Cecília, que me incentivaram e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho. Agradeço também a minha irmã, Lara, ao meu namorado, Leonardo, aos meus familiares e aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado, pelo apoio demonstrado ao longo de todo o período de tempo em que me dediquei a este trabalho.

Agradeço ao professor Luiz Tiarajú, por ter sido meu orientador e ter desempenhado tal função com dedicação. Agradeço igualmente ao Silva, que me ensinou e me auxiliou nos experimentos deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos que participaram, direta ou indiretamente do desenvolvimento deste trabalho, enriquecendo o meu processo de aprendizado e também às pessoas com quem convivi ao longo desses anos de curso, que me incentivaram e que certamente tiveram impacto na minha formação acadêmica.

## RESUMO

O conceito de qualidade de energia elétrica (QEE) evoluiu em conjunto com a utilização da energia. Com a evolução, o aumento da automatização dos sistemas contribuiu com o aumento de cargas não lineares no sistema elétrico, provocando distúrbios tanto para os consumidores quanto para os distribuidores de energia elétrica. O trabalho trata de um estudo de caso prático na laminação de uma usina siderúrgica no Rio Grande do Sul em que se observaram parâmetros de qualidade de energia elétrica utilizando um medidor de grandezas elétricas. Devido a existência de um grande número de cargas não lineares na instalação, o trabalho tem como objetivo analisar a qualidade de energia focando em distorções harmônicas. Foram feitas medições em um ponto estratégico da instalação considerando a alimentação e as cargas de baixa tensão compostas por dois motores de corrente contínua de 400 kW para entender o impacto das mesmas nesse ponto do sistema elétrico. As medições foram analisadas de acordo com as normas vigentes estabelecidas pelo *módulo 8* do PRODIST elaborado pela ANEEL e pela norma IEEE Std 519 -2014. O estudo em questão tem como abrangência a possibilidade de ser expandido para o resto do pavilhão de laminação para verificação de qualidade de energia pensando na mitigação dos impactos causados por distúrbios.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Curva CBEMA com limites de duração de sub e sobretensões.
- Figura 2 - Curva ITIC com limites de duração de sub e sobretensões.
- Figura 3 - Gráfico de um transitório impulsivo causado por descarga atmosférica.
- Figura 4 - Sinal de corrente apresentando um transitório oscilatório gerado pela energização de um capacitor.
- Figura 5 - Sinal de tensão RMS de três fases com interrupção momentânea.
- Figura 6 - Afundamento de tensão causado por partida de motor de indução.
- Figura 7 - Representação de uma forma de onda com cintilação.
- Figura 8 - Forma de onda com fenômeno de cortes de tensão (*notching*).
- Figura 9 - Gráfico de tensão e corrente de uma carga não linear.
- Figura 10 - Onda fundamental e ondas com harmônicos.
- Figura 11 - Sequências de fasores positiva, negativa, zero.
- Figura 12 - Correntes presentes no neutro de ligações estrela com cargas não lineares.
- Figura 13 - Representação das potências.
- Figura 14 - Forma de onda da comutação de um retificador trifásico.
- Figura 15 - Distorção na onda de tensão devido ao fenômeno de comutação.
- Figura 16 - Acionamentos com drive de corrente contínua (CC).
- Figura 17 - Retificador de 6 pulsos utilizado em acionamentos CC e representação da tensão de saída que alimenta a carga.
- Figura 18 - Formas de onda de acordo com o ângulo de disparo.
- Figura 19 - Representação de um drive de corrente alternada.
- Figura 20 - Circuito de um drive de corrente alternada dos tipos VSI (a) e CSI (b).
- Figura 21 - Diagrama de um drive de corrente alternada (CA) com a técnica de PWM.
- Figura 22 - Harmônicas geradas pelo drive CA operando em velocidade nominal e em 42% da velocidade nominal.
- Figura 23 - Tipos de filtros passivos.
- Figura 24 - Filtros amortecidos: (a) 1ª ordem; (b) 2ª ordem; (c) 3ª ordem; (d) Tipo "C".
- Figura 25 - Exemplos de filtros ativos.
- Figura 26 - Diagrama de alimentação da usina que será analisada.
- Figura 27 – Diagrama dos barramentos de entrada da subestação de alta tensão da laminação.
- Figura 28 - Equipamento Kew 6315 da Kyoritsu.

Figura 29 - Tela de distorções harmônicas do analisador de qualidade de energia Kew 6315.

Figura 30 - Transformador que alimenta as gaiolas A3 e A4.

Figura 31 - Montagem das ponteiras do analisador de energia no transformador.

Figura 32 - Diagrama unifilar das cargas denominadas gaiola A3 e gaiola A4 e ponto de medição.

Figura 33 - Montagem do analisador de energia na Gaiola A3.

Figura 34 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de tensão (DHIT95%) da gaiola A3.

Figura 35 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão (DTT) da gaiola A3.

Figura 36 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão (DTT) versus corrente da gaiola A3.

Figura 37 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de tensão (DHIT95%) da gaiola A4.

Figura 38 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão (DTT) da gaiola A4.

Figura 39 - Gráfico de distorção harmônica total (DTT) versus corrente da gaiola A4.

Figura 40 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de tensão (DHIT95%) do transformador.

Figura 41 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão do transformador.

Figura 42 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão (DTT) versus corrente do transformador.

Figura 43 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de corrente (DHII95%) da gaiola A3.

Figura 44 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de corrente P95% da gaiola A4.

Figura 45 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de corrente P95% do transformador.

Figura 46 - Exemplo de um filtro passivo sintonizado monofásico.

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sequência positiva, negativa e zero das harmônicas de acordo com a frequência.

Quadro 2 - Terminologias aplicadas ao cálculo de distorções harmônicas.

Quadro 3 - Dados de placa do transformador que será analisado.

Quadro 4 - Valores de referência globais de distorções harmônicas totais em porcentagem de tensão fundamental de acordo com o módulo 8 do PRODIST.

Quadro 5 - Valores de referência de distorções harmônicas individuais e totais de acordo com a norma IEEE Std 519.

Quadro 6 - Limites de distorção individual de corrente e distorção total de demanda para sistemas com até 69kV de acordo com a norma IEEE Std 519.

Quadro 7 - Valores de distorção harmônica individual de tensão máxima, percentil 95% e média da gaiola A3.

Quadro 8 - Valores de distorção harmônica total de tensão da gaiola A3 e valor limite estabelecido pelo PRODIST.

Quadro 9 - Valores de distorção harmônica individual de tensão máxima, percentil 95% e média da gaiola A4.

Quadro 10 - Valores de distorção harmônica total de tensão máximo, percentil 95% e média da gaiola A4.

Quadro 11 - Valores de distorção harmônica individual de tensão máxima, percentil 95% e média do transformador.

Quadro 12 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão máxima, percentil 95% e média do transformador.

Quadro 13 - Valores de distorção harmônica individual de corrente máxima, P95% e média da gaiola A3.

Quadro 14 - Valores de distorção harmônica individual de corrente máxima, P95% e média da gaiola A4.

Quadro 15 - Valores de distorção harmônica individual de corrente máxima e P95% do transformador.

Quadro 16 - Valores medidos para distorção harmônica de corrente individual e valor limite definido pela norma IEEE Std 519 – 2014.

Quadro 17 - Valores de distorção total de demanda do transformador.

Quadro 18 - Valores de potência, tensão e corrente nominal do transformador.

Quadro 19 - Cálculo do "fator k".

Quadro 20 - Valores de potência ativa, reativa, aparente e fator de potência para dimensionamento do filtro.

**LISTA DE SIGLAS**

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica.

CA: corrente alternada.

CC: corrente contínua.

CSI: fonte de corrente inversora.

D: distorção da potência aparente.

DTD: distorção total de demanda.

$DHI_h$ : distorção harmônica individual de ordem  $h$ .

DHI95%: distorção harmônica individual de tensão em percentil 95%.

DHI95%: distorção harmônica individual de corrente em percentil 95%.

DHT: distorção harmônica total.

$DTT_p\%$ : distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3.

$DTT_1\%$ : distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3.

$DTT_3\%$ : distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3.

DTT95%: distorção harmônica total de tensão em percentil 95%.

FFT: Transformada rápida de Fourier.

FP: Fator de potência.

$I_{cc}$ : corrente de curto circuito.

IEEE Std: Institute of Electrical and Electronics Engineers Standard.

IL: corrente de demanda máxima (corrente fundamental).

P: potência ativa.

PCC: ponto de conexão comum.

PRODIST: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

PU: Sistema por unidade.

PWM: modulação por largura de pulsos.

Q: Potência reativa.

QEE: Qualidade de Energia Elétrica.

RCT: reatores controlados por tiristores.

S: Potência aparente.

VSI: fonte de tensão inversora.

## ÍNDICE

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	12
1.1 MOTIVAÇÃO E PRINCIPAIS OBJETIVOS DO TRABALHO .....	13
1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	14
<b>2. REVISÃO TEÓRICA</b> .....	14
2.1 DEFINIÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E SUA IMPORTÂNCIA .....	15
2.2 FENÔMENOS QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA .	17
2.2.1 Fenômenos transitórios impulsivos e oscilatórios .....	17
2.2.2 Variações de tensão de longa duração .....	18
2.2.3 Variações de tensão de curta duração.....	19
2.2.4 Desequilíbrio de tensão .....	20
2.2.5 Flutuação de tensão .....	20
2.2.6 Variação de frequência .....	21
2.2.7 Distorções na forma de onda .....	21
2.3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS.....	23
2.3.1 Fator de potência .....	29
2.3.2 Problemas gerados pelas distorções harmônicas .....	30
2.4 ORIGEM DAS HARMÔNICAS .....	31
2.4.1 Fontes de alimentação chaveadas .....	31
2.4.2 Acionamentos em corrente contínua (CC) .....	33
2.4.2 Acionamentos em corrente alternada (CA) .....	35
2.4.3 Fator K.....	37
2.5 NORMAS TÉCNICAS .....	38
2.6 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO .....	42
2.6.1 Filtros passivos .....	42
2.6.2 Filtros ativos .....	44
2.6.3 Projeto de filtros .....	45
<b>3. METODOLOGIA</b> .....	47
3.1 INSTRUMENTO E SOFTWARE .....	49
3.2 MÉTODO .....	51
3.2.1 Medições.....	51
3.2.2 Distorções harmônicas.....	55
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> .....	58

4.1 Análise das tensões .....	59
4.2 Análise das correntes .....	70
4.3 Análise da variação de frequência .....	76
4.4 Cálculo do fator K .....	76
4.5 Dimensionamento do filtro .....	77
<b>5. CONCLUSÕES</b> .....	<b>82</b>
<b>6. REFERÊNCIAS</b> .....	<b>84</b>

## INTRODUÇÃO

A energia elétrica possibilitou o desenvolvimento tecnológico em diversas áreas e setores. Durante muito tempo, a qualidade de energia limitou-se à quantidade de desligamentos que o sistema elétrico era submetido. Com a informatização e o desenvolvimento da eletrônica de potência nos processos de automação tanto industrial quanto residencial, surgiram novos tipos de distúrbios gerados pelo consumidor que poluem a planta elétrica causando interferências internas e propagando-se pela rede. Dessa forma, o termo qualidade de energia (QEE) inseriu-se no contexto nacional com maior intensidade, com necessidade de ser explorado e regulamentado.

O conceito de qualidade de energia pode ser definido como “a ausência relativa de variações nos níveis de tensão provocados pelo sistema da concessionária, incluindo a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, transitórios e harmônicas medidas no ponto de entrega da energia” (GAMA; OLIVEIRA, 1999). Os principais problemas enfrentados pela qualidade de energia, em regime permanente ou transitório, são a tensão, o fator de potência, os harmônicos, o desequilíbrio de tensão, a flutuação de tensão, a variação de frequência e as variações de tensão de curta duração (PRODIST, 2021).

As cargas não lineares são amplamente utilizadas em processos industriais por permitirem um controle otimizado do fluxo de energia. A relação entre a corrente e a tensão dessas cargas não é proporcional, fazendo com que ocorra uma distorção nas ondas quando comparadas a senoide de tensão original. Portanto, a utilização dessas cargas não lineares acarreta em perturbações na qualidade de energia elétrica. Essas perturbações podem ser responsáveis por falhas nos equipamentos e desencadear problemas na produção. Computadores e equipamentos que utilizam eletrônica são mais sensíveis a pequenas variações na qualidade de energia, e o comprometimento da vida útil de componentes elétricos pode ser uma consequência dos distúrbios na qualidade de energia.

A circulação da corrente distorcida pelas impedâncias da instalação elétrica provoca distorções nas formas de onda de corrente e tensão e são conhecidas como distorções harmônicas. As distorções harmônicas são uma combinação de componentes de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (no caso desse trabalho, 60 Hz). O fato de terem relacionado problemas na rede e nos equipamentos com as distorções harmônicas incentivou a criação do *módulo 8* do PRODIST e a norma *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic*

*Control in Electric Power Systems* - IEEE Std 519 2014. Ambas tratam a respeito da qualidade de energia e de práticas recomendadas e requisitos para controle de distorções harmônicas em sistemas de potência.

A análise da qualidade da energia elétrica tem como objetivo inicialmente identificar distúrbios e as causas para então apresentar as soluções mais viáveis buscando minimizar as consequências dos problemas de qualidade de energia. Nas indústrias esses problemas podem ocasionar impactos como a perda de produção com a geração de sucata e o reparo ou substituição de componentes danificados. Portanto, ao encontrar um problema na qualidade de energia e sanar o mesmo, se pode esperar resultados relevantes como economia de energia, redução de custos de manutenção e aumento da confiabilidade de equipamentos.

Para identificar as possíveis perturbações presentes na qualidade de energia elétrica, deve-se utilizar um analisador de grandezas elétricas que possua algumas medições como tensão, corrente, fator de potência, medições no espectro da frequência para identificar taxa de distorção harmônica. Ao monitorar esses parâmetros da maneira indicada na norma, é possível entender os problemas presentes e traçar possíveis soluções.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E PRINCIPAIS OBJETIVOS DO TRABALHO

O processo siderúrgico é bastante complexo e o sistema elétrico está sujeito a diversas formas de geração de harmônicos. Durante a fase de revisão bibliográfica, foi possível verificar que poucos trabalhos utilizavam dados coletados a partir de um ponto específico de uma usina. Grande parte das publicações não foca em analisar as características das cargas na qualidade de energia elétrica, como a de Teixeira (2009). Portanto, o trabalho tem como objetivo entender as características das cargas não lineares e analisar o impacto das cargas não lineares no secundário do transformador que as alimenta.

Os principais objetivos do trabalho são:

- Entender como as distorções harmônicas são geradas e seu comportamento.
- Entender como as distorções harmônicas podem impactar os sistemas.
- Planejar e executar um estudo de distorções harmônicas no sistema avaliado.
- Analisar os valores medidos em busca de distorções harmônicas de tensão e corrente, utilizando cálculos e valores definidos pelas normas.
- Concluir as análises com as explicações das possíveis distorções harmônicas encontradas.

## 1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

O trabalho está dividido em cinco capítulos principais que iniciam fundamentando a base teórica para possibilitar a medição e análise dos dados coletados. O Capítulo 1 introduziu o tema do trabalho, destacando a motivação e os objetivos. O capítulo 2 aborda o tema a partir de uma revisão teórica dos tópicos explorados no trabalho, definindo o que é qualidade de energia elétrica (QEE), quais os principais distúrbios, detalha o que é e como são geradas as distorções harmônicas, assim como possíveis técnicas de mitigação.

Abordando a parte prática do trabalho, o capítulo 3 trata da metodologia utilizada no trabalho. Apresenta como o experimento foi conduzido, qual o equipamento utilizado para as medições e como deve ser conectado, assim como normas que devem ser seguidas para as medições e para a análise após a coleta. O capítulo 4 aborda as análises feitas a partir das medições conduzidas no decorrer do trabalho, e o capítulo 5 traz as conclusões observadas com o trabalho, assim como proposições para estudos futuros. Por fim, existe o referencial teórico com as fontes utilizadas como consulta para esse trabalho.

## 2. REVISÃO TEÓRICA

## 2.1 DEFINIÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E SUA IMPORTÂNCIA

Uma definição abrangente se refere a qualidade de energia elétrica (QEE) como sendo uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores. Essa medida inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com certos parâmetros considerados desejáveis para a operação segura (DECKMANN *et al.*, 2020). Existem normas que regulamentam o tipo de energia entregue pelos agentes do sistema e também normas que os consumidores devem seguir a fim de não causar distúrbios na qualidade de energia recebida.

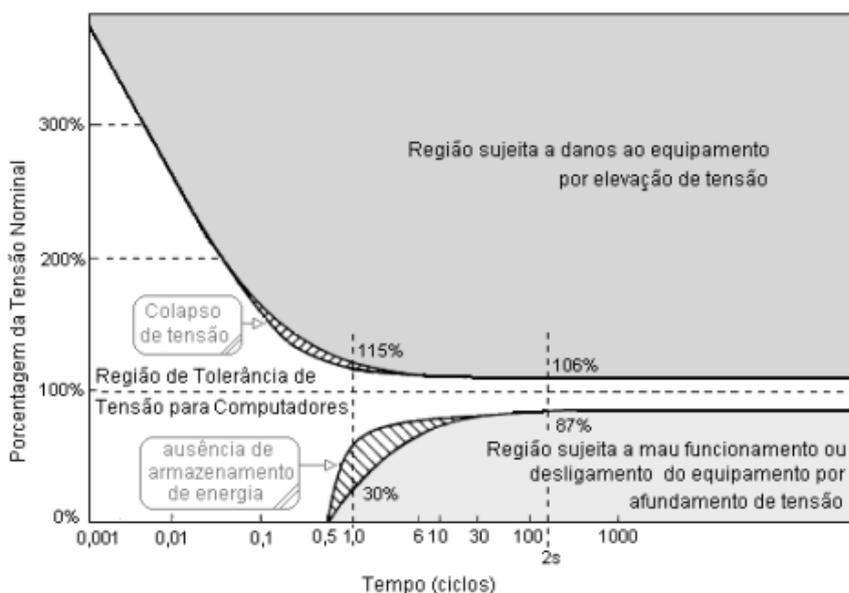
Em alguns ramos de atividade, como a siderúrgica, os impactos econômicos da qualidade da energia são enormes, justificando a importância de uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica. O intuito do estudo é determinar as causas e as consequências dos distúrbios no sistema, apresentar medidas técnica e economicamente viáveis para solucionar o problema.

A maioria dos problemas que surgem nos sistemas elétricos é causada pela excessiva distorção das correntes ou tensões junto ao consumidor final. Uma das causas deste fenômeno deve-se à crescente utilização de equipamentos eletrônicos alimentados pela rede elétrica (ALDABÓ, 2013).

A complexidade do problema da avaliação e controle da qualidade da energia suprida não resulta apenas da grande variedade de perturbações a que o sistema elétrico está sujeito. São relevantes também os variados efeitos que podem causar, desde o sobreaquecimento (aumento de perdas e de rendimento) de máquinas elétricas devido a distorções ou desequilíbrios, variações luminosas devidas a flutuações de tensão, oscilações de potência entre as cargas e a rede durante a operação de cargas não lineares e interrupções momentâneas de tensão (DECKMANN *et al.*, 2020).

Com o objetivo de uniformizar os limites de suportabilidade frente as variações da tensão de alimentação para equipamentos destinados ao processamento de dados, foram estabelecidas curvas magnitude x duração para variações de tensões abaixo e acima da nominal, formando a curva conhecida como CBEMA, apresentada na Figura 1. Em geral as sobretensões tem a ver com a ruptura do dielétrico ou o *breakdown* de semicondutores, enquanto que as subtensões se relacionam com a deficiência de energia armazenada (DECKMANN *et al.*, 2020).

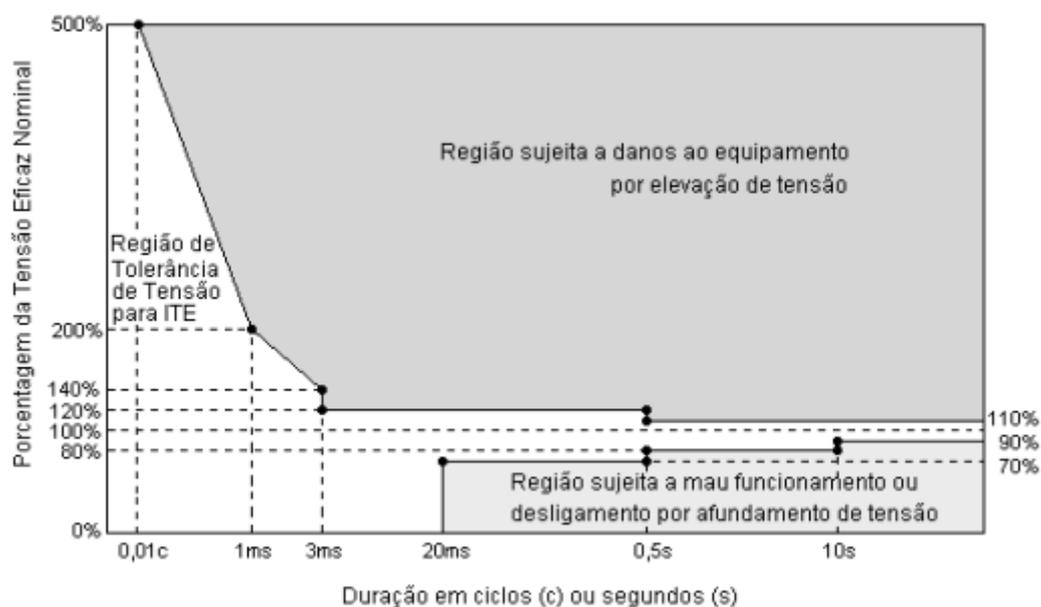
Figura 1 - Curva CBEMA com limites de duração de sub e sobretensões.



