

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
ENGENHARIA ELETRÔNICA

EVANDRO BALLERO ZOTESSO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA QUALIDADE DA ENERGIA  
ELÉTRICA SOB A ÓTICA DA MELHORIA DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM  
UMA INDÚSTRIA NA CIDADE DE TOLEDO - PR**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TOLEDO  
2019

EVANDRO BALLERO ZOTESSO

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA QUALIDADE DA ENERGIA  
ELÉTRICA SOB A ÓTICA DA MELHORIA DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM  
UMA INDÚSTRIA NA CIDADE DE TOLEDO - PR**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 1, do curso de Engenharia Eletrônica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Roberto Bombacini.

TOLEDO  
2019

## TERMO DE APROVAÇÃO

Título do Trabalho de Conclusão de Curso Nº 109

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA SOB A ÓTICA DA MELHORIA DAS INSTALAÇÕES ELÉTRICAS EM UMA INDÚSTRIA NA CIDADE DE TOLEDO - PR**  
por

**EVANDRO BALLERO ZOTESSO**

Esse Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado às 13h30 do dia 12 de dezembro de 2019 como requisito parcial para a obtenção do título Bacharel em Engenharia Eletrônica. Após deliberação da Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados, o trabalho foi considerado APROVADO.

---

**Ednei Luiz Miotto**

COELE/UTFPR-TD

---

**Victor Alexandre Franco de Carvalho**

COELE/UTFPR-TD

---

**MARCOS ROBERTO BOMBACINE**

COELE/UTFPR-TD

Orientador (a)

---

**Fabio Rizental Coutinho**

Coordenador(a) da COELE

Toledo, 25/02/2020

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, José Carlos e Aparecida, que além de todo aprendizado que fora me passado, não medem esforços para ajudar não só a mim, mas a todos os meus irmãos.

Aos meus queridos irmãos Carlos Eduardo, José Elias, Ana Elisa e Ana Clara por acreditarem sempre no meu sucesso. Saibam que serei eternamente um admirador de vocês.

A minha namorada Mariana, muito obrigado pela ajuda, pela paciência, pela colaboração e pelo amor que tem por mim. Eu amo você.

Ao meu professor Marcos Bombacini, pela colaboração e ajuda para ir até o fim com o desenvolvimento deste trabalho. Obrigado por confiar em mim.

Aos meus colegas de faculdade, por toda ajuda e colaboração.

A todos os meus professores, que desde criança me trilharam nos caminhos do conhecimento.

A todos da empresa Eletromindy, por me ensinarem e auxiliarem no desenvolvimento da minha profissão.

A Empresa Bompel, por ceder o local para desenvolvimento dos meus estudos.

A Empresa Strom Elétrica, em especial ao Engenheiro Ruahn Fuser por colaborar com o desenvolvimento deste trabalho.

A Deus, pelo dom da vida e do aprendizado!

## RESUMO

A qualidade da energia elétrica contempla vários indicadores que tem por função mensurar a energia fornecida aos diversos consumidores, considerando parâmetros desejáveis e que gerem confiabilidade para seu funcionamento. A eficiência energética é uma atividade que consiste em usar de modo eficaz a energia para se obter um determinado resultado. Contudo, existem diferentes fatores que podem afetar a qualidade da energia e a eficiência energética em uma indústria, como por exemplo, a instalação de cargas não lineares, chaveamento de dispositivos eletrônicos, variação de tensão devido ao uso de cargas que exigem altas potências do sistema, equipamentos obsoletos em uso, entre outros. No Brasil, o Módulo 8 do PRODIST regulamenta e dita as regras a respeito da Qualidade da Energia Elétrica fornecida além de abordar a qualidade dos serviços prestados e o tratamento das reclamações junto às concessionárias. Logo, o objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso será apresentar um estudo sobre a eficiência energética e qualidade da energia elétrica em uma indústria na cidade de Toledo – PR, verificando assim as possíveis cargas geradoras de distúrbios e as instalações elétricas em geral. Sobre a resolução de possíveis problemas, o desenvolvimento deste trabalho visa mitigar os diferentes tipos de cargas propondo para tal, soluções técnicas e dispositivos eletrônicos capazes de sanar a problemática do local.

**Palavras-chave:** Qualidade da Energia Elétrica. PRODIST. Eficiência Energética.

## **ABSTRACT**

The quality of electric energy includes several indicators that have the function of measuring the energy supplied to the various consumers, considering desirable parameters and that generate reliability for its functioning. Energy efficiency is an activity that consists of using energy effectively to obtain a certain result. However, there are different factors that can affect energy quality and energy efficiency in an industry, such as the installation of non-linear loads, switching of electronic devices, voltage variation due to the use of loads that require high system power. , obsolete equipment in use, among others. In Brazil, Module 8 of PRODIST regulates and dictates the rules regarding the Quality of the Electricity provided, in addition to addressing the quality of the services provided and the handling of complaints with the concessionaires. Therefore, the general objective of this course conclusion work will be to present a study on the energy efficiency and quality of electric energy in an industry in the city of Toledo - PR, thus verifying the possible disturbance loads and electrical installations in general. Regarding the resolution of possible problems, the development of this work aims to mitigate the different types of loads by proposing technical solutions and electronic devices capable of solving the problem of the place.

**Keywords:** Electric Power Quality. PRODIST. Energy Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixas de tensão em relação à de referência .....	21
Figura 2 - Relação entre as potências ativa, reativa e aparente para determinação do fator de potência .....	24
Figura 3 - Influência das distorções harmônicas a) componente fundamental, b) forma de onda com incidência de 3° harmônico no sinal (180Hz), c) forma de onda com incidência de 5° harmônico no sinal (300Hz) e d) somatório das respectivas ondas.....	27
Figura 4 – a) Esquema de aterramento do tipo TN-C; b) Esquema de aterramento do tipo TN-S.....	39
Figura 5 - BOMPEL Industria de Calçados Ltda.....	45
Figura 6 – Entrada de serviço da unidade.....	46
Figura 7 – Entrada de serviço da unidade.....	47
Figura 8 – Analisador de Energia Elétrica IMS.....	48
Figura 9 – Método de instalação do analisador de QEE. ....	49
Figura 10 – Alicate Amperímetro Fluke 302+.....	50
Figura 11 – Localização da instalação do equipamento.....	50
Figura 12 – Vista frontal do novo compressor.....	51
Figura 13 – Analisador da QEE instalado no painel de alimentação do compressor.....	53
Figura 14 – Modelo de diagrama unifilar das instalações elétricas da Bompel.....	54
Figura 15 – Disparador de corrente do disjuntor geral da Bompel.....	62

## LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Faixas de classificação de tensões – Tensões em regime permanente. ....	22
Quadro 2 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).....	30
Quadro 3 - Limites para desequilíbrios de tensão. ....	31
Quadro 4 - Limites para flutuação de tensão. ....	32
Quadro 5 - Classificação das tensões de curta duração. ....	34
Quadro 6 - Estratificação dos parâmetros de amplitude e duração para contabilização dos eventos da VTCD. ....	36
Quadro 7 - Limite de distorção de corrente em relação à corrente fundamental do sistema de até 69 kV. ....	37
Quadro 8 - Limites de distorção harmônica de tensão em baixa e média tensão.....	38
Quadro 9 - Valores máximos, mínimos e médios da tensão de linha obtidos na primeira coleta de dados.....	58
Quadro 10 - Valores máximos, mínimos e médio da tensão de fase para a primeira medição .....	60
Quadro 11 - Valores máximos, mínimos e médios das corrente para cada uma das fases..	63
Quadro 12 - Valores mínimos para tensão de linha e de fase.....	64
Quadro 13 – Indicação de valores de frequência (Hz) menores que os recomendados pelo Prodist. ....	64
Quadro 14 - Indicação de valores de frequência (Hz) maiores que os recomendados pelo Prodist. ....	65
Quadro 15 - Valores máximos e mínimos para o fator de potência na primeira análise. ....	67
Quadro 16 – Comparação das distorções harmônicas individuais de correntes por fase entre a IEEE 519 para a primeira medição. ....	74
Quadro 17 - Valores máximos, mínimos e médios da tensão de linha obtidos na segunda coleta de dados. ....	75
Quadro 18 - Valores mínimos de tensão identificados para a tensão de linha CA obtidos na segunda coleta de dados.....	76
Quadro 19 - Valores máximos, mínimos e médios da tensão de fase obtidos na segunda coleta de dados.....	77
Quadro 20 - Valores mínimos, médio e máximos da corrente para cada uma das fases. ....	79
Quadro 21 - Valores mínimos da frequência elétrica medida. ....	80
Quadro 22 - Valores máximos da frequência elétrica medida. ....	80



Quadro 23 - Valores máximos e mínimos para o fator de potência identificado em cada fase. .....	82
Quadro 24 – Comparação das distorções harmônicas individuais de correntes por fase entre a IEEE 519 para a terceira medição. ....	88
Quadro 25 - Valores médios da tensão de linha obtidos na terceira coleta de dados.....	89
Quadro 26 – Comparação das distorções harmônicas individuais de correntes por fase entre a IEEE 519 para a terceira medição. ....	96
Tabela 1 - Terminologias associada a flutuação de tensão.....	32
Tabela 2 - Valores máximos, médio e mínimos para a THDv obtidos na primeira coleta. ....	68
Tabela 3 - Valores máximos, médio e mínimos para a THDi obtidos na primeira coleta. ....	72
Tabela 4 - Valores máximos, médio e mínimos para a THDv obtidos na segunda coleta. ...	83
Tabela 5 - Valores máximos, médio e mínimos para a THDv obtidos na primeira coleta. ....	86

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Comportamento da tensão de linha do sistema para a primeira medição.....	58
Gráfico 2 - Comportamento da tensão de fase do sistema para a primeira medição.....	59
Gráfico 3 – Comportamento da corrente de linha identificada na primeira medição. ....	61
Gráfico 4 - Comportamento da corrente máxima identificada para cada fase. ....	61
Gráfico 5 - Comportamento da frequência média para a primeira medição.....	66
Gráfico 6 - Comportamento do fator de potência identificado durante a primeira medição...	66
Gráfico 7 - Comportamento das distorções harmônicas totais de tensão para cada fase. ...	68
Gráfico 8 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase A. ....	69
Gráfico 9 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase B. ....	70
Gráfico 10 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase C. ....	70
Gráfico 11 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente para cada fase. .....	71
Gráfico 12 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase A. ....	73
Gráfico 13 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase B. ....	73
Gráfico 14 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase C. ....	74
Gráfico 15 - Comportamento da tensão de linha do sistema para a segunda medição. ....	75
Gráfico 16 - Comportamento da tensão de fase do sistema para a segunda medição.....	77
Gráfico 17 - Comportamento da corrente de linha identificada na segunda medição. ....	78
Gráfico 18 - Comportamento da corrente máxima identificada para cada fase. ....	78
Gráfico 19 - Comportamento da frequência (Hz) média medida para a segunda medição...	81
Gráfico 20 - Comportamento do fator de potência identificado durante a segunda medição.	81
Gráfico 21 - Comportamento das distorções harmônicas totais de tensão para cada fase...	83
Gráfico 22 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase A.....	84
Gráfico 23 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase B.....	84
Gráfico 24 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase C. ....	85
Gráfico 25 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente para cada fase. .....	85
Gráfico 26 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase A. ....	86
Gráfico 27 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase B. ....	87
Gráfico 28 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase C. ....	87
Gráfico 29 - Comportamento da tensão de linha do sistema para a terceira medição.....	89
Gráfico 30 - Comportamento da tensão de fase do sistema para a terceira medição.....	89
Gráfico 31 - Comportamento da corrente de linha identificada na terceira medição.....	90

Gráfico 32 - Comportamento da frequência (Hz) média medida para a terceira medição. ...	91
Gráfico 33 - Comportamento do fator de potência identificado durante a terceira medição..	91
Gráfico 34 - Comportamento das distorções harmônicas totais de tensão para cada fase...	92
Gráfico 35 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase A.....	93
Gráfico 36 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase B.....	93
Gráfico 37 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase C. ....	94
Gráfico 38 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente para cada fase. .....	94
Gráfico 39 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase A. ....	95
Gráfico 40 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase B. ....	95
Gráfico 41 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase C. ....	96

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
A	Amperes
AT	Alta tensão
BT	Baixa tensão
CA	Corrente alternada
CC	Corrente contínua
CCM	Centro de comando de motores
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DEC	Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora
DTT	Distorção harmônica total de tensão
EPI	Equipamentos de Proteção Individual
FEC	Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora
FP	Fator de Potência
IEC	Comissão Eletrotécnica Internacional
ISO	Organização Internacional de Normalização
kV	Quilovolt
kVA	Quilovolt-ampère
kVA <sub>r</sub>	Quilovolt-ampère reativo
MT	Média tensão
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – Módulo 8: Qualidade da Energia Elétrica
QDC	Quadro de cargas
QDF	Quadro de força
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
QGBT	Quadro Geral de Baixa Tensão
SEP	Sistema Elétrico de Potência
THD	Distorção harmônica total
TR	Tensão de referência
V	Volts
VTCD	Variação de Tensão de Curta Duração

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1 Problemas e premissas	14
1.2 Objetivos Gerais	14
1.3 Objetivos Específicos	14
1.4 Justificativa	15
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>17</b>
2.1 Qualidade da Energia Elétrica	17
2.1.1 Tensão em regime permanente	19
2.1.2 Fator de potência	24
2.1.3 Harmônicos	26
2.1.4 Desequilíbrio de tensão	30
2.1.5 Flutuação de tensão	31
2.1.6 Variação de frequência	33
2.1.7 Variação de tensão de curta duração	33
2.2 Normas internacionais, método de aterramento para mitigação de harmônicos e normas da Copel	36
2.2.1 Norma IEEE 519 – 2014	36
2.2.2 Norma EN 50160	38
2.2.3 Método de aterramento	38
2.2.4 Diretrizes da Copel para consumidores do Grupo A	39
2.3 Aplicações da Eficiência Energética	40
2.3.1 Eficiência Energética	41
2.3.2 A gestão de energia nas indústrias	42
2.3.3 Eficiência energética no âmbito econômico e ambiental	43
2.3.4 Dificuldades para implementação da eficiência energética	43
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>45</b>
4.1 A Empresa	45
4.2 Entrada de Energia Elétrica	45
4.3 Medições e coleta de dados	47
4.4 Estudo de caso	50
4.5 Levantamento de cargas	54
4.6 Análise dos dados	55
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>57</b>
5.1 Primeira coleta de dados	57

5.1.1 Tensão de linha .....	57
5.1.2 Tensão de fase .....	59
5.1.3 Corrente de linha .....	60
5.1.4 Interrupção, desequilíbrio e flutuação de tensão .....	63
5.1.5 Variações de frequência .....	64
5.1.6 Fator de potência .....	66
5.1.7 Harmônicos de tensão .....	67
5.1.8 Harmônicos de corrente .....	71
5.2 Segunda coleta de dados .....	74
5.2.1 Tensão de linha .....	74
5.2.2 Tensão de fase .....	76
5.2.3 Corrente de linha .....	77
5.2.4 Interrupção, desequilíbrio e flutuação de tensão .....	79
5.2.5 Variações de frequência .....	80
5.2.6 Fator de potência .....	81
5.2.7 Harmônicos de tensão .....	82
5.2.8 Harmônicos de corrente .....	85
5.3 Terceira coleta de dados .....	88
5.3.1 Tensão de linha .....	88
5.3.2 Tensão de fase .....	89
5.3.3 Corrente de linha .....	90
5.3.4 Interrupção, desequilíbrio e flutuação de tensão .....	90
5.3.5 Variações de frequência .....	91
5.3.6 Fator de potência .....	91
5.3.7 Harmônicos de tensão .....	92
5.3.8 Harmônicos de corrente .....	92
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>98</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>102</b>
<b>APÊNDICE A – DADOS REFERENTES A PRIMEIRA COLETA DE DADOS .....</b>	<b>107</b>
<b>APÊNDICE B – DADOS REFERENTES A SEGUNDA COLETA DE DADOS .....</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICE C – DADOS REFERENTES A TERCEIRA COLETA DE DADOS .....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A busca constante pela manutenção da qualidade da energia elétrica que é distribuída aos consumidores vem sendo elemento motivador para uma série de estudos e modificações tanto dos instrumentos legais e regulatórios, como para a própria organização das empresas no direcionamento de suas estratégias.

Assim, a expressão tida por Qualidade da Energia Elétrica (QEE) relaciona os diversos fenômenos eletromagnéticos que caracterizam a tensão e corrente em um determinado instante de tempo e em uma determinada localização do Sistema Elétrico de Potência (SEP) (IEEE Std. 1159, 2009). Outra sentença comumente atribuída aos distúrbios de QEE pode ser atribuída a qualquer problema manifestado na tensão de fornecimento, corrente do circuito ou variação na frequência da energia elétrica que possa acarretar em falha ou má operação dos equipamentos locais.

Outro fator de grande relevância nos dias de hoje diz a respeito sobre a eficiência energética direcionada ao desenvolvimento de novas técnicas de geração, de reaproveitamento de algum material ou de força exercida para produção de energia, sem que esta prejudique o meio ambiente. Sobre a perspectiva do setor elétrico, o uso eficiente da energia elétrica diminui consideravelmente a necessidade de expansão e investimento do setor elétrico, o que de fato seria o mais adequado. Contudo, este cenário nem sempre é o mais comum, pois em alguns casos, as organizações não realizam os devidos investimentos na área de manutenção.

Com o objetivo principal de aumentar a eficiência e a produtividade do sistema elétrico de energia, houve um grande avanço da aplicação de equipamentos utilizando a eletrônica de potência (RAMALHETE; SIMONETTI, 2009). Esses dispositivos melhoram o rendimento e controlabilidade e desta forma colaboram para redução dos custos de energia elétrica (VASCONCELLOS, *et al.*, 2011). Mesmo fornecendo um controle otimizado do fluxo de energia nas instalações, esses equipamentos atuam como cargas não lineares, tendo em vista que a corrente não é proporcional à tensão aplicada, e com isso as ondas se tornam distorcidas quando comparadas ao sinal da tensão original (ALVES, 2010).

## 1.1 Problemas e premissas

Com a crescente mudança no cenário econômico atual e com perspectivas sobre a busca de fatores que possam contribuir com a redução do consumo de energia elétrica, é de grande valia para as corporações procurarem alternativas técnicas que possam auxiliá-las na tomada de decisão para com as instalações elétricas. Sobre a perspectiva de que melhorando seus processos e atuando diretamente no controle de seus equipamentos, as empresas podem ter um ganho significativo relacionado aos gastos com energia elétrica e com isso, otimizarem suas instalações.

## 1.2 Objetivos Gerais

O presente trabalho tem por objetivo elaborar um estudo referente a análise da QEE e de eficiência energética no sistema elétrico de uma indústria, especificamente com relação aos fenômenos da qualidade do produto em regime permanente, transitório e ainda buscar formas de redução no consumo de energia elétrica no âmbito de uma instalação industrial.

Sobretudo, será realizado um levantamento de cargas do local a fim de determinar quais equipamentos podem gerar estes distúrbios na rede, quais podem ter seus processos otimizados, os que podem ter uma diminuição na carga instalada e se o local comporta a instalação de um sistema de geração através de fontes renováveis de energia.

## 1.3 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Aprofundar-se no estudo relativo ao PRODIST – Módulo 8, pois este estabelece os limites ou valores de referência e a metodologia de medição em campo com equipamento específico;
- Conhecer o processo produtivo e o plano de manutenção de uma indústria;
- Realizar o levantamento de cargas da unidade, a fim de identificar possíveis causadores de distúrbios na rede elétrica;
- Avaliar a energia entregue pela concessionária empregando um analisador de qualidade de energia;



- Verificar através de equipamentos as grandezas elétricas no interior da indústria, tais como a luminosidade nos ambientes, a corrente elétrica e a tensão nos equipamentos;
- Detectar equipamentos que prejudicam o uso eficiente da energia elétrica.

#### 1.4 Justificativa

A importância da medição da QEE tem se tornado evidente nos anos recentes, uma vez que supervisionar e, se necessário, elevar a qualidade da energia elétrica passou a ser exigência normativa observada pelas concessionárias. Entretanto, dada a complexidade da rede elétrica, dotada de geração distribuída, cargas não lineares e equipamentos sensíveis que também contribuem para a degradação da QEE, a observância destes valores de referência tem sido um grande desafio para gestores da energia elétrica.

Neste cenário, medir a qualidade da energia é essencial para o cumprimento dos requisitos técnicos exigidos através dos órgãos reguladores. Desde a coleta e tratamento das medições até a construção de um diagnóstico, as etapas gerais de um cronograma de medições devem ser observadas e devidamente implementadas.

No âmbito corporativo, o uso eficiente da energia deve ser entendido como uma das estratégias para a redução das perdas e de racionalização técnico-econômica dos diversos fatores de produção e que são específicos de cada empresa, sendo de caráter estratégico e determinante o suprimento da energia em todos os processos industriais. Ainda que representando uma parcela por vezes reduzidas quando comparadas aos custos totais, via de regra, a energia elétrica não possui outros substitutos, sem a qual os processos não se desenvolvem (BATISTA, 2011).

Os responsáveis técnicos pela gestão da energia, além de promoverem a busca por métodos mais eficientes para com as instalações, os sistemas e os equipamentos devem também responder a dois desafios estratégicos: avaliar o consumo e a demanda de energia que são necessários para com o atendimento de suas necessidades atuais e futuras, bem como adquirir e contratar no mercado esta disponibilidade energética.

Logo, a gestão e a otimização de energia elétrica necessitam-se de avaliação permanente, levando em consideração as projeções da produção interna da empresa com o estabelecimento de estratégias de curto, médio e longo prazo para com a

aquisição de energia elétrica, evitando neste caso o custo com o excesso, ou ainda, com a aquisição de energia maior que a demanda contratada.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 Qualidade da Energia Elétrica

O termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE) vem sendo muito abordado nos diversos setores dentro da nossa sociedade, seja ela tratada dentro das universidades e institutos a fim de buscar estudos e otimização para suas problemáticas, como pelos órgãos competentes do governo que legislam através de normas técnicas. O tema é discutido também pelas concessionárias de energia elétrica que tem por obrigação entregar um produto com qualidade para seus clientes e os próprios usuários do sistema, que além de consumirem a energia, podem ocasionar danos às instalações elétricas do seu entorno caso estes estejam utilizando máquinas e/ou equipamentos sem suas devidas proteções elétricas.

Para Poll (2013), o conceito de QEE sugere um conjunto de características necessárias para que a energia elétrica seja entregue aos consumidores com continuidade e qualidade, ou seja, aquele no qual deve-se ter o sinal de energia com amplitude e frequência constante e forma de onda senoidal.

Já para Albadó (2001), quando se muda a perspectiva para o lado dos fabricantes de máquinas e equipamentos, a QEE é definida como sendo um conjunto de características do fornecimento que atendam aos requisitos necessários para que seus aparelhos operem em suas características nominais e de forma satisfatória durante toda vida útil.

Os problemas relacionados com a QEE atualmente são oriundos devido à incompatibilidade elétrica entre as cargas da instalação, ou seja, as que são sensíveis com a variação da energia elétrica e o fornecimento típico da mesma por parte das concessionárias, haja vista que são estas empresas que devem entregar o produto (energia elétrica) com forma de onda senoidal pura sem alterações na sua amplitude e frequência de operação.

Entretanto, para que as concessionárias pudessem tratar esta problemática, houve a inserção de diversos fatores a se levar em consideração na análise da QEE com o passar dos anos, sendo que estas, impactaram tanto no fornecimento de energia elétrica quanto no tratamento da falta dela.

A primeira legislação que estabeleceu parâmetros para o controle da QEE no Brasil só se tornou vigente no ano de 1934, sendo que durante alguns anos, a única

preocupação a respeito desse assunto limitou-se a tratar apenas sobre a quantidade de desligamentos em que o sistema fora submetido, ou seja, quanto menor o tempo destes eventos melhor seria a qualidade da energia elétrica entregue aos consumidores (BACH; PINTO, 2014).

Por volta da década de 1970, houve o acréscimo de novos fatores para a análise da QEE por parte das concessionárias, sendo que os indicadores acrescentados foram as distorções harmônicas oriundas de cargas não lineares e a cintilação (variação) luminosa, conhecida pelo termo técnico “Fliker”. Este último é ocasionado devido a pequenas flutuações de tensão provocadas pelo funcionamento de cargas variáveis de grande porte, como por exemplo, os fornos a arco, as máquinas de solda, entre outros.

Já no final da década de 1990, por meio da ANEEL, criou-se o Grupo de Trabalho Especial – Qualidade da Energia Elétrica, tendo o ONS como coordenador destes estudos a fim de realizar uma revisão e com isso, elaborar um documento de caráter normativo determinando as diretrizes para a análise da QEE (ALVES, 2010).

No início dos anos 2000, se instaurou através da Resolução Normativa nº 024 (ANEEL) os indicadores de continuidade do sistema (DEC e FEC) e a análise comparativa de desempenho da energia entregue aos consumidores. A partir daí, são formados agrupamentos com características físicas e técnicas semelhantes entre si, para que em seguida, trace metas a se atingir para cada conjunto de consumidores. Este fator foi de fundamental importância para comparação no desempenho de grandes consumidores de energia elétrica e para análise de desempenho imposta pelo governo para com às concessionárias. (BERNARDO, 2013).

Logo, com a crescente mudança no cenário de consumo de energia elétrica e com a preocupação sobre a matriz energética nacional, a ANEEL elaborou documentos que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Estes, denominados por PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) são separados em onze módulos com versões vigentes e atualizadas periodicamente. Para o desenvolvimento deste trabalho, será empregado para estudos o Módulo 8 que trata sobre a Qualidade da Energia Elétrica, abordando a qualidade do produto, dos serviços e do tratamento das reclamações junto às concessionárias de energia elétrica.