Fonte - DECKMANN *et al.*, 2020.

Uma nova versão para os limites de tolerância conhecida como ITIC (*Information Technology Industry Council*) foi introduzida e está representada na Figura 2. Essa curva é uma referência para verificação do nível de vulnerabilidade de equipamentos comparando-se a curva de sensibilidade do equipamento com a curva das variações permitidas ou observadas durante um determinado intervalo de tempo. Quanto menor a duração da perturbação, maior a alteração admitida, pois entende-se que os elementos armazenadores de energia internos ao equipamento devem ser capazes de absorvê-la. Em termos da tensão suprida, a Distorção Harmônica Total (DHT) tem um limite de 5% (DECKMANN *et al.*, 2020).

Figura 2 - Curva ITIC com limites de duração de sub e sobretensões.



Fonte - DECKMANN *et al.*, 2020.

## 2.2 FENÔMENOS QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

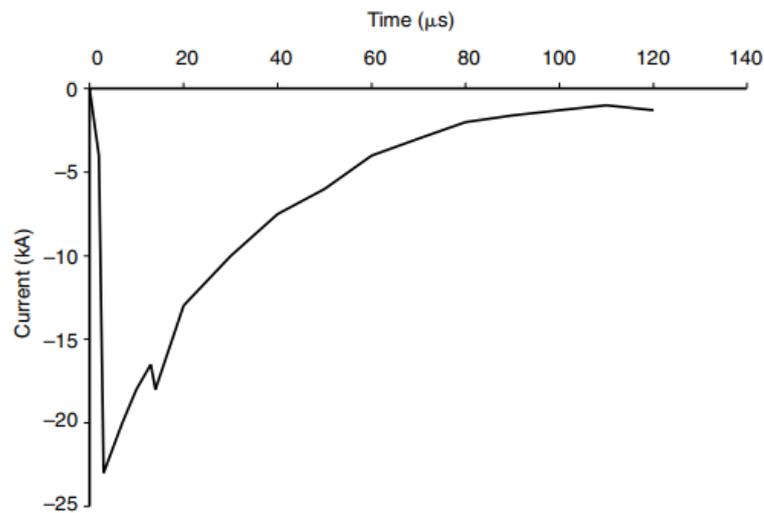
As principais perturbações elétricas em um sinal de tensão ou corrente são as perturbações na amplitude, na frequência, desequilíbrios de tensão/corrente em sistemas trifásicos e perturbações na forma de onda.

Existem algumas categorias dos fenômenos que afetam a qualidade de energia elétrica. Os eventos podem ser transitórios, o que significa indesejados e momentâneos e podem ser classificados em impulsivos ou oscilatórios. Também podem ser variações de tensão de curta e longa duração, desbalanceamento de tensão, distorções na forma de onda, flutuação de tensão e variações de frequência.

### 2.2.1 Fenômenos transitórios impulsivos e oscilatórios

Os fenômenos transitórios impulsivos são caracterizados pelo tempo de subida e descida do impulso, costumam ter apenas uma polaridade e normalmente são causados por descargas atmosféricas, pode-se observar um exemplo de representação na Figura 3.

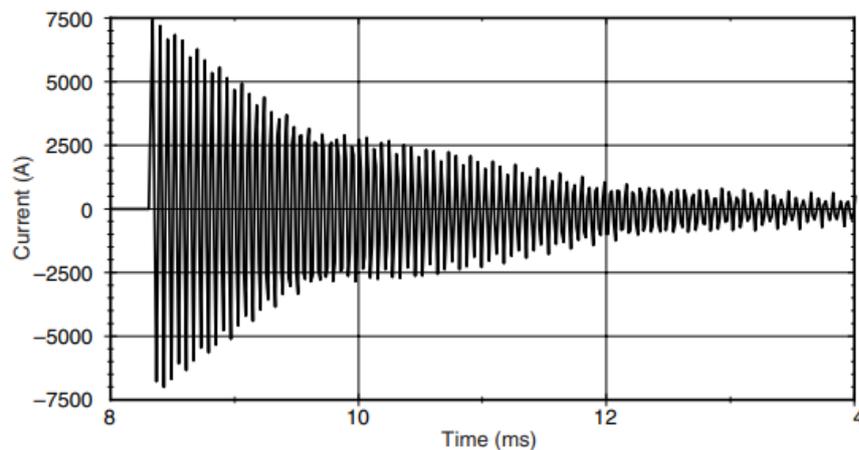
Figura 3 - Gráfico de um transitório impulsivo causado por descarga atmosférica.



Fonte – DUGAN *et al.*, 2003.

Os fenômenos transitórios oscilatórios consistem em um sinal de tensão ou corrente que instantaneamente altera a sua polaridade. Podem ser descritos pela duração, magnitude e principalmente pelo espectro de frequência, sendo classificados em altas, médias e baixas frequências. Como exemplo de médias frequências, pode-se observar os transientes oscilatórios gerados pela energização de um capacitor na Figura 4.

Figura 4 - Sinal de corrente apresentando um transitório oscilatório gerado pela energização de um capacitor.



Fonte – DUGAN *et al.*, 2003.

### 2.2.2 Variações de tensão de longa duração

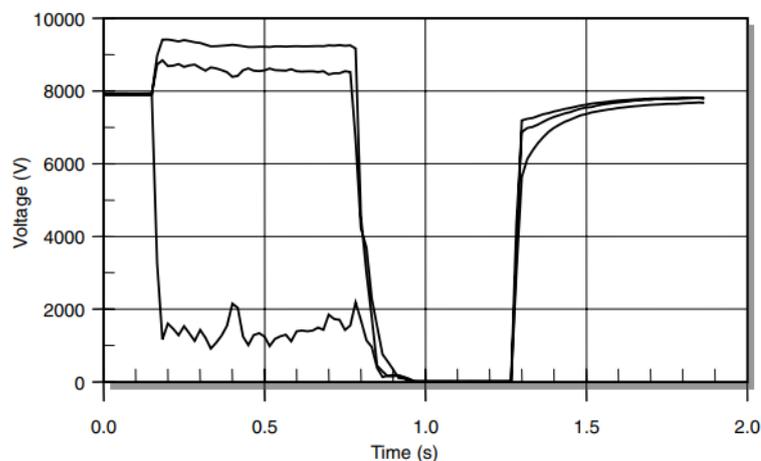
As variações de longa duração podem ser sobretensões ou subtensões, e geralmente não são o resultado de falhas no sistema, mas sim de variações de carga no

sistema. Podem ser observadas em gráficos de tensão RMS versus tempo. Para ser classificado como sobretensão, deve ter uma tensão superior a 110% da nominal com duração superior a 1 minuto. A subtensão deve ser uma tensão inferior a 90% da nominal também com duração superior a 1 minuto. Por exemplo, um banco de capacitores sendo desligado pode causar subtensão até que o equipamento de regulação traga a tensão de volta para os valores previstos pela tolerância (DUGAN *et al.*, 2003).

### 2.2.3 Variações de tensão de curta duração

Variações de tensão de curta duração podem ser de três tipos. Podem ser afundamentos (*sags*) de tensão, sobretensões de curta duração (*swells*) ou interrupções. Uma interrupção é caracterizada quando a alimentação de tensão do sistema diminui para menos de 0,1 pu por um intervalo menor que 1 minuto e logo reestabelece o funcionamento, conforme a Figura 5.

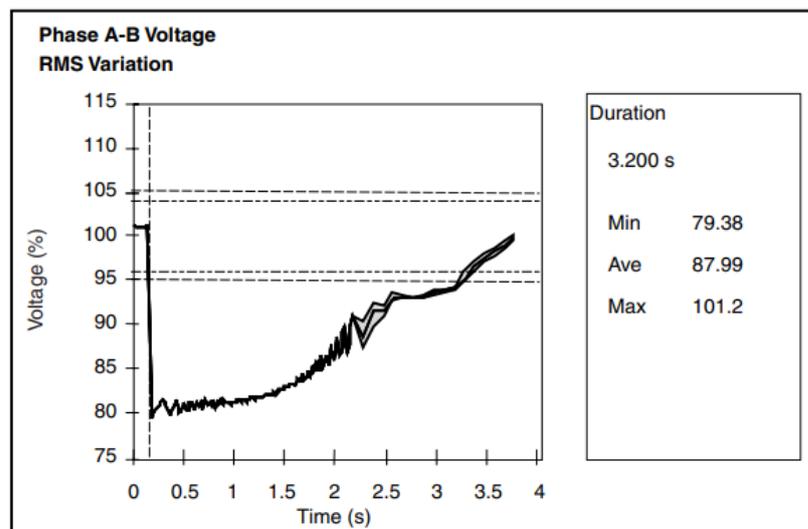
Figura 5 - Sinal de tensão RMS de três fases com interrupção momentânea.



Fonte – DUGAN *et al.*, 2003.

Os afundamentos de tensão geralmente estão associados a falhas do sistema, mas também podem ser causados pela energização de cargas pesadas ou partida de grandes motores, como mostrado na Figura 6, em que ocorre um afundamento de tensão em 80% e o nível de tensão volta ao valor original depois de 3 segundos. Durante um afundamento de tensão, a energia disponível para a carga é reduzida e podem ocorrer problemas na operação de equipamentos.

Figura 6 - Afundamento de tensão causado por partida de motor de indução.



Fonte – DUGAN *et al.*, 2003.

Uma sobretensão de curta duração (*swell*) é caracterizada por um aumento entre 1,1 e 1,8 pu na tensão eficaz entre 0,5 ciclo a 1 minuto. Estão geralmente associados com condições de falta no sistema.

#### 2.2.4 Desequilíbrio de tensão

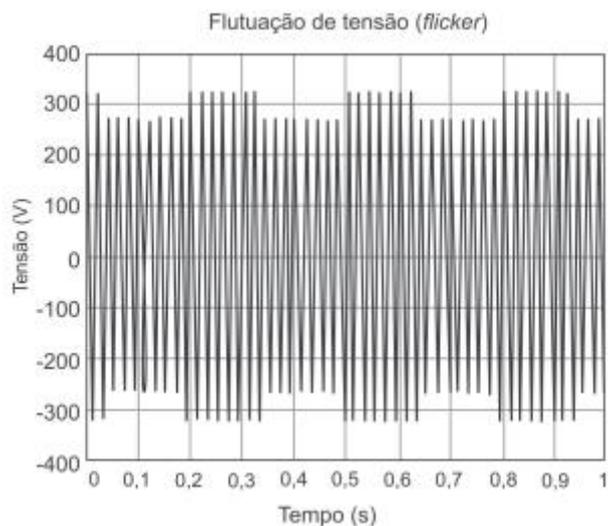
Os desequilíbrios de tensão ou corrente são produzidos nos sistemas trifásicos quando existem diferenças significativas entre os valores eficazes das tensões presentes na instalação. Eles ocorrem quando as intensidades de corrente que circulam pelas três fases não são iguais, provocando uma corrente diferente de zero no condutor neutro da instalação. O resultado desta circulação de corrente é o sobreaquecimento nos componentes da instalação (RODRIGUES, 2009). O grau de desequilíbrio é definido pela relação entre os módulos da tensão de sequência negativa e da tensão de sequência positiva. Segundo os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), admite-se nas instalações um desequilíbrio de tensão entre 2 e 3%.

#### 2.2.5 Flutuação de tensão

As variações na amplitude do sinal, periódicas ou aleatórias, são chamadas de flutuações de tensão e são representadas por uma variação de mais ou menos 10% em

torno do valor nominal. Um exemplo desse fenômeno é conhecido como cintilação (*flicker*), em que se pode notar visualmente a luminosidade variando no tempo. Consiste na existência de pequenas e repetitivas quedas de tensão que são causadas por cargas elevadas que solicitam altas correntes por breves e repetidos períodos. A Figura 7 mostra uma forma de onda com cintilação.

Figura 7 - Representação de uma forma de onda com cintilação.



Fonte – ALDABÓ, 2013.

### 2.2.6 Variação de frequência

As perturbações na frequência do sinal são variações em torno do valor nominal e são causadas por problemas nos sistemas de geração e transmissão. Não são fenômenos comuns nas instalações elétrica.

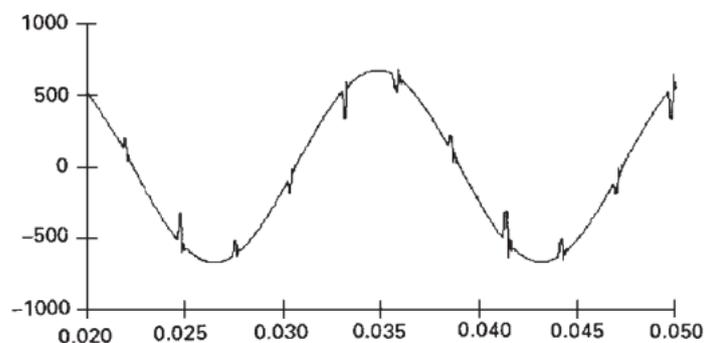
### 2.2.7 Distorções na forma de onda

As perturbações nas formas de onda são descritas como distorções na forma de onda senoidal ideal e caracterizadas pelo seu conteúdo espectral de desvio. Existem cinco principais tipos de distorções: harmônicas, interharmônicas, *CC offset*, cortes de tensão e ruído.

A presença de corrente contínua (CC) em sistemas de corrente alternada (CA) é denominada de *CC offset* ou nível CC. Este fenômeno pode ocorrer como resultado da retificação de meia onda, levando a saturação de transformadores o que resulta em perdas adicionais e redução da vida útil.

Os cortes de tensão (*notching*) são causados pela má operação dos dispositivos eletrônicos quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Nesse momento, ocorre um pequeno curto circuito que leva a tensão tão próxima a zero quanto a impedância do sistema permitir. A forma de onda que se pode observar na Figura 8 e o fenômeno que gerador serão discutidos no item 2.4.1.

Figura 8 - Forma de onda com fenômeno de cortes de tensão (*notching*).



Fonte – DUGAN *et al.*, 2003.

Os ruídos são sinais elétricos não desejáveis com um conteúdo abaixo de 200 kHz superpostos aos sinais de tensão ou corrente, geralmente são distorções que não podem ser classificadas como distorções harmônicas. Podem ser causados por cargas não lineares como equipamentos eletrônicos.

As interharmônicas são ondas periódicas com frequências não múltiplas da frequência fundamental. São resultantes de cargas não lineares que variam ao longo do tempo, como fornos a arco e compensadores reativos controlados por tiristores (DECKMANN *et al.*, 2020). Quando as frequências das distorções interharmônicas

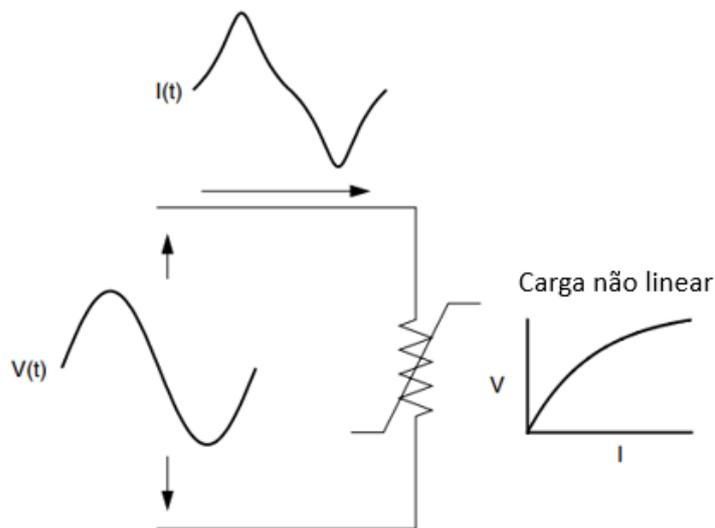
coincidem com as frequências presentes no sistema, pode ser gerado o fenômeno de ressonância.

As distorções harmônicas serão amplamente discutidas no item 2.3.

### 2.3 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções de formas de onda conhecidas como harmônicas são uma combinação de componentes de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (no caso desse trabalho, 60 Hz) e geralmente as deformações são impostas por dispositivos que apresentam relação não linear entre tensão e corrente, conforme a Figura 9. Dispositivos eletrônicos como computadores, conversores de frequência, fontes chaveadas apresentam um comportamento não linear provocando perturbações significativas nas formas de onda de tensão e corrente em relação à onda senoidal.

Figura 9 - Gráfico de tensão e corrente de uma carga não linear.



Fonte – Adaptado de DUGAN *et al.*, 2003.

As distorções harmônicas podem ser analisadas matematicamente utilizando a Série de Fourier, que indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta por um valor médio, uma expressão senoidal em frequência fundamental e expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental, as chamadas harmônicas (RODRIGUES, 2009),

conforme a Equação (1) e a Equação (2). Portanto, cada componente harmônica pode ser considerada separadamente e a distorção final é determinada pela superposição dos vários componentes do sinal distorcido (MAGALHÃES, 2010). Na Figura 10 pode-se observar a onda fundamental e a decomposição de uma onda de corrente global em suas componentes harmônicas de ordem 1, 3, 5, 7 e 9 (RODRIGUES, 2009).

$$v(\omega t) = V_0 + V_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + V_{2m\acute{a}x} \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots \\ + V_{hm\acute{a}x} \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (1)$$

$$i(\omega t) = I_0 + I_{m\acute{a}x} \text{sen}(\omega t + \varphi_1') + I_{2m\acute{a}x} \text{sen}(2\omega t + \varphi_2') + \dots \\ + I_{hm\acute{a}x} \text{sen}(h\omega t + \varphi_n') \quad (2)$$

Em que  $V_0$  é a componente contínua de tensão.

$I_0$  é a componente contínua de corrente.

$V_{m\acute{a}x}$  é a amplitude máxima do sinal de tensão harmônico

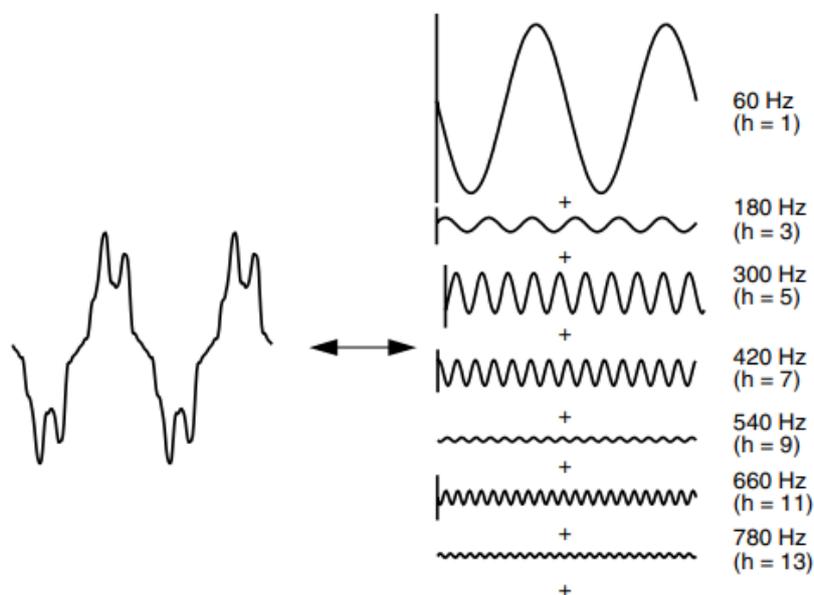
$I_{m\acute{a}x}$  é a amplitude máxima do sinal de corrente harmônico.

$\omega$  é a frequência angular.

$\varphi$  é a defasagem da componente harmônica de ordem n.

$h$  é a componente harmônica.

Figura 10 - Onda fundamental e ondas com harmônicos.

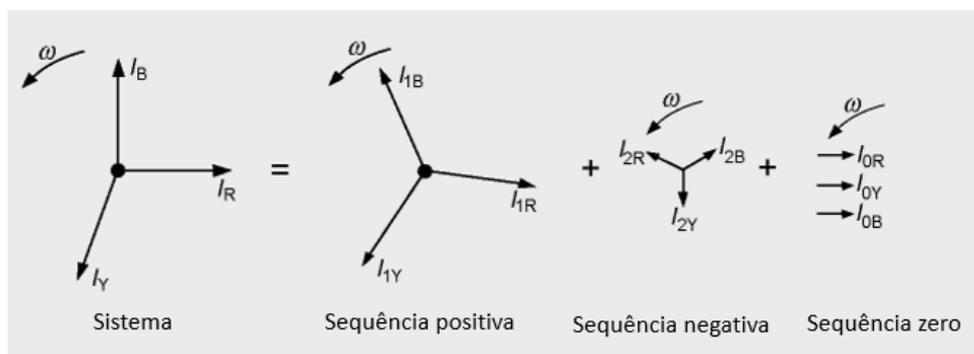


Fonte – DUGAN *et al.*, 2003.

A distorção de tensão é resultante da corrente distorcida passando pela impedância do sistema. A carga não tem controle sobre a distorção da tensão, a mesma carga em diferentes partes do sistema gerará diferentes distorções na tensão. A distorção resulta em componentes de corrente adicionais fluindo no sistema que não produzem nenhuma energia líquida, mas causam perdas nos elementos do sistema de potência por onde passam (DUGAN *et al.*, 2003).

A Figura 11 indica as sequências de fasoriais positivas, negativas e zero. O Teorema de Fortescue afirma que um conjunto N-fásico de tensões desequilibradas pode ser transformado em N conjuntos com N fases balanceadas. Conforme a imagem, pode-se constatar que existe a sequência positiva em que os fasores estão defasados entre si em  $120^\circ$  e seguem uma ordem que está invertida na sequência negativa. A sequência zero mostra três fasores com  $0^\circ$  de defasagem entre si.