Portanto, o estudo sobre a QEE é de extrema importância, pois possibilita diferenciar uma interrupção de fornecimento de energia de um transitório oscilatório, ou ainda quando um equipamento não está funcionando dentro de suas características nominais de fabricação. A falta desta percepção pode levar a incorreta tomada de decisão para aquisição de um dispositivo para correção do problema local, acarretando em consequências financeiras para o consumidor ou em malefícios a rede de energia elétrica local devido a instalação do mesmo.

Sobretudo ainda, a fim de garantir a otimização da QEE nas instalações locais, seja ela de uma indústria ou de uma residência, torna-se necessário que consumidores, profissionais da área, as concessionárias de energia e o governo trabalhem em conjunto com o intuito de atender aos indicadores específicos da energia elétrica, de forma que busquem se beneficiar do suprimento e consumo de energia com indicadores de qualidades condizentes com os especificados em normas técnicas disponíveis pelos órgãos reguladores.

Para tanto, o presente estudo apresentará os aspectos considerados na análise da QEE segundo o ANEEL por meio do Prodist, no qual tratará a qualidade do produto em regime permanente e transitório, sendo estes apresentados por:

- i. Tensão em regime permanente;
- ii. Fator de potência;
- iii. Harmônicos;
- iv. Desequilíbrio de tensão;
- v. Flutuação de tensão;
- vi. Variação de frequência e
- vii. Variação de tensão de curta duração (VTCD).

De acordo com suas respectivas causas, os mesmos são descritos nos capítulos a seguir.

### *2.1.1 Tensão em regime permanente*

A tensão em regime permanente é um fator que tem por premissa o acompanhamento em todo o sistema de distribuição, ficando a cargo da distribuidora prover-se de recursos técnicos modernos e de pessoal capacitado a fim de acompanhar e atuar quando necessário de forma preventiva no local com a intenção

de manter a tensão em regime permanente dentro dos padrões adequados, conforme prescreve a ANEEL (2018).

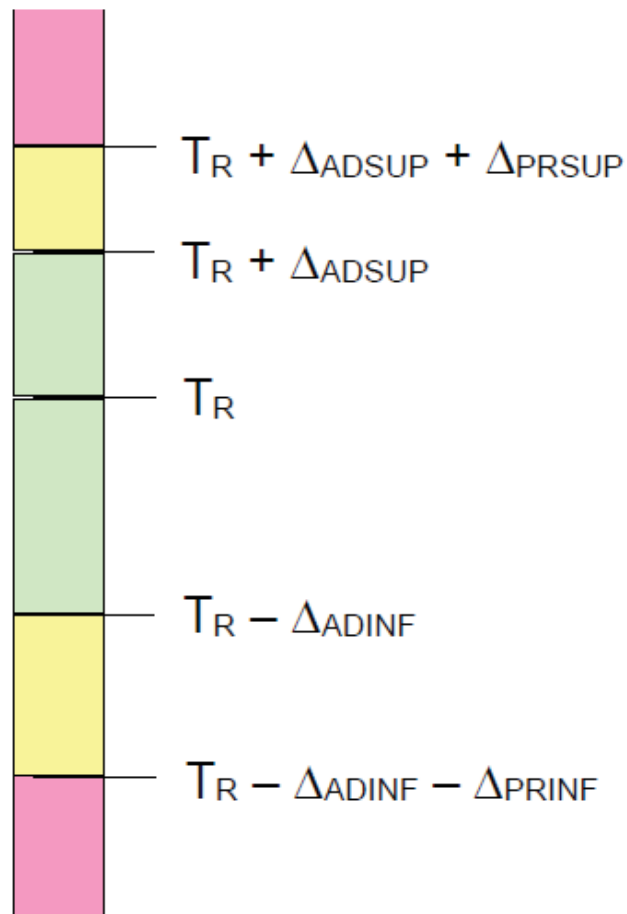
Ainda sobre os valores de tensão nominal, deve-se observar que os mesmos são fixados em função dos níveis de planejamento do sistema de distribuição, de modo que haja a compatibilidade com os níveis de tensão solicitados nos projetos elétricos requeridos por seus clientes.

Para a avaliação da tensão em regime permanente, a ANEEL (2018), no Módulo 8 do Prodist prescreve que seja avaliado um conjunto de 1008 (mil e oito) leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de 10 (dez) minutos cada, que serão obtidas através de medições apropriadas no local, além de determinar que tal avaliação seja direcionada nos pontos de conexão à rede de distribuição, nos pontos de conexão entre distribuidoras e nos pontos de conexão com as unidades consumidoras instaladas. Contudo, essas medidas só serão aceitas caso não ocorra distúrbios elétricos capazes de invalidar tal leitura da rede. Nota-se que para os indicadores individuais coletados mensalmente dos acessantes ao sistema elétrico com medição permanente sejam armazenados por no mínimo cinco anos para efeito de possível fiscalização da ANEEL.

Alinhado com a Resolução da ANEEL nº 505/2001, e atualizado no Módulo 8 do Prodist a classificação das respectivas leituras e medições que são associadas à tensão em regime permanente, divide-se em três categorias distintas, sendo: adequadas, precárias e críticas. Estas, baseiam-se no afastamento do valor da tensão nominal de leitura em relação a tensão de referência do local. O valor da tensão de referência é definido como o próprio valor de tensão contratado junto às concessionárias, nos quais devem estar situados dentro de uma faixa de tensão nominal, que outrora fora estabelecido pelos agentes do poder público, as concessionárias e os consumidores locais, sendo que os valores contratados devem constar nos Contratos de Conexão às Instalações de Distribuição (CCD).

Na Figura 1, temos a representação da tensão de atendimento que é associada às leituras e que deve ser classificada segundo as faixas supracitadas que estão no entorno da tensão de referência (TR).

Figura 1 - Faixas de tensão em relação à de referência



Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica ANEEL (2018, p. 9).

- a) Tensão de referência ( $T_R$ );
- b) Faixa adequada de tensão ( $T_R - \Delta_{ADINF}$ ,  $T_R + \Delta_{ADSUP}$ );
- c) Faixas precárias de tensão ( $T_R + \Delta_{ADSUP}$ ,  $T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$  ou  $T_R - \Delta_{ADINF}$ ,  $T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$ );
- d) Faixas críticas de tensão ( $>T_R + \Delta_{ADSUP} + \Delta_{PRSUP}$  ou  $<T_R - \Delta_{ADINF} - \Delta_{PRINF}$ ).

Para tanto, será apresentado no Quadro 1, de acordo com a categoria de atendimento para os pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV, conforme é apresentado no Anexo I do Módulo 8 do Prodlist.

**Quadro 1 - Faixas de classificação de tensões – Tensões em regime permanente.**

<b>Tensão Adotada (V)</b>	<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (V)</b>
220/127	Adequada	$(202 \leq TL \leq 231)/(117 \leq TL \leq 133)$
	Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)/$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
	Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)/(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$
380/220	Adequada	$(350 \leq TL \leq 399)/(202 \leq TL \leq 231)$
	Precária	$(331 \leq TL < 350 \text{ ou } 399 < TL \leq 403)/$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
	Crítica	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$
254/127	Adequada	$(234 \leq TL \leq 267)/(117 \leq TL \leq 133)$
	Precária	$(221 \leq TL < 234 \text{ ou } 267 < TL \leq 269)/$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
	Crítica	$(TL < 221 \text{ ou } TL > 269)/(TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$
440/220	Adequada	$(405 \leq TL \leq 462)/(202 \leq TL \leq 231)$
	Precária	$(383 \leq TL < 405 \text{ ou } 462 < TL \leq 466)/$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
	Crítica	$(TL < 383 \text{ ou } TL > 466)/(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$
faixas aplicadas às tensões nominais inferiores a 1kV	Adequada	$(0,92TN \leq TL \leq 1,05TN)$
	Precária	$(0,87TN \leq TL < 0,92TN \text{ ou } 1,05TN < TL \leq 1,06TN)$
	Crítica	$(TL < 0,87TN \text{ ou } TL > 1,06TN)$

**Fonte: Adaptado da Agência Nacional de Energia Elétrica (2018, p. 42 - 44).**

Sobre os indicadores individuais já mencionados, vale ressaltar que após a obtenção do conjunto de leituras válidas, sendo as medições provenientes de reclamações ou dados amostrais coletados, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária (DRP) e para tensão crítica (DRC) que estão associados um mês civil. Já os indicadores *nlp* e *nlc* representam o maior valor de tensão entre as fases com relação ao número de leituras situadas nas faixas precárias e críticas, respectivamente, de acordo com as equações (1) e (2).



$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100 [\%] \quad (2)$$

Já os indicadores coletivos empregados, baseia-se também nas medições amostrais via equipamentos, sendo apresentado pelo índice de unidades consumidoras com tensão crítica (ICC) representado abaixo pela equação (3).

$$ICC = \frac{N_c}{N_L} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

A variável  $N_c$  representa o total de unidades consumidoras com DRC não nulo e  $N_L$  o total de unidades consumidoras via objeto de medição. Já para a determinação dos índices equivalentes por consumidor, devem ser calculados o índice de duração relativa da transgressão para tensão precária equivalente ( $DRP_E$ ) e o índice de duração relativa da transgressão para tensão crítica equivalente ( $DRC_E$ ) de acordo com as equações (4) e (5).

$$DRP_E = \sum \frac{DRP_i}{N_L} [\%] \quad (4)$$

$$DRC_E = \sum \frac{DRC_i}{N_L} [\%] \quad (5)$$

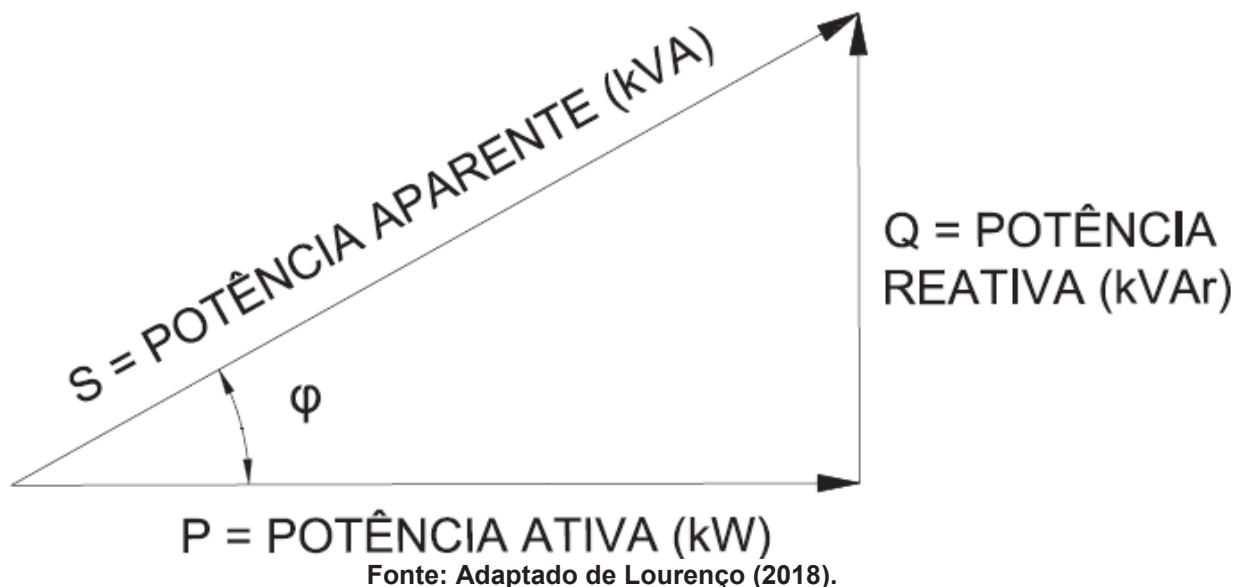
Para este caso, a  $DRP_i$  denomina-se como sendo a duração relativa de transgressão de tensão precária individual da unidade consumidora (i) e  $DRC_i$  é tido como a duração relativa de transgressão de tensão crítica individual da unidade consumidora (i). Por fim, os limites impostos pela ANEEL para variação dos indicadores DRP e DRC são de 3% e 0,5% respectivamente, levando a concessionária de energia elétrica a multas caso estes valores sejam ultrapassados (ANEEL, 2018).

### 2.1.2 Fator de potência

Um elemento de grande importância no âmbito das instalações elétricas atualmente, o fator de potência é definido como sendo a relação entre a potência ativa e aparente. Este indicador tem como função determinar a eficácia com que a potência ativa do local está sendo transferida para a carga, sendo que este fator só pode ser considerado igual ao cosseno do ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente elétrica. Para uma instalação com altos índices de distorção harmônica, tal definição não é válida pois as ondas de tensão e corrente não serão senóides puras (ANEEL, 2018).

Para melhor entendimento, a Figura 2 representa o triângulo de potência que relaciona cada qual como uma grandeza, de sentido e intensidade (vetor) em uma instalação.

**Figura 2 - Relação entre as potências ativa, reativa e aparente para determinação do fator de potência**



Os motores de indução ou cargas indutivas para realizar trabalho demandam por energia reativa para a criação do campo magnético no seu interior. Logo, esta potência demandada acaba não gerando trabalho útil para carga, mas sim, ocasiona perdas e ocupa espaço nos condutores ao ser transmitida. Por isso, o adequado é que quando se tem uma instalação com fator de potência indutivo seja instalado um conjunto (banco de capacitores) que gere fator de potência capacitivo na instalação,

com a intenção de ambos se anularem, mantendo a energia ativa disponível em sua totalidade para o uso dos equipamentos.

De acordo com Rocha (2016), o emprego de banco de capacitor contribui com a manutenção do fator de potência no intervalo de valores pré-estabelecidos junto às concessionárias, pois este dispositivo tem a característica de gerar a energia reativa que as cargas indutivas irão consumir durante seu período de funcionamento.

Outra forma de abordar o assunto com relação ao fator de potência é o conceito de troca de energia armazenada entre os capacitores e as cargas indutivas uma vez que estão submetidos a mesma onda de tensão e como o armazenamento de energia do capacitor ocorre com uma defasagem de 90 graus em relação ao armazenamento de energia do indutor, haja vista que quanto um elemento está no período de acumular energia, o outro está no processo de entregar a energia acumulada ao sistema. Percebe-se então que conceitualmente, a soma das componentes de energia do sistema será nula fazendo com que a circulação de potência ativa na instalação seja maior além de contribuir para a diminuição das perdas por efeito Joule nos condutores e no transformador do local (ROCHA, 2016).

Para fins de cálculo, o fator de potência é obtido através da equação (6), gerado tanto pelo registro das potências ativas e reativas (P e Q) quanto pelas energias ativa e reativa (EA e ER).

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \text{ ou } \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (6)$$

O controle do fator de potência dentro das instalações elétricas é realizado através de medição permanente e de forma obrigatória para unidades consumidoras atendidas em média tensão, alta tensão (Grupo A) e em conexões entre distribuidores de energia elétrica conforme especificado pela ANEEL (2018).

Para os consumidores atendidos em baixa tensão (Grupo B) a adesão pela medição de reativos fica a cargo da concessionária local, sendo facultativa por lei para este caso. Sobre os resultados de tais medições é determinado que os mesmos estejam disponíveis para consultas por um período mínimo de cinco anos por parte das concessionárias (ROCHA, 2016).

Segundo a ANEEL (2018), para uma unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230 kV deve possuir um fator de potência no seu

ponto de conexão da rede variando entre 0,92 a 1,00 indutivo ou de 0,92 a 1,00 capacitivo de acordo com regulamentação vigente em todo território nacional. Para o caso de haver valor de potência reativo excedente no sistema, o mesmo deve ser calculado com auxílio de equações definidas em regulamento específico pela ANEEL.

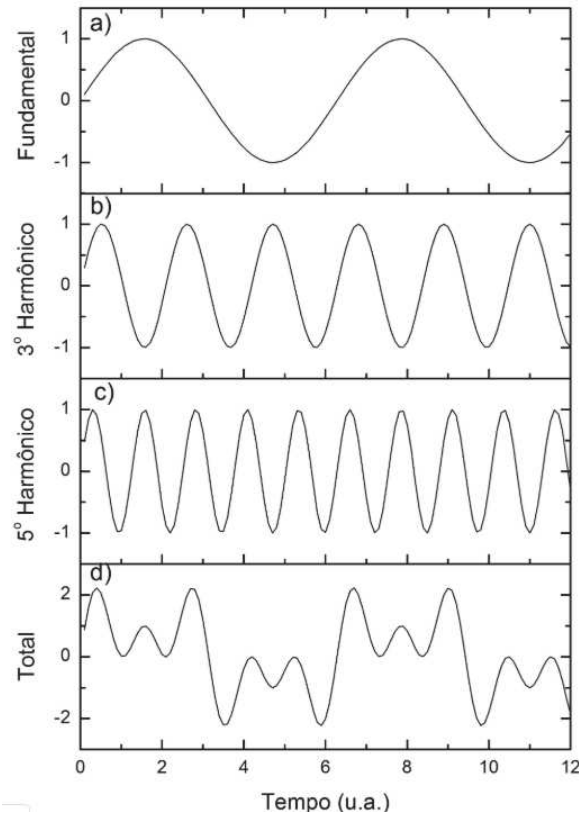
Finalmente, ao listar os benefícios de manter o fator de potência próximo do unitário para com as instalações elétricas são descritos pela redução dos valores cobrados na fatura de energia elétrica, maior potência fornecida pelos transformadores na rede elétrica, redução das perdas por efeito Joule para transferência de energia até os consumidores e menor queda de tensão nas instalações que ocasiona na diminuição do valor eficaz de corrente disponibilizada para o uso dos equipamentos (POLL, 2013).

### *2.1.3 Harmônicos*

De acordo com a ANEEL (2018), as distorções harmônicas são fenômenos associados às deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental, as quais são provocadas por cargas não lineares conectadas à rede elétrica. Outra característica associada a este distúrbio é que as harmônicas são sinais com frequências correspondentes a múltiplos inteiros da fundamental.

Como exemplo de cargas não lineares temos as máquinas de solda, fornos a arco, inversores de frequência empregados na partida de motores, nobreaks, computadores, entre outros. A Figura 3 representa um sinal de onda original, outros dois com características harmônicas incidindo sobre sua frequência e por último o somatório delas.

**Figura 3 - Influência das distorções harmônicas a) componente fundamental, b) forma de onda com incidência de 3° harmônico no sinal (180Hz), c) forma de onda com incidência de 5° harmônico no sinal (300Hz) e d) somatório das respectivas ondas**



Fonte: Azevedo et al (2018, p. 2).

Fica perceptível nesta representação o quão é prejudicial para as diversas cargas instaladas em uma indústria quando ocorre o efeito das distorções harmônicas nos sinais de tensão e corrente do sistema. Isto faz com que os equipamentos não funcionem em suas características nominais além de levá-los a sérios danos ou até queima dos mesmos.

Contudo, visto a importância na análise da distorção harmônica, a ANEEL (2018) regulamentou por meio do Módulo 8 do Prodist os indicadores e as expressões matemáticas para estudos deste assunto, sendo os principais:

- i. Distorção harmônica individual de tensão ( $DIT_h\%$ ), como apresentado pela equação (7): uma grandeza que expressa o nível individual de uma das componentes do sistema que totalizam o espectro de frequências de um sinal distorcido, uma vez que está diretamente associada ao valor da componente fundamental do sinal de tensão;

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

Em que,  $h$  a ordem harmônica individual.

- ii. Distorção harmônica total de tensão ( $DTT\%$ ) como apresentado pela equação (8) é a composição das distorções harmônicas individuais e que expressa o grau de desvio da onda em relação ao padrão ideal, normalmente referenciada ao valor da componente fundamental de tensão;

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

Em que,  $h$  correspondente a todas as ordens harmônicas de 2 até  $h_{max}$  e  $h_{max}$  conforme a classe de medição de dispositivos de análise da qualidade de energia elétrica (classe A ou S).

- iii. Ordem harmônica ( $h$ ): é um número representativo do espectro das frequências associadas com uma onda distorcida de um sinal;
- iv. Tensão fundamental ( $V_1$ ): é a amplitude ou valor eficaz da tensão de um sinal, que corresponde a componente fundamental da tensão analisada;
- v. Tensão harmônica de ordem  $h$  ( $V_h$ ): representa o valor eficaz da tensão harmônica analisada;
- vi. Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 ( $DTT_p\%$ ): é uma composição das distorções harmônicas individuais dos sinais com componentes pares não múltiplas de 3, como apresentado pela equação (9).

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

Em que,  $h$  igual a todas as harmônicas pares, não múltiplas de 3 (2, 4, 8, entre outros) e  $h_p$  a ordem máxima de harmônicos presente no sinal e não múltipla de 3;

- vii. Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 ( $DTT_i\%$ ): é uma composição das distorções harmônicas

individuais dos sinais com componentes ímpares não múltiplas de 3, como apresentado pela equação (10).

$$DTT_I\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} (V_h)^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (10)$$

Em que, h igual a todas as harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (5, 7, 11, 13, entre outros) e  $h_i$  a ordem máxima de harmônicos presente no sinal e não múltipla de 3;

viii. Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 ( $DTT_3\%$ ): é uma composição das distorções harmônicas individuais dos sinais com componentes múltiplas de 3, sendo  $h = 3, 6, 9, 12$ , entre outros, como apresentado pela equação (11).

$$DTT_3\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} (V_h)^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (11)$$

Em que, h igual a todas as harmônicas múltiplas de 3 (3, 6, 9, 12, entre outros) e  $h_3$  a ordem máxima de harmônicos presente no sinal e múltiplo de 3;

Um fato intrínseco na maioria dos sistemas elétricos com cargas não lineares é a geração de harmônicas ímpares, sendo que a maior componente de distorção é dada pelo 3º harmônico. Para os harmônicos de ordem par, relaciona-se em geral a problemas de mau funcionamento das cargas não lineares, com exceção dos fenômenos relacionados a arcos elétricos. Nesta ocorrência, percebe-se uma interação principalmente entre os retificadores, levando à produção inclusive de uma componente CC na corrente da rede CA. Por consequência, induz os transformadores a operar de forma desequilibrada, fazendo com que aumente as perdas por saturação eletromagnéticas no entreferro (ANEEL, 2018).

Já os limites máximos pré-determinados pela ANEEL para os indicadores de distorções harmônicas totais ( $DTT_{95\%}$ ,  $DTT_p95\%$ ,  $DTT_I95\%$  e  $DTT_395\%$ ) que

caracterizam o valor indicado respectivamente ao que foi superado em apenas 5% das 1008 leituras válidas segundo o Módulo 8 do Prodist são expressos no Quadro 2.

**Quadro 2 - Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental)**

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1kV$	$1 kV < V_n < 69kV$	$69 kV < V_n < 230kV$
$DTT_{95\%}$	10%	8%	5%
$DTT_p_{95\%}$	2,5%	2%	1%
$DTT_l_{95\%}$	7,5%	6%	4%
$DTT_3_{95\%}$	6,5%	5%	3%

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018, p. 15).

#### 2.1.4 Desequilíbrio de tensão

Para um sistema trifásico ideal, sendo a tensão das três fases com mesma amplitude e defasadas eletricamente entre si em  $120^\circ$  pode-se considerar este circuito como totalmente equilibrado. No entanto, verifica-se na prática a ocorrência de distúrbios de tensão ocasionados pela variação tanto da amplitude quanto da defasagem angular entre as fases, fazendo com que o sistema não opere de forma adequada. Esta ocorrência se dá com mais frequência em locais onde há uma má distribuição das cargas monofásicas, sendo caracterizado pela diferença de tensão por entre as fases do sistema (ALVES, 2018).

Por consequência, o desequilíbrio de tensão provoca danos às instalações e as cargas, tais como o mal funcionamento dos dispositivos de proteção, sobreaquecimento de transformadores, motores e condutores elétricos, além de reduzir a vida útil dos mesmos.

Com relação aos principais indicadores referentes ao desequilíbrio de tensão citados pela ANEEL (2018) no Prodist, temos o FD que representa o fator de desequilíbrio de tensão, que é oriundo dos módulos das componentes de sequência negativa ( $V_-$ ) pela sequência positiva ( $V_+$ ) da tensão e que é expresso em porcentagem, conforme equação (12).

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \cdot 100 \quad (12)$$



Alternativamente, para calcular o fator de desequilíbrio de tensão utiliza-se do método Cigré, uma vez que pode ser obtido utilizando as tensões de linha que é expresso pela equação (13), cujo parâmetro  $\beta_v$  é calculado pela equação (14) (ATAÍDES, SILVA, 2014).

$$FD\% = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta_v}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta_v}}} \cdot 100 \quad (13)$$

$$\beta_v = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2} \quad (14)$$

Em que,  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  e  $V_{ca}$  tensões de linha expressas em RMS.

Sobre os limites máximos indicados pela ANEEL (2018) no Módulo 8 do Prodist com relação ao fator de desequilíbrio são apresentados no Quadro 3.

**Quadro 3 - Limites para desequilíbrios de tensão.**

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1kV$	$1 kV < V_n < 230kV$
FD95%	3%	2%

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018, p. 17).

### 2.1.5 Flutuação de tensão

A flutuação de tensão pode ser definida como uma variação de tensão aleatória, repetitiva ou esporádica com relação ao valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. A determinação deste fator tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pela cintilação luminosa (efeito Flicker) nos consumidores que são atendidos pela rede em BT (ANEEL, 2018). Para Andrade (2012) o principal efeito da cintilação luminosa nos seres humanos, diz a respeito sobre a sensação desagradável com relação a visão, sendo que pode levar a fadiga, redução da concentração, desconforto e irritabilidade.

Os equipamentos mais propensos a causar esse tipo de distúrbios na rede de energia elétrica são os fornos a arco e os acionadores de laminadores haja vista que são cargas flutuantes que demandam de grande potência do sistema.

Os indicadores de severidade de cintilação luminosa são diretamente associados à flutuação de tensão e podem ser quantificados de acordo com os indicadores representados na Tabela 1 que sintetizam as recomendações dispostas na IEC 61000-4-15 (*Flickermeter – Functional and design specifications*) e que contemplam no Prodist Módulo 8.