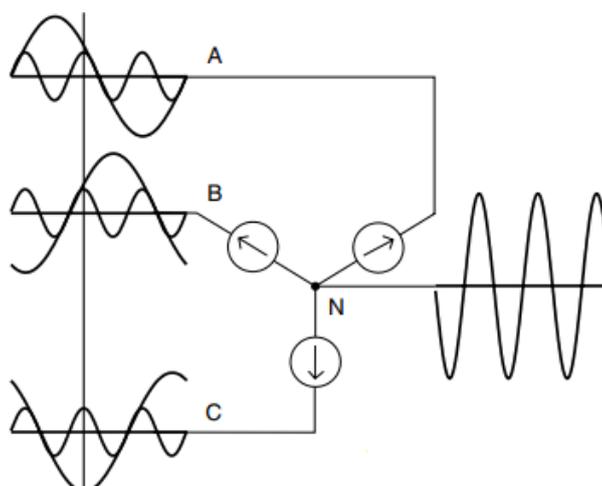
Figura 11 - Sequências de fasores positiva, negativa, zero.



Fonte – Adaptado de Ebrary.net, 2014.

As seqüências zero são todas as harmônicas múltiplas de 3 ( $3n$ ,  $n=1,2,3\dots$ ) (DECKMANN et al., 2020) e estão presentes em circuitos estrela que possuem o neutro conectado a um ponto do circuito, em que as correntes da seqüência zero se somam no neutro fazendo com que passe a circular uma corrente harmônica cuja amplitude é três vezes maior do que a corrente harmônica que percorre cada condutor. A Figura 12 representa esse comportamento. A corrente em excesso entre o ponto central da estrela e a conexão ao aterramento contribui para a interferência eletromagnética, podendo levar ao mau funcionamento de equipamentos sensíveis por meio de fenômenos de baixa frequência (NIELSON, 2011). Já para uma conexão delta, as três componentes da terceira harmônica são somadas e formam uma corrente da terceira harmônica que circula dentro dos enrolamentos da ligação delta da máquina (CARVALHO, 2018).

Figura 12 - Correntes presentes no neutro de ligações estrela com cargas não lineares.



Fonte – Adaptado de DUGAN *et al.*, 2003.

O Quadro 1 apresenta as sequências positivas, negativas e zero das harmônicas de acordo com a frequência (Hz). A sequência positiva é representada por harmônicas de ordem 1, 4, 7, ( $h=(3n-2)$ ,  $n = 1, 2, 3...$ ) (DECKMANN *et al.*, 2020) e é aquela capaz de gerar momento no mesmo sentido da onda fundamental, apesar de parecerem benéficas, as sequências positivas são em geral indesejadas uma vez que geram sobreaquecimento nos condutores do motor devido à adição das ondas. A sequência negativa é representada por harmônicas de ordem 2, 5, 8, ( $3n-1$ ,  $n= 1,2,3...$ ) (DECKMANN *et al.*, 2020) e é aquela que gera conjugado na direção oposta ao da onda fundamental e enfraquece o campo magnético rotativo, uma vez que tem o fasor com rotação inversa ao sentido de rotação do campo magnético, fazendo com que o motor produza menos conjugado (CARVALHO, 2018).

Harmônicas pares produzem assimetria de meia-onda, um semi-ciclo tem formato diferente do outro. Esse fenômeno não é muito comum e pode ocorrer em alguns transitórios como energização de transformadores ou a corrente de ignição de fornos a arco (DECKMANN *et al.*, 2020).

Quadro 1 - Sequência positiva, negativa e zero das harmônicas de acordo com a frequência.

Ordem Harmônica	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	N*60	-

Fonte – PROCOBRE, 2001.

O principal indicador utilizado para quantificar a distorção harmônica é a distorção harmônica total (DHT) e segundo o módulo da ANEEL que regulamenta as distorções harmônicas presentes no sistema, a DHT pode ser representada pela Equação (3).

$$DHT_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{hmáx} y_h^2}}{y_1} 100 \quad (3)$$

Onde  $y_1$  é o valor eficaz da onda fundamental.

$y_h$  é o valor eficaz da componente harmônica de ordem h.

Nem sempre a Equação (3) é a melhor maneira para entender as distorções harmônicas. Por exemplo, alguns acionamentos com velocidade ajustável exibem altos valores de DHT para a corrente de entrada quando estão operando com cargas leves. Esse valor pode não ser uma preocupação significativa porque a magnitude da corrente é baixa mesmo com sua DHT sendo alta (DUGAN *et al.*, 2003). Portanto, surgiu o conceito de distorção total de demanda (DTD), expressa como um percentual da média dos últimos 12 meses da demanda máxima mensal da corrente fundamental  $I_L$ . A principal diferença é que a DHT utiliza a corrente fundamental no horário da medição e a DTD é calculada em função da corrente máxima da carga.

$$DTD_{\%} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} I_h^2}}{I_L} 100 \quad (4)$$

Onde  $I_L$  é a corrente eficaz de demanda máxima (corrente fundamental).

$I_h$  é o valor eficaz da corrente harmônica de ordem  $h$ .

A corrente fundamental  $I_L$  pode ser medida de duas maneiras distintas. Com uma carga já no sistema, pode ser calculado como a média da demanda máxima para os 12 meses anteriores. O cálculo pode ser simplesmente feito pela média das leituras de demanda de pico de 12 meses. Para uma instalação nova, o  $I_L$  deve ser estimado com base nos perfis de carga previstos (DUGAN *et al.*, 2003).

### 2.3.1 Fator de potência

O fator de potência representa a quantidade de energia fornecida pela fonte que é convertida em trabalho. Na onda de frequência fundamental existe apenas um ângulo entre a tensão e a corrente e o fator de potência pode ser representado conforme a Equação (5).

$$FP = \frac{P}{S} = \cos\theta \quad (5)$$

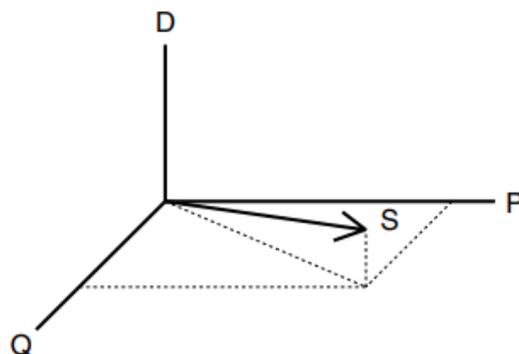
Onde  $P$  é a potência ativa.

$S$  é a potência aparente.

$\theta$  é o ângulo entre o fasor de potência aparente e potência ativa.

No caso de ondas com distorção harmônica, o fator de potência considera a contribuição de toda potência ativa, incluindo tanto a frequência fundamental quanto a harmônica e é chamado de fator de potência real. A distorção resulta em componentes de corrente adicionais que não produzem energia, mas aumentam as perdas nos elementos de sistema de potência que estão inseridos, conforme já mencionado. A Figura 13 mostra a potência aparente ( $S$ ), potência ativa ( $P$ ), potência reativa ( $Q$ ) e distorção da potência aparente ( $D$ ). Para uma dada potência ativa, quanto menor for o FP, maiores serão as perdas.

Figura 13 - Representação das potências.



Fonte - DUGAN *et al.*, 2003.

As cargas não lineares, que geram as distorções harmônicas, também as agravam por terem baixo fator de potência. Geralmente as instalações industriais utilizam bancos de capacitores para corrigir o fator de potência, e esses capacitores podem ser responsáveis por ampliar as correntes harmônicas das cargas não lineares, dando origem a ressonância.

### 2.3.2 Problemas gerados pelas distorções harmônicas

Alguns problemas que podem ser causados por distorções harmônicas envolvem:

- Excitação de correntes ou tensões ressonantes entre indutâncias e capacitâncias: associações de capacitores com transformadores, cabos com blindagem, capacitores associados com motores, capacitores operando com reatores, dispositivos de correção de fator de potência.
- Aparecimento de vibrações e ruído: ferro-ressonância em transformadores e reatores.
- Sobre aquecimento de núcleos ferromagnéticos: aumento de perdas por histerese e correntes parasitas em núcleos de motores, geradores, transformadores, reatores, relés.
- Sobre aquecimento de capacitores: ressonância de capacitores shunt, provocando sobretensão e perdas excessivas no dielétrico.
- Erro de medição de grandezas elétricas.
- Erro de controle de conversores: detectores de sincronismo e comparadores de nível, usados como referência para gerar pulsos de controle em chaves eletrônicas.

- Erro de atuação da proteção: relés eletromagnéticos acionando devido à contribuição das harmônicas.
- Sobrecorrente de neutro: circuitos com lâmpadas com reatores ou circuitos retificadores monofásicos podem provocar correntes de neutro maiores que as de linha, devido às harmônicas de sequência zero.
- Interferências e ruídos eletromagnéticos: fontes chaveadas, conversores de frequência, pontes retificadoras, inversores, sistemas de acionamento controlados eletronicamente (DECKMANN *et al.*, 2020).

O fato de terem relacionado esses problemas com as distorções harmônicas incentivou a criação do *módulo 8* do PRODIST e a norma IEEE Std 519 - 2014. Ambas serão mencionadas no item 2.5 e tratam da qualidade de energia, de práticas recomendadas e requisitos para controle de distorções harmônicas em sistemas de potência.

## 2.4 ORIGEM DAS HARMÔNICAS

Conforme mencionado anteriormente, as cargas não lineares são as principais responsáveis por gerarem as distorções harmônicas. No âmbito industrial, cita-se dispositivos eletrônicos destinados ao acionamento de velocidade variável de máquinas rotativas, tanto em corrente contínua (CC) quanto em corrente alternada (CA).

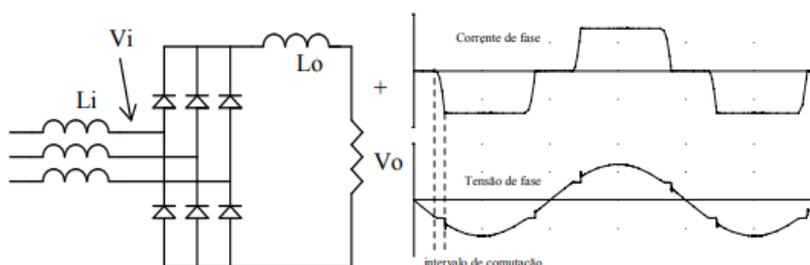
### 2.4.1 Fontes de alimentação chaveadas

Comumente é necessária a conversão entre dois regimes: alternado para contínuo ou contínuo para alternado. Para se realizar a conversão de uma tensão alternada para contínua, utilizam-se componentes eletrônicos como diodos, transistores, resistores, capacitores, indutores e transformadores. A finalidade desse processo é interromper o ciclo negativo de tensão, permitindo apenas a passagem da parte positiva. Esse procedimento ocorre várias vezes em um pouco tempo, sendo conhecido como chaveamento de alta frequência. Como primeiro estágio do processo, ocorre a retificação. Como segundo estágio da conversão, é feito o ajuste RMS da tensão de saída contínua para entregar o valor esperado conforme a necessidade da carga. Esse processo gera harmônicas, mais comumente de terceira ordem (DUGAN *et al.*, 2003).

Em reatores controlados por tiristores, conhecidos como RCT, o controle é realizado através da variação do ângulo de disparo dos tiristores que controlam a corrente através do reator. Os tiristores são interruptores unidirecionais em corrente e bidirecionais em tensão. A passagem do estado de bloqueio para o de condução ocorre quando se aplica um pulso de corrente entre o terminal de “gatilho” (*gate*) e o catodo. A condução do tiristor se interrompe naturalmente quando a corrente cai abaixo de um valor mínimo que corresponde a uma fração de sua corrente nominal (DECKMANN *et al.*, 2020). Um RCT associado em paralelo a um banco capacitivo forma o SVC (*Static var Compensator*), capaz de atuar com compensação capacitiva e indutiva.

Nos retificadores, na presença de indutâncias, a transferência de corrente de uma fase para outra não é instantânea. Existe um intervalo no qual estarão em condução o diodo que está entrando e aquele que está em processo de desligamento. Isto configura um curto-circuito na entrada do retificador e a sua duração depende de quão rapidamente ocorre pela diferença de tensão entre as fases que estão envolvidas na comutação. Esse acontecimento pode ser observado na Figura 14.

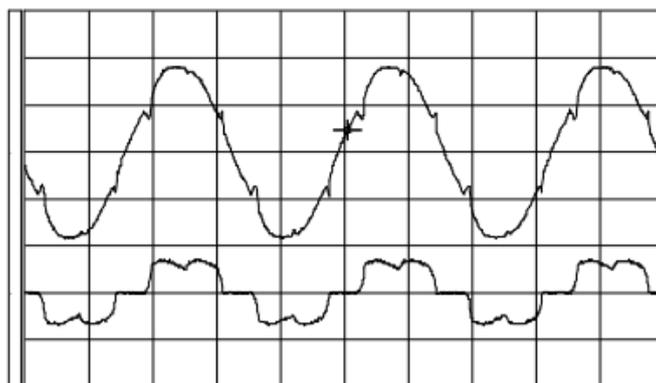
Figura 14 - Forma de onda da comutação de um retificador trifásico.



Fonte - DECKMANN *et al.*, 2020.

A distorção na tensão, apresentada na Figura 15 ocorre pela distorção na corrente associada à reatância na linha.

Figura 15 - Distorção na onda de tensão devido ao fenômeno de comutação.

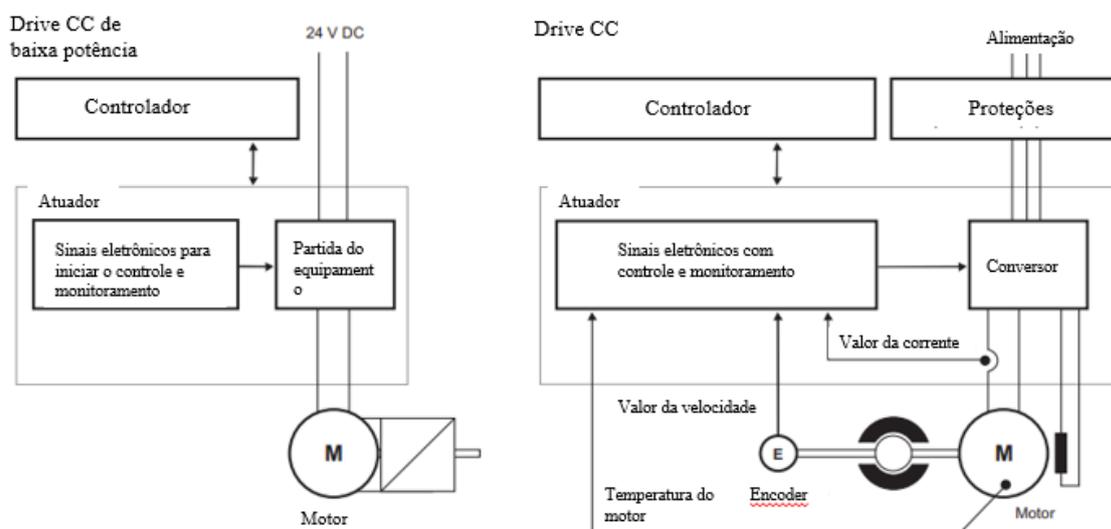


Fonte - DECKMANN *et al.*, 2020.

## 2.4.2 Acionamentos em corrente contínua (CC)

Motores de corrente contínua, apesar de serem mais caros, são comumente utilizados em laminadores pelas propriedades de velocidade e conjugado de partida. Os acionamentos utilizando drives de corrente contínua contam com o drive de baixa potência para alimentação da eletrônica e o drive CC (WEIDAUER *et al.*, 2014), conforme a Figura 16. A retificação da alimentação é feita a partir de reatores controlados por tiristores.

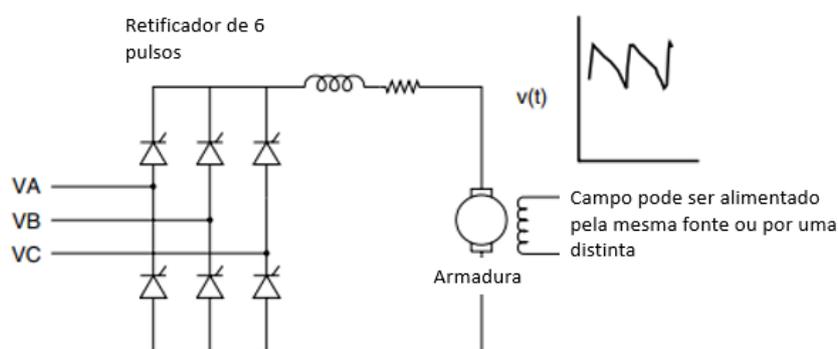
Figura 16 - Acionamentos com drive de corrente contínua (CC).



Fonte – Adaptado de WEIDAUER *et al.*, 2014.

Um exemplo de como fazer a retificação do sinal para acionamento é com um retificador de seis pulsos, conforme representado na Figura 17. O retificador de seis pulsos comumente gera harmônicas de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup> ordem, uma opção que elimina 90% dessas harmônicas é o retificador de doze pulsos, mas esse é mais custoso que o de seis pulsos (DUGAN *et al.*, 2003).

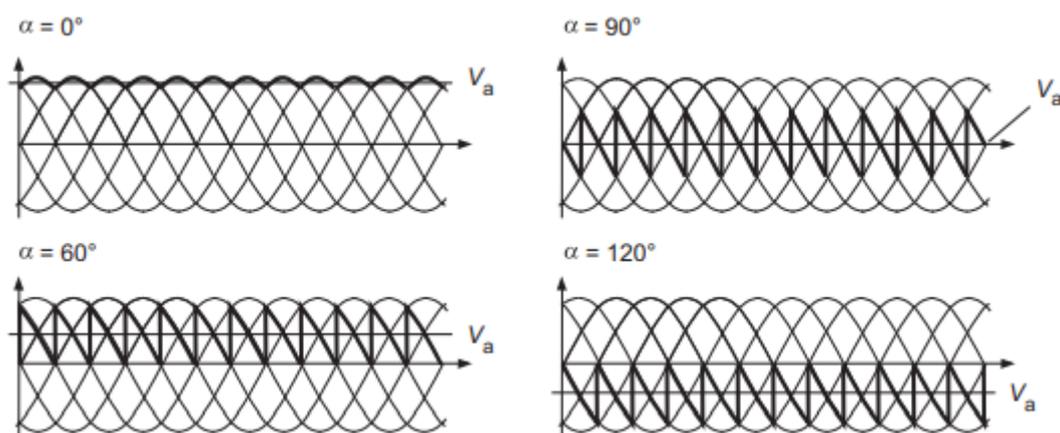
Figura 17 - Retificador de 6 pulsos utilizado em acionamentos CC e representação da tensão de saída que alimenta a carga.



Fonte – Adaptado de DUGAN *et al.*, 2003.

Para que o circuito da Figura 17 funcione, os tiristores devem ser disparados da maneira correta, ou seja, a ordem de disparo é escolhida de forma que o disparo de um tiristor em meia ponte faça com que o tiristor ativo na mesma ponte seja desligado. O ângulo de disparo define o atraso do pulso de disparo para cada tiristor em relação ao ponto de comutação natural, em que, considerando uma alimentação em CA, a corrente vai de um pico positivo a um negativo fazendo com que apareça uma tensão reversa que desliga o mesmo. A unidade de medida do atraso do ângulo de disparo é o grau. Seu alcance é de 0° a 180°. A tensão de armadura média mais alta  $V_a$  é alcançada com um atraso do ângulo de disparo de 0° e o menor com um retardo do ângulo de disparo de 180°, gerando as ondas da Figura 18.

Figura 18 - Formas de onda de acordo com o ângulo de disparo.

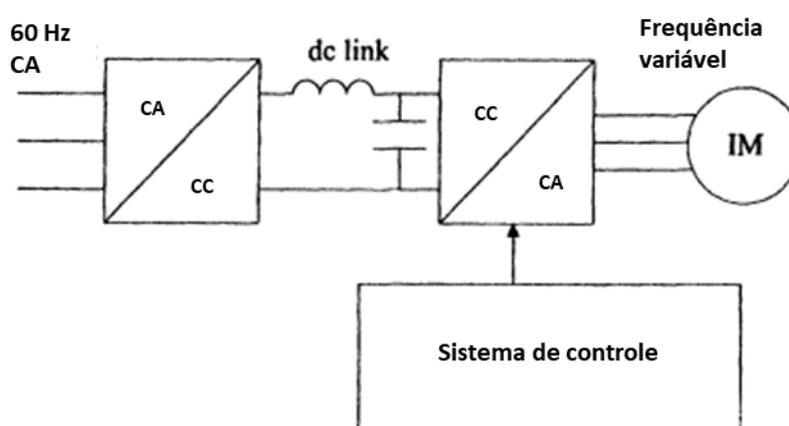


Fonte – WEIDAUER *et al.*, 2014.

## 2.4.2 Acionamentos em corrente alternada (CA)

Drives de corrente alternada são amplamente utilizados em conjunto com motores de indução e motores síncronos. Assim como nos drives CC, é necessário retificar a onda, e no caso dos drives CA a onda de saída tem frequência variável. As três fases são alimentadas por um diodo retificador trifásico, e a saída do retificador tem um capacitor para controlar a tensão de saída e em alguns casos um indutor para diminuir a distorção harmônica proveniente da fonte, conforme a Figura 19.

Figura 19 - Representação de um drive de corrente alternada.

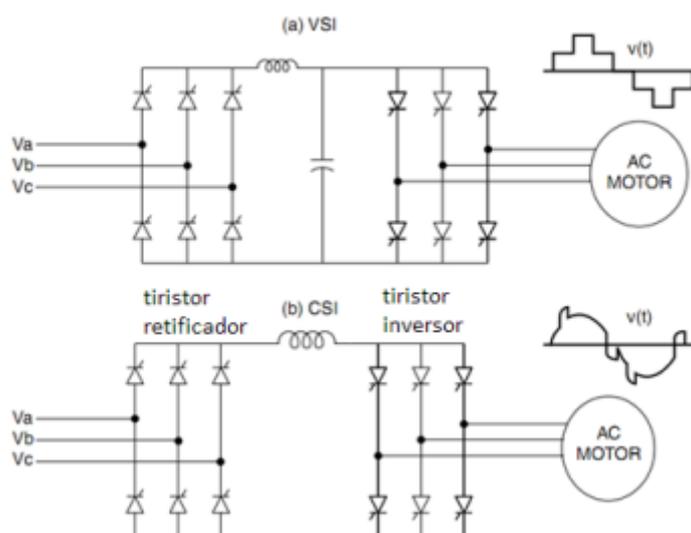


Fonte – Adaptado de BOLLEN, 1999.