**Tabela 1 - Terminologias associada a flutuação de tensão.**

<b>Identificação da Grandeza</b>	<b>Símbolo</b>
Severidade de Flutuação de Tensão de Curta Duração	Pst
Severidade de Flutuação de Tensão de Longa Duração	Plt
Valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	Pst95%

**Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018, p. 18).**

Sobre as características dos indicadores supracitados, temos que, o Pst representa a severidade dos níveis de cintilação associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de dez minutos e calculado a partir dos níveis instantâneos de cintilação. Já o Plt representa a severidade dos níveis de cintilação causados pela flutuação da tensão verificada num período contínuo de duas horas e calculados a partir de registros do Pst. Para o indicador Pst95% temos que o valor diário do indicador Pst foi superado somente em 5% dos registros obtidos no período de 24 horas (ANEEL, 2018).

Para as instalações elétricas atendidas em BT, o limite máximo utilizado para avaliação do desempenho do sistema de distribuição quanto às flutuações de tensão e determinados pelo Módulo 8 do Prodist pode ser observado no Quadro 4, sendo que estes, correspondem aos valores máximos desejáveis a ser observado no sistema de distribuição local (ANEEL, 2018).

**Quadro 4 - Limites para flutuação de tensão.**

<b>Indicador</b>	<b>Tensão nominal</b>		
	$V_n \leq 1kV$	$1kV < V_n < 69kV$	$69kV < V_n < 230kV$
Pst95%	1 pu	1,5 pu	2 pu

**Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018, p. 19).**

### 2.1.6 *Variação de frequência*

Um parâmetro de grande importância dentro do âmbito das instalações elétricas é a frequência, pois ela está diretamente relacionada com a velocidade de rotação dos geradores. Todavia, para manter este fator constante é necessário haver um controle contínuo dos equipamentos de geração haja vista que deve existir um equilíbrio entre o consumo e a produção de energia elétrica (ROCHA, 2016).

Com isso, definiu-se uma das características para tomada de decisão com relação ao consumo e geração de energia elétrica, ficando a cargo no Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) controlar e coordenar a operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN) entregando a energia às concessionárias, que por sua vez, entregam a energia aos consumidores (ROCHA, 2016).

A ANEEL (2018) diz que para sistemas de distribuição e centrais geradoras de energia devem operar por via de regra em condições normais de atendimento e em regime permanente dentro dos limites de frequência situados pelos valores de 59,9 a 60,1 Hz.

Outros fatores inerentes a variação de frequência no sistema diz que havendo necessidades de cortes de geração de energia elétrica ou até mesmo das cargas instaladas com o intuito de permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração acarretado por distúrbios na rede deve seguir as seguintes regras (ANEEL, 2018):

- i. A frequência não pode exceder o valor de 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz para condições extremas associadas;
- ii. A frequência pode permanecer acima de 62 Hz por no máximo trinta segundos e acima de 63,5 Hz por no máximo dez segundos;
- iii. A frequência pode permanecer abaixo de 58,5 Hz por no máximo dez segundos e abaixo de 57,5 Hz por no máximo cinco segundos.

### 2.1.7 *Variação de tensão de curta duração*

Segundo a ANEEL (2018), a variação de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Para Maia (2011), as VTCD são consideradas eventos

aleatórios de tensão caracterizados por desvios significativos por um período de um ciclo até três minutos, do valor eficaz da tensão.

Outros conceitos pertinentes ao tema dizem a respeito sobre a duração e a amplitude da VTCD. A duração da VTCD corresponde ao intervalo de tempo transcorrido entre o instante em que o valor eficaz da tensão em relação a tensão nominal do sistema no ponto considerado ultrapassa determinado limite e o instante em que essa variável volta a cruzar esse limite. Já a amplitude da VTCD é definida pelo valor extremo do valor eficaz da tensão em relação à tensão nominal do sistema no ponto considerado, enquanto existir tal evento (ANEEL, 2018).

No Quadro 5, temos uma síntese sobre a classificação das variações de tensão de curta duração, sendo elas divididas em variações momentâneas e temporárias de acordo a ANEEL (2018).

**Quadro 5 - Classificação das tensões de curta duração.**

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração da Variação</b>	<b>Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência</b>
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018, p. 20).

O fenômeno tido por elevação da tensão do sistema é caracterizado pelo aumento da tensão de alimentação acima dos limites pré-estabelecidos por normas,

sendo que sua duração não deve transcender por mais de três segundos, sendo sua causa oriunda de curto circuito entre fase-terra, fazendo com que a fase em curto tenha sua tensão reduzida enquanto as outras duas, observa-se elevado aumento em seus valores nominais. Já o afundamento de tensão é definido como o decaimento da tensão de alimentação do sistema, tendo como causa, o próprio sistema da concessionária, partida de grandes motores, entre outros (POMILIO, 2017).

Para o caso da interrupção de energia elétrica, equipamentos de informática por exemplo devem ser projetados para suportar interrupções completas da tensão da rede durante intervalos de até meio ciclo, sendo que suas fontes devem prever suficiente capacidade de armazenamento de energia em capacitores e/ou baterias a fim de suprir a carga durante a falta da energia elétrica (POMILIO, 2017).

Para Rocha (2016), as severidades dos distúrbios relacionados às VTCD são medidas entre os condutores de fase e neutro diretamente nos barramentos de um QGBT ou QDC, é também caracterizada pela frequência de tal ocorrência e não somente pela duração e amplitude do distúrbio. O indicador a ser utilizado para verificação do desempenho de um barramento de uma instalação com relação às VTCD é correspondente ao número de eventos agrupados por faixas de amplitude e duração do sinal.

Com relação ao cálculo dos principais indicadores associados com as VTCD, tem-se a amplitude do evento da VTCD representada pela equação (15).

$$V_e = \frac{V_{res}}{V_{ref}} \cdot 100 \quad (15)$$

Em que,  $V_{res}$  a tensão residual do evento VTCD e  $V_{ref}$  a tensão de referência

A duração do evento da VTCD (especificada em milissegundos), mostrado na equação (16).

$$\Delta t_e = t_f - t_i \quad (16)$$

Em que,  $t_f$  o instante final e  $t_i$  o instante inicial do evento da VTCD.

Já a frequência de ocorrência ( $f_e$ ) dos eventos da VTCD são observados pela equação (17).

$$f_e = n \quad (17)$$

Em que,  $n$  igual a quantidade de eventos da VTCD registrados no período de avaliação do sistema.

Na análise dos distúrbios relacionados às VTCD, a ANEEL (2018) determina que seja realizado a estratificação dos parâmetros de amplitude e duração conforme o Quadro 6, a fim de determinar as regiões de sensibilidade das cargas do sistema.

**Quadro 6 - Estratificação dos parâmetros de amplitude e duração para contabilização dos eventos da VTCD.**

Amplitude (pu)	Duração						
	[16,67 ms - 100 ms]	(100 ms - 300 ms]	[300 ms - 600 ms]	[600 ms - 1 seg]	[1 seg - 3 seg]	[3 seg - 1 min]	[1 min - 3 min]
> 1,15							
[1,10 - 1,15]							
[0,85 - 0,90]							
[0,80 - 0,85]							
[0,70 - 0,80]							
[0,60 - 0,70]							
[0,50 - 0,60]							
[0,40 - 0,50]							
[0,30 - 0,40]							
[0,20 - 0,30]							
[0,10 - 0,20]							
< 0,10							

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica (2018, p. 22).

## 2.2 Normas internacionais, método de aterramento para mitigação de harmônicos e normas da Copel

Este capítulo apresenta diretrizes de normas internacionais e nacionais da área, e de maneiras de mitigação de harmônicos, como explanado a seguir.

### 2.2.1 Norma IEEE 519 – 2014

A respectiva norma americana, descreve os principais fenômenos causadores das harmônicas nas instalações elétricas, apresenta os métodos de medições, além de estabelecer os valores máximos das distorções harmônicas individuais de tensão e de corrente.

Em virtude da abordagem, que compreende tanto os consumidores quanto as concessionárias, esta norma tem seu ponto central de discussão, o de limitar os impactos das cargas não lineares das instalações, definindo assim, os níveis máximos de distorção no ponto de entrega da energia elétrica por parte das concessionárias (CAVALCANTI; NUNES, 2019).

Com isso, a tensão de operação do sistema deverá ser tomada como base, a fim de realizar a comparação com os limites de distorção encontrados (LEÃO, 2014). A partir daí, compara-se a tensão individual e a tensão de base para determinar as distorções harmônicas. Além deste fator, emprega-se a razão da corrente de curto circuito e a máxima corrente solicitada pela carga,  $I_{SC}$  e  $I_L$ , respectivamente. Portanto, o valor limite para as distorções harmônicas são proporcionais a esta relação (TEIXEIRA, 2009).

Para o Quadro 7, a IEEE std 519-2004 apresenta os valores máximos para as distorções harmônicas de corrente de acordo com sua ordem e o respectivo valor total admissível. Aqui vale frisar que, independente da relação de corrente, os limites de distorção estão restritos a 20%, podendo atingir o valor mínimo de 5%.

**Quadro 7 - Limite de distorção de corrente em relação à corrente fundamental do sistema de até 69 kV.**

<b>Máxima Distorção Harmônica de Corrente em Percentual de <math>I_L</math></b>						
Ordem Harmônica Individual (harmônicos ímpares) <sup>(a,b)</sup>						
$I_L/I_{SC}$	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20 <sup>c</sup>	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,4	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

<sup>a</sup> Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites harmônicos ímpares acima;  
<sup>b</sup> Distorções de corrente que resultam em um offset CC, e.g., conversores de meia onda, não são permitidos;  
<sup>c</sup> Todo o equipamento de geração de energia está limitado a estes valores de distorção de corrente, independente de  $I_{SC}/I_L$ .  
 Onde:  
 $I_{SC}$  = máxima corrente de curto circuito no PCC;  
 $I_L$  = máxima corrente de carga demandada (componente de frequência fundamental) no PCC sobre condições de operação nominal;  
 PCC = Ponto de acoplamento comum entre a concessionária e o usuário.

Fonte: Adaptado (IEEE std 519, 2004).

### 2.2.2 Norma EN 50160

No caso da norma europeia EN 50160, é estipulado que, caso o consumidor não esteja recebendo o fornecimento de energia com qualidade e parâmetros definidos para uma QEE satisfatória, fica a cargo da concessionária, realizar melhorias e adequações do seu sistema de distribuição, com o intuito de enquadrar-se segundo as normas vigentes (CAVALCANTI; NUNES, 2019).

Dessa forma, delimita-se as características e valores para a tensão fornecida pelas redes de distribuição de energia elétrica, tanto para média tensão como para baixa tensão, como por exemplo, os afundamentos de tensão, picos de tensão, interrupções de fornecimento, assimetria do sinal elétrico e efeito flicker.

No Quadro 8 é apresentado os valores limites para os harmônicos individuais de tensão elétrica, de acordo com a Norma EN 50160.

**Quadro 8 - Limites de distorção harmônica de tensão em baixa e média tensão.**

HARMÔNICOS ÍMPARES				HARMÔNICOS PARES	
Não-múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem h	Tensão Relativa	Ordem h	Tensão Relativa	Ordem h	Tensão Relativa
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	4%	15	0,5%	6 ... 24	0,5%
13	3%	21	0,5%	-	
17	2%	-		-	
19	1.5%	-		-	
23	1.5%	-		-	
25	1.5%	-		-	
THD <sub>v</sub> < 8%					

Fonte: Adaptado (EN 50160, 2010).

### 2.2.3 Método de aterramento

Na implantação de sistemas de aterramento de uma instalação, deve-se levar em conta o método que melhor satisfaz os requisitos das cargas instaladas, haja vista que, além de tornar as instalações elétricas seguras e com qualidade, também pode



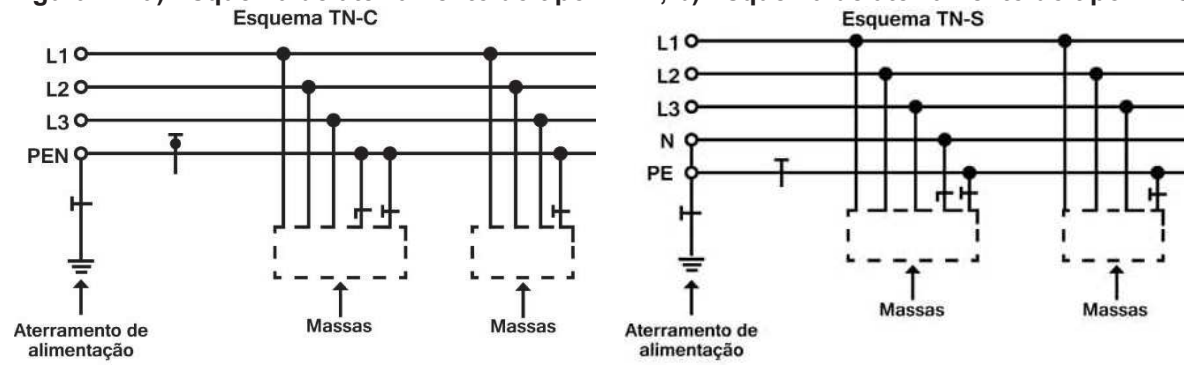
ser necessária para assegurar a correção das distorções harmônicas da rede (CAVALCANTI; NUNES, 2019).

Neste caso, o método TN-S é o mais indicado para eliminar as distorções harmônicas, pois o condutor de neutro e proteção são distintos em toda sua extensão (CAVALCANTI; NUNES, 2019).

A característica que melhor explica este método é devido ao condutor de proteção escoar apenas as correntes de falta do sistema, enquanto o condutor neutro irá conduzir os resíduos e distorções harmônicas pelo circuito, podendo elevá-las acima das correntes de linha (BACH; PINTO, 2014).

Outro fator relevante para curto-circuitar os condutores neutro e proteção na entrada do sistema se deve pelo fato de evitar a circulação de corrente de retorno, que outrora haveria pelo condutor neutro, fazendo com que esta, chegasse até a rede de distribuição de energia, ocasionando assim, sérios danos à rede. Contudo, no meio industrial, o método de aterramento TN-C é comumente utilizado, sendo as funções de neutro e proteção combinadas em apenas um único condutor. A Figura 4 exemplifica o sistema TN-C e TN-S.

**Figura 4 – a) Esquema de aterramento do tipo TN-C; b) Esquema de aterramento do tipo TN-S.**



Fonte: ABNT NBR 5410 (2008, p.15).

#### 2.2.4 Diretrizes da Copel para consumidores do Grupo A

A distribuição de energia por parte da Copel baseia-se na Resolução Homologatória 2.559, de 18 de junho de 2019, a qual estabelece as Tarifas de Energia (TE) e as Tarifas de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD). Essas tarifas são destinadas ao fornecimento de energia para os diferentes consumidores, como indústrias, residências e comércios, sendo que, com relação ao nível de tensão e a

carga demandada, os consumidores são divididos em Grupo A e Grupo B (COPEL, 2019).

O Grupo A engloba unidades consumidoras de tensões iguais ou superiores a 2,3 kV, ou que são atendidas por sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizando-se pela tarifa binômia (alta tensão). O Grupo B engloba unidades consumidoras de tensões inferiores a 2,3 kV, possuindo uma tarifa monômia (baixa tensão). O Grupo A possui uma divisão em grupos de acordo com o intervalo de tensão de fornecimento, como segue (COPEL, 2019):

- Subgrupo A1: tensão igual ou superior a 230 kV;
- Subgrupo A2: tensão de 88 kV a 138 kV;
- Subgrupo A3: tensão de 69 kV;
- Subgrupo A3a: tensão de 30 kV a 44 kV;
- Subgrupo A4: tensão de 2,3 kV a 25 kV;
- Subgrupo AS: tensão inferior a 2,3 kV, por sistema subterrâneo.

Além das tarifas monômia e binômia citadas anteriormente, as tarifas existentes dentro da estrutura tarifária da Copel são a convencional e horária. Por sua vez, as tarifas horárias são divididas em azul, verde e branca. Essas tarifas são assim divididas, pois levam em consideração às horas do dia (ponta e fora de ponta) (COPEL, 2019).

A tarifa azul é aplicada a unidades consumidoras que tem alto fator de carga no horário de ponta, possuindo capacidade de modulação de carga nesse momento. A tarifa verde é destinada aos consumidores com baixo teor de carga no horário de ponta, possuindo uma capacidade limitada com relação a modulação. Essa tarifa é composta por tarifas diferenciadas de acordo com as horas do dia, e por uma tarifa única de demanda de potência em qualquer horário de utilização. Já a tarifa branca é aplicada as unidades consumidoras em baixa tensão (127V, 220V, 380V e 440V) (COPEL, 2019).

### 2.3 Aplicações da Eficiência Energética

Este capítulo aborda o conceito de eficiência energética, a sua interação com a sustentabilidade e economia, e seus objetivos quando empregados no setor

industrial. Compreende também as dificuldades para a real implementação nas indústrias e como funciona o conceito da melhoria contínua aplicada à gestão.

### *2.3.1 Eficiência Energética*

A eficiência energética corresponde a um ideal de racionalização de energia. Este conceito abrange ações, de cunho tecnológico ou econômico, que são aplicadas em sistemas e processos visando uma redução da demanda energética, sem acarretar em prejuízos qualitativos ou quantitativos dos bens e/ou serviços produzidos (GODOI, 2011).

Até o início dos anos 1970 o conceito de eficiência energética não possuía muita importância no contexto econômico mundial, porém, após o primeiro aumento do preço do petróleo em 1973, fez com que surgisse uma revisão das políticas energéticas, uma vez que a energia destacou-se como fator determinante nos preços dos produtos industriais e nas despesas relacionadas à manutenção dos grandes centros urbanos. Com isso, iniciou-se um processo de melhoria da eficiência nos aparelhos eletroeletrônico e de adoção de medidas visando à conservação de energia nos centros industriais (NATURESA, 2011).

Nesse contexto, no Brasil, houve a criação de determinadas iniciativas, como o Programa Nacional do Alcool (PROÁLCOOL), o acordo nuclear entre Brasil e Alemanha, assim como a redução gradativa e contínua nas tarifas de energia elétrica, entre outros. Esses fatos reduziram o nível de dependência do petróleo, porém aumentaram o consumo de outros insumos energéticos, destacando-se a energia elétrica. Somente nos anos 80 iniciaram-se medidas específicas na área de conservação de energia elétrica, visando à melhoria e controle da eficiência energética, como por exemplo, a fundação do INEE (Instituto Nacional de Eficiência Energética), em 1992 (NATURESA, 2011).

Segundo Geller (2003), a melhoria da eficiência energética pode se obtida através da implantação de tecnologias disponíveis, como por exemplo, dispositivos mais eficientes para aquecer a água; substituição de lâmpadas incandescentes por fluorescentes compactas; uso de equipamento de refrigeração com compressores mais eficientes e melhores conversores de calor; implementação de motores de veículos mais eficientes, como veículos elétricos híbridos; dispositivos eletrônicos com

baixo consumo de energia; controle avançado de sistemas motores; melhor gerenciamento da energia e dos sistemas de controle.

### 2.3.2 A gestão de energia nas indústrias

A gestão de energia nas indústrias abrange atividades planejadas e realizadas sistematicamente, com o objetivo de assegurar o pleno funcionamento de subsistemas de conversão, transporte, armazenamento e uso da energia. Sob o cenário econômico, ambiental e social, um gestor da indústria deve-se atentar para (GODOI, 2011):

- Recursos naturais (renováveis e/ou não renováveis) disponíveis para uso;
- Conversores utilizados e seus níveis de desempenho;
- Local a ser implantado e possíveis interferências;
- Externalidades positivas e negativas da energia;
- Metodologias empregadas para integrar as partes interessadas na tomada de decisão quanto à necessidade e tipo da adoção de sistema energético;
- Controle dos custos da energia;
- Monitoramento e controle da gestão da energia.

Medidas econômicas para a eficiência energética, como modificações no planejamento de produção para reduzir ou eliminar uso de eletricidade comprada nos horários de pico, pode resultar na introdução de novos sistemas de substituição de energia para esses horários, implicando na adoção de uma medida tecnológica para a indústria em questão e também resultar em racionalização de energia, como uma medida comportamental (GODOI, 2011).

Para obter índices altos de eficiência energética dentro de uma indústria requer-se então a implementação de medidas tecnológicas e comportamentais. Em uma organização com cultura favorável às ideias de racionalização de energia, permite-se a criação de redes de comunicação de indução à eficiência energética industrial, possibilitando a divulgação e troca de informações entre gestores, fornecedores e patrocinadores, sobre indicadores de eficiência, tecnologias disponíveis e emergentes, projetos inovadores, entre outros (GODOI, 2011).

### *2.3.3 Eficiência energética no âmbito econômico e ambiental*

O setor industrial é um dos setores que mais consome recursos energéticos no mundo. Por este motivo, e aliado ao crescimento demográfico e industrialização, aumentaram-se as preocupações referentes à escassez desses recursos, que alimentam tanto os setores comerciais, quanto os industriais (SILVA, 2013).

Segundo Nogueira (2006), os recursos não renováveis, ou fósseis e os recursos renováveis são definidos como recursos energéticos que estão disponíveis na natureza e que podem ser usados para o atendimento das necessidades humanas. Porém, segundo o PROCEL (2006), o uso intensivo desses recursos e a geração de resíduos correspondente, tem causado efeitos nocivos ao meio ambiente, como por exemplo: efeito estufa e mudanças climáticas; perda de terras cultiváveis; desmatamento; poluição das águas; smog foto-químico e poluição das cidades.

Portanto, em vistas da importância que a energia exerce sobre a sociedade como um todo, o consumo desta deve ser realizado de forma sustentável, garantindo a utilização deste recurso às gerações futuras. O setor industrial como grande consumidor de recursos energéticos, deve buscar melhorias contínuas em seus processos produtivos e na tomada de consciência organizacional, objetivando produções de forma sustentável, sem interferir nos níveis de desempenho desejados (SILVA, 2013).

### *2.3.4 Dificuldades para implementação da eficiência energética*

A eficiência energética se baseia na utilização da energia com o menor desperdício possível, porém, mesmo possuindo grandes vantagens econômicas e ambientais, a sua adoção na indústria ainda sofre resistência. As dificuldades dizem respeito: a infraestrutura de fornecimento limitada; a conscientização; problemas de qualidade; custos de transação; avaliação dos resultados econômicos; falta de equipamentos e serviços adequados; inexistência de custos explícitos para as externalidades; restrições financeiras; práticas organizacionais; distorções nos preços regulamentados; barreiras percebidas pelas concessionárias; obstáculos políticos (SILVA, 2013).

A resistência por parte da sociedade diz respeito a questões de conscientização, uma vez que este assunto não possui tanto enfoque, minimizando a

sua prioridade e conseqüentemente a aceitação de medidas relacionadas. Já para as organizações, as barreiras dizem respeito à questão do custo benefício, pois é comprovado que a eficiência energética traz vantagens ambientais, sociais e econômicas, porém, muitas vezes, não é possível quantificar esses benefícios, o que dificulta a análise do retorno do investimento (SILVA, 2013).

De acordo com Naturesa (2011), como forma de ultrapassar essa resistência, podem ser aplicadas políticas, como: pesquisa, desenvolvimento e demonstração; financiamento; incentivos financeiros; tarifação; acordos voluntários; regulamentações; disseminação de informação e treinamento; aquisição de equipamentos; reformas de mercado; obrigações de mercado; capacitação; planejamento.

Para Geller (2003), com relação a essas políticas:

“Algumas políticas, como pesquisa e desenvolvimento, incentivos financeiros e iniciativas de aquisição, são mais adequadas para estimular a comercialização e os mercados iniciais para novas tecnologias. Outras políticas, como financiamento, acordos voluntários e disseminação da informação, são utilizadas para acelerar a adoção, uma vez que a tecnologia se estabeleça no mercado. Políticas como regulamentações e obrigações de mercado, frequentemente, são utilizadas para maximizar a participação de mercado e/ou competir no seu processo de transformação” (GELLER, 2003, p. 61).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção, consta a apresentação dos materiais e métodos empregados no desenvolvimento deste trabalho.

### 4.1 A Empresa

O local escolhido para estudo e análise técnica com a finalidade de desenvolvimento deste trabalho é a empresa Bompel Industria de Calçados Ltda, localizada na rua Luiz Segundo Rossoni, 539, Centro, pertencente a cidade de Toledo, no estado do Paraná. A Empresa, cujo a logo está representada pela Figura 5 atua há mais de 40 anos no mercado, desenvolvendo produtos de qualidade reconhecidas internacionalmente no ramo de calçados, sendo estes voltados a equipamentos de proteção individual (EPI) (BOMPEL, 2019).

Figura 5 - BOMPEL Industria de Calçados Ltda.



Fonte: BOMPEL (2019).

### 4.2 Entrada de Energia Elétrica

A empresa Bompel é atendida pela Companhia Paranaense de Energia – COPEL, com tensão de atendimento em média tensão (MT) e demanda contratada de 280 kVA. A medição da energia elétrica é realizada diretamente em baixa tensão (BT), mas com tarifação pertencente ao grupo A, ou seja, aquela na qual é efetuada para consumidores de média (MT) e alta tensão (AT).



Outra característica de cobrança da energia elétrica da Bompel é a incidência da tarifa horária verde no consumo. Já a tensão contratada junto à concessionária é de 13,2 kV com limite inferior e superior podendo atingir entre 12,28 kV e 13,86 kV, respectivamente.

A entrada de serviço da unidade é do tipo aérea sendo instalado transformador e cabos de média tensão em final de linha dentro do perímetro do local. O transformador instalado tem potência de 300 kVA com tensão de alimentação no primário de 13,8 kV e no secundário do tipo trifásico com tensão de 220/127 V a quatro fios. Para proteção e seccionamento das instalações elétricas, há instalado um disjuntor em caixa moldada com disparador de corrente de até 1000 A. Com relação aos condutores elétricos instalados após o disjuntor geral, constata-se quatro condutores de 150 mm<sup>2</sup> por fase, com isolamento para 1kV. A Figura 6 e 7 apresentam a entrada de serviço da empresa Bompel.

**Figura 6 – Entrada de serviço da unidade.**



Fonte: Autor (2019).



**Figura 7 – Entrada de serviço da unidade.**



Fonte: Autor (2019).

Para o Quadro de medição mostrado na Figura 6, observa-se pela seta número 1 a caixa de derivação do ramal de entrada. A seta de número 2 indica a caixa onde se encontra o disjuntor de proteção e seccionamento das instalações e a seta de número 3 indica a caixa onde se encontra os componentes da medição, como por exemplo, o medidor da concessionária, a chave de aferição e o aparelho de telemetria que é responsável pela leitura remota do consumo de energia da unidade consumidora, por parte da Copel.

Após a saída do disjuntor de proteção, os condutores elétricos seguem para os respectivos quadros de distribuição instalados no setor de produção e escritórios.

#### 4.3 Medições e coleta de dados

Inicialmente foi feita uma visita às instalações elétricas internas da indústria, verificando os pontos alimentadores e de distribuição de energia elétrica, com o intuito de identificar o melhor local a ser coletados os dados, além de observar por meio de estudos, eventuais fenômenos que interferem no bom desempenho do sistema elétrico local.

Na realização da coleta de dados, empregou-se um analisador de qualidade de energia elétrica da marca IMS, modelo PowerNet P-600 G4, sendo o seu uso, indicado

para medição de circuitos alimentadores de cargas indutivas, máquinas e dispositivos industriais, edificações de uso comercial e residencial além de painéis de distribuição.

Segundo o fabricante, o aparelho é homologado para trabalho nas diversas concessionárias de energia elétrica do país e a sua representação é mostrada pela Figura 8.

**Figura 8 – Analisador de Energia Elétrica IMS.**



Fonte: IMS (2019).

As principais especificações e componentes do equipamento são descritas a seguir:

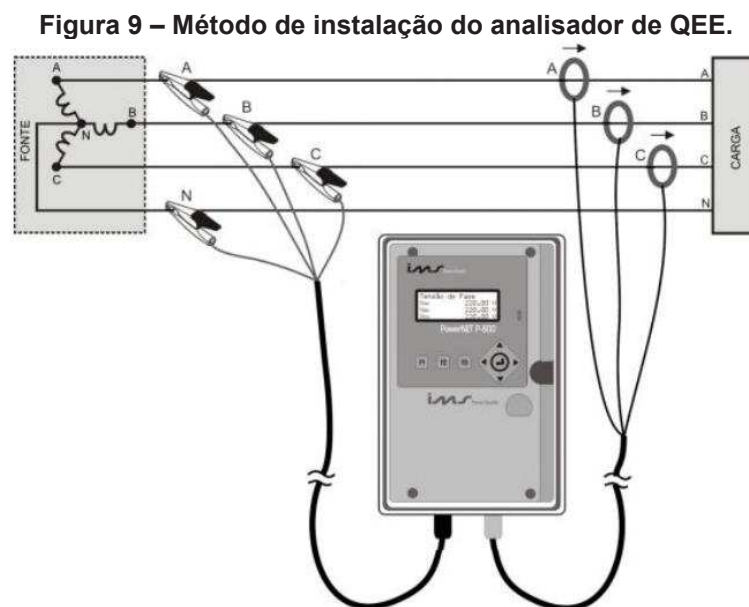
- i. Medição de corrente com sensor flexível, fazendo a leitura de até 3000 A;
- ii. Medição de tensão com conectores tipo jacaré;
- iii. Acompanha software PowerManager Desktop para manipulação dos dados (Download de registros, visualização e programação das grandezas medidas, emissão de gráficos, tabelas e desenvolvimento de relatórios técnicos);
- iv. Acompanha bolsa de lona para transporte do equipamento e seus componentes;
- v. Memória para armazenamento de registros de 16MB e comunicação USB;
- vi. Tensão de alimentação do dispositivo: 70 ~ 300 V.

As principais grandezas em análise para desenvolvimento deste trabalho são:

- i. Tensão por fase e média [V];
- ii. Tensões Máximas e Mínimas [V];
- iii. Corrente por fase e média [A];
- iv. Correntes Máximas e Mínimas [A];
- v. Fator de Potência por fase e médio;

- vi. Fatores de Potência Máximos e Mínimos;
- vii. Consumo Ativo e Reativo trifásico;
- viii. Demanda Ativa e Reativa trifásica;
- ix. Energia Direta e Reversa;
- x. Potência Ativa Instantânea por fase e média [W];
- xi. Potência Reativa Instantânea por fase e média [VAR];
- xii. Potência Aparente Instantânea por fase e média [VA];
- xiii. Frequência da fase de referência [Hz];
- xiv. THD de Tensão (%);
- xv. THD de Corrente (%);
- xvi. Harmônicas Pares de Tensão (%) até 40º ordem;
- xvii. Harmônicas Pares de Corrente (%) até 40º ordem;
- xviii. Harmônicas Ímpares de Tensão (%) até 41º ordem;
- xix. Harmônicas Ímpares de Corrente (%) até 41º ordem

Para a instalação do analisador de QEE, o fabricante recomenda que o equipamento seja inserido de acordo com a representação dada pela Figura 9.



Fonte: IMS (2019).

Outro dispositivo empregado para verificação de pontos específicos para análise da tensão e da corrente nas instalações elétricas do local, será um alicate amperímetro modelo 302+ da marca Fluke, com medição de corrente (CA) de 400 A, de acordo com a Figura 10.

**Figura 10 – Alicate Amperímetro Fluke 302+.**



**Fonte: Fluke (2019).**

#### 4.4 Estudo de caso

Após verificação do melhor local a se instalar o analisador de qualidade de energia elétrica, decidiu-se por inseri-lo junto ao disjuntor de proteção no quadro de medição, como pode ser observado pela Figura 11.

**Figura 11 – Localização da instalação do equipamento.**



**Fonte: Autor (2019).**

A tomada de decisão quanto ao local de instalação do equipamento se deu em conjunto com a *Strom Elétrica*, que é a empresa responsável pela manutenção elétrica da Bompel e também pelo fato de que posterior ao disjuntor de proteção, os condutores elétricos seguem caminhos distintos até os demais painéis elétricos, o que inviabilizaria uma análise global das instalações.

Quanto a escolha dos períodos de medições, definiu-se que a coleta de dados seria dividida em dois períodos distintos, que seguisse os procedimentos dispostos pelo Módulo 8 do Prodist e que não fosse interferir no processo produtivo da fábrica.

Outro fator de grande relevância e preponderante na escolha das datas das medições, foi devido a Bompel realizar um *retrofit* de um processo interno. Esse investimento se deu no setor da fábrica (produção), em que ocorreu a troca do sistema composto por um compressor com potência de 50 CV via acionamento por partida direta. O novo compressor adquirido é da marca Atlas Copco, modelo GA30VSD+FF no qual possui a potência de 40 CV. Um grande diferencial deste novo equipamento é a inserção de um inversor de frequência para o controle da partida e do eixo do motor. O compressor instalado é mostrado pela Figura 12.

**Figura 12 – Vista frontal do novo compressor.**



Fonte: Autor (2019).



A diferença do método de partida anterior para o atual é que para o primeiro caso, quando aciona-se o circuito de comando, a carga receberá a alimentação instantaneamente da rede de energia, ou seja, no momento da partida, a tensão nominal da rede é aplicado no estator de forma direta por seu enrolamento, gerando portanto, torque nominal no eixo do motor. Por consequência, a corrente de partida poderá atingir até oito vezes a corrente nominal do motor (corrente de pico), e com isso, contribuir para com afundamentos de tensão devido à alta potência do motor, e ainda, possibilitar a deterioração dos dispositivos e condutores elétricos do sistema.

Já para o caso onde emprega-se inversores de frequência na partida de motores, obtém-se um dispositivo capaz de controlar a velocidade de rotação, a partida através da rampa de aceleração, a frenagem, a frequência máxima e mínima de operação, além de monitorar a corrente nominal da carga. Um ponto negativo neste caso se dá com a incidência de harmônicos na rede elétrica devido a conversão de energia e/ou chaveamento. Isso ocorre devido aos sucessivos chaveamentos realizados para o controle de velocidade do eixo do motor.

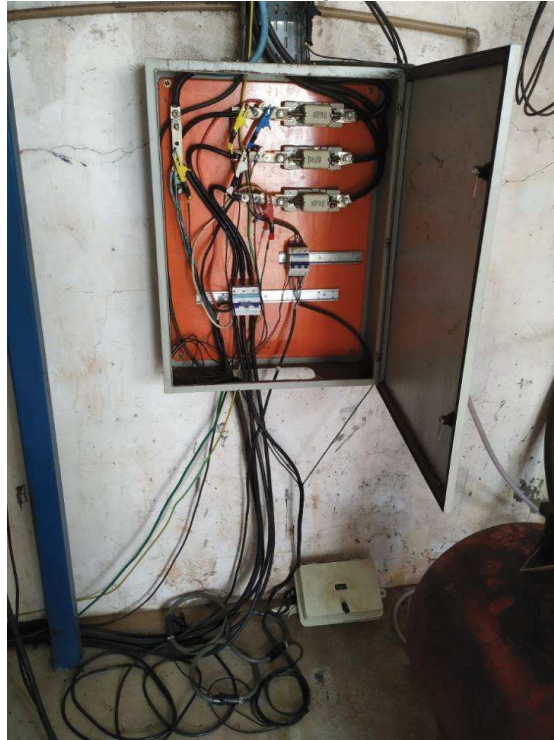
Além disso, realizou-se a coleta de dados diretamente no painel de alimentação deste novo sistema, sendo que esta nova coleta, ocorreria de forma pontual e durante algumas horas do dia.

Assim, a primeira coleta de dados teve início às 08:35 do dia 19 de setembro de 2019 e ocorreu até às 4:01 do dia 26 de setembro de 2019. Devido às características do equipamento programou-se a coleta de dados para intervalos de 60 segundos, totalizando 9807 registros.

A segunda análise da energia elétrica no local, ocorreu das 18:46 do dia 17 de outubro de 2019 até às 14:40 do dia 24 de outubro de 2019. Com relação ao quantitativo de dados, foram armazenados 9815 registros com intervalos de 60 segundos entre eles.

Já para a terceira verificação, agendou-se com a equipe de manutenção da Bompel no período da tarde do dia 14 de novembro de 2019, das 15:22 até as 17:58, totalizando 157 amostras coletadas. O intuito desse diagnóstico foi para identificar a possível geração de harmônicos na rede devido a proporção do inversor de frequência ali instalado, e também pelo fato de que, para energização do motor há instalado um transformador com potência de 45 kVA que eleva a tensão de 220 V para 380 V, sendo essa, a tensão nominal de operação do novo compressor. A Figura 13 mostra o analisador da QEE instalado no painel de alimentação do compressor.

**Figura 13 – Analisador da QEE instalado no painel de alimentação do compressor.**



**Fonte: Autor (2019).**

Neste painel encontra-se instalado três fusíveis da marca Siemens tipo NH de 200 A, categoria gL/gG para proteção individual contra sobrecorrentes em cada uma das fases, haja vista que, sua atuação é mais rápida quando comparado ao disjuntor. Após os fusíveis, existe ainda um disjuntor classe C de 125A para proteção contra sobrecarga e seccionamento do respectivo circuito. Para os condutores elétricos, verificou-se a instalação de cabos tipo singelo de seção 95 mm<sup>2</sup> e categoria 1 kV. Quanto à corrente nominal medida, constatou-se o valor de aproximadamente 50 A.

Outro fator que pode ser visualizado, se dá com a utilização do barramento de neutro para conexões de condutores de proteção (aterramento) e que é caracterizado pelo sistema TN-C. Contudo, no processo de mitigação de harmônicos, essa metodologia não é adequada tendo em vista a circulação de correntes harmônicas pelo condutor PEN, conforme Figura 4 - a. O recomendado seria o emprego do sistema TN-S com condutores de neutro e proteção distintos, de acordo com padrão da entrada de energia.

O processo de instalação do analisador de QEE no quadro de medição conforme a Figura 13, foi realizada pelo autor, acompanhado pela sócia proprietária da Bompel e pelo engenheiro Ruahn Fuser, responsável técnico da Strom Elétrica. Procurou-se efetuar a instalação do equipamento fora do horário comercial, devido a carga instalada ser menor. Este fator, colabora para a baixa temperatura do disjuntor

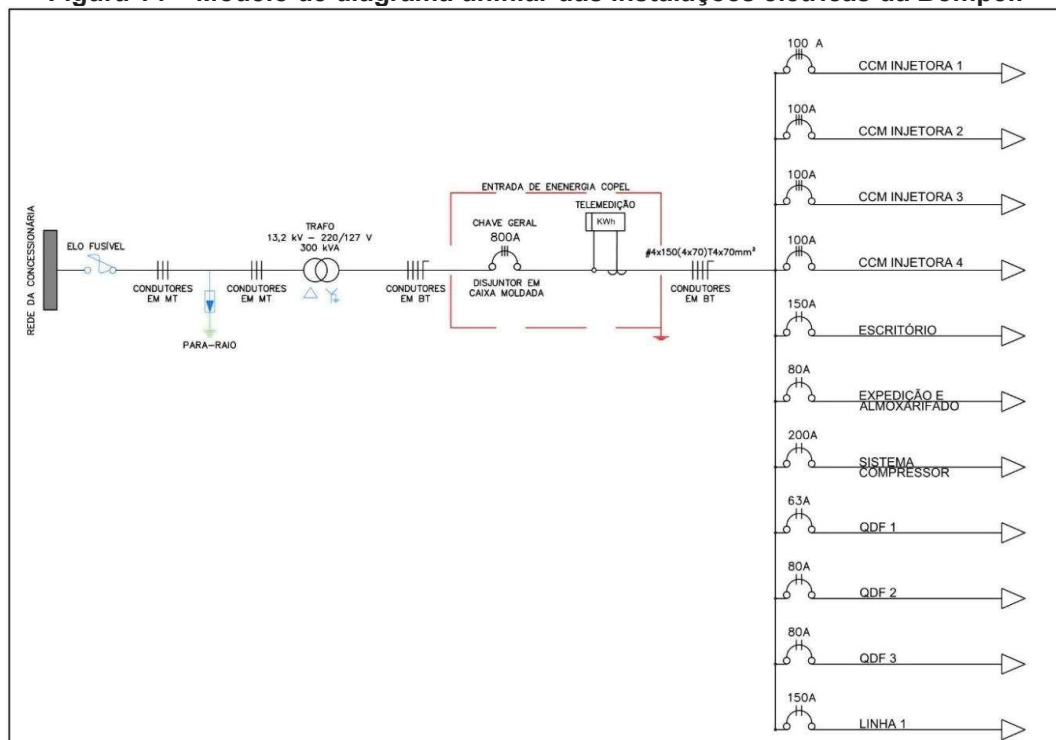
de proteção e dos condutores elétricos instalados. Além disso, foi utilizado de equipamentos de proteção individual (EPI) para a segurança e integridade física do autor com relação ao trabalho em eletricidade, conforme é especificado pela NR10 (Norma Regulamentadora 10: Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade).

#### 4.5 Levantamento de cargas

Para melhor compreensão do desenvolvimento deste trabalho na empresa Bompel, foi realizado um levantamento das principais cargas da instalação com o propósito de obter informações técnicas e características de cada equipamento, principalmente daqueles de maior potência. Também foi verificado se os painéis e quadros de distribuição possuem identificação de circuitos e diagramas unifilares das instalações.

A Figura 14 apresenta um diagrama unifilar geral das instalações elétricas da Bompel, dando ênfase aos componentes de proteção e seccionamento gerais dos circuitos.

**Figura 14 – Modelo de diagrama unifilar das instalações elétricas da Bompel.**



Fonte: Autor (2019).

Como pode ser visto no diagrama unifilar da Figura 14, após o disjuntor geral das instalações, os condutores seguem diferentes caminhos até os quadros de



distribuição de energia e/ou CCM's. Em alguns casos, a derivação dos condutores de alimentação ocorria tanto por barramentos quanto por conexões de condutores anterior ao lado primário dos disjuntores gerais dos painéis alocados.

Ainda sobre a Figura 14, vale ressaltar que após os respectivos disjuntores gerais dos painéis, segue a distribuição de circuitos para as demais cargas instaladas. Para o caso dos CCM's, ocorre a divisão dos circuitos em seu interior a fim de acionar as resistências, os motores, sensores, transformador e circuito de comando instalado nas respectivas máquinas.

Para o painel de alimentação das cargas do escritório, corresponde apenas de um disjuntor em caixa moldada de 150 A para seccionamento e proteção do alimentador. Após o disjuntor, os condutores elétricos seguem até o painel de distribuição destinado às cargas da área administrativa da Bompel e por fim acionam-se suas respectivas cargas.

Para a proteção e seccionamento do circuito da expedição e almoxarifado corresponde ao disjuntor de 80 A destinado à pequenas cargas instaladas naqueles locais, como por exemplo, computadores, leitores de código de barras, equipamentos de embalagens, entre outros. Já para o sistema do compressor, um disjuntor de 200 A em caixa moldada é alocado em um painel de distribuição de força, sendo que, após o disjuntor, os condutores elétricos seguem até o painel apresentado pela Figura 13.

Os demais painéis, QDF1, QDF2, QDF3 e Linha 1 corresponde aos painéis de alimentação dos robôs (molde e costura das botas), máquinas de costuras, prensa de pequeno porte e demais equipamentos de chão de fábrica.

#### 4.6 Análise dos dados

Em posse dos dados obtidos através das medições realizadas na Empresa Bompel, foi feito um estudo da qualidade da energia elétrica e da eficiência energética das instalações da empresa. Para isso, foi utilizado a planilha gerada através do analisador de QEE, no qual irá conter os dados acima citados e verificando as particularidades que podem ser sanadas neste trabalho, além de fornecer dados para o estudo.

Com relação aos dados medidos pelo analisador da QEE, o mesmo encontra-se no Apêndice A, B e C respectivo à primeira, a segunda e a terceira coleta de dados.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentadas as análises sobre os dados coletados com o medidor de QEE, em três coletas, como especificado no item 4.4 deste trabalho. Serão analisados os valores relativos à tensão de linha, tensão de fase, corrente de linha, interrupções de tensão, variações de frequência, fator de potência e distorções harmônicas, observando os principais indicadores e comparando-os com a norma vigente.

Na primeira coleta, o estudo foi feito com o compressor de 50 CV acionado via partida direta ainda em funcionamento na Bompel. A segunda coleta contempla a análise após o *retrofit* do compressor na fábrica, enquanto que a terceira coleta retrata as informações diretamente no painel de acionamento do novo compressor.

Para tanto, serão exibidos os valores mínimos, médios e máximo para cada unidade verificada, sendo:

- Valor máximo: relativo ao maior registro identificado durante o período analisado;
- Valor mínimo: referente ao menor registro identificado durante o período averiguado;
- Valor médio: correspondente à amostra média obtida pelo analisador de QEE.

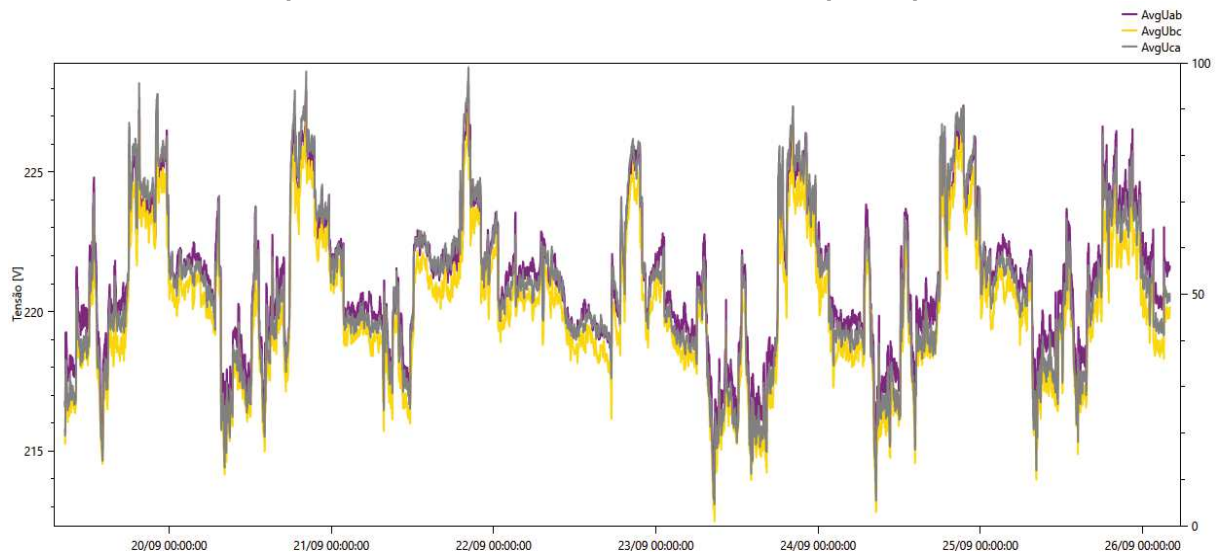
Os dados obtidos através das medições realizadas foram representados em planilhas do *software Microsoft Excel*. Para melhor apresentar os dados obtidos da primeira, segunda e terceira coleta, as referentes planilhas estão disponibilizadas para consulta através de links contidos nos Apêndices A, B e C, respectivamente. Os links disponibilizados são correspondentes as planilhas salvas em nuvem, mais especificamente através da ferramenta *Google Drive*.

### 5.1 Primeira coleta de dados

#### 5.1.1 Tensão de linha

Para este primeiro cenário, o Gráfico 1 representa o comportamento da tensão de linha do sistema, onde é possível verificar que os valores de tensão mantiveram-se dentro da faixa de tensão adequada especificado entre 202 V até 231 V, conforme prescreve o Módulo 8 do Prodist. Para tensão de linha, considera-se a tensão de referência igual a 220 V.

**Gráfico 1 - Comportamento da tensão de linha do sistema para a primeira medição.**



Considerando os valores de tensão especificados durante este primeiro momento, o Quadro 9 identifica algumas particularidades, sendo que, a segunda e terceira linha apresentam, respectivamente, os valores máximos e médios obtidos, classificando-os dentro da faixa de tensão adequada. Por último, a tensão mínima de linha verificada atingiu tanto o patamar da faixa precária de tensão que compreende o valor de 191 V até 202 V, quanto o valor da faixa crítica admitida, representada por valores menores que 191 V.

A grande diferença de tensão para os valores mínimos admitidos pode ser consequência das cargas monofásicas instaladas no interior da indústria em questão. Portanto, recomenda-se atenção e se possível, equilibrar as cargas monofásicas e bifásicas instaladas.

**Quadro 9 - Valores máximos, mínimos e médios da tensão de linha obtidos na primeira coleta de dados.**

	$V_{AB}$ [V]	Data - Hora	$V_{BC}$ [V]	Data - Hora	$V_{CA}$ [V]	Data - Hora
Valor Mínimo	188,97	20/09/2019 – 15:15	162,05	20/09/2019 – 15:15	165,21	20/09/2019 – 15:15
	192,47	19/09/2019 – 19:32	193,87	19/09/2019 – 19:32	195,59	19/09/2019 – 19:32
	196,93	19/09/2019 – 19:33	198,63	19/09/2019 – 19:16	196,67	19/09/2019 – 19:33
Valor Médio	221,10	25/09/2019 – 13:30	220,04	20/09/2019 – 16:29	220,79	22/09/2019 – 10:11

	$V_{AB}$ [V]	Data - Hora	$V_{BC}$ [V]	Data - Hora	$V_{CA}$ [V]	Data - Hora
Valor Máximo	228,43	21/09/2019 – 20:18	227,89	21/09/2019 – 20:18	228,91	21/09/2019 – 20:16
	228,32	21/09/2019 – 20:17	227,66	21/09/2019 – 20:17	228,90	21/09/2019 – 20:17
	228,20	21/09/2019 – 20:16	227,66	21/09/2019 – 20:16	228,90	21/09/2019 – 20:15

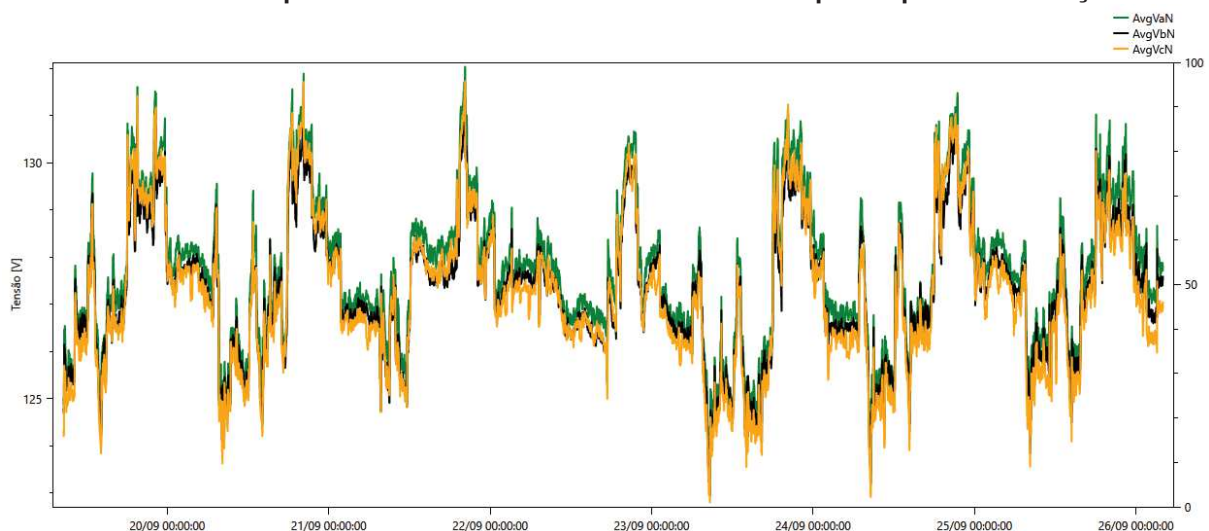
Fonte: Autor (2019).