A velocidade e o conjugado são alterados no funcionamento das máquinas que utilizam drives CA, portanto é importante que exista um controle para ajustar essas variáveis. Os drives CA são classificados em dois tipos: fonte de tensão inversora (VSI) e fonte de corrente inversora (CSI), representados na Figura 20.

Inicialmente, a corrente CA é retificada em corrente CC. O circuito intermediário atua como um filtro para estabilizar a onda de saída de corrente contínua do retificador. O inversor fará com que a corrente contínua se torne corrente alternada e mantenha a proporcionalidade com a corrente contínua. Essa etapa é composta de três pares de chaves, a primeira chave de cada conjunto gera a componente positiva e a outra chave gera a componente negativa.

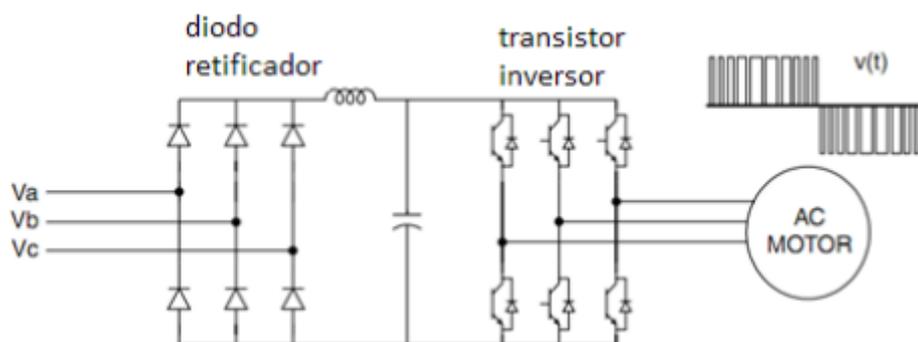
Figura 20 - Circuito de um drive de corrente alternada dos tipos VSI (a) e CSI (b).



Fonte – Adaptado de DUGAN *et al.*, 2003.

Outra técnica comum utilizada em acionamentos com drive CA é a modulação por largura de pulsos (PWM) representado na Figura 21. A técnica consiste em variar a largura de pulso da onda alterando o *duty-cycle*, parâmetro que considera a largura do pulso, ou seja, o período em que o pulso está com o valor alto, e o período da onda. A onda gerada mantém a mesma amplitude, conforme representado na Figura 21.

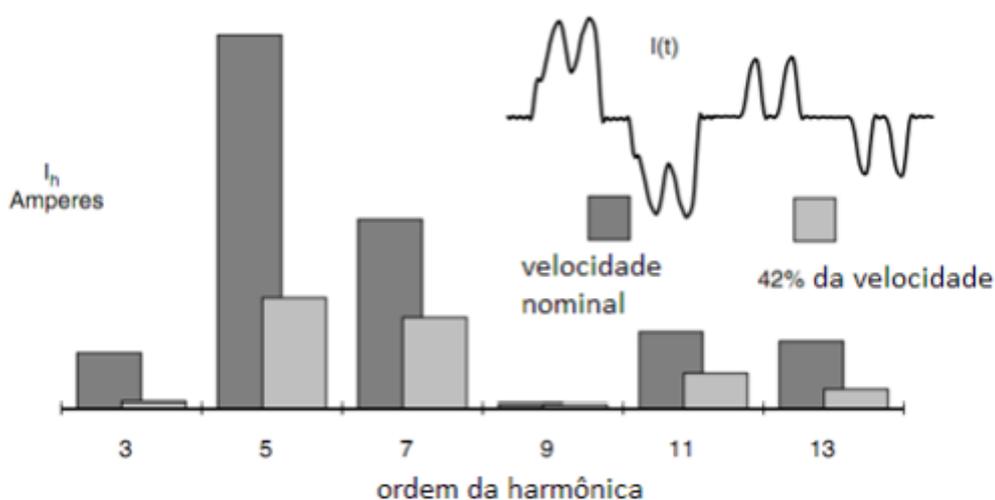
Figura 21 - Diagrama de um drive de corrente alternada (CA) com a técnica de PWM.



Fonte – Adaptado de DUGAN *et al.*, 2003.

As distorções harmônicas geradas por drives de corrente alternada são constantemente alteradas de acordo com os valores de velocidade e conjugado. A Figura 22 mostra um gráfico com as harmônicas de terceira até décima terceira ordem. Pode-se constatar que quando o drive está operando com a velocidade nominal, ele gera mais harmônicas do que quando comparado a operação com 42% da velocidade nominal.

Figura 22 - Harmônicas geradas pelo drive CA operando em velocidade nominal e em 42% da velocidade nominal.



Fonte – Adaptado de DUGAN *et al.*, 2003.

### 2.4.3 Fator K

Equipamentos como transformadores são projetados para trabalhar com a circulação de correntes elétricas senoidais com frequência de 60Hz. Por esse motivo, o conteúdo harmônico tem efeitos indesejados no transformador, causando aquecimento

excessivo e reduzindo a vida útil do equipamento. Para transformadores a seco os fabricantes já preveem o “fator K”, que define o nível de aquecimento a que pode ser submetido um transformador que alimenta cargas não lineares.

A classificação do “fator K” atribuída a um transformador é um índice relacionado ao projeto do transformador para suportar um nível harmônico em sua corrente da carga nominal, permanecendo dentro de seus limites da temperatura de operação (SCHALLENBERGER, 2019). A Equação (6) determina como o cálculo do “fator K” deve ser feito.

$$Fator K = \sum_{h=1}^{hmax} \left( \frac{I_h}{I_R} \right)^2 h^2 \quad (6)$$

Em que  $I_R$  é a corrente de base do transformador e  $I_h$  é a corrente harmônica medida para a ordem harmônica  $h$ .

## 2.5 NORMAS TÉCNICAS

Alguns problemas que podem ser causados por distorções harmônicas envolvem sobre corrente em capacitores, sobre aquecimento, aumento das perdas, funcionamento irregular como desarmes, interferências eletromagnéticas nos medidores de energia, aumento da temperatura em cabos e equipamentos, redução da vida útil de algumas cargas, ruídos audíveis. Portanto, incentivou-se a criação do *módulo 8* do PRODIST desenvolvido pela ANEEL e a norma IEEE Std 519 - 2014. Ambas tratam a respeito da qualidade de energia e de práticas recomendadas e requisitos para controle de distorções harmônicas em sistemas de potência.

### 2.5.1 PRODIST - Módulo 8

O *módulo 8* do PRODIST é um documento que tem como objetivo principal estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica (QEE), abordando a qualidade do produto, a qualidade do serviço prestado e a qualidade do tratamento de reclamações (PRODIST, 2021). Para a qualidade do produto, a norma define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição e os estudos específicos de qualidade da energia

elétrica. Este documento gerado pela ANEEL tem como principais indicadores utilizados para quantificar a distorção harmônica os itens encontrados no Quadro 2.

Quadro 2 - Terminologias aplicadas ao cálculo de distorções harmônicas.

Descrição	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_{p95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_{i95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5% das 1.008 leituras válidas	$DTT_{395\%}$

Fonte – PRODIST, 2021.

A distorção harmônica individual de ordem h ( $DHI_h$ ) pode ser calculado conforme a Equação (7). A distorção harmônica total de tensão (DTT) pode ser calculada conforme a Equação (8).

$$DHI_h\% = \frac{V_h}{V_1} 100 \quad (7)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (8)$$

A distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 ( $DTT_p\%$ ) pode ser calculada conforme a Equação (9). Já para as componentes ímpares não múltiplas de 3 ( $DTT_i\%$ ), considera-se a Equação (10).

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (9)$$

$$DTT_i \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (10)$$

Para a distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 ( $DTT_3\%$ ), a representação se dá pela Equação (11).

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h3} V_h^2}}{V_1} 100 \quad (11)$$

Em que  $V_h$  se refere a tensão harmônica de ordem  $h$ .

$h$  se refere a ordem harmônica individual.

$V_1$  a tensão fundamental medida.

Especificamente na Equação (8),  $h_{\text{máx}}$  se refere a ordem harmônica máxima.

Na Equação (9),  $hi$  é a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

Na Equação (10),  $hp$  é a máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

Na Equação (11),  $h3$  é a máxima ordem harmônica múltipla de 3.

Os valores de referência das taxas de distorções harmônicas totais que são permitidos pelo PRODIST serão apresentados no capítulo 3, indicando como serão feitas as comparações com os valores medidos.

O *módulo 8* do PRODIST apresenta instruções quanto a instrumentação e metodologia de medição da qualidade do produto. Para gerar os indicadores de distorções harmônicas, flutuação de tensão e desequilíbrio de tensão deve-se:

- Considerar o registro de 1.008 leituras válidas, ou o máximo possível que represente o funcionamento do equipamento, obtidas em intervalos consecutivos (período de agregação) de 10 minutos cada.
- Após a aquisição dos registros válidos de medição, deve ser obtido um conjunto de valores para DTT, DTTp%, DTTi% e DTT3% que, devidamente tratado,

conduzirá aos valores dos indicadores estatísticos DTT95%, DTTp95%, DTTi95%, DTT395%.

Ao que se refere a distorções harmônicas de corrente, não há abordagens. Para sistemas elétricos trifásicos, as medições das tensões devem ser feitas fase-neutro para sistema com estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

### 2.5.2 IEEE Std 519 – 2014

A norma IEEE Std 519 - 2014 oferece como recomendação itens que não se aplicam a equipamentos individuais, pois levam em conta apenas o nível global de distorção de uma instalação, medida no ponto de conexão do consumidor à rede de distribuição (PCC). No trabalho desenvolvido, o ponto de conexão considerado é o secundário do transformador.

Diferentemente do PRODIST, a norma IEEE Std 519 - 2014 apresenta indicações com relação ao limite de distorção de corrente. São sugeridos valores máximos de harmônicas individuais em relação ao nível de tensão da carga. Para a obtenção dos limites de distorção individual na corrente, ao invés de se relacionar as componentes harmônicas ( $I_h$ ) com a componente fundamental da amostra naquele instante, realiza-se a relação da corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ) com o máximo valor da componente fundamental registrado ( $I_L$ ). A norma utiliza o índice de distorção total de demanda (DTD) para quantificar a distorção de corrente. A Equação (12) indica novamente como é feito o cálculo de DTD.

$$DTD \% = \frac{\sqrt{\sum_{h>1}^{hmax} I_h^2}}{I_L} 100 \quad (12)$$

Em que  $I_L$  é o valor máximo da corrente eficaz registrada.

$I_h$  é o valor de corrente eficaz da componente harmônica.

$h$  se refere a ordem harmônica.

Os quadros e tabelas com os valores estabelecidos pela norma serão apresentados no capítulo 3.

## 2.6 TÉCNICAS DE MITIGAÇÃO

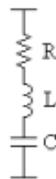
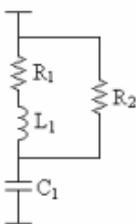
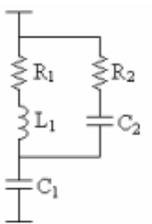
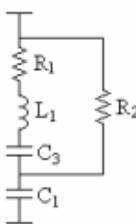
Existem diversas técnicas para lidar com as distorções harmônicas dependendo se elas são geradas pela fonte alimentadora ou pela carga. Algumas soluções utilizadas são filtros passivos e ativos.

O funcionamento dos filtros é baseado na restrição ou permissão da passagem de determinadas frequências, e são classificados em: rejeita-faixa, passa-faixa, passa-alta e passa-baixa. O filtro passa-baixa permite a passagem de sinais até uma frequência limite denominada frequência de corte, e os sinais acima desse valor são atenuados. O filtro passa-alta funciona de maneira oposta ao passa-baixa, rejeitando a passagem de sinais abaixo da frequência de corte. Os filtros passa-faixa e rejeita-faixa apresentam dois limites de frequência de corte, um superior e um inferior. O primeiro permite a passagem de sinais que estejam na faixa dentro do limite superior e inferior, enquanto o outro permite a passagem apenas de sinais que estão fora desses limites.

### 2.6.1 Filtros passivos

Filtros passivos são indutâncias, capacitâncias e resistências configuradas para controlar harmônicas e tem configurações conforme a Figura 23. Eles são empregados tanto para desviar as correntes harmônicas da linha ou bloquear seu fluxo entre partes do sistema ajustando os elementos para criar uma ressonância em uma frequência selecionada (DUGAN *et al.*, 2003). Na frequência da rede, os diferentes filtros apresentam uma reatância capacitiva, de modo que contribuem para a correção do fator de potência, supondo que a carga alimentada seja de característica indutiva. Os modelos de filtros passivos disponíveis são os filtros shunt, filtro em série e filtros em paralelo de sintonia simples, duplas e amortecidos de 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup> e 3<sup>a</sup> ordens e do tipo “C”.

Figura 23 - Tipos de filtros passivos.

Tipos de Filtros	Circuitos por Fase
Sintonizado para Uma Frequência	
Amortecido de 2ª Ordem	
Amortecido de 3ª Ordem	
Amortecido Tipo "C"	

Fonte – NASCIMENTO, 2007.

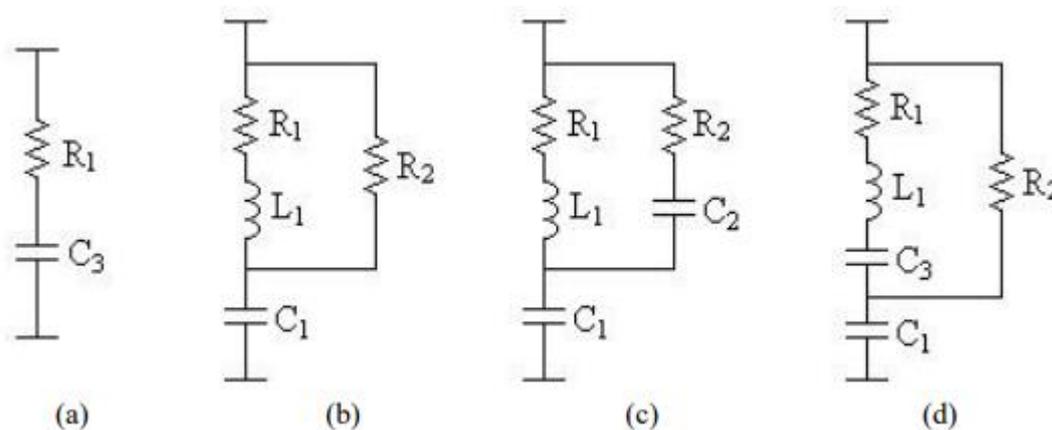
Os filtros passivos mais comuns são os filtros *shunt*, eles são projetados para que as harmônicas presentes no sistema sejam desviadas do seu caminho normal para o filtro e então para o sistema de aterramento. Os filtros em série são projetados para terem uma alta impedância para certo tipo de harmônica, e essa alta impedância é capaz de bloquear o fluxo de corrente harmônica. Cada harmônica exige um filtro específico, além de serem dimensionados para transportarem toda a corrente do sistema, tornando a solução custosa.

Os filtros de sintonia são projetados de acordo com o grau de sintonia e é o fator de qualidade (Q) que determina a intensidade da sintonização. O fator Q está definido

como a razão da indutância (ou capacitância) pela resistência no ponto de ressonância. Os filtros sintonizados são circuitos ressonantes série que, na frequência de sintonia ou de ressonância, apresentam baixa impedância resistiva. Para frequências menores que a frequência de sintonia eles são capacitivos e, para as frequências superiores são indutivos. Portanto, para a frequência fundamental, estes filtros podem funcionar como compensadores de reativo (NASCIMENTO, 2007). São mais comumente utilizados para frequências harmônicas que apresentam maiores amplitudes, normalmente de ordem mais baixa (3<sup>a</sup>, 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 9<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup>).

Os filtros amortecidos oferecem uma baixa impedância para uma ampla banda de frequência e podem ser de primeira, segunda, terceira ordem ou tipo “C”, conforme Figura 24. O filtro de terceira ordem é mais vantajoso em comparação ao de primeira e segunda por ter menos perdas de energia na frequência fundamental e permitir uma redução da impedância na frequência de ressonância paralela através de um possível ajuste no banco de capacitor. O desempenho do filtro tipo “C” pode ser comprometido por ter uma elevada suscetibilidade a desvios na frequência fundamental e as variações nos valores dos componentes.

Figura 24 - Filtros amortecidos: (a) 1<sup>a</sup> ordem; (b) 2<sup>a</sup> ordem; (c) 3<sup>a</sup> ordem; (d) Tipo "C".



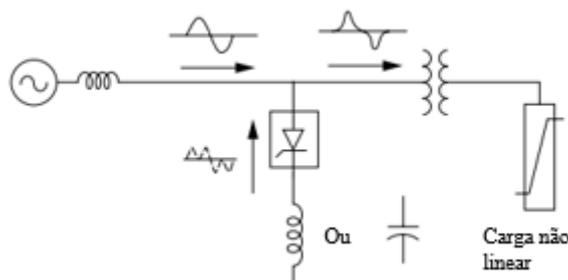
Fonte – NASCIMENTO, 2007.

### 2.6.2 Filtros ativos

Filtros ativos utilizam eletrônica avançada e por isso são mais caros que filtros passivos. Podem operar independentemente da impedância das cargas, são capazes de endereçar mais de uma harmônica ao mesmo tempo e atuar em outros problemas de qualidade de energia. A principal ideia é substituir a porção da onda senoidal que está

faltando na corrente em uma carga não linear por meio de controle eletrônico. Um monitoramento de tensão e/ou corrente da linha é feito para rastrear a corrente de carga ou tensão e forçá-lo a ser senoidal. Existem duas abordagens fundamentais: uma que usa um indutor para armazenar a corrente a ser injetada no sistema no instante apropriado e uma que usa um capacitor, conforme observado na Figura 25.

Figura 25 - Exemplos de filtros ativos.



Fonte - DUGAN *et al.*, 2003.

### 2.6.3 Projeto de filtros

Os objetivos a serem alcançados com o projeto de filtros consiste em alcançar a redução da harmônica, suprir a potência reativa exigida na frequência fundamental e realizar ambos a um custo mínimo (SILVA, 2007).

De acordo com a teoria apresentada anteriormente nesse capítulo, espera-se encontrar valores significativos de distorções harmônicas nas ordens mais baixas. Esses harmônicos comumente apresentam as maiores amplitudes de corrente e, portanto, exigem filtros que tenham baixas impedâncias em torno das frequências destes harmônicos (SILVA, 2007). O projeto desses envolve a seleção de seus tamanhos e grau de sintonia (Q).

A impedância do filtro RLC série de sintonia simples dada pela Equação (13).

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (13)$$

Em que  $Z_f$  é a impedância do filtro ( $\Omega$ ).

$R$  é a resistência ( $\Omega$ ).

$\omega$  é a frequência angular da fonte de alimentação do sistema (rad/s).

L é a indutância (H).

C é a capacitância (F).

O módulo e a fase da impedância série pode ser escritas conforme a Equação (14) e (15).

$$Z(\omega) = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} \quad (14)$$

$$\phi(\omega) = \operatorname{tg}^{-1}\left(\frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R}\right) \quad (15)$$

Em que  $Z(\omega)$  é o módulo da impedância complexa em função da frequência angular  $\omega$ .

$\phi(\omega)$  é o ângulo da impedância  $Z(\omega)$  em função da frequência angular  $\omega$ .

Para determinar a frequência que anulará a parte imaginária de  $Z(\omega)$ , pode-se utilizar a Equação (15). O resultado da equação é a frequência angular de ressonância do circuito, frequência na qual a impedância é mínima.

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (15)$$

A dessintonização é um fenômeno que os filtros estão sujeitos. Alguns fatores como as variações de frequência de um sistema, erro de sintonia inicial e variações de capacitância total (tanto por variações de temperatura quanto por tempo de uso) são responsáveis por causar a dessintonização do filtro.

### 3. METODOLOGIA

O monitoramento da qualidade de energia é o processo de coletar, analisar e interpretar os dados das medições em informações úteis. O processo de coleta de dados geralmente é realizado por medição de corrente e tensão por um período prolongado (DUGAN *et al.*, 2003). A necessidade de monitoramento de QEE muitas vezes surge para melhorar a mesma devido a utilização de equipamentos sensíveis a distúrbios na energia elétrica.

Antes de iniciar o processo de monitoramento, é importante que sejam definidos os objetivos. Por exemplo, pode-se definir que o monitoramento será feito para:

- Caracterizar a performance do sistema: é uma abordagem proativa para o monitoramento de qualidade de energia e conhecendo como o sistema normalmente opera, pode-se encontrar defeitos de maneira mais rápida.
- Caracterizar problemas específicos: é uma abordagem reativa para o monitoramento, mas pode identificar a causa da incompatibilidade de algum equipamento com a qualidade de energia, iniciando o processo de solução.
- Monitoramento como parte da manutenção preditiva: Os dados de qualidade de energia coletados ao longo do tempo podem ser analisados para fornecer informações relacionadas ao desempenho específico do equipamento.