Consultando a equipe de manutenção quanto a possíveis problemas nos equipamentos, registrou-se que na tarde do dia 20 de setembro, um dos robôs que trabalha na costura dos calçados na linha de produção deixou de funcionar, fazendo com que a programação pré-estabelecida do equipamento fosse perdida. Logo, foi preciso acionar uma empresa especializada de outra cidade para corrigir a falha e colocar o robô em funcionamento novamente. Verificou-se que a correção da falha só ocorreu após às 17:00.

### 5.1.2 Tensão de fase

Para a tensão de fase adotada de 127 V (TR), seu comportamento é observado pelo Gráfico 2.

Gráfico 2 - Comportamento da tensão de fase do sistema para a primeira medição.



Fonte: Autor (2019).

Com relação aos valores máximos e médios de tensão identificados, afirma-se que ambos permanecem dentro da faixa adequada de tensão que abrange os valores de 117 até 133 V.

Já os valores mínimos identificados, enquadram-se tanto na faixa de tensão precária que abrange os valores menores que 117 V até 110V, quanto os da faixa crítica, que são representados por valores menores que 110V, de acordo com o Quadro 1 da seção 2.1.1.

O Quadro 10 apresenta um resumo das tensões identificadas durante o período de análise.

**Quadro 10 - Valores máximos, mínimos e médio da tensão de fase para a primeira medição**

	$V_{AN}$ [V]	Data - Hora	$V_{BN}$ [V]	Data - Hora	$V_{CN}$ [V]	Data - Hora
Valor Mínimo	101,99	20/09/2019 – 15:15	103,65	20/09/2019 – 15:15	89,17	20/09/2019 – 15:15
	112,50	19/09/2019 – 19:32	110,63	19/09/2019 – 19:32	112,05	19/09/2019 – 19:16
	113,10	19/09/2019 – 19:33	114,63	19/09/2019 – 19:33	112,69	19/09/2019 – 19:32
Valor Médio	127,68	23/10/2019 – 19:19	127,30	22/09/2019 – 17:34	127,19	20/09/2019 – 16:46
Valor Máximo	132,13	21/09/2019 – 20:18	131,59	21/09/2019 – 20:18	131,89	21/09/2019 – 20:18
	132,12	21/09/2019 – 20:16	131,48	21/09/2019 – 20:17	131,86	20/09/2019 – 20:16
	127,11	21/09/2019 – 20:17	131,43	20/09/2019 – 20:16	131,81	21/09/2019 – 20:17

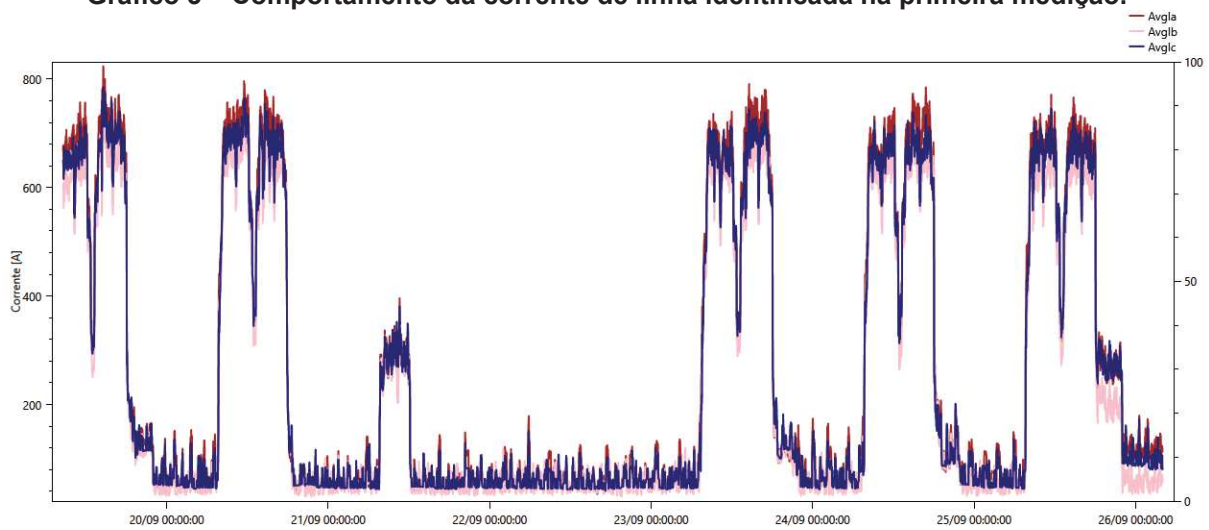
Fonte: Autor (2019).

Um fator relevante e que vale destaque para o primeiro cenário, refere-se à análise no dia 20 de setembro de 2019, por volta das 15:15, em que foi identificado os menores valores anotados pelo equipamento, tanto para a tensão de linha quanto para a de fase do sistema. O mesmo pode ser justificado pela grande quantidade de equipamentos em funcionamento devido ao horário de trabalho da empresa.

### 5.1.3 Corrente de linha

Para uma análise global da corrente de linha das instalações elétricas da Bompel, o Gráfico 3 mostra o comportamento da corrente durante o período de estudo.

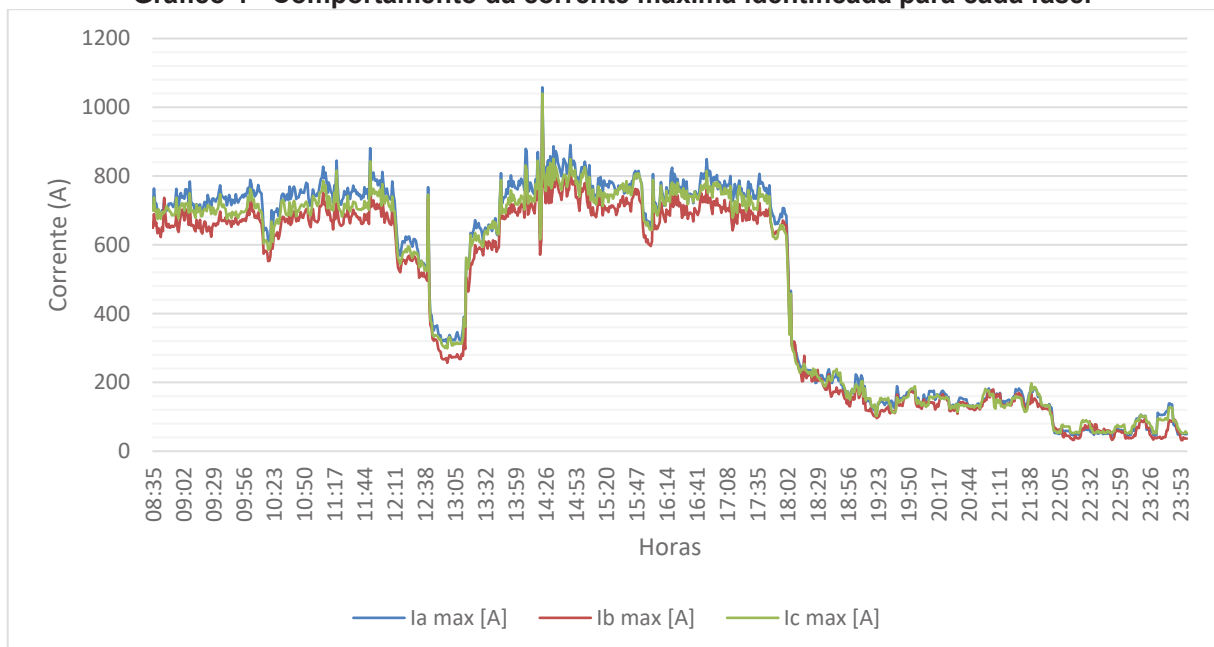
**Gráfico 3 – Comportamento da corrente de linha identificada na primeira medição.**



Fonte: Autor (2019).

Verificando pontualmente as características de corrente e levando-se em consideração o dia que ocorreu o pico de consumo, o Gráfico 4 exhibe os dados referentes ao dia 19 de setembro de 2019, relacionando um conjunto de medições para com as correntes máximas identificadas.

**Gráfico 4 - Comportamento da corrente máxima identificada para cada fase.**



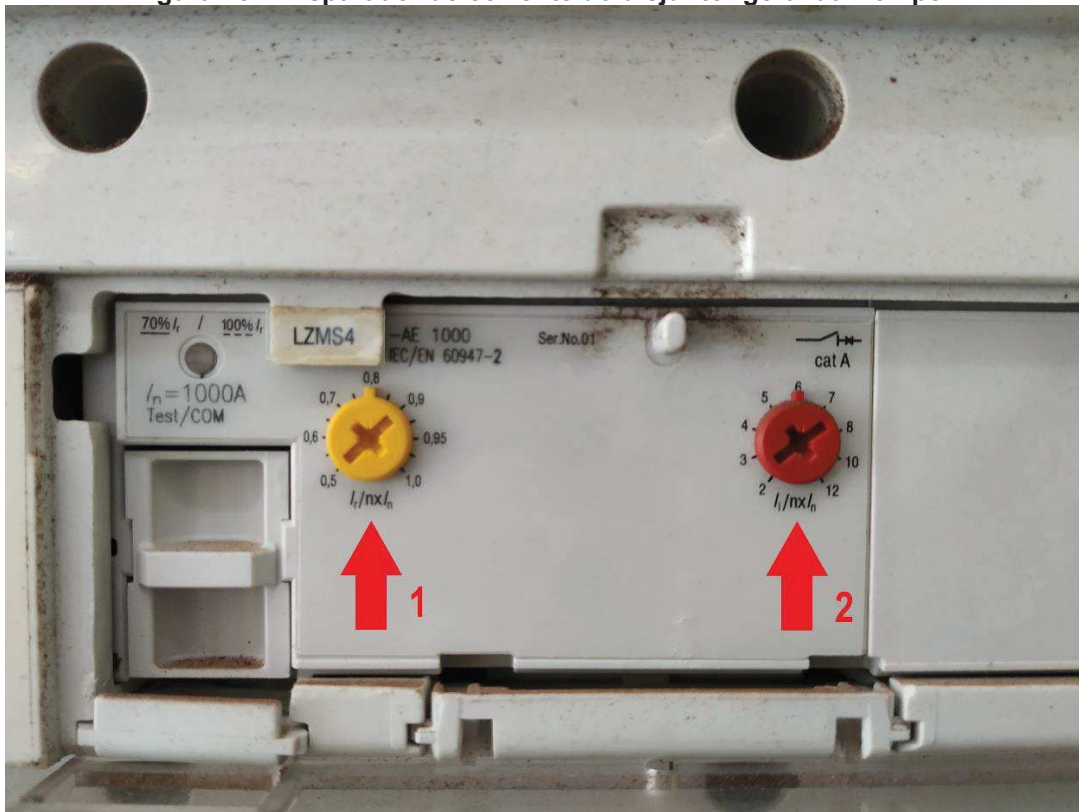
Fonte: Autor (2019).

Levando em consideração as características técnicas do disjuntor de proteção das instalações, sabe-se que o mesmo é do tipo caixa moldada, com disparador de corrente de até 1000 A e da linha *Moeller* pertencente ao grupo *Eaton*. O valor definido junto ao disparador de corrente para funcionamento e operação do disjuntor é de 800



A, representado no disjuntor como  $0,8 \times I_N$  (trimpot amarelo), onde  $I_N$  retrata a corrente nominal, de acordo com a seta 1, da Figura 15. Já a seta 2 indica o valor do ajuste para corrente de sobrecarga (trimpot vermelho), do disjuntor geral, sendo esta, definida como seis vezes a corrente nominal do disjuntor.

**Figura 15 – Disparador de corrente do disjuntor geral da Bompel.**



Fonte: Autor (2019).

Observando os demais resultados das medições, percebe-se que a corrente média comumente aproxima-se o valor da corrente nominal do disjuntor em horários de pico da fábrica, chegando até o valor máximo de 1058,05 A, de acordo com o apresentado no Quadro 12.

Outro ponto importante da análise das correntes foi de constatar que a fase A possui nível de corrente mais elevado quando comparado a fase C, e esta, superior a fase B. Esse acontecimento pode ser levado em conta devido a atuação das cargas monofásicas e bifásicas do sistema.

O Quadro 11 apresenta alguns dados relativos às correntes identificadas no período de medição. Para os valores máximos e mínimos, considerou aqueles obtidos durante todo o intervalo da análise, dos quais selecionou-se os três valores mais significativos. Todavia, para o valor médio, a referência adotada na definição de valores foi o horário comercial de funcionamento da Bompel, que inicia-se por volta

das 07:30 e vai até próximo às 18:00. Com isso, calculou-se por meio de uma planilha no *software Microsoft Excel* os respectivos valores médios para ambas as fases da instalação.

**Quadro 11 - Valores máximos, mínimos e médios das corrente para cada uma das fases.**

	Corrente de linha A [A]	Data - hora	Corrente de linha B [A]	Data - Hora	Corrente de linha C [A]	Data - Hora
Valor Mínimo	32,14	22/09/2019 - 16:00	29,18	20/09/2019 - 20:33	38,7	23/09/2019 - 02:38
	34,32	22/09/2019 - 16:01	29,3	20/09/2019 - 20:34	39,3	22/09/2019 - 17:08
	34,71	22/09/2019 - 15:59	29,5	24/09/2019 - 01:48	39,5	22/09/2019 - 07:29
Valor Médio	665,81	19/09/2019 - 09:25	602,07	19/09/2019 - 09:07	635	19/09/2019 - 09:41
Valor Máximo	1058,05	19/09/2019 - 14:23	1007,91	19/09/2019 - 14:23	1040	19/09/2019 - 14:23
	994,43	23/09/2019 - 14:01	933,58	23/09/2019 - 09:25	954	23/09/2019 - 09:25
	978,35	23/09/2019 - 09:25	912,19	23/09/2019 - 14:01	941	23/09/2019 - 14:01

Fonte: Autor (2019).

Por fim, verifica-se que durante o ciclo de trabalho da fábrica, o comportamento das correntes é predominante durante a semana. Já nos períodos fora de expediente da fábrica, observa-se também valores constantes, atingindo aproximadamente entre 60 a 80 A para ambas as fases. Para este caso, considera-se o funcionamento do sistema de iluminação externa, equipamentos de informática (servidor), sistema de alarme e as injetoras de poliuretano.

#### 5.1.4 Interrupção, desequilíbrio e flutuação de tensão

Com relação ao analisador de QEE empregado neste trabalho, não é possível fazer a verificação quanto as interrupções de curta duração relacionado a valores menores que 1 segundo. Para demais valores, não houveram ocorrências detectadas.

Sobre as componentes dos fatores  $V_-$ ,  $V_+$  e FD para o cálculo do desequilíbrio de tensão, o analisador de QEE não contempla este fornecimento, assim como o Pst e Plt relativo ao estudo da flutuação de tensão.



Para análise da VTCD, será considerado o Quadro 12.

**Quadro 12 - Valores mínimos para tensão de linha e de fase.**

Data - hora	Van min [V]	Vbn min [V]	Vcn min [V]	Uab min [V]	Ubc min [V]	Uca min [V]
19/09/2019 - 19:31	129,96	129,31	129,68	224,69	223,87	225,11
19/09/2019 - 19:32	112,5	110,63	112,69	192,47	193,87	195,59
19/09/2019 - 19:33	113,1	114,63	114,55	196,93	199,23	196,67
19/09/2019 - 19:34	131,14	130,59	131,11	226,71	226,23	227,42

Fonte: Autor (2019).

Observa-se que, para os valores mínimos identificados, ocorreu um afundamento temporário de tensão por pelo menos dois minutos, tanto para a tensão de linha quanto para a tensão de fase entre as 19:32 e 19:33 do dia 19 de setembro. Esse afundamento se torna perceptível quando comparado aos minutos anteriores e posteriores aos citados anteriormente.

#### 5.1.5 Variações de frequência

Segundo a ANEEL, a variação de frequência em condições normais de operação e em regime permanente deve estar situada entre 59,9 Hz até 60,1 Hz. Outra afirmação feita é que a frequência da energia elétrica não pode exceder o valor de 66 Hz nem ser inferior ao valor de 56,5 Hz.

Verificando a planilha de dados referente a este primeiro momento, afirma-se que não houveram ocorrências relativo aos valores críticos para com a frequência da rede elétrica. Contudo, para valores abaixo de 59,9 Hz detectou-se vinte e quatro eventos, como podem ser vistos na Quadro 13.

**Quadro 13 – Indicação de valores de frequência (Hz) menores que os recomendados pelo Prodist.**

Data - Hora	Frequência (Hz)
20/09/2019 - 15:15	59,8
22/09/2019 - 05:53	59,86
22/09/2019 - 05:57	59,89
22/09/2019 - 10:58	59,89
22/09/2019 - 10:59	59,88
22/09/2019 - 11:09	59,89

Data - Hora	Frequência (Hz)
23/09/2019 - 06:50	59,67
23/09/2019 - 06:51	59,82
23/09/2019 - 06:52	59,84
23/09/2019 - 20:37	59,83
23/09/2019 - 20:38	59,87
23/09/2019 - 23:21	59,89
23/09/2019 - 23:22	59,88
24/09/2019 - 08:02	59,88
24/09/2019 - 08:06	59,85
24/09/2019 - 08:51	59,88
24/09/2019 - 08:54	59,88
24/09/2019 - 14:15	59,87
24/09/2019 - 16:36	59,74
24/09/2019 - 18:41	59,88
24/09/2019 - 18:54	59,89
24/09/2019 - 18:55	59,89
25/09/2019 - 07:52	59,89
25/09/2019 - 07:53	59,89

Fonte: Autor (2019).

Para valores acima de 60,1 Hz o Quadro 14 exibe as ocorrências detectadas do decorrer desta análise com a identificação de seis amostras neste período.

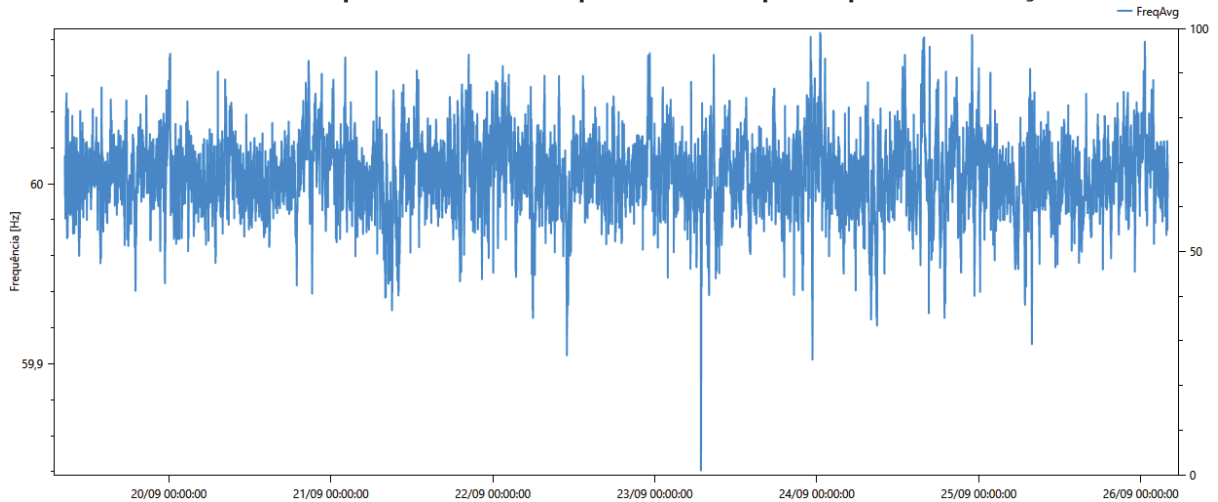
**Quadro 14 - Indicação de valores de frequência (Hz) maiores que os recomendados pelo Prodinst.**

Data - Hora	Frequência (Hz)
24/09/2019 - 00:30	60,11
24/09/2019 - 00:33	60,11
24/09/2019 - 00:35	60,11
24/09/2019 - 15:48	60,11
24/09/2019 - 22:59	60,11
24/09/2019 - 23:00	60,13

Fonte: Autor (2019).

Finalmente, o Gráfico 5 representa a variação da frequência média medida.

**Gráfico 5 - Comportamento da frequência média para a primeira medição.**

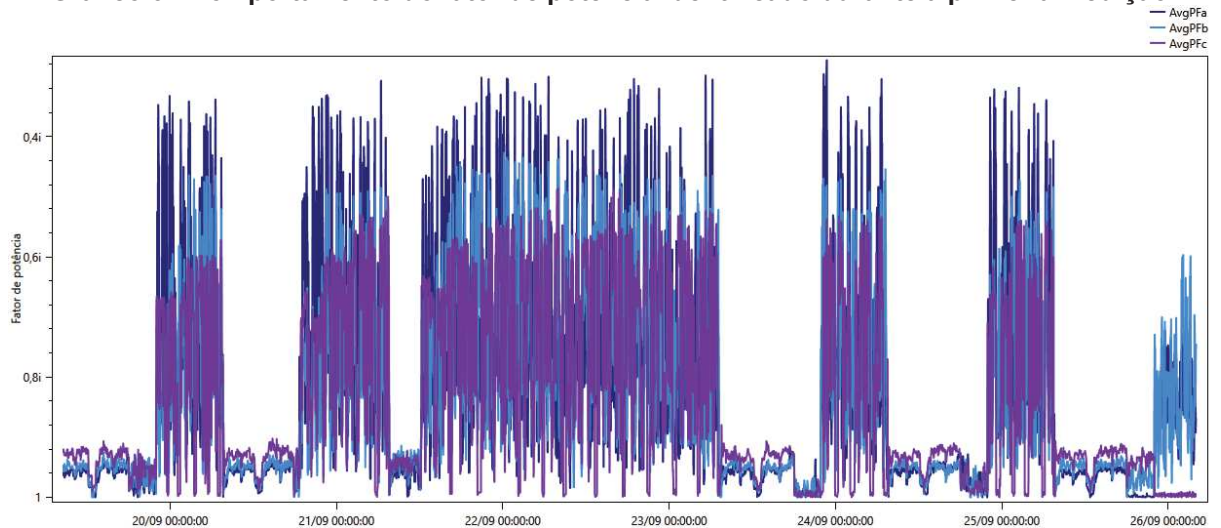


Fonte: Autor (2019).

### 5.1.6 Fator de potência

O FP indica qual a porcentagem da potência total é fornecida às cargas, além de representar o grau de eficiência do sistema elétrico. Logo, a partir dos dados gerados, o Gráfico 6 mostra o comportamento do fator de potência ao longo da primeira coleta.

**Gráfico 6 - Comportamento do fator de potência identificado durante a primeira medição.**



Fonte: Autor (2019).

Analisando-se as curvas do FP e os dados gerados, afirma-se que seu valor médio é em torno de 0,93 indutivo para ambas as fases durante o horário comercial da empresa. Segundo o Módulo 8 do Prodist, recomenda-se um FP com valor entre 0,92 e 1 indutivo ou 1 e 0,92 capacitivo.

Para os demais horários, é nítido o decaimento e variação do fator de potência para com as instalações. Contudo, a carga em uso no sistema é baixa, o que faz do consumo de excedente reativo não ser elevado.

Neste caso, é verificado a cobrança de excedente reativo na fatura de energia elétrica, sendo que, para o mês de setembro, houve a cobrança 466 kWh, gerando um custo adicional de R\$ 187,70.

Segundo a COPEL (2019), para o horário da madrugada, compreendendo das 00:00 até às 6:00 é cobrado o consumo e/ou demanda excedente reativo capacitivo. Para os demais horários, é cobrado o excedente reativo indutivo.

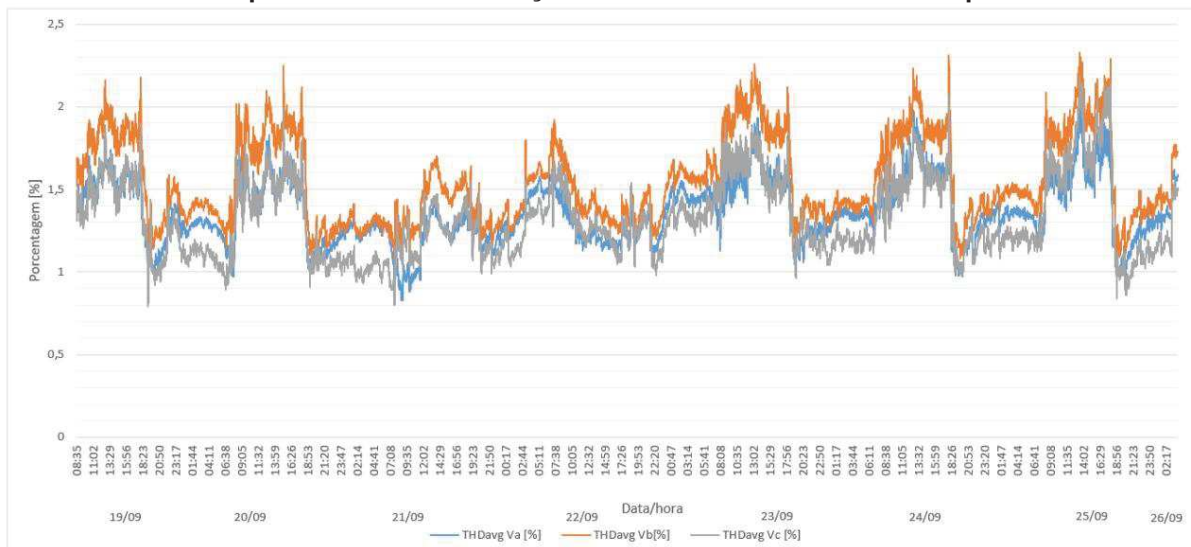
Com relação aos valores máximos e mínimos identificados, o Quadro 15 traz identificado os três principais valores para cada unidade.