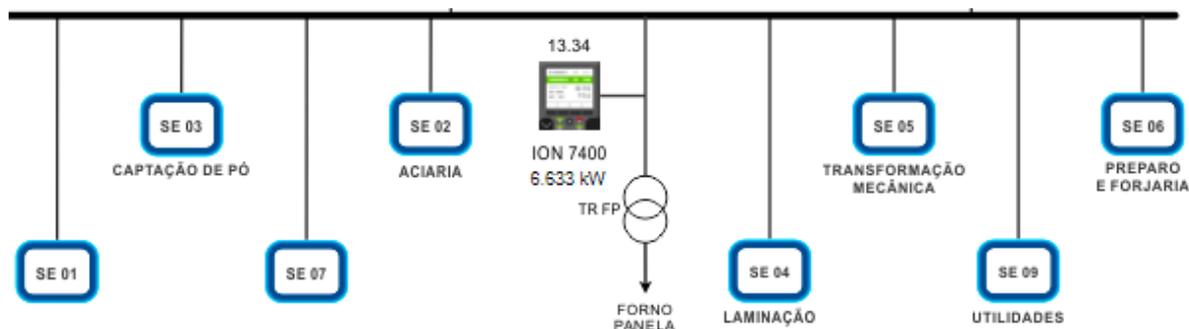
Quando o levantamento da qualidade de energia na planta é feito para investigar problemas específicos, é importante que algumas informações estejam bem definidas. Deve-se conhecer qual a natureza dos problemas, características dos equipamentos enfrentando dificuldades, em que momentos os problemas podem ser experienciados. Deve-se observar se existem outros eventos que ocorrem no mesmo período em que o equipamento enfrenta a dificuldade, se existem possíveis fontes que causem distúrbios na qualidade de energia elétrica e conhecer o diagrama e projeto elétrico do local (DUGAN *et al.*, 2003).

Existem diferentes tipos de variação na qualidade de energia e diferentes métodos atrelados a cada caso. Por exemplo, afundamentos de tensão requerem um gráfico de tensão RMS versus tempo enquanto distorções harmônicas requerem amostragens do estado estacionário com análise de tendências ao longo do tempo.

Cada tipo de monitoramento requer uma ferramenta adequada. Para medições de distorções harmônicas, os medidores devem apresentar alguns requisitos como capacidade de medir corrente e tensão simultaneamente para obter o fluxo de energia. Também devem ser capazes de medir a magnitude e a fase de cada componente harmônica e apresentar uma taxa de amostragem suficientemente elevada para obter as componentes das harmônicas (DUGAN *et al.*, 2003).

O sistema elétrico analisado nesse trabalho fica localizado em uma grande siderúrgica do Rio Grande do Sul. Uma parte do diagrama elétrico geral da usina pode ser observado na Figura 26, em que se observa a alimentação em comum da maior parte das cargas da usina. A subestação 4 (SE 04) é responsável pela alimentação do pavilhão de laminação e é o foco do estudo. O local conta com cargas não lineares como inversores, *soft-starters*, lâmpadas com reatores eletrônicos, fontes chaveadas, controladores tiristorizados e *no-breaks*.

Figura 26 - Diagrama de alimentação da usina que será analisada.

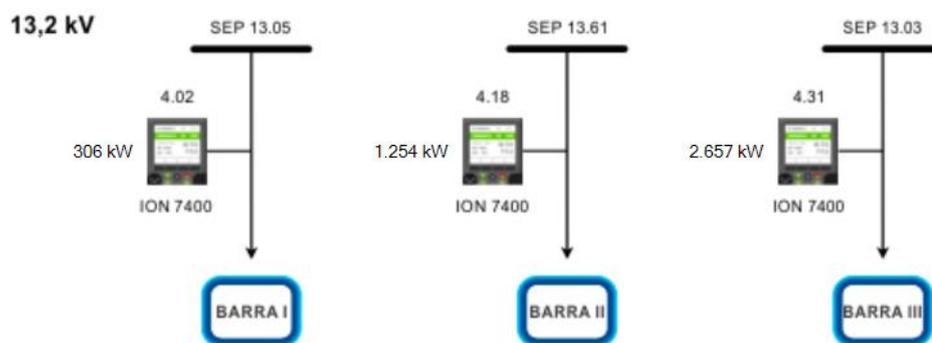


Fonte – Elaboração própria.

A subestação de alta tensão (13,2 kV) da laminação conta com três barramentos de entrada que possuem medidores ION 7400 da Schneider Electric, conforme a Figura 27. Esses medidores têm como função principal mostrar as correntes, tensões, demanda, energia ativa, reativa, distorções harmônicas, desequilíbrios de fase, detecção de quedas de tensão, entre outros. Existe um supervisor de monitoramento chamado SIGE que contém os dados desses medidores ION 7400 e que gera alarmes em caso de falhas na alimentação. O supervisor também é capaz de gerar relatórios das variáveis que os medidores monitoram. Os três barramentos alimentam cubículos de alta tensão equipados

com medidores MMGE da Siemens que mostram os valores de corrente, tensão, energia ativa e reativa, mas não mostram a qualidade de energia. Esses cubículos alimentam várias cargas, e cada uma dessas cargas tem seu painel na subestação de baixa tensão.

Figura 27 – Diagrama dos barramentos de entrada da subestação de alta tensão da laminação.



Fonte – Elaboração própria.

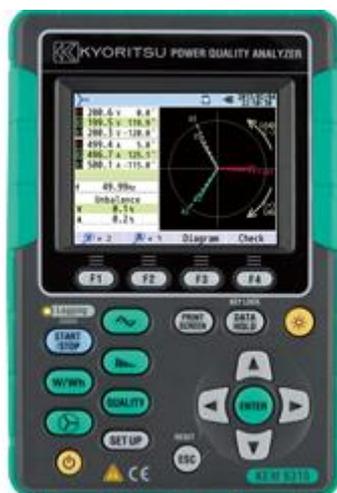
O trabalho tem como objetivo analisar a qualidade de energia de uma parte isolada da instalação como forma de validar a metodologia. A análise foi executada na parte de baixa tensão composta por dois motores de corrente contínua de 725V/1500A controlados por *drives* CC e alimentados pelo transformador de 2500kVA de 13,2kV/0,72kV. Atualmente os painéis de alta e de baixa tensão não têm monitores de qualidade de energia e para este trabalho pretende-se monitorar a qualidade de energia elétrica com um equipamento capaz de capturar dados de qualidade de energia elétrica.

### 3.1 INSTRUMENTO E SOFTWARE

Anteriormente foi abordada a questão de que existem diversos tipos de distúrbios na qualidade de energia elétrica, e que os monitoramentos precisam ser feitos por

equipamentos específicos. Foi decidido adotar o analisador de qualidade de energia *Kew 6315 da Kyoritsu* após a verificação de que o mesmo atende o escopo do projeto. O analisador pode ser observado na Figura 28.

Figura 28 - Equipamento Kew 6315 da Kyoritsu.

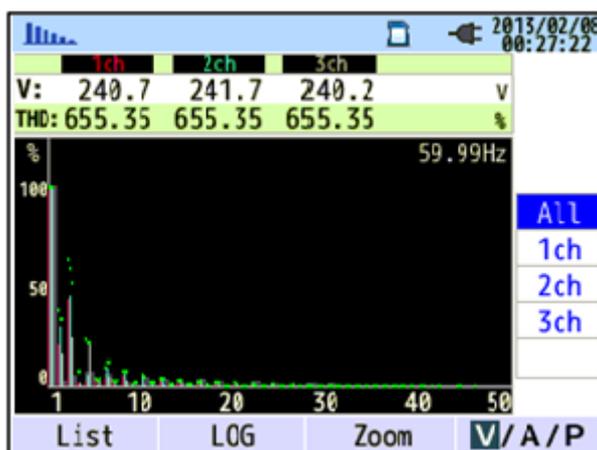


Fonte – KYORITSU, 2020

O analisador de energia Kew 6315 tem capacidade de gravar e apresentar diferentes dados. O equipamento mostra os gráficos de potência, demanda, tensão, corrente, vetores das fases, análise de distorção harmônica e informações relacionados a fenômenos de qualidade de energia discutidos no capítulo 2 como afundamentos de tensão, sobretensões de curta duração, interrupções e *flicker*. Essas informações podem ser gravadas em um cartão de memória e transferidas para o software da própria Kyoritsu chamado *KEW Windows for KEW6315*.

As distorções harmônicas de tensão e corrente podem ser analisadas no aparelho conforme a Figura 29, de forma linear ou logarítmica, em forma de gráfico ou tabela e baseadas no valor fundamental medido ou nos valores RMS. Para este trabalho, as medições de distorção harmônica baseadas nos valores fundamentais medidos foram adotadas, conforme valores que serão apresentadas na seção 3.2.2.

Figura 29 - Tela de distorções harmônicas do analisador de qualidade de energia Kew 6315.



Fonte – KYORITSU, 2020.

O software apresenta três maneiras de analisar os dados de acordo com as medições que foram gravadas. “*Time series*” permite analisar os dados de potência, “*Harmonics*” permite analisar as distorções harmônicas e “*Event*” apresenta os possíveis problemas de qualidade de energia detectados. Para este trabalho, serão utilizadas as análises de “*Time series*” e “*Harmonics*”.

## 3.2 MÉTODO

A metodologia de medição e análise dos dados seguiu o *módulo 8* do PRODIST e a norma IEEE Std 519 – 2014, ambas foram apresentadas no capítulo 2.

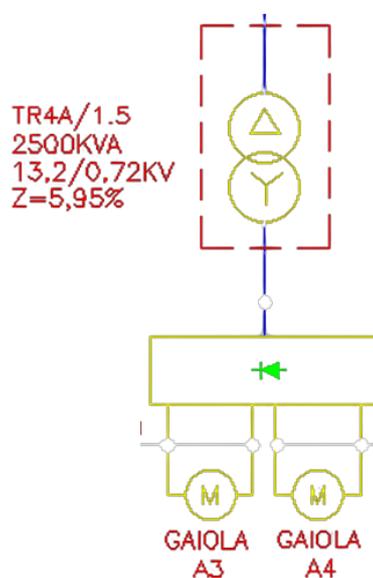
Os principais distúrbios avaliados serão as distorções harmônicas. Para isso, o medidor terá os *setups* de acordo com o que é estabelecido pelas normas já citadas.

### 3.2.1 Medições

As medições foram feitas de acordo com o regime de produção do laminador e foram analisadas inicialmente as cargas e então o transformador. Os diagramas dos equipamentos que foram analisados podem ser observados na Figura 30 e na Figura 32. Pode-se verificar a placa do transformador que alimenta as cargas no Quadro 3.

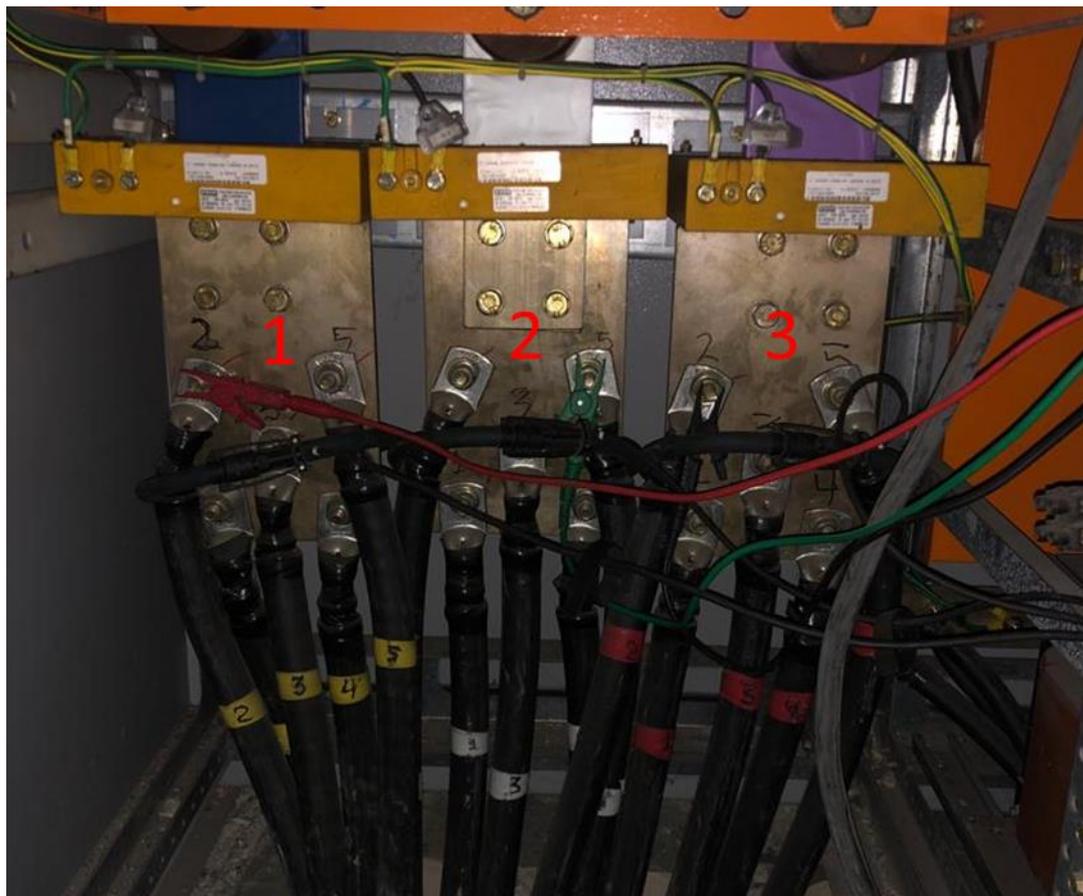
O transformador a seco apresenta a conexão delta-estrela e o secundário não tem o neutro aterrado. As medições foram feitas como está identificado na Figura 31, em que os números representam cada uma das fases e é possível verificar as ponteiros de tensão e corrente. Quanto às cargas, as mesmas foram denominadas “gaiola A3” e “gaiola A4”. Nas representações pode-se observar a presença de um filtro que auxilia na diminuição de interferência entre as cargas.

Figura 30 - Transformador que alimenta as gaiolas A3 e A4.



Fonte – Elaboração própria.

Figura 31 - Montagem das ponteiras do analisador de energia no transformador.



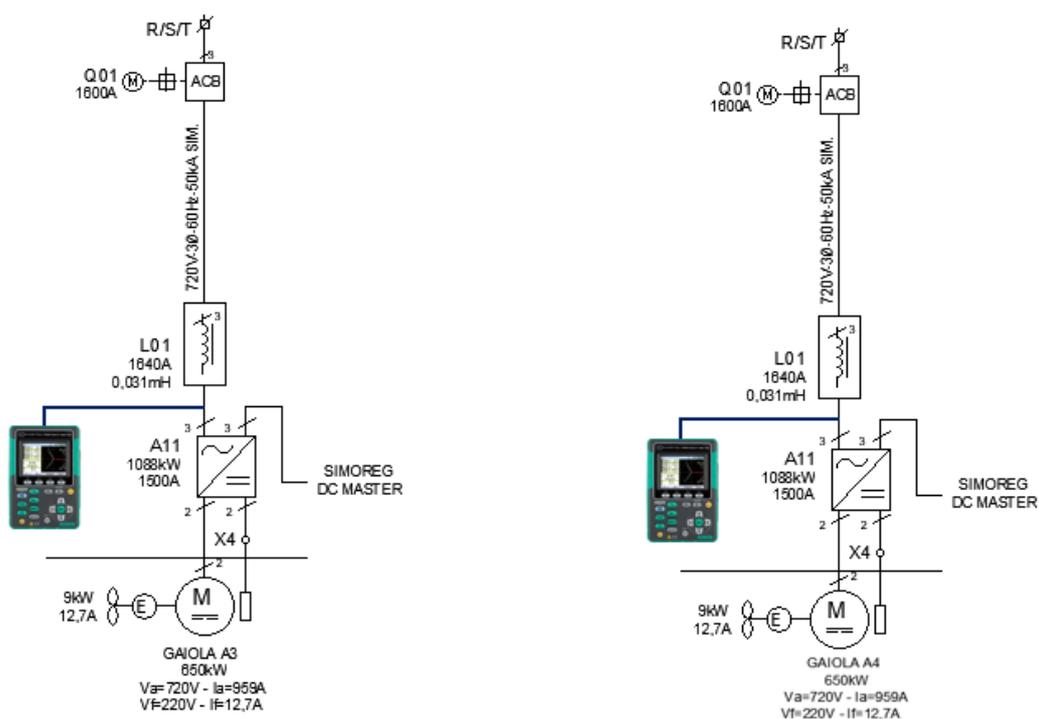
Fonte – Elaboração própria.

Quadro 3 - Dados de placa do transformador que será analisado.

Potência	2500kVA
Tensão	13,2kV/0,72kV
Impedância	5,95%

Fonte – Elaboração própria.

Figura 32 - Diagrama unifilar das cargas denominadas gaiola A3 e gaiola A4 e ponto de medição.



Fonte – Elaboração própria.

A Figura 33 representa a montagem feita para aquisitar os dados da gaiola A3 e é possível observar os componentes apresentados nos diagramas da Figura 32. Verifica-se o disjuntor, o filtro, o *drive* e as saídas do *drive* para a carga. As ponteiras de corrente são do tipo Bobina de Rogowski, tem uma faixa de até 3000A e estão identificadas na Figura 33 com o número 2. As ponteiras de tensão são do tipo garra jacaré e tem uma faixa de até 1000A, dispensando a utilização de divisor de tensão. Na Figura 33 é possível observar o divisor de tensão que sendo utilizado apenas como ponto de conexão para as ponteiras de tensão representadas pelo número 1.

Figura 33 - Montagem do analisador de energia na Gaiola A3.



Fonte – Elaboração própria.

### 3.2.2 Distorções harmônicas

Os principais indicadores utilizados para quantificar a distorção harmônica foram abordados no capítulo anterior e serão apresentados quadros e tabelas para que seja possível fazer a comparação com os dados medidos.

O Quadro 4 apresenta os valores de referência das taxas de distorções harmônicas totais que são permitidos pelo PRODIST. Para cada nível de tensão de barramento as taxas de distorção variam de acordo com o indicador observado. O trabalho em questão utiliza os dados da coluna de tensão inferior ou igual a 2,3kV.

Quadro 4 - Valores de referência globais de distorções harmônicas totais em porcentagem de tensão fundamental de acordo com o PRODIST.

Indicador	Tensão nominal ( $V_n$ )		
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT <sub>95%</sub>	10,0%	8,0%	5,0%
DTT <sub>p,95%</sub>	2,5%	2,0%	1,0%
DTT <sub>i,95%</sub>	7,5%	6,0%	4,0%
DTT <sub>3,95%</sub>	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte – PRODIST, 2021.

Conforme apontado anteriormente, a norma IEEE Std 519 - 2014 oferece como recomendação itens que não se aplicam a equipamentos individuais, pois levam em conta apenas o nível global de distorção de uma instalação, medida no ponto de conexão comum (PCC), nesse trabalho será considerado como o ponto de medição do transformador. Os valores podem ser observados no Quadro 5.

Quadro 5 - Valores de referência de distorções harmônicas individuais e totais de acordo com a norma IEEE Std 519.

Nível de tensão no PCC	Máximo DHIT	Máxima DTT
$V_{PCC} \leq 1 \text{ kV}$	5%	8%
$1 \text{ kV} < V_{PCC} \leq 69 \text{ kV}$	3%	5%
$69 \text{ kV} < V_{PCC} \leq 161 \text{ kV}$	1,5%	2,5%
$V_{PCC} > 161 \text{ kV}$	1%	1,5%

Fonte – Adaptado de IEEE Std 519 - 2014.

A norma apresenta indicações com relação ao limite de distorção de corrente, conforme apresentado no Quadro 6 para tensões de até 69kV. Para a obtenção dos limites de distorção individual na corrente, foi utilizada a relação do cálculo da corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ) com o máximo valor da componente fundamental registrado ( $I_L$ ). A norma

utiliza o índice de distorção total de demanda (DTD) para quantificar a distorção de corrente.

Quadro 6 - Limites de distorção individual de corrente e distorção total de demanda para sistemas com até 69kV de acordo com a norma IEEE Std 519.

I <sub>cc</sub> /I <sub>L</sub>	Distorções harmônicas individuais de corrente					DTD
	3 ≤ h < 11	11 ≤ h < 17	17 ≤ h < 23	23 ≤ h < 35	35 ≤ h ≤ 50	
<20	4	2	1,5	0,6	0,3	5
20-50	7	3,5	2,5	1	0,5	8
50-100	10	4,5	4	1,5	0,7	12
100-1000	12	5,5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2,5	1,4	20

Fonte – Adaptado de IEEE Std 519 – 2014.

O monitoramento e as medições do experimento foram feitos de acordo com os procedimentos discutidos. As análises serão discutidas no capítulo de resultados, assim como os problemas e possíveis soluções encontradas.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A oportunidade de desenvolver o estudo em distorções harmônicas foi observada durante o período estágio feito na manutenção da laminação. A presença de uma grande gama de cargas não lineares, em conjunto com algumas falhas de equipamentos que não tiveram a causa raiz bem fundamentada e conversas com mantenedores eletricitas experientes trouxeram dúvidas a respeito da qualidade de energia elétrica. O trabalho foi desenvolvido em conjunto com técnicos da área para garantir que fossem consideradas as especificidades das instalações elétricas e as medições sejam obtidas de maneira correta.

Inicialmente definiu-se que o estudo seria conduzido com o uso do analisador de qualidade de energia da *Fluke 190-104 ScopeMeter® Test Tool*. Esse medidor conta com a função *Spectrum* que mostra o conteúdo espectral da forma de onda da entrada A, B, C ou D na cor do traço de entrada. Ela realiza uma FFT (Transformação rápida de Fourier) para transformar a forma de onda de amplitude do domínio temporal no domínio de frequência.

No decorrer dos ensaios, constatou-se que o instrumento da *Fluke* não atendia as necessidades do projeto. Ao adquirir dados por um período maior, a taxa de integração aumentava, gerando dados inconsistentes. Conforme mencionado no capítulo 3, foi decidido adotar o analisador de qualidade de energia *Kew 6315 da Kyoritsu*.

A análise foi feita com base nas distorções harmônicas de tensão e de corrente. Os dados estão apresentados de acordo com os valores máximos, médios e em percentil 95%, das distorções harmônicas medidas, considerando a medição de “tempo curto” (10 min) (DECKMANN *et al.*, 2020). É importante ressaltar que o percentil é uma medida de posição relativa de uma unidade de observação em relação a todas as outras de um conjunto de valores dispostos em ordem crescente. Tem no mínimo p% valores abaixo e 100-p% acima do ponto mencionado.

Para que se compreenda as medições provenientes do experimento, deve-se estabelecer que as cargas medidas são gaiolas de laminação que tem uma tensão de alimentação aproximadamente constante e uma corrente variável dependendo da receita de laminação e da carga imposta. Existem alguns fatores que afetam os valores de corrente nos motores das gaiolas de laminação como a calibração aplicada nas gaiolas, a bitola, a

temperatura, a qualidade e a velocidade do material que está sendo laminado. Como existe apenas um equipamento de medição, as medições foram coletadas em dias diferentes.

Os dados indicam se são provenientes de uma das cargas ou do transformador, e são apresentados de acordo com os seguintes indicadores:

- Ordem harmônica;
- Distorção harmônica individual de tensão ou corrente de ordem  $h$  em percentil 95% apresentado em porcentagem (%);
- Distorção harmônica individual de tensão ou corrente de ordem  $h$  máxima apresentado em porcentagem (%);
- Distorção harmônica individual de tensão ou corrente de ordem  $h$  média apresentado em porcentagem (%);
- Distorção harmônica total de tensão de ordem  $h$  apresentado em porcentagem (%);

Para os dados coletados no transformador, além dos indicadores mencionados anteriormente, foi adicionado o indicador de distorção harmônica total de demanda (DTD) de ordem  $h$ . O cálculo do DTD foi apresentado anteriormente e a tabela de comparação de resultados conforme a norma necessita que seja calculado o valor de corrente de curto circuito e corrente de demanda máxima da carga. Ressalta-se que para esse trabalho o PCC é considerado o ponto de medição do transformador.

A partir dos dados analisados, também foi possível calcular o fator  $k$  do transformador e dimensionar um filtro para mitigação de distorções harmônicas.

#### 4.1 ANÁLISE DAS TENSÕES

Os dados das análises de distorção harmônica individual de tensão são apresentados em quadros contendo as seguintes variáveis:

- $DHIT_{95\%}$  significa o percentil 95% da distorção harmônica individual de tensão naquela ordem harmônica apresentada em porcentagem (%).
- $DHIT_{m\acute{a}x}$  significa o valor máximo de distorção harmônica individual de tensão naquela ordem harmônica apresentada em porcentagem (%).
- $DHIT_{m\acute{e}d}$  significa o valor médio de distorção harmônica individual de tensão naquela ordem harmônica apresentada em porcentagem (%). É importante ressaltar que essa variável tem uma diferença significativa quando comparada com as duas anteriores devido ao modo de operação das gaiolas de laminação.

As medições da gaiola A3 ocorreram a partir do dia 06/08/22 às 20:00 até o dia 08/08/22 às 08 horas, foram integralizadas em um intervalo de 10 minutos e medidos em RMS de forma que existem 215 dados válidos.

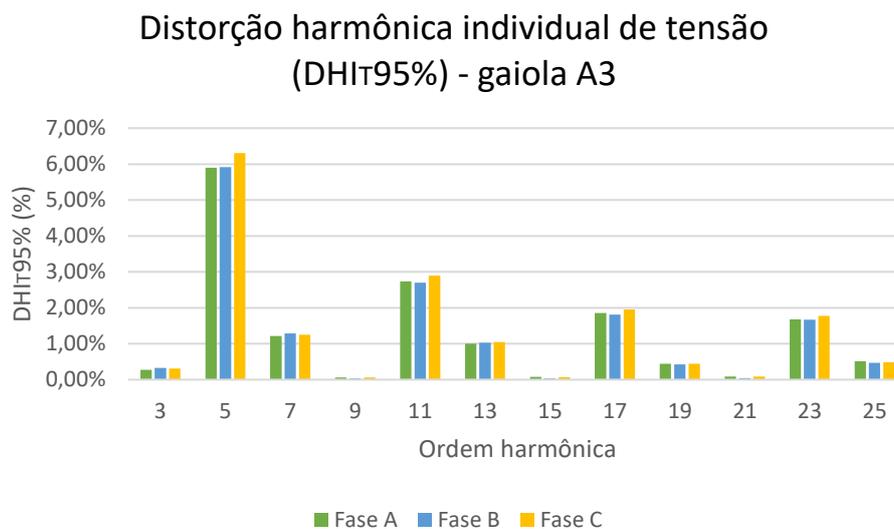
O Quadro 7 mostra os dados de distorção harmônica individual de tensão da gaiola A3, e os valores apresentados por fase nas colunas  $DHIT_{95\%}$  podem ser observados em forma de gráfico de colunas na Figura 34. No gráfico, é possível constatar que o valor mais expressivo de distorção harmônica se encontra na 5ª, seguido por valores presentes na 7ª, 11ª, 13ª, 17ª e 23ª, conforme apontado no capítulo de referencial teórico. Não foram encontrados valores expressivos de harmônicos na terceira ordem porque a configuração de alimentação não tem o neutro aterrado.

Quadro 7 - Valores de distorção harmônica individual de tensão máxima, percentil 95% e média da gaiola A3.

Ordem harmônica	Fase A			Fase B			Fase C		
	$DHIT_{95\%}$	$DHIT_{máx}$	$DHIT_{méd}$	$DHIT_{95\%}$	$DHIT_{máx}$	$DHIT_{méd}$	$DHIT_{95\%}$	$DHIT_{máx}$	$DHIT_{méd}$
3	0,27%	0,55%	0,13%	0,33%	0,73%	0,19%	0,31%	0,77%	0,18%
5	5,90%	7,57%	0,82%	5,92%	7,60%	0,82%	6,31%	8,11%	0,87%
7	1,22%	4,16%	0,45%	1,29%	4,17%	0,45%	1,25%	4,28%	0,46%
9	0,06%	0,14%	0,02%	0,04%	0,19%	0,01%	0,06%	0,15%	0,02%
11	2,74%	4,66%	0,70%	2,70%	4,71%	0,68%	2,90%	4,89%	0,73%
13	1,00%	2,44%	0,39%	1,03%	2,45%	0,40%	1,04%	2,49%	0,40%
15	0,07%	0,19%	0,01%	0,04%	0,16%	0,01%	0,07%	0,21%	0,02%
17	1,85%	3,39%	0,32%	1,81%	3,52%	0,32%	1,95%	3,63%	0,34%
19	0,44%	1,62%	0,09%	0,42%	1,67%	0,08%	0,44%	1,66%	0,09%
21	0,09%	0,26%	0,01%	0,04%	0,13%	0,01%	0,08%	0,27%	0,01%
23	1,68%	3,36%	0,34%	1,67%	3,50%	0,33%	1,78%	3,48%	0,35%
25	0,51%	1,88%	0,21%	0,47%	1,53%	0,21%	0,49%	1,96%	0,22%

Fonte – Elaboração própria.

Figura 34 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de tensão (DHIT95%) da gaiola A3.



Fonte – Elaboração própria.

A norma utilizada para comparação dos valores de distorção harmônica total de tensão das cargas é o PRODIST. Os valores do Quadro 8 foram medidos com o equipamento da KEW e calculados da mesma maneira que a Equação (8) apresentada no capítulo anterior. Conforme o Quadro 4 disponível no capítulo anterior e conforme a última coluna do Quadro 8, o valor limite estabelecido para a DTT95% para tensões nominais menores que 2,3kV é de 10%. É possível constatar que as três fases da gaiola A3 tiveram valores menores que o máximo estabelecido pela norma.

Quadro 8 - Valores de distorção harmônica total de tensão da gaiola A3 e valor limite estabelecido pelo PRODIST.

Fase A			Fase B			Fase C			Limite PRODIST
DTT95%	DTTmáx	DTTmed	DTT95%	DTTmáx	DTTmed	DTT95%	DTTmáx	DTTmed	
7,320%	11,400%	1,565%	7,375%	11,330%	1,633%	7,785%	12,070%	1,694%	10%

Fonte – Elaboração própria.

A Figura 35 mostra a representação gráfica dos valores de distorção total de tensão (DTT) medidos no intervalo de 06/08 às 20:00 até 08/08/2022 às 08:00. Nos momentos em que a distorção ficou próxima de zero não existia carga na gaiola A3. Isso pode ser observado ao traçar o valor de DTT versus corrente da Gaiola A3, conforme a Figura 36.

Figura 35 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão (DTT) da gaiola A3.

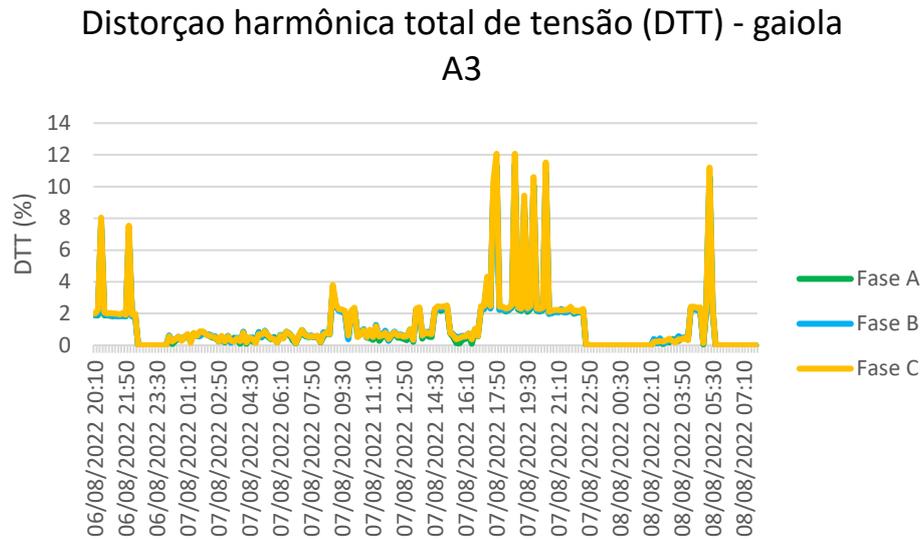
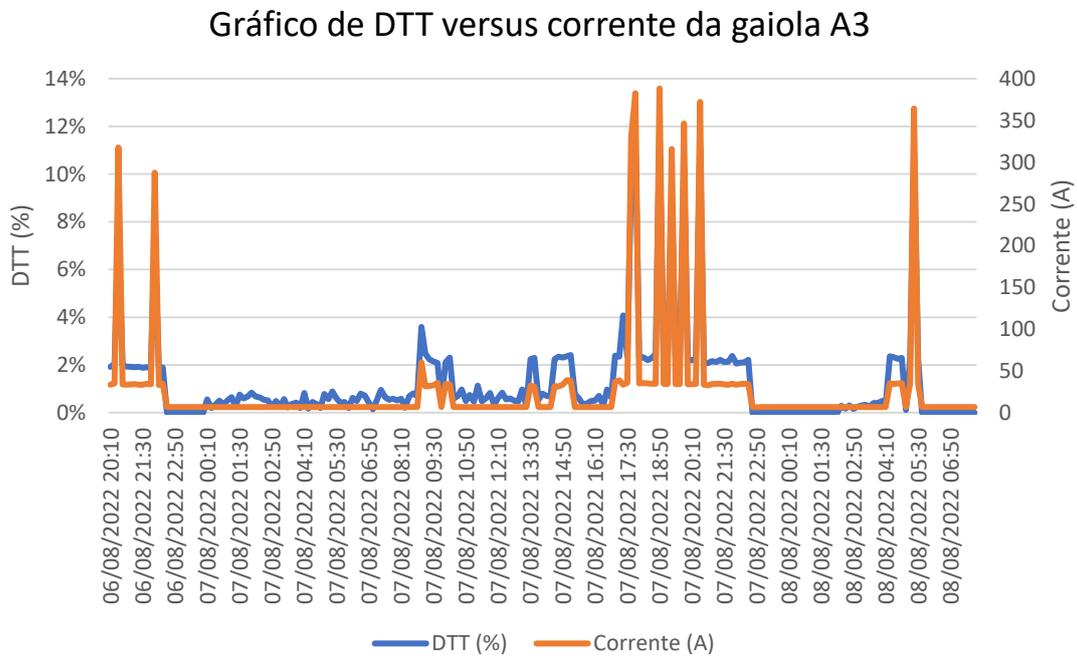


Figura 36 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão (DTT) versus corrente da gaiola A3.



As medições da gaiola A4 ocorreram a partir do dia 17/08/22 às 20:15 até o dia 19/08/22 às 15:40, foram integralizadas em um intervalo de 10 minutos e medidos em RMS de forma que existem 215 valores válidos.

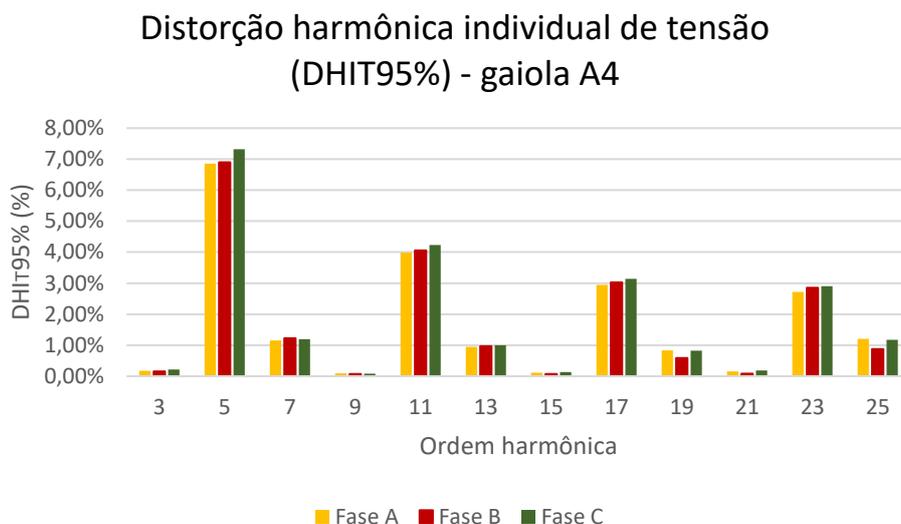
O Quadro 9 mostra os dados de distorção harmônica individual de tensão da Gaiola A4, e os valores apresentados por fase nas colunas DHI $\tau$ 95% podem ser observados em forma de gráfico de colunas na Figura 37/Figura 34. No gráfico, é possível constatar que o valor mais expressivo de distorção harmônica se encontra na 5<sup>a</sup>, seguido por valores presentes na 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 13<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup> e 23<sup>a</sup> e 25<sup>a</sup>, conforme comentado no capítulo de referencial teórico. Não foram encontrados valores expressivos de harmônicos na terceira ordem porque assim como a gaiola A3, a alimentação da gaiola A4 não tem a configuração de neutro aterrado.

Quadro 9 - Valores de distorção harmônica individual de tensão máxima, percentil 95% e média da gaiola A4.

Ordem harmônica	Fase A			Fase B			Fase C		
	DHI $\tau$ 95%	DHI $\tau$ máx	DHI $\tau$ méd	DHI $\tau$ 95%	DHI $\tau$ máx	DHI $\tau$ méd	DHI $\tau$ 95%	DHI $\tau$ máx	DHI $\tau$ méd
3	0,18%	0,28%	0,04%	0,15%	0,10%	0,07%	0,21%	0,30%	0,06%
5	6,86%	7,92%	0,06%	6,90%	2,86%	0,12%	7,32%	8,47%	0,11%
7	1,16%	3,51%	0,01%	1,23%	0,92%	0,03%	1,19%	3,70%	0,04%
9	0,09%	0,16%	0,01%	0,07%	0,03%	0,01%	0,08%	0,18%	0,01%
11	3,99%	5,09%	0,01%	4,05%	1,94%	0,01%	4,24%	5,43%	0,01%
13	0,95%	2,01%	0,01%	0,97%	0,67%	0,01%	1,00%	2,13%	0,01%
15	0,11%	0,22%	0,01%	0,08%	0,03%	0,00%	0,13%	0,28%	0,00%
17	2,95%	3,90%	0,01%	3,03%	1,21%	0,01%	3,14%	4,17%	0,01%
19	0,83%	2,07%	0,01%	0,59%	0,23%	0,01%	0,83%	2,06%	0,01%
21	0,15%	0,29%	0,01%	0,08%	0,03%	0,01%	0,19%	0,37%	0,01%
23	2,72%	3,63%	0,01%	2,85%	1,05%	0,01%	2,90%	3,94%	0,01%
25	1,20%	2,50%	0,01%	0,87%	0,43%	0,01%	1,18%	2,41%	0,01%

Fonte – Elaboração própria.

Figura 37 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de tensão (DHIT95%) da gaiola A4.



Fonte – Elaboração própria.

A norma utilizada para comparação dos valores de distorção harmônica total de tensão das cargas é o PRODIST. Os valores do Quadro 10 foram medidos com o equipamento da KEW e calculados da mesma maneira que a Equação (8) apresentada no capítulo anterior. Ao comparar os valores medidos de DTT95% com a última coluna do Quadro 10, é possível constatar que os valores das três fases da gaiola A4 foram superiores ao limite definido pelo PRODIST. É importante ressaltar que apesar de as especificações dos motores e drives das duas gaiolas serem as mesmas, as duas tem calibrações, velocidades e temperaturas diferentes pela maneira como o trem de laminação é composto. Além disso, como as medições foram feitas em dias diferentes para cada uma das gaiolas, os materiais laminados na gaiola A4 eram de bitolas inferiores aos laminados na gaiola A3.

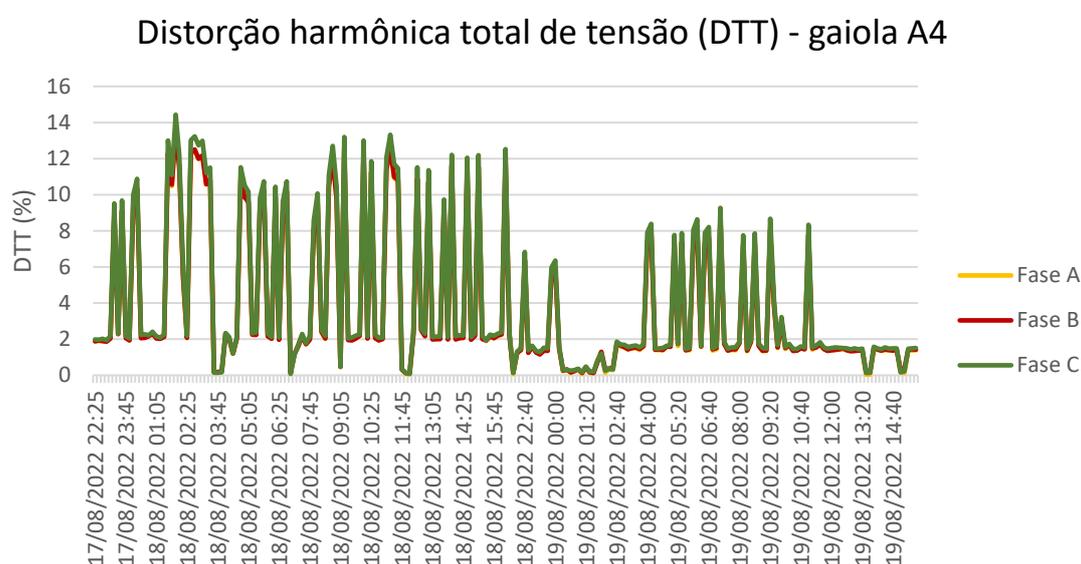
Quadro 10 - Valores de distorção harmônica total de tensão máximo, percentil 95% e média da gaiola A4.

Fase A			Fase B			Fase C			Limite PRODIST
DTT95%	DTTmáx	DTTmed	DTT95%	DTTmáx	DTTmed	DTT95%	DTTmáx	DTTmed	
11,868%	13,600%	3,723%	11,902%	13,620%	3,737%	12,564%	14,430%	3,957%	10%

Fonte – Elaboração própria.

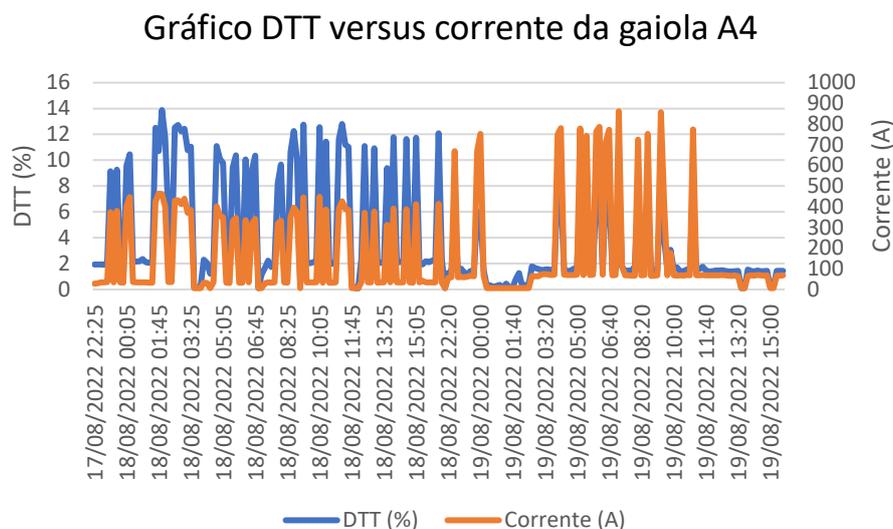
A Figura 38 mostra a representação gráfica dos valores de distorção harmônica total de tensão (DTT) medidos no intervalo de 17/08/22 às 20:15 até o dia 19/08/22 às 15:40. Nos momentos em que a distorção ficou próxima de zero não existia carga na gaiola A4, como pode ser observado ao traçar o valor de DTT versus corrente da gaiola A4, conforme a Figura 39. É possível verificar que a receita de laminação que foi produzida no dia 19/08 a partir das 04:00 horas exigia uma corrente maior do que os materiais produzidos no período anterior, fato confirmado ao se analisar as fichas de calibração das gaiolas, que indica que o material laminado no período mencionado tem propriedades que dificultam a laminação e exigem mais do motor.