**Quadro 15 - Valores máximos e mínimos para o fator de potência na primeira análise.**

	fase A	Data - Hora	fase B	Data - Hora	fase C	Data - Hora
Valor Mínimo	0,31	23/09/2019 - 22:43	0,44	22/09/2019 - 00:09	0,49	22/09/2019 - 07:59
	0,31	22/09/2019 - 00:43	0,44	22/09/2019 - 00:34	0,49	22/09/2019 - 07:49
	0,33	23/09/2019 - 05:15	0,44	22/09/2019 - 02:56	0,49	22/09/2019 - 16:01
Valor Máximo	1	19/09/2019 - 13:15	1	19/09/2019 - 19:23	1	19/09/2019 - 19:32
	1	23/09/2019 - 20:10	1	23/09/2019 - 07:29	1	19/09/2019 - 19:16
	1	25/09/2019 - 18:41	1	23/09/2019 - 07:28	1	22/09/2019 - 17:25

#### 5.1.7 Harmônicos de tensão

A seguir serão apresentados os resultados referentes às medições realizadas no local para as distorções harmônicas totais de tensão (THD<sub>v</sub>), de acordo com o Gráfico 7.

**Gráfico 7 - Comportamento das distorções harmônicas totais de tensão para cada fase.**

Fonte: Autor (2019).

O gráfico da THD<sub>v</sub> apresenta uma visão ampla da influência da distorção média verificada para cada fase. Verifica-se também que durante o expediente de funcionamento da Bompel, os limites verificados aumentam para próximo de 2% a taxa de distorção, chegando a superar esse valor em alguns momentos. Quando comparada as três distorções, verifica-se acentuada diferença da fase B com relação a fase A e C.

No caso da Tabela 2 é apresentado os valores mínimos, médio e máximos referentes às distorções apresentadas nas fases A, B e C. Além disso é verificado os valores recomendados tanto pelo Módulo 8 do Prodinst quanto para a Norma EN 50160. Analisando os valores apresentados com os normativos verifica-se que para este primeiro momento, a THD<sub>v</sub> está dentro dos limites estipulados.

**Tabela 2 - Valores máximos, médio e mínimos para a THD<sub>v</sub> obtidos na primeira coleta.**

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO - THD <sub>v</sub>							
Valores Medidos						Valores Normativos	
	fase A	Data - Hora	fase B	Data - Hora	fase C	Data - Hora	
Valor Mínimo	0,75	21/09/2019 - 08:48	0,91	19/09/2019 - 19:32	0,73	19/09/2019 - 19:19	De acordo com o Quadro 2: THD <sub>v</sub> ≤ 10% De acordo com o Quadro 8: THD <sub>v</sub> < 8%
	0,79	21/09/2019 - 09:09	0,92	21/09/2019 - 19:10	0,75	21/09/2019 - 07:45	
Valor Médio	0,79	21/09/2019 - 08:59	0,93	21/09/2019 - 19:14	0,75	21/09/2019 - 07:43	
	1,36		1,55		1,32		
Valor Máximo	3,84	20/09/2019 - 15:15	4,49	25/09/2019 - 19:43	5,01	20/09/2019 - 15:15	
	3,24	19/09/2019 - 19:33	4,03	20/09/2019 - 15:15	3,74	19/09/2019 - 19:33	
	3,15	19/09/2019 - 19:16	3,08	20/09/2019 - 09:36	3,3	25/09/2019 - 04:02	

Fonte: Autor (2019).

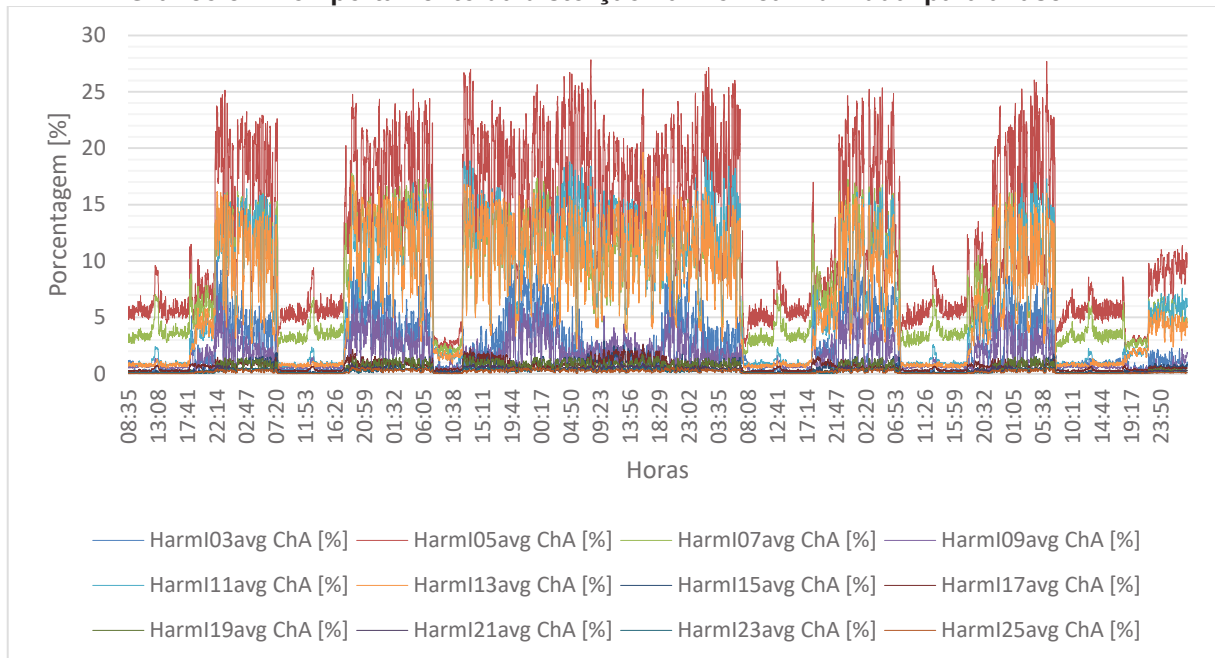
Para as harmônicas individuais de tensão, o analisador de QEE faz a coleta de dados desde a onda fundamental até a 41ª ordem. Contudo, as harmônicas de ordem

superior à 25° apresentam valores muito inferiores, aproximando-se de 0%, o que faz desses dados insignificantes para estudo.

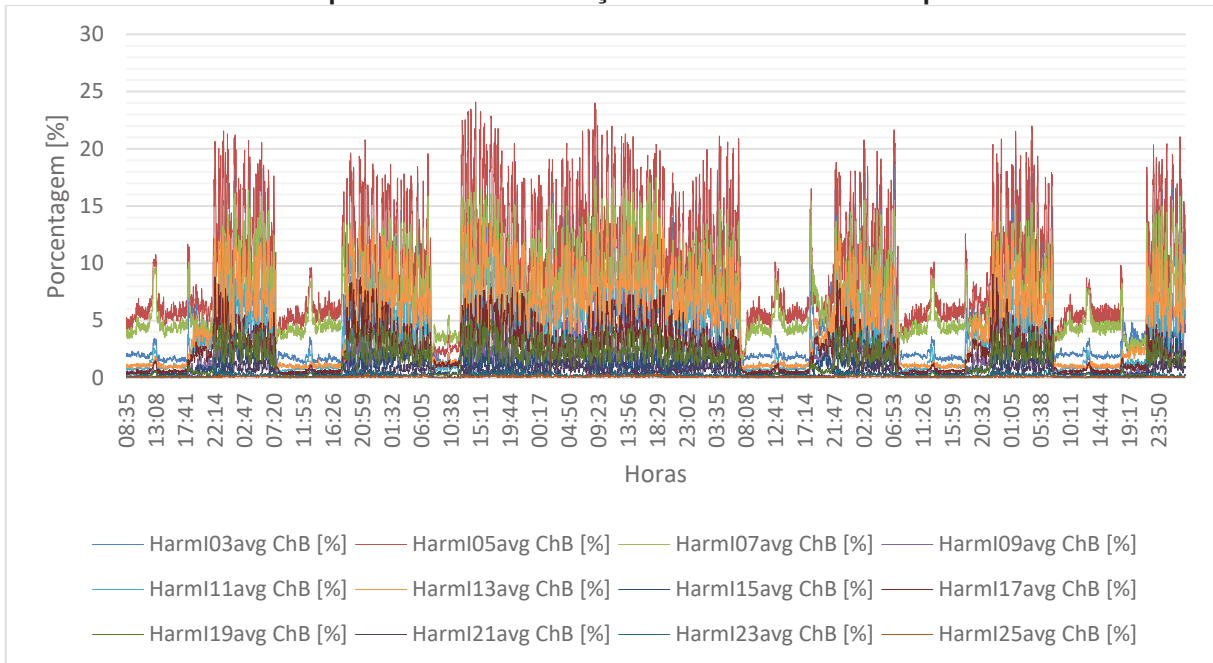
Portanto, os Gráficos 8, 9 e 10, apresentam as componentes ímpares dos harmônicos identificados para as fases A, B e C, respectivamente, sendo mostrado da 3° até a 25° harmônica.

Para fase A, B e C os valores mais significativos correspondem às amostras de 5°, 11° e 13° ordem. Segundo Isoni (2017), a grande incidência de harmônicos ímpares nas instalações elétricas é devido ao empregado de cargas indutivas elevadas no sistema, além do emprego de inversores de frequência e luminárias com reator de baixo FP.

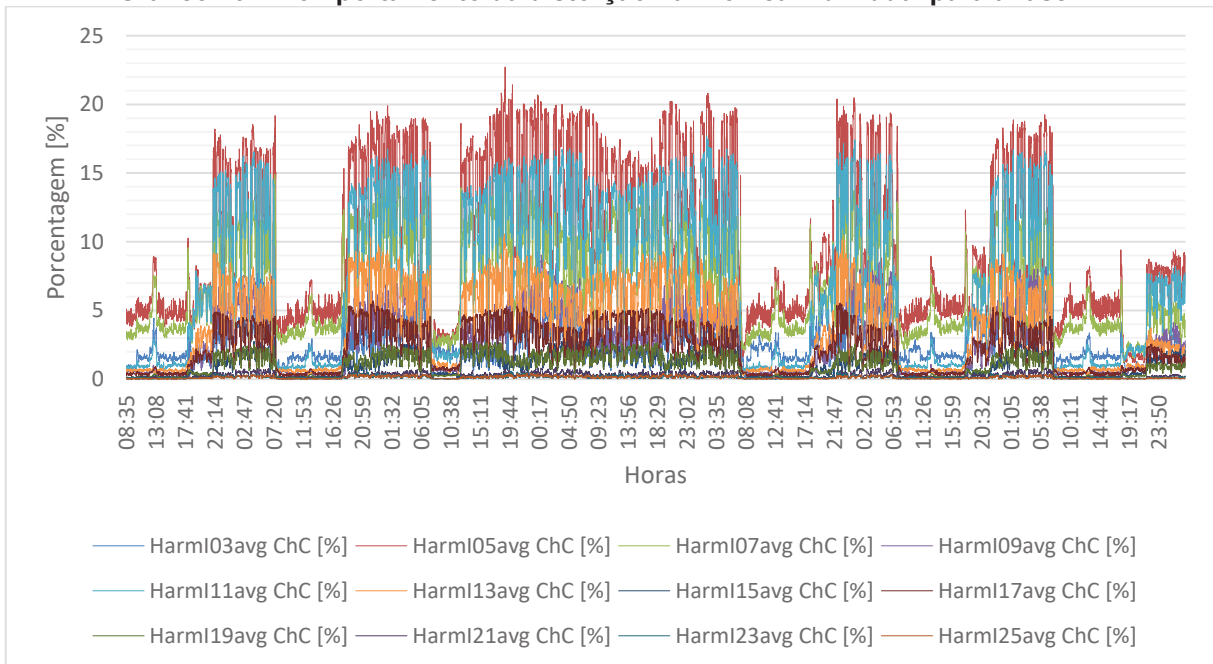
**Gráfico 8 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase A.**



**Fonte: Autor (2019).**

**Gráfico 9 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase B.**

Fonte: Autor (2019).

**Gráfico 10 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase C.**

Fonte: Autor (2019).

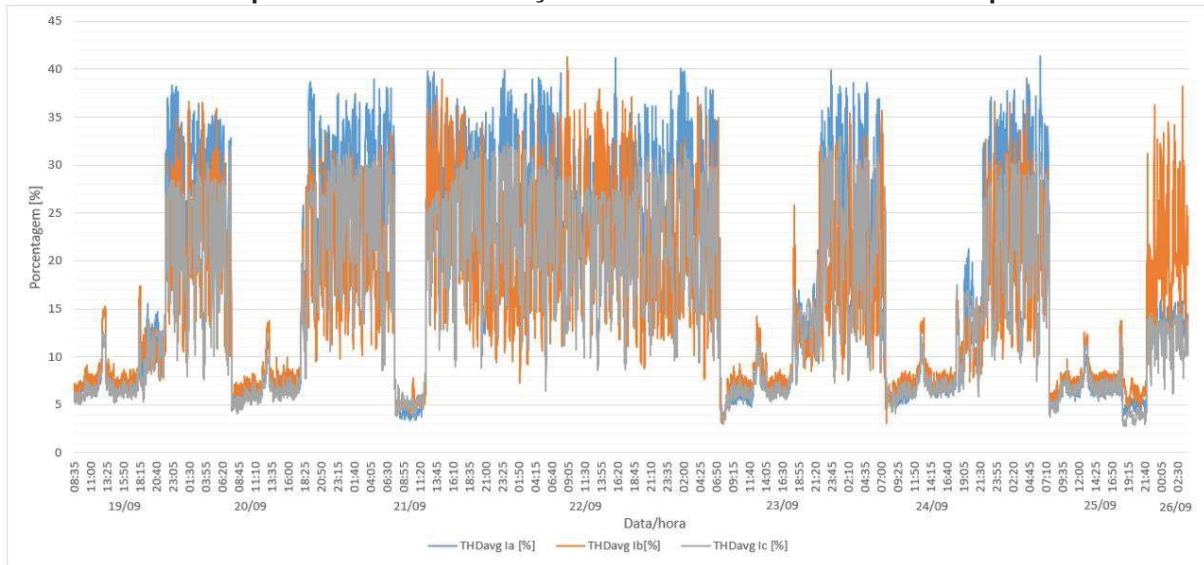
Comparando os valores individuais do Quadro 8 da seção 2.2.2 com aqueles apresentados nos gráficos acima, percebe-se a forte incidência de distúrbios elétricos relacionados aos harmônicos de tensão.



### 5.1.8 Harmônicos de corrente

A seguir serão apresentados os resultados referentes às medições realizadas no local para as distorções harmônicas totais de corrente (THDi), de acordo com o Gráfico 11.

**Gráfico 11 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente para cada fase.**



Fonte: Autor (2019).

Comparando o Gráfico 11 com o Gráfico 3, é possível notar que o THDi é inversamente proporcional ao valor da corrente nominal, ou seja, a medida que a corrente diminui, o índice THDi aumenta consideravelmente. Já para os horários de expediente da empresa, em que a corrente nominal aumenta em relação às cargas em operação, a THDi aumenta.

Esta correlação pode ser explicada da seguinte forma: quando a indústria encontra-se em pleno funcionamento, a corrente elétrica da instalação é elevada permanecendo em torno de 650 A até 800 A. Diante disto, a corrente de alimentação das cargas não lineares constituídas principalmente por inversores de frequência e o pelo sistema de iluminação, é considerada muito baixa e portanto as distorções harmônicas produzidas por estas cargas afetaram menos o nível do THDi, já que o valor da corrente é elevada.

Porém, quando o processo produtivo da indústria chega ao fim, por volta das 17:40, a corrente total do sistema diminui e então a corrente de alimentação das cargas não lineares se sobressai, já que após este horário são as principais cargas



da instalação, fazendo com que o conteúdo harmônico por elas produzido aumente de forma significativa o valor percentual do THDi.

A critério de comparação das amostras com as normas vigentes, as THDi são comparadas de acordo com o critério estabelecido no Módulo 8 do Prodist e pela norma IEEE 519 – 2014. Contudo, a norma IEEE não traz uma especificação aceitável para a THDi, mas sim para o nível da distorção total da demanda (DTD) especificada pela equação contida no Quadro 7, da seção 2.2.1.

Para isso, a máxima corrente de curto circuito ( $I_{sc}$ ) no ponto de acoplamento comum entre a concessionária e o usuário (PCC) adotada, leva em consideração a corrente de curto circuito do disjuntor de proteção da entrada padrão que corresponde ao valor de 40 kA, enquanto que a máxima corrente de carga demandada ( $I_L$ ) é aquela correspondente à corrente nominal do disjuntor, que equivale a 800 A. Portanto, o valor da razão  $I_{sc}/I_L$  é igual a 50, considerando então os valores da linha 5, do Quadro 7.

A Tabela 3 apresenta os valores máximos, mínimos e médio para a THDi em cada uma das fases. Comparando os resultados obtidos com os valores recomendados é possível verificar que os níveis de distorções harmônicas de corrente máximo e médio não encontram-se em conformidade, pois apresentam valores superiores aos recomendados. Já os valores mínimos observados contemplam o atendimento aos requisitos propostos pelas normas citadas anteriormente.

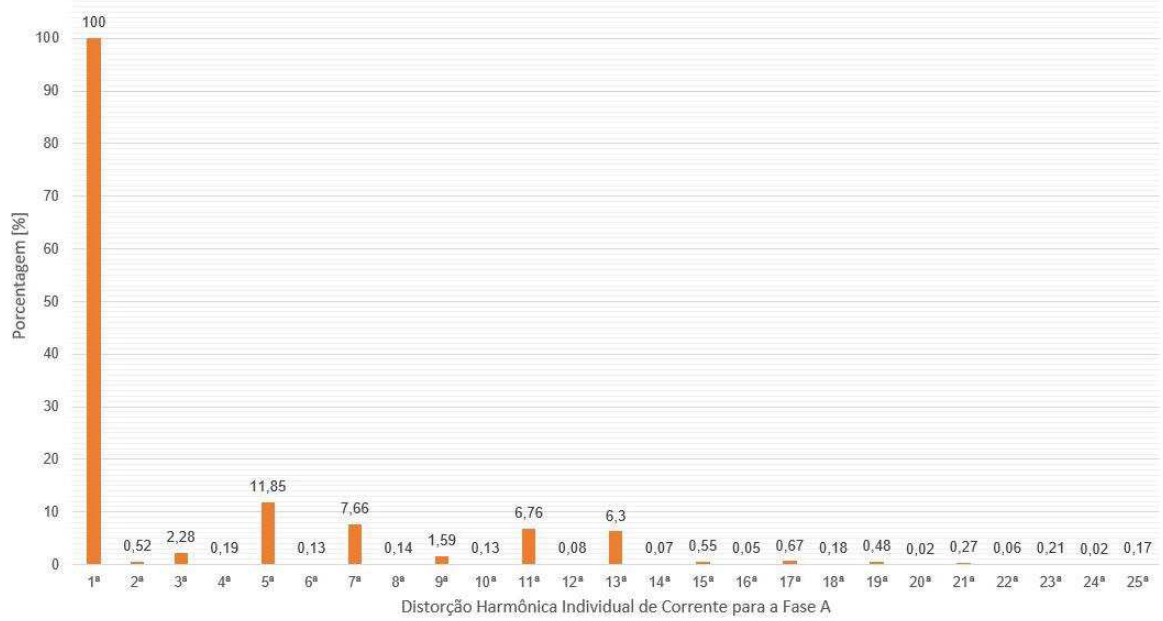
**Tabela 3 - Valores máximos, médio e mínimos para a THDi obtidos na primeira coleta.**

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO - THDi								
Valores Medidos						Valores Normativos		
	fase A	Data - Hora	fase B	Data - Hora	fase C	Data - Hora	PRODIST - Módulo 8	IEEE 519
Valor Mínimo	2,63	20/09/2019 - 07:46	2,18	24/09/2019 - 07:46	2,21	25/09/2019 - 21:38	De acordo com o Quadro 2: THDi ≤ 7,5%	De acordo com o Quadro 8: THDi < 12%
	2,67	21/09/2019 - 09:33	2,37	23/09/2019 - 07:40	2,22	25/09/2019 - 18:52		
	2,69	21/09/2019 - 09:51	2,37	21/09/2019 - 07:42	2,25	25/09/2019 - 20:12		
Valor Médio	17,45		15,19		15,13			
	49,4	25/09/2019 - 06:17	44,04	26/09/2019 - 03:09	47,82	20/09/2019 - 07:36		
	47,48	20/09/2019 - 19:12	44,02	25/09/2019 - 07:27	38,94	25/09/2019 - 07:37		
Valor Máximo	46,46	25/09/2019 - 04:40	42,36	22/09/2019 - 08:54	38,69	25/09/2019 - 07:27		

**Fonte: Autor (2019).**

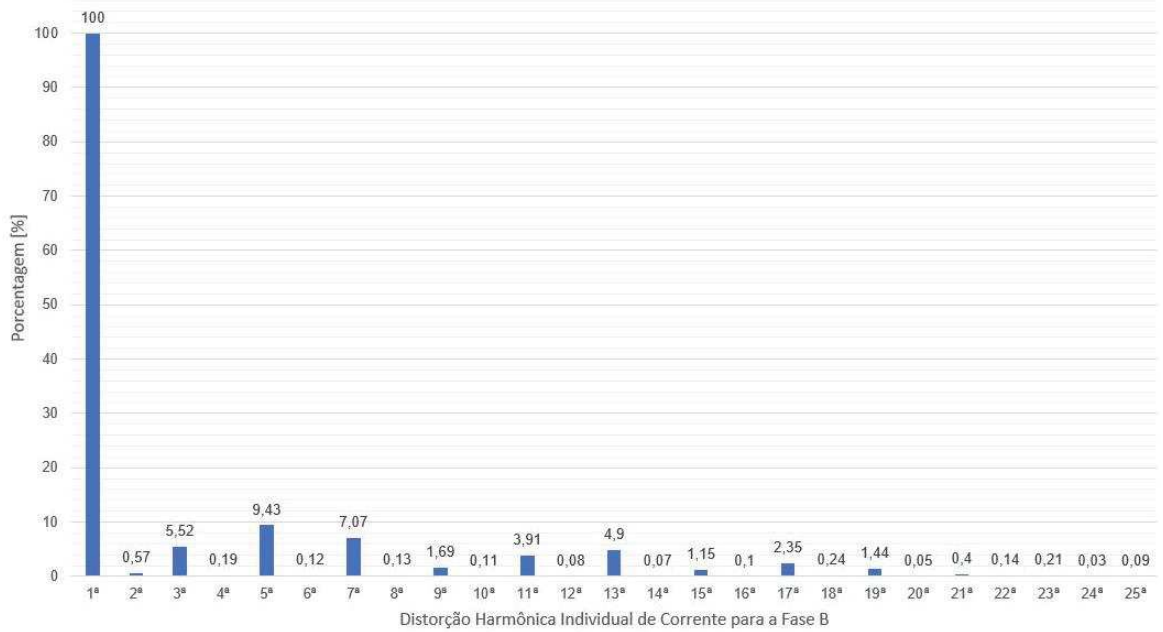
Sobre as distorções harmônicas individuais de corrente, os Gráficos 12, 13 e 14 retratam o cenário encontrado para a primeira coleta de dados referentes às fases A, B e C.

Gráfico 12 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase A.



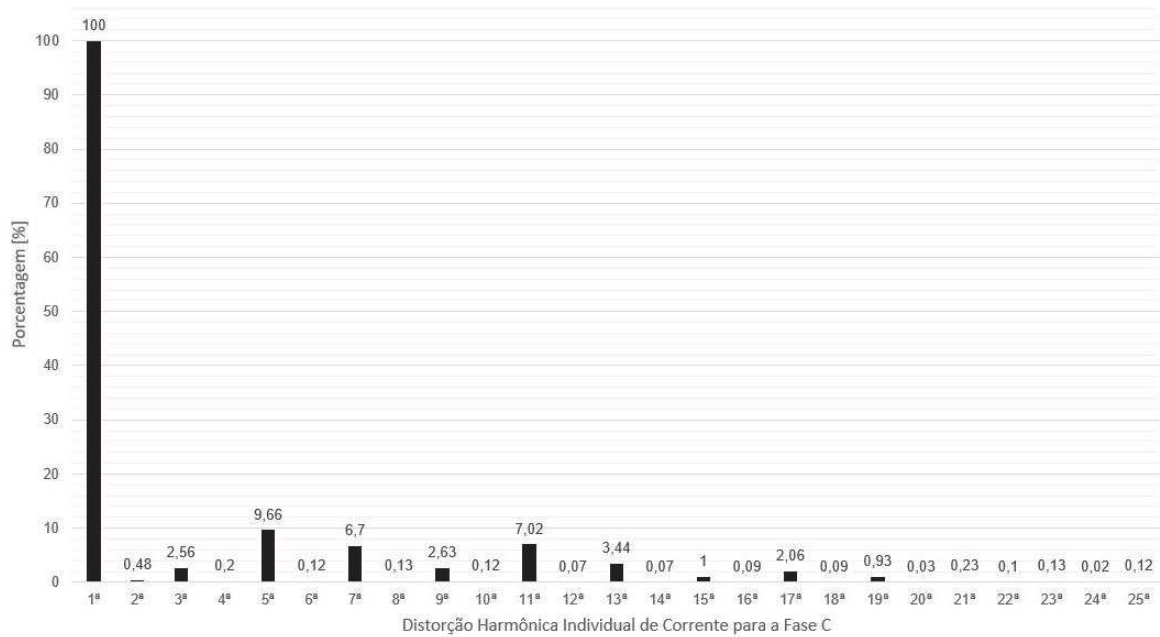
Fonte: Autor (2019).

Gráfico 13 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase B.



Fonte: Autor (2019).

Gráfico 14 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase C.



Fonte: Autor (2019).

Por fim, o Quadro 16 apresenta na cor vermelha, os valores que ultrapassaram o limite estipulado pela norma, confirmando que a instalação tem inúmeros equipamentos produtores de distorções harmônicas de corrente.

Quadro 16 – Comparação das distorções harmônicas individuais de correntes por fase entre a IEEE 519 para a primeira medição.

ORDEM (°)	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)	IEEE 519 (%)
1	100	100	100	
3	2,28	5,52	2,56	10
5	11,85	9,43	9,66	10
7	7,66	7,07	6,7	10
9	1,59	1,69	2,63	10
11	6,76	3,91	7,02	4,5
13	6,3	4,9	3,44	4,5
15	0,55	1,15	1	4,5
17	0,67	2,35	2,06	4
19	0,48	1,44	0,93	4
21	0,27	0,4	0,23	4
23	0,21	0,21	0,13	1,5
25	0,17	0,09	0,12	1,5

Fonte: Autor (2019).

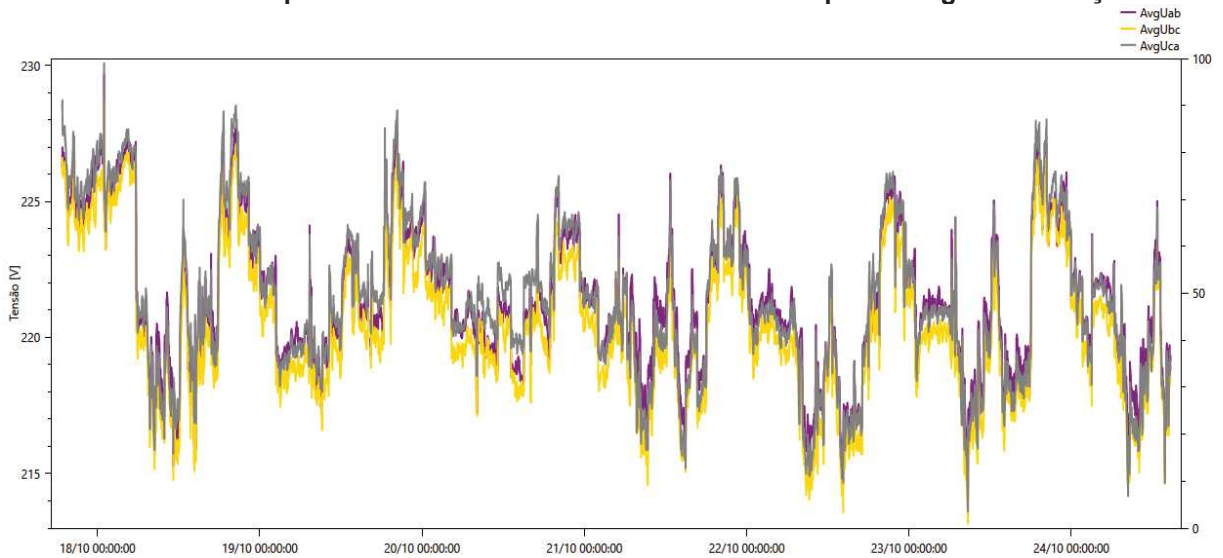
## 5.2 Segunda coleta de dados

### 5.2.1 Tensão de linha

Nesta segunda situação, o Gráfico 15 retrata o comportamento da tensão de linha do sistema após a realização do *retrofit*, no qual é possível identificar que os

valores de tensão mantiveram-se dentro da faixa de tensão adequada especificada entre 202 até 231 V. Considera-se neste caso que a TR considerada é igual a 220 V.

**Gráfico 15 - Comportamento da tensão de linha do sistema para a segunda medição.**



Fonte: Autor (2019).

Para este segundo cenário, o Quadro 17 comprova que os valores máximos e médios encontram-se dentro da faixa de tensão considerada adequada. Já para os valores mínimos de tensão de linha, observou-se que foi superado tanto a faixa de tensão precária que corresponde a valores menores que 202 V até 191 V quanto para a faixa crítica, que engloba os valores menores que 191 V. Neste caso, percebe-se que a fase C foi a única a apresentar valores críticos para a tensão.

Contudo, é perceptível para este caso que, a queda de tensão verificada não atingiu valores tão abaixo quanto aqueles vistos na Quadro 9, da seção 5.1.1.

**Quadro 17 - Valores máximos, mínimos e médios da tensão de linha obtidos na segunda coleta de dados.**

	$V_{AB}$ [V]	Data - Hora	$V_{BC}$ [V]	Data - Hora	$V_{CA}$ [V]	Data - Hora
Valor Mínimo	191,29	21/10/2019 - 04:39	193,31	21/10/2019 - 04:39	184,86	21/10/2019 - 04:39
	199,15	21/10/2019 - 03:49	199,49	21/10/2019 - 03:49	190,01	21/10/2019 - 03:49
	208,79	20/10/2019 - 17:04	204,15	19/10/2019 - 14:18	206,32	19/10/2019 - 14:18
Valor Médio	221,33	20/10/2019 - 16:11	220,42	20/10/2019 - 15:25	221,38	20/10/2019 - 17:46

	$V_{AB}$ [V]	Data - Hora	$V_{BC}$ [V]	Data - Hora	$V_{CA}$ [V]	Data - Hora
Valor Máximo	230,17	18/10/2019 - 00:59	229,15	18/10/2019 - 00:59	230,32	18/10/2019 - 00:59
	229,71	18/10/2019 - 01:00	228,78	18/10/2019 - 01:00	230,12	18/10/2019 - 01:00
	228,99	17/10/2019 - 18:49	228,32	17/10/2019 - 18:49	230,12	17/10/2019 - 18:49

Fonte: Autor (2019).

Para os valores correspondentes à faixa crítica, apenas duas amostras da tensão de linha CA foram identificadas, como observadas pelo Quadro 18.

**Quadro 18 - Valores mínimos de tensão identificados para a tensão de linha CA obtidos na segunda coleta de dados.**

Data - Hora	CA min [V]
21/10/2019 – 03:39	190,01
21/10/2019 – 04:39	184,86

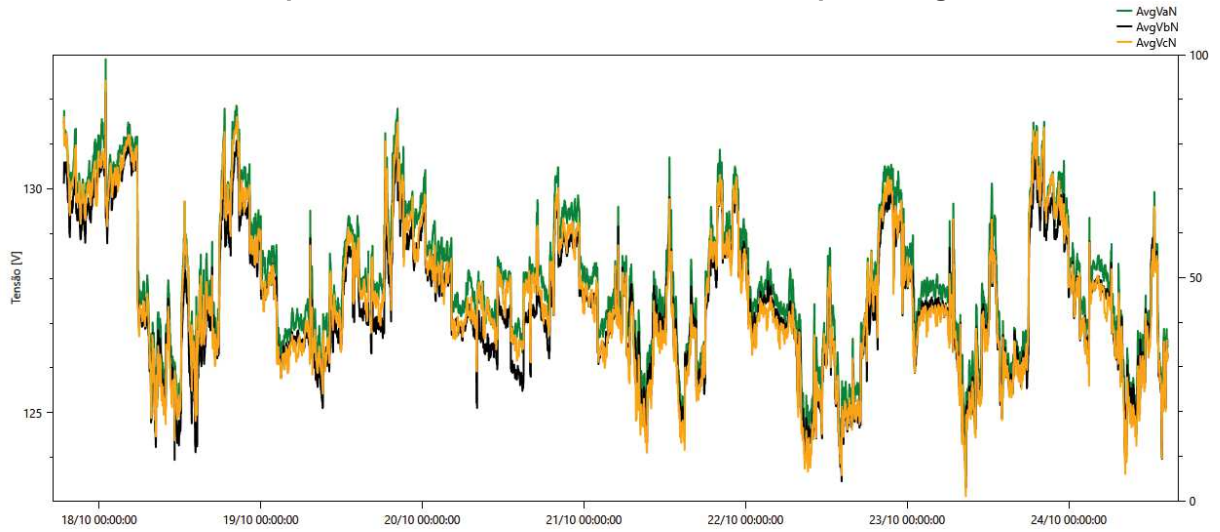
Fonte: Autor (2019).

### 5.2.2 Tensão de fase

A análise das respectivas tensões de fase para este contexto demonstra que os valores máximos e médio de tensão identificados permanecem dentro da faixa de tensão adequada. Para o caso dos valores mínimos de tensão encontrados, percebe-se que somente as tensões  $V_{an}$  e  $V_{cn}$  atingiram o patamar crítico que corresponde aos valores de tensão menores que 110 V. Para este caso, ambas atingiram os valores no mesmo instante de tempo, sendo este identificado às 04:39 do dia 21 de outubro de 2019.

Para a faixa de tensão precária, correspondente aos valores menores que 117 V até 110 V, constatou-se que ambas apresentaram amostras neste nível de tensão. O Gráfico 16 mostra os valores encontrados durante a coleta de dados.

**Gráfico 16 - Comportamento da tensão de fase do sistema para a segunda medição.**



Fonte: Autor (2019).

A Quadro 19 traz um resumo das tensões constatadas durante o período de análise.

**Quadro 19 - Valores máximos, mínimos e médios da tensão de fase obtidos na segunda coleta de dados.**

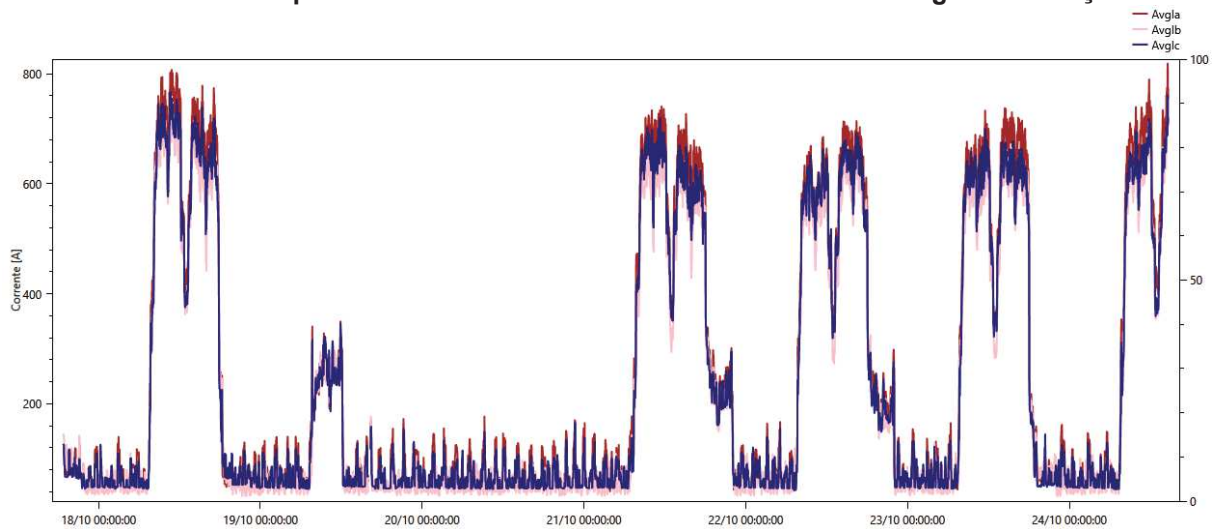
	$V_{AN}$ [V]	Data - Hora	$V_{BN}$ [V]	Data - Hora	$V_{CN}$ [V]	Data - Hora
Valor Mínimo	107,56	21/10/2019 - 04:39	112,37	21/10/2019 - 04:39	108,86	21/10/2019 - 04:39
	112,66	21/10/2019 - 03:49	115,61	21/10/2019 - 03:49	114,14	21/10/2019 - 03:49
	120,31	20/10/2019 - 17:04	119,38	19/10/2019 - 14:18	117,8	19/10/2019 - 14:18
Valor Médio	127,94	20/10/2019 - 16:31	127,41	20/10/2019 - 16:28	127,51	20/10/2019 - 16:08
Valor Máximo	133	18/10/2019 - 00:59	132,43	18/10/2019 - 00:59	132,69	18/10/2019 - 00:59
	132,91	18/10/2019 - 01:00	132,2	18/10/2019 - 01:00	132,46	18/10/2019 - 01:00
	132,73	17/10/2019 - 18:49	131,76	17/10/2019 - 18:49	132,4	17/10/2019 - 18:49

Fonte: Autor (2019).

### 5.2.3 Corrente de linha

Para a segunda coleta de dados, o Gráfico 17 mostra o comportamento da corrente durante o período de estudo.

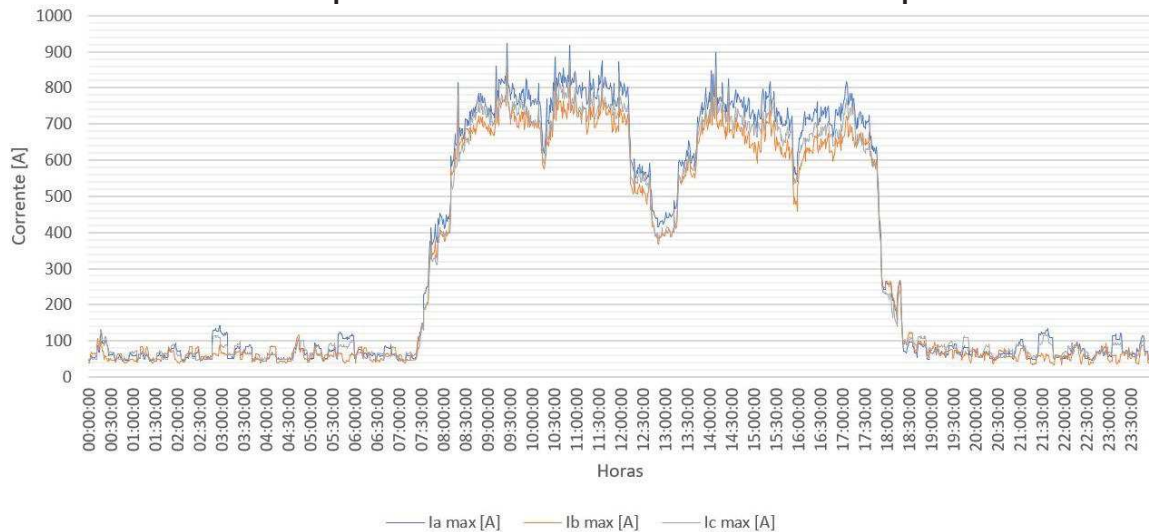
**Gráfico 17 - Comportamento da corrente de linha identificada na segunda medição.**



Fonte: Autor (2019).

Já o Gráfico 18, apresenta os dados relativos ao dia 18 de outubro de 2019, no qual obteve-se os maiores valores de corrente registrados.

**Gráfico 18 - Comportamento da corrente máxima identificada para cada fase.**



Fonte: Autor (2019).

Verificando de forma geral ambas as correntes medidas, percebe-se que neste cenário também ocorre a extrapolação dos valores de corrente acima de 800A. Contudo, percebe-se que não ocorre picos tão elevados com relação ao primeiro cenário estudado. Logo, o maior valor verificado equivale a 923,83 A para a corrente elétrica na fase A ocorrida no dia 18 de outubro às 09:26.

Além disso, nota-se também certo desequilíbrio entre as correntes elétricas da instalação, com a diferença de apresentar valores mais abaixo do que quando



comparados à primeira medição. Logo, o Quadro 20 traz um resumo das principais amostras registradas pelo analisador de QEE.

Conforme realizado na seção 5.1.3, para o cálculo do valor médio da corrente elétrica será considerado o horário comercial de funcionamento da Bompel.

**Quadro 20 - Valores mínimos, médio e máximos da corrente para cada uma das fases.**

	Corrente de linha A [A]	Data - hora	Corrente de linha B [A]	Data - Hora	Corrente de linha C [A]	Data - Hora
Valor Mínimo	39,59	19/10/2019 - 13:15	29,26	18/10/2019 - 19:55	40,06	24/10/2019 - 07:17
	39,60	21/10/2019 - 06:06	30,50	23/10/2019 - 22:13	40,37	22/10/2019 - 07:23
	39,66	21/10/2019 - 03:51	30,56	23/10/2019 - 22:14	40,49	24/10/2019 - 06:59
Valor Médio	649,27	23/10/2019 - 17:10	587,23	23/10/2019 - 11:19	608,51	24/10/2019 - 08:56
Valor Máximo	923,83	18/10/2019 - 09:26	870,18	18/10/2019 - 09:26	874,49	18/10/2019 - 10:51
	917,80	18/10/2019 - 10:51	855,28	18/10/2019 - 09:27	874,08	18/10/2019 - 09:26
	911,78	18/10/2019 - 09:27	841,20	18/10/2019 - 10:51	867,43	18/10/2019 - 09:27

Fonte: Autor (2019).

Assim, verifica-se que durante o ciclo de trabalho da fábrica, o comportamento das correntes é predominante durante a semana. Nos períodos fora de expediente da Bompel, verifica-se também valores constantes, atingindo aproximadamente entre 50 A a 70 A para ambas as fases. Comparando estes valores com aqueles encontrados na primeira medição, percebe-se que não há uma grande diferença entre eles, haja vista que os cenários analisados são os mesmos.

#### 5.2.4 Interrupção, desequilíbrio e flutuação de tensão

Verificando o segundo estudo com o analisador de QEE, percebe-se a não identificação de valores relativos às interrupções no fornecimento de energia elétrica. No entanto, quando levado em consideração a faixa de tempo menor que 1 segundo, o analisador da QEE não possui capacidade para verificação.



Sobre as componentes dos fatores  $V_-$ ,  $V_+$  e FD para o cálculo do desequilíbrio de tensão, o analisador de QEE não contempla este fornecimento, assim como o Pst e Plt relativo ao estudo da flutuação de tensão.

Considerando a tensão de linha e de fase, verifica-se que não houve a ocorrência de afundamento temporário de tensão para mais de 1 minuto.

### 5.2.5 Variações de frequência

Considerando o intervalo entre 59,9 Hz até 60,1 Hz determinado pela ANEEL como sendo um intervalo de valores adequados para o bom funcionamento da energia elétrica, o Quadro 21 e o Quadro 22 mostram, respectivamente, os valores menores e maiores dos citados anteriormente.

**Quadro 21 - Valores mínimos da frequência elétrica medida.**

Data - Hora	Frequência (Hz)
17/10/2019 – 23:31	59,88
17/10/2019 – 23:32	59,88
18/10/2019 – 22:51	59,88
19/10/2019 – 07:59	59,87
19/10/2019 – 08:00	59,87
19/10/2019 – 15:59	59,89
20/10/2019 – 03:09	59,89
21/10/2019 – 14:59	59,86
21/10/2019 – 17:24	59,89
21/10/2019 – 17:25	59,89
22/10/2019 – 07:55	59,88
23/10/2019 – 06:55	59,88
23/10/2019 – 07:59	59,88
24/10/2019 - 08:00	59,88
24/10/2019 - 08:01	59,89
24/10/2019 - 08:02	59,89

Fonte: Autor (2019).

**Quadro 22 - Valores máximos da frequência elétrica medida.**

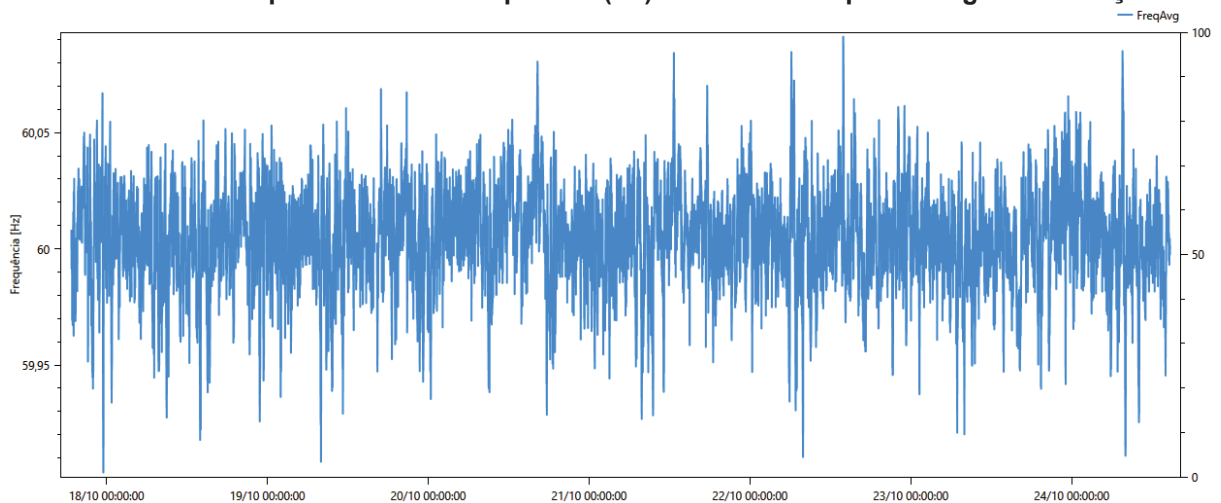
Data - Hora	Frequência (Hz)
17/10/2019 – 23:24	60,11
19/10/2019 – 16:56	60,19
19/10/2019 – 16:57	60,11
20/10/2019 – 16:18	60,12
22/10/2019 – 13:55	60,11
22/10/2019 – 13:56	60,11

Data - Hora	Frequência (Hz)
22/10/2019 – 15:31	60,11
23/10/2019 – 21:26	60,11

Fonte: Autor (2019).

Para os valores mínimos identificados, o Quadro 21 traz a informação de 16 amostras abaixo do recomendando, enquanto que, o Quadro 22 apresenta 8 valores acima do pré-estabelecido. Finalmente, o Gráfico 19 representa o gráfico da variação da frequência medida.

**Gráfico 19 - Comportamento da frequência (Hz) média medida para a segunda medição.**

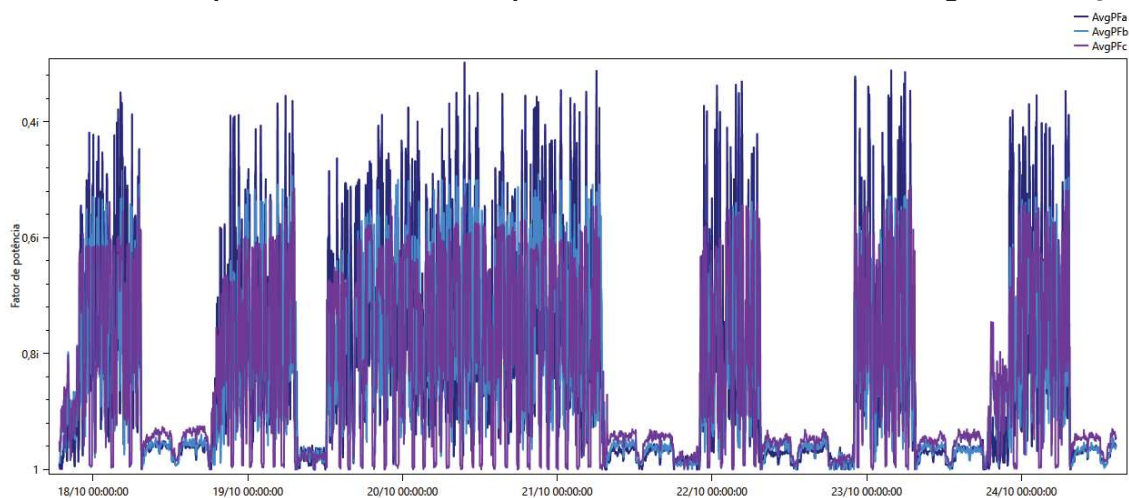


Fonte: Autor (2019).

### 5.2.6 Fator de potência

O fator de potência para a segunda coleta pode ser visto no Gráfico 20.

**Gráfico 20 - Comportamento do fator de potência identificado durante a segunda medição.**



Fonte: Autor (2019).

Verificando as curvas do FP, afirma-se que seu valor médio é em torno de 0,85 indutivo para ambas as fases. Percebe-se ainda que, quando comparado à primeira medição, não foram verificadas alterações destoantes do FP por entre as fases. Para o valor cobrado de excedente reativo no mês de outubro, constatou-se por meio da fatura de energia o valor de R\$ 205,38 relativo a cobrança de 488 kWh.

Com relação aos valores máximos e mínimos identificados, o Quadro 23 traz identificado os três principais valores para cada unidade.

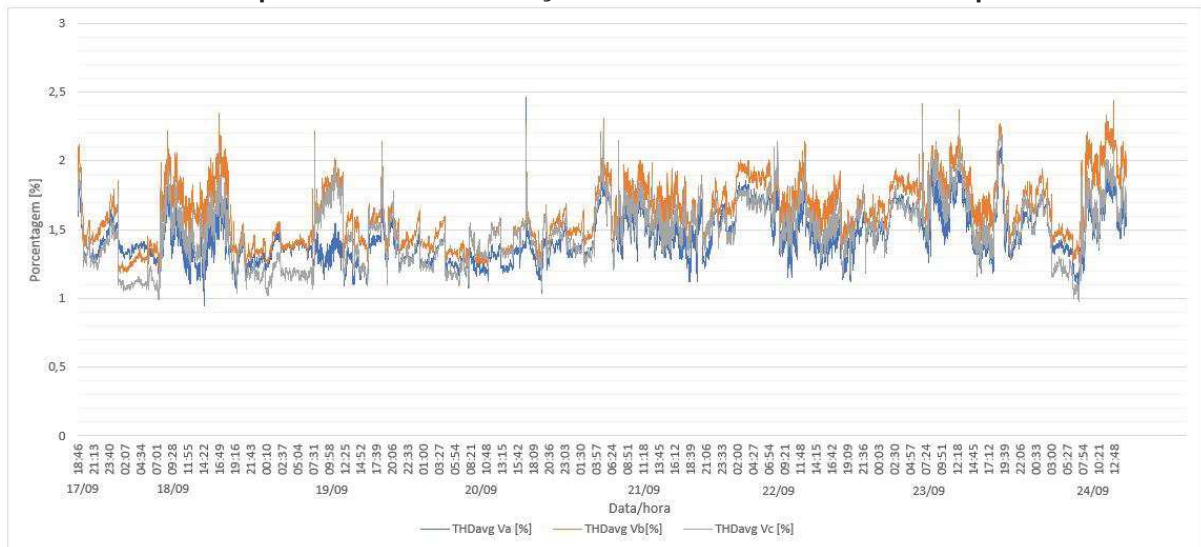
**Quadro 23 - Valores máximos e mínimos para o fator de potência identificado em cada fase.**

	fase A	Data - Hora	fase B	Data - Hora	fase C	Data - Hora
Valor Mínimo	0,31	20/10/2019 - 09:36	0,50	20/10/2019 - 21:04	0,52	23/10/2019 - 06:49
	0,32	23/10/2019 - 03:48	0,50	20/10/2019 - 08:21	0,52	19/10/2019 - 07:13
	0,34	22/10/2019 - 22:13	0,51	20/10/2019 - 21:03	0,20	23/10/2019 - 06:33
Valor Máximo	1	24/10/2019 - 07:39	1	21/10/2019 - 18:42	1	20/10/2019 - 22:38
	1	23/10/2019 - 18:33	1	21/10/2019 - 18:39	1	20/10/2019 - 22:39
	1	24/10/2019 - 07:38	1	21/10/2019 - 18:41	1	20/10/2019 - 22:41

Fonte: Autor (2019).