Figura 38 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão (DTT) da gaiola A4.



Fonte – Elaboração própria.

Figura 39 - Gráfico de distorção harmônica total (DTT) versus corrente da gaiola A4.



Fonte – Elaboração própria.

As medições do transformador ocorreram a partir do dia 23/08/22 às 08:00 até o dia 27/08/22 às 03:30, foram integralizadas em um intervalo de 10 minutos e medidos em RMS de forma que existem 550 valores válidos.

O Quadro 11 mostra os dados de distorção harmônica individual de tensão do transformador, e os valores apresentados por fase nas colunas DHIT95% podem ser observados em forma de gráfico de colunas na Figura 40. No gráfico, é possível constatar que o valor mais expressivo de distorção harmônica se encontra na 5<sup>a</sup>, seguido por valores presentes na 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup>, 17<sup>a</sup> e 23<sup>a</sup>. Não foram encontrados valores expressivos de harmônicos na terceira ordem porque o transformador não tem a configuração de neutro aterrado.

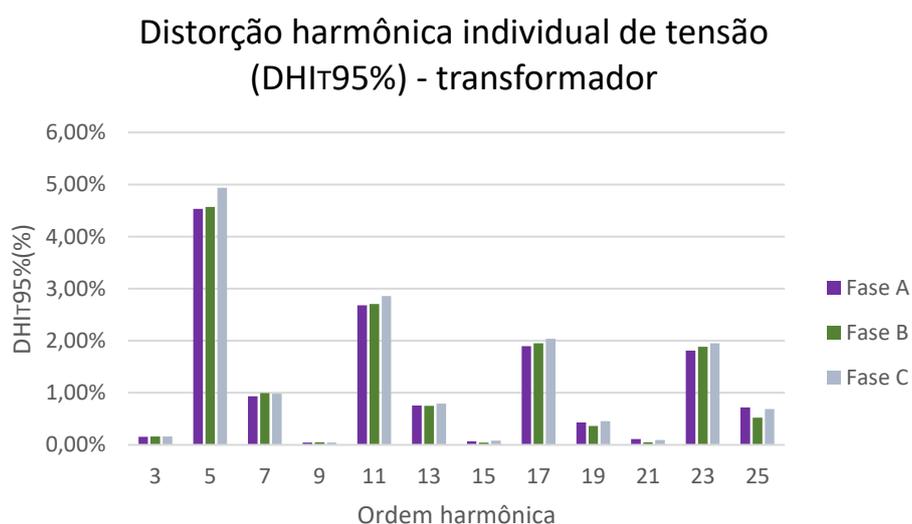
A norma IEEE Std 519 - 2014 estabelece valores de distorção harmônica individual de tensão (DHIT), conforme o Quadro 5. No Quadro 11 pode-se comparar os valores da coluna DHIT95% com o valor limite estabelecido pela IEEE Std 519 – 2014 para tensões inferiores a 1kV, constatando que as medições de todas as fases tem valores menores do limite estabelecido pela norma.

Quadro 11 - Valores de distorção harmônica individual de tensão máxima, percentil 95 e média do transformador.

Ordem harmônica	Fase A			Fase B			Fase C			Limite IEEE Std 519 - 2014
	DHI <sub>T</sub> P95%	DHI <sub>T</sub> máx	DHI <sub>T</sub> méd	DHI <sub>T</sub> P95%	DHI <sub>T</sub> máx	DHI <sub>T</sub> méd	DHI <sub>T</sub> P95%	DHI <sub>T</sub> máx	DHI <sub>T</sub> méd	
3	0,16%	2,25%	0,08%	0,16%	2,23%	0,12%	0,16%	2,02%	0,10%	5%
5	4,53%	5,36%	0,99%	4,57%	5,44%	1,00%	4,94%	5,86%	1,10%	
7	0,93%	2,73%	0,43%	0,99%	2,77%	0,44%	0,98%	2,93%	0,46%	
9	0,04%	0,19%	0,01%	0,05%	0,23%	0,01%	0,04%	0,29%	0,01%	
11	2,68%	3,77%	0,77%	2,70%	3,91%	0,77%	2,86%	4,07%	0,83%	
13	0,76%	1,71%	0,36%	0,75%	1,76%	0,36%	0,79%	1,82%	0,38%	
15	0,07%	0,18%	0,01%	0,05%	0,22%	0,01%	0,08%	0,22%	0,01%	
17	1,90%	2,78%	0,42%	1,95%	2,92%	0,42%	2,04%	2,99%	0,44%	
19	0,43%	1,59%	0,10%	0,36%	1,32%	0,08%	0,45%	1,64%	0,10%	
21	0,11%	0,57%	0,02%	0,05%	0,57%	0,01%	0,09%	0,63%	0,02%	
23	1,81%	2,66%	0,40%	1,88%	2,84%	0,40%	1,95%	2,86%	0,43%	
25	0,72%	1,85%	0,24%	0,52%	1,52%	0,21%	0,69%	1,87%	0,24%	

Fonte – Elaboração própria.

Figura 40 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de tensão (DHI<sub>T</sub>95%) do transformador.



Fonte – Elaboração própria.

A norma utilizada para comparação dos valores de distorção harmônica total de tensão das cargas é o PRODIST. Os valores Quadro 12 foram medidos com o

equipamento da KEW e calculados da mesma maneira que a Equação (8) apresentada no capítulo anterior. O valor limite apresentado no Quadro 4 disponível no capítulo anterior aparece na última coluna do Quadro 12. Comparando as colunas de DTT95% com o valor limite estabelecido pela norma, é possível constatar que as três fases do transformador tiveram valores inferiores ao limite.

A Figura 41 mostra a representação gráfica dos valores de distorção harmônica total de tensão (DTT) medidos no transformador no intervalo de dia 23/08/22 às 08:00 até o dia 27/08/22 às 03:30. É possível verificar que alguns valores ficam próximos do valor definido como limite pela norma, e na fase C foi registrado um valor máximo de 10,54%. Entretanto, para comparação deve-se considerar o valor de DTT95%, de forma que os valores de cada uma das fases se encontram dentro do que é estabelecido pela norma do PRODIST.

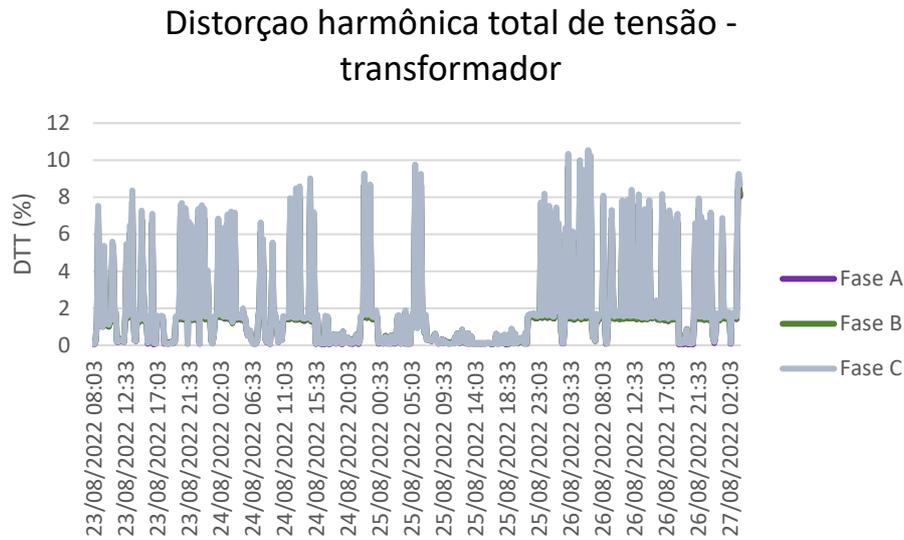
Para as medições do transformador também é possível comparar os valores de distorção harmônica total de tensão com a norma IEEE Std 519 - 2014, conforme o Quadro 5. Ao analisar os dados do Quadro 12, considerando a comparação da coluna de DTT95% com a do valor limite indicado pela norma IEEE Std 519 – 2014, as três fases encontram-se dentro dos valores definidos pela norma

Quadro 12 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão máxima, percentil 95% e média do transformador.

Fase A			Fase B			Fase C			Limite PRODIST	IEEE Std 519 - 2014
DTT95%	DTTmáx	DTTméd	DTT95%	DTTmáx	DTTméd	DTT95%	DTTmáx	DTTméd		
7,114%	9,795%	1,784%	7,232%	9,935%	1,803%	7,698%	10,540%	1,916%	10%	8%

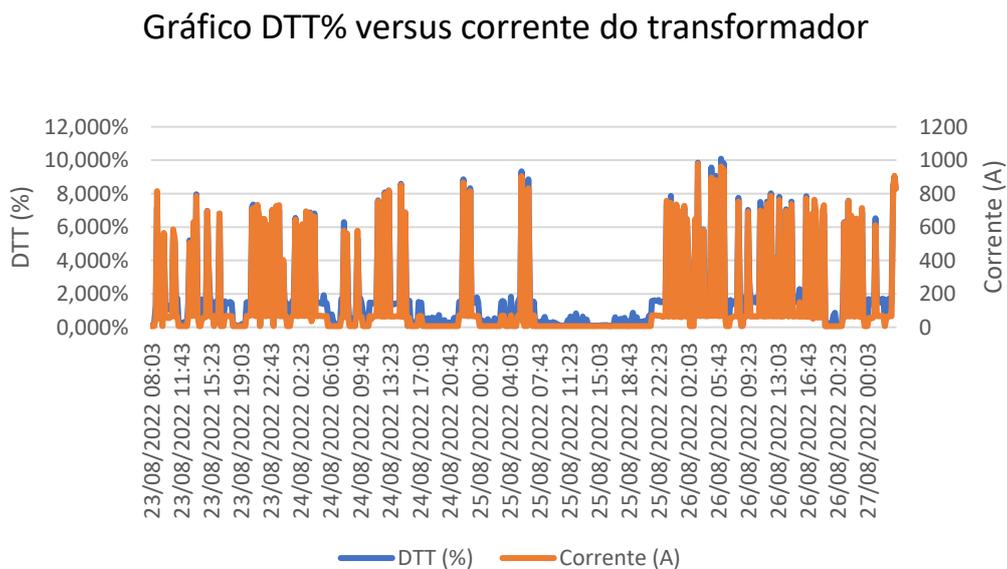
Fonte – Elaboração própria.

Figura 41 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão do transformador.



A Figura 42 mostra o gráfico da distorção harmônica total de tensão (DTT) versus a corrente medida no transformador. É possível observar que quando não há passagem de peças nas gaiolas A3 e A4, a corrente medida no transformador tem valores próximos de zero, assim como os valores da DTT.

Figura 42 - Gráfico de distorção harmônica total de tensão (DTT) versus corrente do transformador.



## 4.2 ANÁLISE DAS CORRENTES

Os dados das análises de distorção harmônica individual de corrente são apresentados em quadros contendo as seguintes variáveis:

- $DH_{I95\%}$  significa distorção harmônica individual de corrente em percentil 95% naquela ordem harmônica apresentada em porcentagem (%).
- $DH_{I\max}$  significa o valor máximo de distorção harmônica individual de corrente naquela ordem harmônica apresentada em porcentagem (%).
- $DH_{I\text{méd}}$  significa o valor médio de distorção harmônica individual de corrente naquela ordem harmônica apresentada em porcentagem (%). É importante ressaltar que essa variável tem uma diferença significativa quando comparada com as duas anteriores devido ao modo de operação das gaiolas de laminação.

Os dados de distorção harmônica individual de corrente das cargas são apresentados, mas não serão analisados porque a norma IEEE Std 519 – 2014 não estabelece valores de comparação para as cargas.

As medições da gaiola A3 ocorreram a partir do dia 06/08/22 às 20:00 até o dia 08/08/22 às 08 horas, foram integralizadas em um intervalo de 10 minutos e medidos em RMS de forma que existem 215 dados válidos.

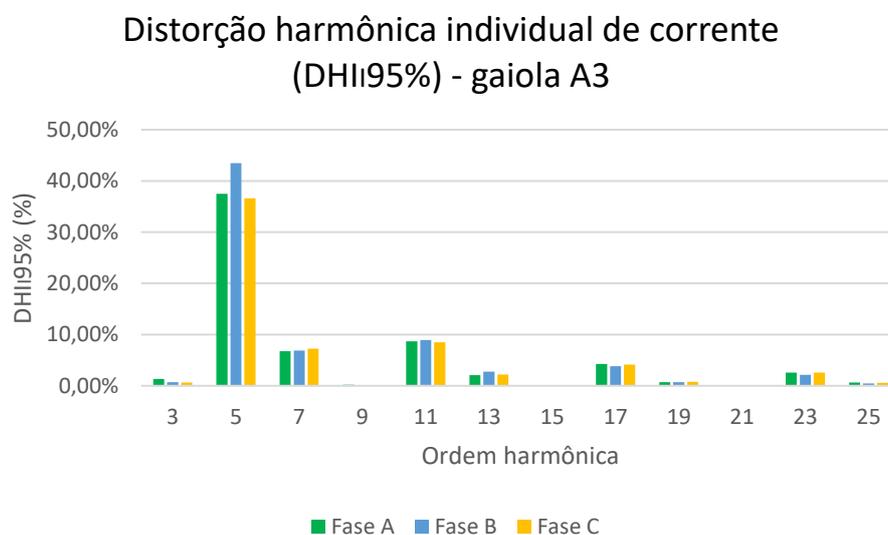
O Quadro 13 mostra os dados de distorção harmônica individual de corrente da gaiola A3, e os valores apresentados por fase nas colunas  $DH_{I95\%}$  podem ser observados em forma de gráfico de colunas na Figura 43Figura 34. No gráfico, é possível constatar que o valor mais expressivo de distorção harmônica se encontra na 5ª harmônica, seguido por valores presentes na 7ª, 11ª, 17ª e 23ª. Não foram encontrados valores expressivos de harmônicos na terceira ordem porque a configuração de alimentação não tem o neutro aterrado.

Quadro 13 - Valores de distorção harmônica individual de corrente máxima, P95% e média da gaiola A3.

Ordem harmônica	Fase A			Fase B			Fase C		
	DHI95%	DHI <sub>máx</sub>	DHI <sub>méd</sub>	DHI95%	DHI <sub>máx</sub>	DHI <sub>méd</sub>	DHI95%	DHI <sub>máx</sub>	DHI <sub>méd</sub>
3	1,36%	1,97%	1,48%	0,68%	1,84%	1,09%	0,62%	1,32%	0,74%
5	37,46%	33,31%	49,34%	43,49%	33,46%	48,20%	36,64%	32,59%	45,00%
7	6,74%	14,90%	20,23%	6,90%	15,49%	20,69%	7,23%	15,20%	19,78%
9	0,20%	0,28%	0,25%	0,09%	0,39%	0,14%	0,08%	0,37%	0,08%
11	8,70%	8,57%	17,32%	8,95%	8,79%	16,69%	8,50%	8,42%	15,65%
13	2,08%	4,52%	7,46%	2,76%	4,65%	7,92%	2,18%	4,54%	7,50%
15	0,08%	0,21%	0,06%	0,00%	0,23%	0,02%	0,00%	0,20%	0,01%
17	4,23%	4,43%	5,38%	3,85%	4,74%	5,26%	4,16%	4,40%	4,93%
19	0,73%	1,78%	0,79%	0,70%	1,97%	0,89%	0,76%	1,86%	0,84%
21	0,04%	0,21%	0,03%	0,00%	0,20%	0,01%	0,00%	0,18%	0,00%
23	2,55%	2,78%	2,99%	2,17%	3,06%	2,89%	2,56%	2,84%	2,65%
25	0,65%	1,45%	1,28%	0,45%	1,07%	1,21%	0,56%	1,25%	1,21%

Fonte – Elaboração própria.

Figura 43 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de corrente (DHI95%) da gaiola A3.



Fonte – Elaboração própria.

As medições da gaiola A4 ocorreram a partir do dia 17/08/22 às 20:15 até o dia 19/08/22 às 15:40, foram integralizadas em um intervalo de 10 minutos e medidos em RMS de forma que existem 215 valores válidos.

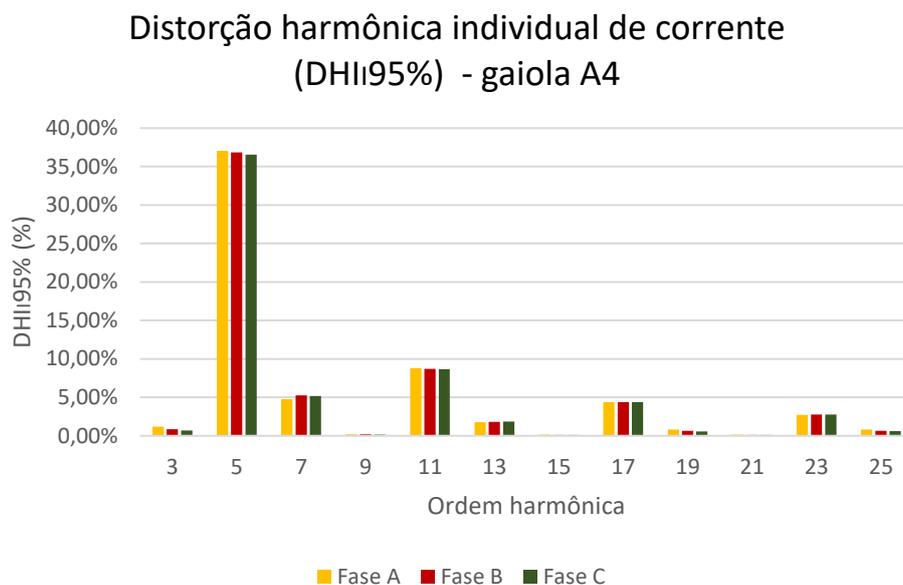
O Quadro 14 mostra os dados de distorção harmônica individual de corrente da gaiola A4, e os valores apresentados por fase nas colunas DHII95% podem ser observados em forma de gráfico de colunas na Figura 44. No gráfico, é possível constatar que o valor mais expressivo de distorção harmônica se encontra na 5ª, seguido por valores presentes na 7ª, 11ª, 17ª e 23ª. Não foram encontrados valores expressivos de harmônicos na terceira ordem porque assim como a gaiola A3, a gaiola A4 não tem a configuração de neutro aterrado na alimentação.

Quadro 14 - Valores de distorção harmônica individual de corrente máxima, P95% e média da gaiola A4.

Ordem harmônica	Fase A			Fase B			Fase C		
	DHII95%	DHII <sub>máx</sub>	DHII <sub>méd</sub>	DHII95%	DHII <sub>máx</sub>	DHII <sub>méd</sub>	DHII95%	DHII <sub>máx</sub>	DHII <sub>méd</sub>
3	1,19%	1,18%	1,37%	0,84%	1,04%	1,20%	0,69%	0,79%	0,83%
5	37,05%	34,76%	42,49%	36,85%	34,64%	42,31%	36,56%	34,44%	41,94%
7	4,74%	10,84%	12,14%	5,27%	11,35%	12,70%	5,18%	11,34%	12,65%
9	0,21%	0,30%	0,29%	0,19%	0,26%	0,28%	0,14%	0,28%	0,22%
11	8,78%	8,72%	12,90%	8,71%	8,74%	12,80%	8,65%	8,66%	12,68%
13	1,77%	2,96%	4,00%	1,82%	3,16%	4,21%	1,86%	3,20%	4,09%
15	0,15%	0,26%	0,12%	0,13%	0,16%	0,07%	0,11%	0,16%	0,08%
17	4,39%	4,56%	4,63%	4,39%	4,64%	4,69%	4,37%	4,61%	4,67%
19	0,80%	1,57%	0,75%	0,67%	1,30%	0,67%	0,58%	1,27%	0,55%
21	0,13%	0,23%	0,10%	0,10%	0,12%	0,04%	0,10%	0,14%	0,06%
23	2,72%	2,89%	2,90%	2,76%	3,01%	2,91%	2,75%	2,98%	2,92%
25	0,82%	1,43%	1,18%	0,66%	1,20%	1,09%	0,59%	1,15%	1,01%

Fonte – Elaboração própria.

Figura 44 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de corrente P95% da gaiola A4.



Fonte – Elaboração própria.

As medições do transformador ocorreram a partir do dia 23/08/22 às 08:00 até o dia 27/08/22 às 03:30, foram integralizadas em um intervalo de 10 minutos e medidos em RMS de forma que existem 550 dados válidos.

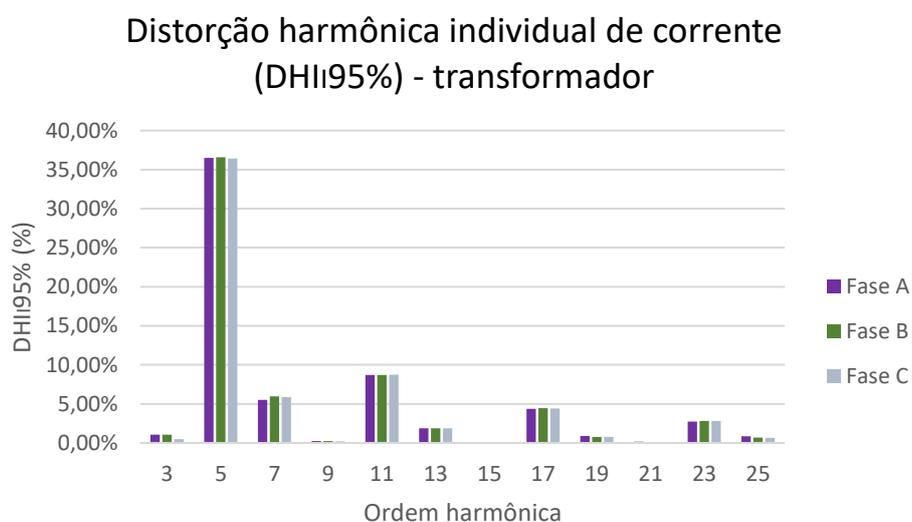
O Quadro 15 mostra os dados de distorção harmônica individual de corrente do transformador, e os valores apresentados por fase nas colunas DHI95% podem ser observados em forma de gráfico de colunas na Figura 45. No gráfico, é possível constatar que o valor mais expressivo de distorção harmônica se encontra na 5ª, seguido por valores presentes na 7ª, 11ª, 17ª e 23ª. Não foram encontrados valores expressivos de harmônicos na terceira ordem porque o transformador não tem a configuração de neutro aterrado.

Quadro 15 - Valores de distorção harmônica individual de corrente máxima e P95% do transformador.

Ordem harmônica	Fase A			Fase B			Fase C		
	DHII95%	DHII <sub>máx</sub>	DHII <sub>méd</sub>	DHII95%	DHII <sub>máx</sub>	DHII <sub>méd</sub>	DHII95%	DHII <sub>máx</sub>	DHII <sub>méd</sub>
3	1,06%	2,46%	1,02%	1,06%	2,86%	1,12%	0,48%	2,46%	1,02%
5	36,50%	31,03%	43,82%	36,58%	31,17%	43,72%	36,43%	31,03%	43,82%
7	5,53%	11,15%	14,35%	5,97%	11,51%	14,64%	5,89%	11,15%	14,35%
9	0,23%	0,54%	0,18%	0,25%	0,76%	0,26%	0,19%	0,54%	0,18%
11	8,72%	8,50%	13,71%	8,72%	8,59%	13,68%	8,73%	8,50%	13,71%
13	1,86%	3,37%	5,03%	1,87%	3,56%	5,18%	1,90%	3,37%	5,03%
15	0,13%	0,35%	0,12%	0,14%	0,39%	0,12%	0,13%	0,35%	0,12%
17	4,39%	4,47%	4,89%	4,45%	4,69%	4,96%	4,42%	4,47%	4,89%
19	0,89%	2,25%	0,94%	0,76%	2,02%	0,87%	0,77%	2,25%	0,94%
21	0,15%	0,63%	0,13%	0,12%	0,64%	0,09%	0,13%	0,63%	0,13%
23	2,72%	2,84%	3,08%	2,83%	3,03%	2,98%	2,82%	2,84%	3,08%
25	0,87%	1,88%	1,26%	0,70%	1,69%	1,31%	0,66%	1,88%	1,26%

Fonte – Elaboração própria.

Figura 45 - Gráfico de barras da distorção harmônica individual de corrente P95% do transformador.



Fonte – Elaboração própria.

A norma IEEE Std 519 - 2014 estabelece valores de DHII, conforme o Quadro 6. Para a obtenção dos limites de distorção individual na corrente, foi utilizada a relação do cálculo da corrente de curto circuito ( $I_{cc}$ ) com o máximo valor da componente fundamental registrado ( $I_L$ ). O cálculo foi feito a partir da metodologia proposta pela IEC 60909 presente em (HADJSAID *et al.*, 2013) e (KASIKCI, 2002) e resultou em um valor

entre os limites  $20 < I_{cc}/I_L < 50$ . A norma utiliza o índice de distorção total de demanda (DTD) para quantificar a distorção de corrente. É possível observar os limites impostos pela IEEE Std 519 – 2014 em comparação com os valores encontrados na medição no Quadro 16. A 5ª harmônica extrapolou significativamente o limite indicado pela norma. A 11ª, 17ª e 23ª também extrapolaram o limite indicado pela norma, mas de forma menos significativa que a 5ª harmônica.

Quadro 16 - Valores medidos para distorção harmônica de corrente individual e valor limite definido pela norma IEEE Std 519 – 2014.

Ordem harmônica	Fase A	Fase B	Fase C	IEEE Std 519 - 2014
	DHII95%	DHII95%	DHII95%	
3	1,06%	1,06%	0,48%	7%
5	36,50%	36,58%	36,43%	
7	5,53%	5,97%	5,89%	
9	0,23%	0,25%	0,19%	
11	8,72%	8,72%	8,73%	3,5%
13	1,86%	1,87%	1,90%	
15	0,13%	0,14%	0,13%	
17	4,39%	4,45%	4,42%	2,5%
19	0,89%	0,76%	0,77%	
21	0,15%	0,12%	0,13%	
23	2,72%	2,83%	2,82%	1%
25	0,87%	0,70%	0,66%	

Fonte – Elaboração própria.

Para fins de comparação com a norma IEEE Std 519 – 2014, foi calculado o valor de distorção total de demanda (DTD) conforme indicado na Equação (12) considerando o mesmo valor de  $I_L$  utilizado para o cálculo de  $I_{cc}/I_L$ . Os valores para DTD estão apresentados no Quadro 17, assim como o limite imposto pelos limites  $20 < I_{cc}/I_L < 50$  do Quadro 6. É possível observar que o valor calculado de DTD para o transformador é menor do que o indicado pela norma.

Quadro 17 - Valores de distorção total de demanda do transformador.

Fase A			Fase B			Fase C			IEEE Std 519 - 2014
DTD95%	DTDmáx	DTDméd	DTD95%	DTDmáx	DTDméd	DTD95%	DTDmáx	DTDméd	
2,052%	2,365%	0,794%	2,106%	2,428%	1,306%	2,059%	2,400%	0,803%	8%

Fonte – Elaboração própria.

### 4.3 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA

O equipamento de medição Kew 6315 permite a análise de outros dados como a variação de frequência. Durante a medição dos dados do transformador, o valor máximo de frequência medido foi de 60,1 Hz e o valor mínimo foi de 59,9 Hz. O PRODIST regulamenta que em condições normais de operação, os limites de variação de frequência devem ser estabelecidos entre 59,9 e 60,1 Hz, permitindo uma variação de aproximadamente  $\pm 0,1$  Hz. Portanto, os valores medidos estão dentro do que é estabelecido pela norma.

### 4.4 CÁLCULO DO FATOR K

Com base no que foi apresentado no capítulo 2, é possível calcular o “fator K” para o transformador em análise utilizando os dados do transformador apresentados no Quadro 18 Quadro 3. Os cálculos são apresentados no Quadro 19, baseado na Equação (6) e na corrente nominal de 2005A, é possível verificar que o “fator K” calculado é de aproximadamente 1,67. A teoria afirma que para casos em que o transformador alimenta cargas não lineares, o valor do “fator K” é sempre superior a 1.

Quadro 18 - Valores de potência, tensão e corrente nominal do transformador.

Potência	2500	kVA
Tensão	0,72	kV
Corrente	2005	A

Fonte – Elaboração própria.

Quadro 19 - Cálculo do "fator k".

Ordem Harmônica	Corrente (%)	Frequência (Hz)	Sequência	Corrente (pu)	I <sup>2</sup>	I <sup>2</sup> *h <sup>2</sup>
1	100%	60	+	1	1	1
2	0,08%	120	-	0,0008	0,0000007	0,0000028
3	0,30%	180	0	0,0030	0,0000091	0,0000818
4	0,05%	240	+	0,0005	0,0000002	0,0000038
5	12,72%	300	-	0,1272	0,0161760	0,4044008
6	0,04%	360	0	0,0004	0,0000002	0,0000057
7	2,02%	420	+	0,0202	0,0004081	0,0199982
8	0,02%	480	-	0,0002	0,0000000	0,0000021
9	0,08%	540	0	0,0008	0,0000006	0,0000504
10	0,00%	600	+	0,0000	0,0000000	0,0000002
11	3,04%	660	-	0,0304	0,0009233	0,1117188
12	0,00%	720	0	0,0000	0,0000000	0,0000000
13	0,65%	780	+	0,0065	0,0000428	0,0072302
14	0,00%	840	-	0,0000	0,0000000	0,0000000
15	0,05%	900	0	0,0005	0,0000002	0,0000479
16	0,00%	960	+	0,0000	0,0000000	0,0000000
17	1,54%	1020	-	0,0154	0,0002370	0,0684951
18	0,00%	1080	0	0,0000	0,0000000	0,0000000
19	0,28%	1140	+	0,0028	0,0000079	0,0028412
20	0,00%	1200	-	0,0000	0,0000000	0,0000000
21	0,05%	1260	0	0,0005	0,0000002	0,0000950
22	0,00%	1320	+	0,0000	0,0000000	0,0000000
23	0,97%	1380	-	0,0097	0,0000946	0,0500286
24	0,00%	1440	0	0,0000	0,0000000	0,0000000
25	0,26%	1500	+	0,0026	0,0000067	0,0041943
					Fator K =	1,6691970

Fonte – Elaboração própria.

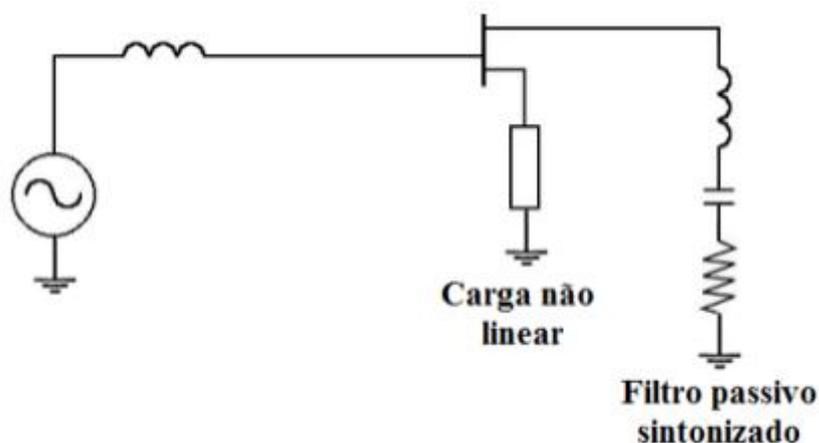
#### 4.5 DIMENSIONAMENTO DO FILTRO

Comumente, alimentadores com menores impedâncias que têm maiores níveis de harmônicas na corrente produzirão uma limitada distorção na tensão (DECKMANN *et al.*, 2020). Esse fato auxilia no entendimento de que existe uma distorção harmônica de corrente significativa. O grau de tolerância de distorções harmônicas depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis são os de carga resistiva, para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que assumem a existência de uma alimentação senoidal, como equipamentos de comunicação. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença

de harmônicas (de tensão ou de corrente) podem ser prejudiciais, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes.

Para a diminuição da distorção harmônica individual de corrente acima dos limites encontrados nesse trabalho e preservação do transformador, propõe-se a utilização um filtro passivo sintonizado para a 5ª harmônica visto que foi a ordem harmônica que ultrapassou significativamente os limites indicados pela norma. A Figura 46 mostra um exemplo de como o filtro passivo sintonizado monofásico pode ser conectado em um circuito, a ideia é a mesma para circuitos trifásicos. Os parâmetros do filtro podem ser calculados a partir de iterações e nesse caso o filtro foi dimensionado a partir dos valores medidos, considerando o Quadro 20. O *módulo 8* do PRODIST indica que o fator de potência deve estar entre 1 e 0,92, portanto nesse trabalho será corrigido para 0,95. Dessa forma, foi escolhido o fator de potência da fase C para o cálculo de correção e de potência reativa disponível no ponto analisado, conforme a Equação (16), Equação (17), Equação (18) e Equação (19).

Figura 46 - Exemplo de um filtro passivo sintonizado monofásico.



Fonte – GOULART, 2018.

Quadro 20 - Valores de potência ativa, reativa, aparente e fator de potência para dimensionamento do filtro.

Grandeza	Fase A	Fase B	Fase C
Potência Ativa (kW)	207,68	209,67	205,80
Potência Reativa (kVAr)	216,84	218,63	216,54
Potência Aparente (kVA)	299,12	300,91	297,31
Fator de Potência	0,699725	0,701225	0,699725

Fonte – Elaboração própria.

$$\cos(\theta) = 0,95 \quad (16)$$

$$\theta = 18,19^\circ \quad (17)$$

$$Q_{f,1} = P (tg\theta_1 - tg\theta_2) \quad (18)$$

$$Q_{f,1} = 205,80k (tg45,6^\circ - tg18,19^\circ) = 142,5kvar \quad (19)$$

Para o valor de potência reativa encontrada na Equação (19), o valor do banco de capacitores necessários para a correção do fator de potência pode ser calculado pela Equação (20).

$$C = \frac{Q_{f,1}}{2 \pi f V^2} \frac{(h_r^2 - 1)}{h_r^2} \quad (20)$$

Em que C é a capacitância (F).

f é a frequência fundamental (Hz).

V é a tensão nominal (V).

hr é a frequência de ressonância e calculada pela Equação (21).

$$hr = h d \quad (21)$$

Em que h é o valor da ordem harmônica para a qual o filtro será projetado.

d é o fator de dessintonia (%), e nesse caso é de 6%, conforme a norma IEEE Std 1531 – 2003.

Substituindo as incógnitas da Equação (20), encontra-se a Equação (22).

$$C = \frac{142,5k}{2 \pi 60 720^2} \frac{(4,7^2 - 1)}{4,7^2} = 696,1 \mu F \quad (22)$$

O valor da reatância capacitiva pode ser calculado a partir da Equação (23).

$$X_c = \frac{1}{2 \pi 60 C} = 3,81 \Omega \quad (23)$$

Seguindo com o projeto do filtro, é necessário igualar a reatância capacitiva disponibilizada pelo banco de capacitores a ser instalado com a reatância indutiva

necessária. Portanto, o cálculo da indutância pode ser feito pela Equação (24) e o da reatância indutiva pela Equação (25).

$$L = \frac{1}{4 \pi^2 f^2 h r^2 C} = 0,46 \text{ mH} \quad (24)$$

$$X_L = 2 \pi f L = 0,17 \Omega \quad (25)$$

Em que L é a indutância (H).

hr é a frequência de ressonância.

C é a capacitância (F).

f é a frequência fundamental (Hz).

O fator de qualidade do filtro normalmente é definido entre 20 e 80 (NASCIMENTO, 2007). Para este trabalho, foi considerado como 50. Portanto, a resistência pode ser calculada como a Equação (26). O valor da resistência define a impedância mínima do sistema, limitando a corrente máxima a passar pelo filtro.

$$R = \frac{\sqrt{L}}{\sqrt{C}} = 16,21 \text{ m}\Omega \quad (26)$$

Para determinar qual a corrente máxima suportada pelo filtro, utilizou-se o valor de tensão correspondente ao máximo valor RMS da quinta harmônica da fase C, equivalente a  $I_5 = 309,09\text{A}$ , conforme a Equação (27).

$$I_F = \frac{|V_F|}{|Z_{eq}|} \quad (27)$$

Em que  $V_f$  (V) é o valor de tensão correspondente ao máximo valor RMS da ordem harmônica para o qual o filtro está sendo dimensionado.

$Z_{eq}$  ( $\Omega$ ) é a impedância equivalente do filtro dada pela Equação (28).

O resultado da Equação (27) é dado pela Equação (29).

$$Z_{eq} = -jX_C + jX_L + R \quad (28)$$

$$I_F = \frac{701,287}{3,64} = 192,7 \text{ A} \quad (29)$$

Portanto, a corrente total RMS que passará pelo filtro é dada pela Equação (30).

$$I_T = \sqrt{I_S^2 + I_F^2} = 364,22 \text{ A} \quad (30)$$

É importante ressaltar que a análise de necessidade de instalação de um filtro foi feita com base nos dados obtidos com as medições para esse trabalho, sendo interessante a validação a partir de uma gama que abranja a maior quantidade de dados provenientes das diferentes bitolas e materiais laminados pelas gaiolas.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

### 5.1 CONCLUSÕES

O trabalho alcançou o objetivo principal de analisar as distorções harmônicas em um ponto estratégico da instalação elétrica de uma indústria, buscando entender o impacto das cargas não lineares no ponto de medição. Foi feita uma revisão teórica abordando os principais conceitos, equações e normas utilizadas para as análises. O equipamento foi escolhido e a coleta de medições foi planejada e executada. De posse dos dados, foi necessário tratá-los de maneira adequada para as comparações com as normas do PRODIST e do IEEE Std 519 – 2014.

Foi observado que as distorções harmônicas totais de tensão de uma das cargas não lineares, mais especificamente da gaiola A4, foram superiores ao limite indicado pelo PRODIST. Já as medições da gaiola A3 e no secundário do transformador foram inferiores ao indicado pelo PRODIST, e os dados do transformador foram inferiores aos valores de distorção harmônica individual e total de tensão indicados pela norma IEEE Std 519 – 2014. É importante ressaltar que as gaiolas têm as mesmas características construtivas de motor e drive CC, mas não têm a mesma calibração devido à forma construtiva do laminador. Além disso, as medições foram coletadas em dias diferentes, o que implica que diferentes materiais eram laminados e as variáveis que influenciam como calibração, temperatura e velocidade do material eram diferentes.

Para as distorções harmônicas de corrente, foi utilizada a norma IEEE Std 519 – 2014 para comparação com os valores medidos. A norma indica que as medições sejam coletadas em um ponto de conexão comum (PCC), visto que o objetivo da norma é impedir que o usuário gere distorções harmônicas para a rede e afete outros usuários. Entretanto, a norma pode ser usada para guiar o usuário no sistema interno para evitar problemas operacionais (BLOOMING *et al.*, 2006). Nesse trabalho a norma IEEE Std 519 – 2014 foi aplicada nos dados de medição do secundário do transformador analisado, assim como o cálculo da distorção total de demanda. Constatou-se que a 5ª harmônica de corrente extrapolou significativamente o limite indicado pela norma. As harmônicas de ordem 11ª, 17ª e 23ª também extrapolaram o limite indicado pela norma, mas de forma menos significativa que a 5ª harmônica.

Para reduzir a distorção harmônica de corrente de 5ª ordem, foi projetado um filtro baseado nos dados de medição coletados nesse trabalho. Com os dados do estudo, também

foi possível calcular o “fator K” do transformador, um dado que pode ser utilizado para melhorias futuras.

## 5.2 TRABALHOS FUTUROS

Esse trabalho propôs a análise das distorções harmônicas em um ponto específico e validar a metodologia para aplicar em outros pontos da usina. Em conjunto com essa expansão, pode-se considerar a instalação de um detector de fluxo de harmônicas em pontos estratégicos para verificar como o impacto gerado no transformador analisado impacta no restante da ligação. É interessante conhecer se o fluxo de entrada de energia da planta recebe ou produz distorções harmônicas para um diagnóstico completo.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade Na Energia Elétrica: Efeitos dos Distúrbios, Diagnósticos e Soluções**. 2a Ed., EdArtliber, 2013.
- ANEEL, **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica**. Resolução Normativa 956/2021.
- BLOOMING, T.M., CARNOVALE, D. J. **Application of IEEE STD 519-1992 Harmonic Limits**. Conference Record of 2006 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, 2006.
- CARVALHO, T.L.C. **Estudo das harmônicas geradas internamente em motores elétricos assíncronos trifásicos**. 2018. 159p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.
- DECKMANN, S.M. *et al.* **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 2020. 155p. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2020.
- DUGAN, C.R. *et al.* **Electrical Power System Quality**. 2003. 528p. 2a Ed. New York: McGraw-Hill, 2003.
- GAMA, P. H. R. P.; OLIVEIRA, A. **Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade de Energia Elétrica**. XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu: [s.n.]. 1999.
- GOULART, T. A. **Estudo de Aplicações de Filtros Sintonizados em Parques Eólicos**. Monografia – Engenharia de Energia da Universidade de Brasília, Brasília, 2018.
- KASIKCI, Ismail. **Short Circuits in Power Systems: A Practical Guide to IEC 60 909**. 2002. 266p. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co, Germany, 2002.
- MAGALHÃES, C.M.S. **Análise do Impacto de Conversores de Frequência na qualidade de Energia do Sistema de Distribuição de uma Indústria de Petróleo**. 2010. 125p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Pará, Pará, 2010.
- MIRCEA, E. *et al.* **Handbook of electrical power system dynamics: Modeling, Stability and Control**. Jonh Wiley & Sons, Inc. New Jersey, 2013.
- Method of Symmetrical Components. In: Ebrary.net. 2014. Disponível em: <[https://ebrary.net/84192/computer\\_science/method\\_symmetrical\\_components](https://ebrary.net/84192/computer_science/method_symmetrical_components)>.
- Acesso em 13 mar. 2022.

NASCIMENTO, R. P. d. *et al.* **Propostas de procedimentos para projetar filtros harmônicos a partir de um programa de penetração harmônica, incluindo cálculos de desempenho e de suportabilidade.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2007.

NIELSON, Rafael. **Harmônicos triplos no sistema de distribuição e uma proposta de mitigação.** 2013. 163p. Dissertação de Mestrado - Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação da Universidade Federal de Goiás, 2013.

PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Harmônicas nas Instalações Elétricas.** 2001. 69p. PROCOBRE, São Paulo, 2001.

RODRIGUES, Augusto M. **Influência da Distorção Harmônica e de Desequilíbrios em Medidores de Energia Elétrica Ativa.** 2009. 11p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

SCHALLENBERGER, G. **Medição da Qualidade de Energia: Fator K Transformador.** 2019. 15p. Electric, Sapucaia do Sul, Brasil, 2019.

SILVA, Marina M.D. **Análise de filtros passivos de harmônicos de conversor CA/CC de seis pulsos.** 2007. 112p. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

TEIXEIRA, Douglas Â. **Análise das Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de um Sistema Industrial.** 2009. 127p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems.** 2014. 29p. IEEE, New York, USA, 2014.

The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. **IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters.** 2003. 69p. IEEE, New York, USA, 2003.

WEIDAUER, J. *et al.* **Electrical Drives.** 2014. 398p. 1<sup>st</sup> Ed. Publicis Erlangen, Zweigniederlassung der PWW GmbH, 2014.