### 5.2.7 Harmônicos de tensão

Em seguida serão apresentados os resultados referentes às medições realizadas no local para as distorções harmônicas totais de tensão (THD<sub>v</sub>), de acordo com o Gráfico 21.

**Gráfico 21 - Comportamento das distorções harmônicas totais de tensão para cada fase.**

Fonte: Autor (2019).

Analisando o comportamento da  $THD_v$  e comparando com o Gráfico 7, percebe-se um cenário diferente, sendo que ocorria um aumento da  $THD_v$  durante o horário comercial e um decaimento fora dele. A média registrada na segunda coleta de dados para ambas as fases é de aproximadamente 1,52% com um desvio padrão (populacional) de 0,21 %.

Conforme item 5.1.7, percebe-se que a fase B também apresenta valores superiores aos mostrados para as fases A e C relativo à  $THD_v$ .

Para Tabela 4 é apresentado os valores mínimos, médio e máximos referentes às distorções apresentadas nas fases A, B e C. Além disso é verificado os valores recomendados tanto pelo Módulo 8 do Prodist quanto para a Norma EN 50160. Analisando os valores apresentados, percebe-se que para os valores máximos, ocorreu-se picos de distorções muito acima do que os recomendados pelas normas vigentes, fator que também foi verificado no item 5.1.7. Já os valores mínimos e médio pareceram dentro da faixa adequada, de acordo com o comparativo apresentado na Tabela 4.

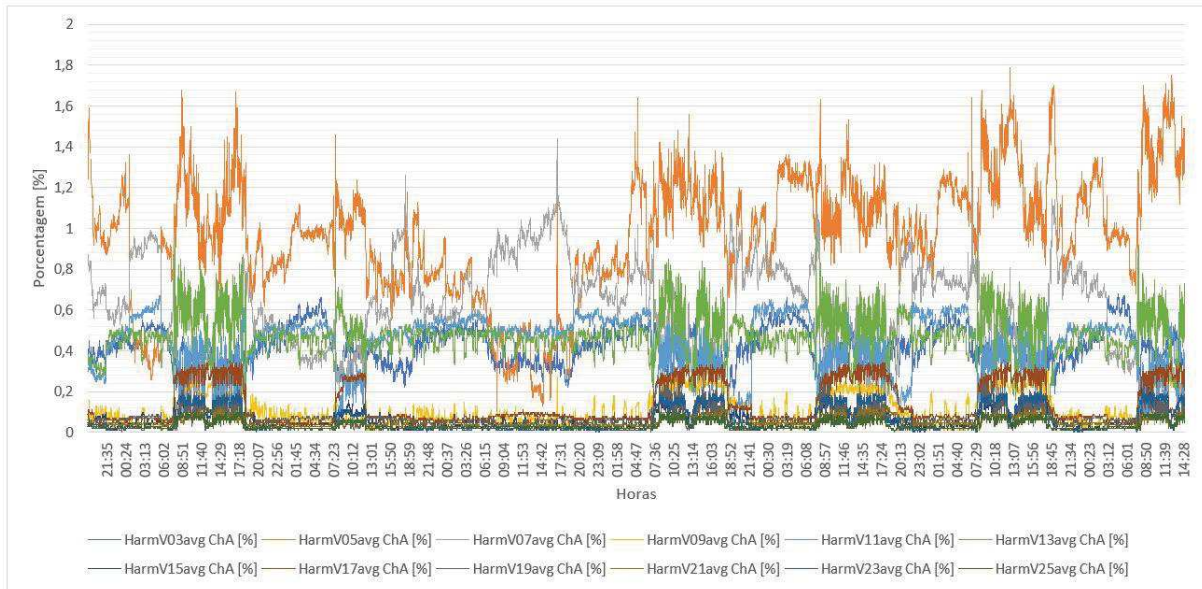
**Tabela 4 - Valores máximos, médio e mínimos para a  $THD_v$  obtidos na segunda coleta.**

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO - $THD_v$								
Valores Medidos						Valores Normativos		
	fase A	Data - Hora	fase B	Data - Hora	fase C	Data - Hora	PRODIST - Módulo 8	EN 50160
	0,88	22/10/2019 - 18:52	1,05	22/10/2019 - 18:52	0,79	19/10/2019 - 14:18		
Valor Mínimo	0,88	22/10/2019 - 18:51	1,08	18/10/2019 - 01:19	0,81	22/10/2019 - 18:52		
	0,92	18/10/2019 - 14:32	1,09	18/10/2019 - 05:42	0,86	22/10/2019 - 18:51		
Valor Médio	1,45		1,63		1,48		De acordo com o	De acordo com o
	17,78	20/10/2019 - 17:04	23,7	21/10/2019 - 07:08	13,89	20/10/2019 - 17:04	Quadro 2: $THD_v \leq 10\%$	Quadro 8: $THD_v < 8\%$
Valor Máximo	12,43	21/10/2019 - 07:08	13,83	20/10/2019 - 17:04	10,45	21/10/2019 - 07:08		
	4,28	19/09/2019 - 16:00	4,59	19/10/2019 - 16:00	7,05	19/10/2019 - 16:00		

Fonte: Autor (2019).

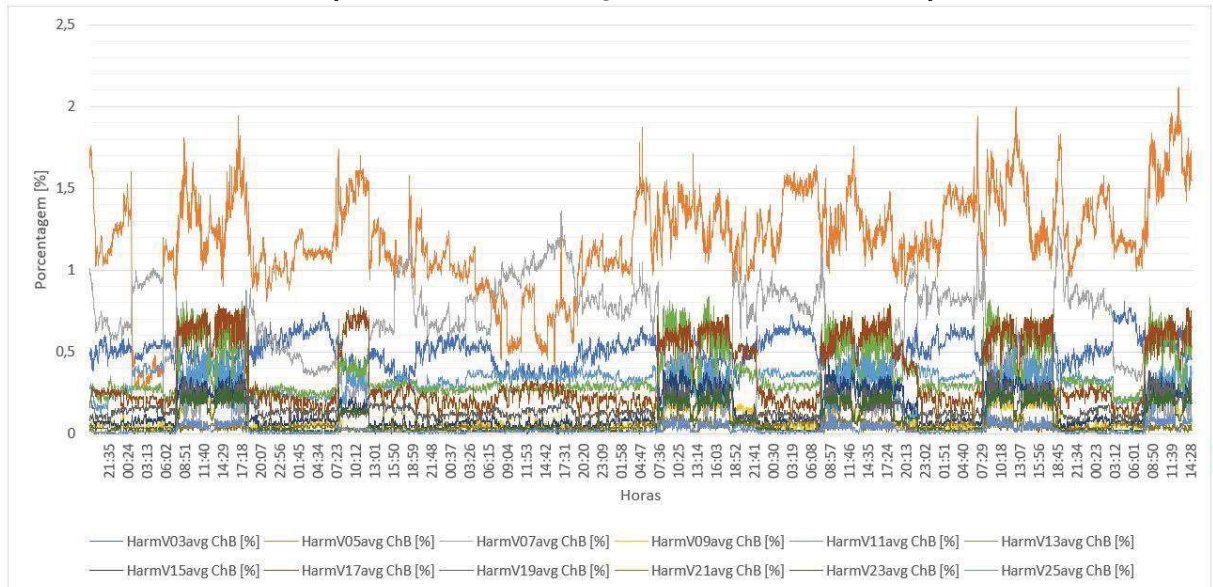
Assim, os Gráficos 22, 23 e 24, apresentam, respectivamente, para as fases A, B e C, as componentes ímpares das distorções harmônicas individuais, da 3° até a 25° ordem. Para fase ambas as fases, os valores mais significativos correspondem às amostras de 5°, 7° e 13° ordem.

**Gráfico 22 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase A.**



Fonte: Autor (2019).

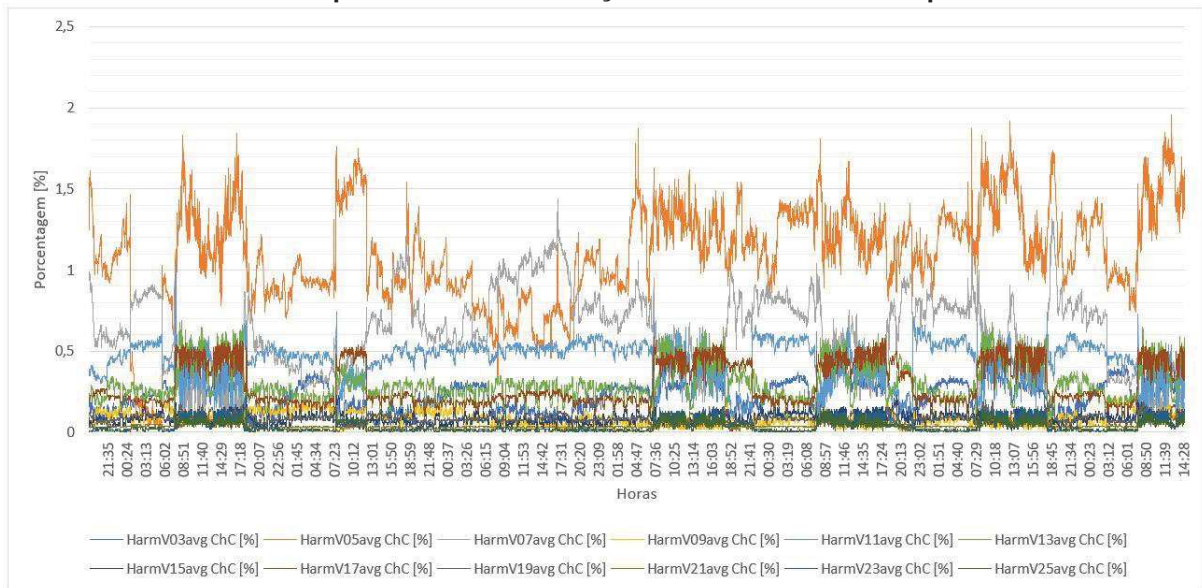
**Gráfico 23 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase B.**



Fonte: Autor (2019).



**Gráfico 24 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase C.**

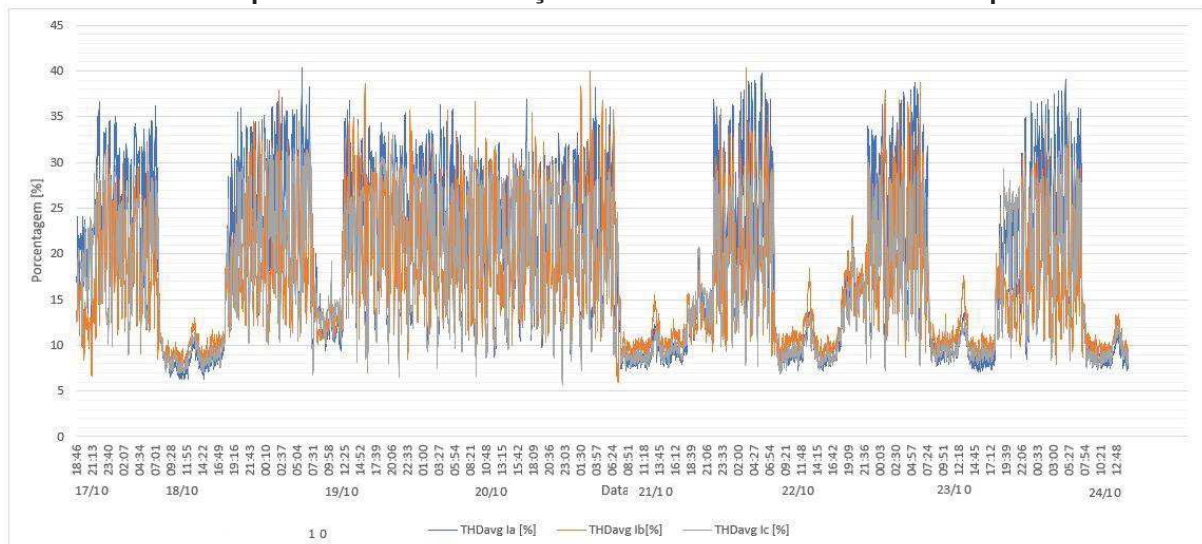


Fonte: Autor (2019).

### 5.2.8 Harmônicos de corrente

O Gráfico 25 apresenta os resultados referentes às medições realizadas no local para as distorções harmônicas totais de corrente (THDi).

**Gráfico 25 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente para cada fase.**



Fonte: Autor (2019).

Comparando o Gráfico 25 com o Gráfico 11, percebe-se que os fenômenos são semelhantes. Para finais de semanas e períodos fora do horário comercial as distorções harmônicas de corrente verificadas chegam próximas à 35 %. Já no período de trabalho esses valores decaem para próximo de 10 %.

Para a razão  $I_{SC}/I_L$  será considerado o valor de 50, conforme calculado no item 5.1.8, a fim de manter as mesmas características comparativas para este estudo.

A Tabela 5 apresenta os valores máximos, mínimos e médios para a THDi em cada uma das fases. Para as distorções máximas verificadas, percebe-se um aumento significativo quando comparado aos valores da Tabela 3. Assim, observa-se que os valores máximos e médios não estão enquadrados na faixa adequada pré-definida pelas normas vigentes. Já os valores mínimos observados contemplam o atendimento aos requisitos propostos pelas normas citadas.

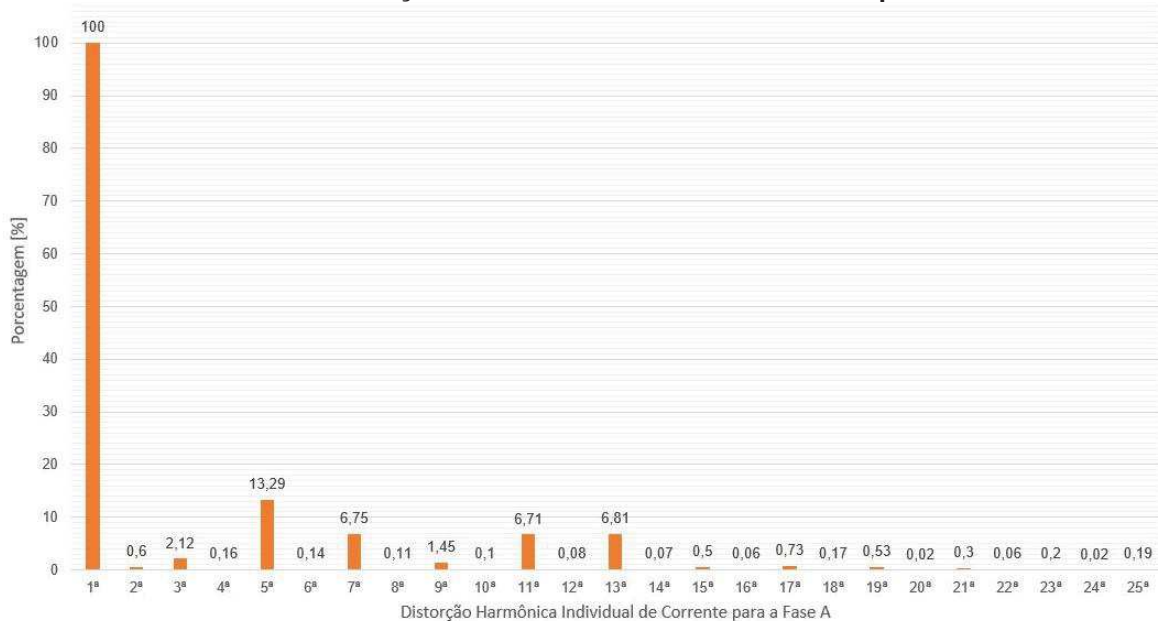
**Tabela 5 - Valores máximos, médio e mínimos para a THDv obtidos na primeira coleta.**

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO - THDi								
Valores Medidos						Valores Normativos		
	fase A	Data - Hora	fase B	Data - Hora	fase C	Data - Hora	PRODIST - Módulo 8	IEEE 519
Valor Mínimo	5,04	18/10/2019 - 11:35	4,89	21/10/2019 - 04:39	5,3	21/10/2019 - 04:39	De acordo com o Quadro 2: THDi ≤ 7,5%	De acordo com o Quadro 8: THDi < 12%
	5,3	18/10/2019 - 09:27	5,15	21/10/2019 - 07:19	5,38	20/10/2019 - 22:41		
Valor Médio	5,27	18/10/2019 - 11:34	5,25	21/10/2019 - 07:20	5,49	18/10/2019 - 11:35		
	18,53		17,63		17,84			
Valor Máximo	136,39	20/10/2019 - 17:04	81,73	20/10/2019 - 17:04	120,26	20/10/2019 - 17:04		
	56,8	21/10/2019 - 07:08	52,47	21/10/2019 - 07:08	38,74	20/10/2019 - 16:58		
	43,46	19/10/2019 - 16:38	50,5	23/10/2019 - 06:17	36,67	21/10/2019 - 07:08		

Fonte: Autor (2019).

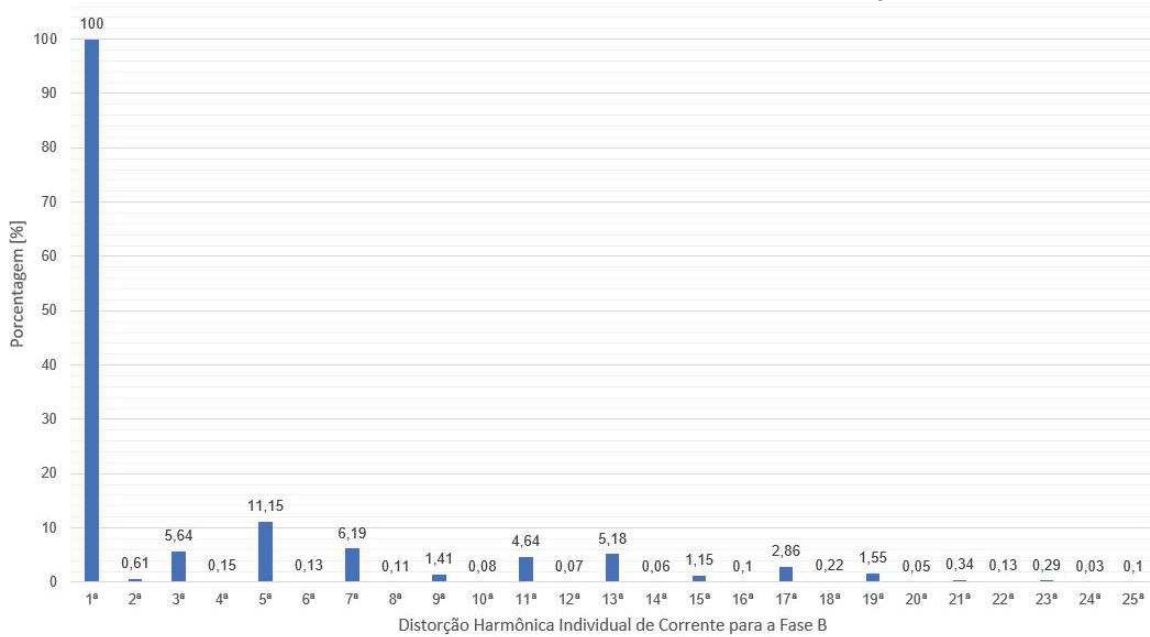
Para as distorções harmônicas individuais de corrente neste segundo cenário, os Gráficos 26, 27 e 28 retratam os valores encontrados referentes às fases A, B e C.

**Gráfico 26 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase A.**



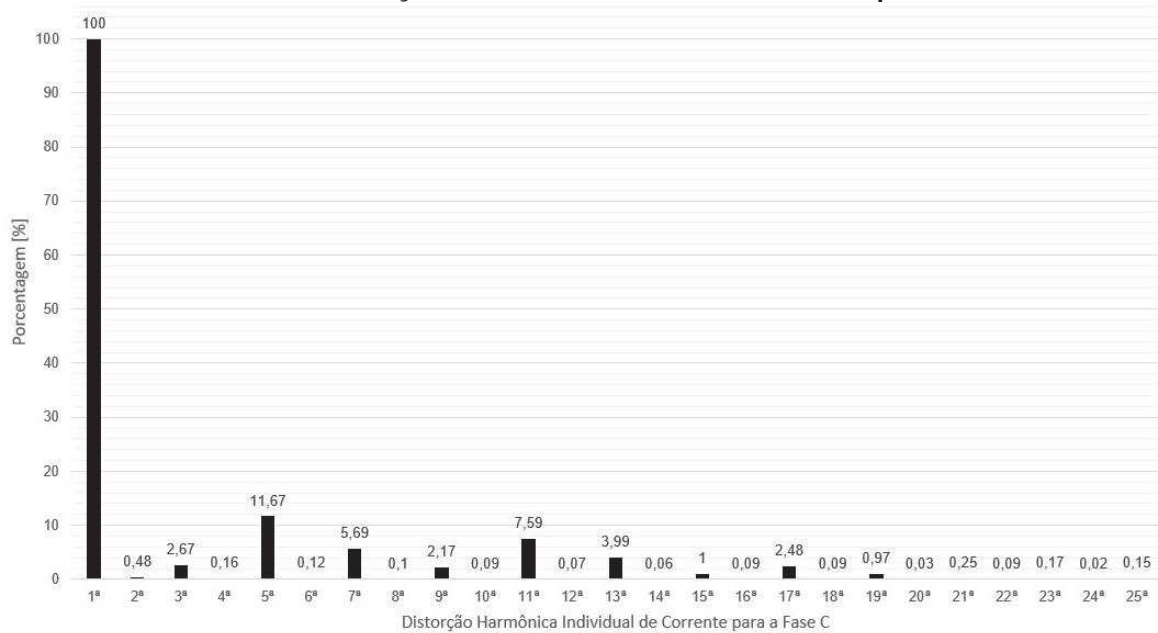
Fonte: Autor (2019).

**Gráfico 27 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase B.**



**Fonte: Autor (2019).**

**Gráfico 28 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase C.**



**Fonte: Autor (2019).**

Por fim, o Quadro 24 apresenta na cor vermelha, os valores que ultrapassaram o limite estipulado pela norma IEEE 519, confirmando que a instalação dispõe de equipamentos geradores de harmônicos de corrente.



**Quadro 24 – Comparação das distorções harmônicas individuais de correntes por fase entre a IEEE 519 para a terceira medição.**

ORDEM (°)	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)	IEEE 519 (%)
1	100	100	100	
3	2,12	5,64	2,67	10
5	13,29	11,15	11,67	10
7	6,75	6,19	5,69	10
9	1,45	1,41	2,17	10
11	6,71	4,64	7,59	4,5
13	6,81	5,18	3,99	4,5
15	0,5	1,15	1	4,5
17	0,73	2,86	2,48	4
19	0,53	1,55	0,97	4
21	0,3	0,34	0,25	4
23	0,2	0,29	0,17	1,5
25	0,19	0,1	0,15	1,5

Fonte: Autor (2019).

Verifica-se também que, quando comparado essa análise com as obtidas no item 5.1.8, percebe-se que ocorreu um aumento dos valores atribuídos às distorções harmônicas individuais de corrente, ou seja, houve uma piora relacionada a este cenário.

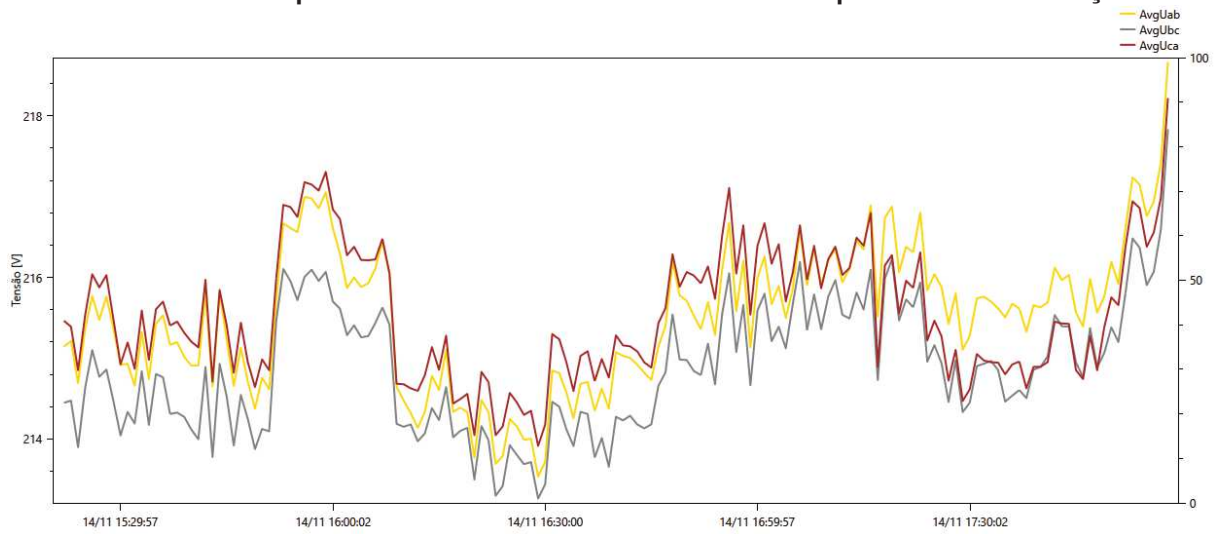
### 5.3 Terceira coleta de dados

Diferentemente do ocorrido na seção 5.1 e 5.2, o cenário de estudo em questão levará em conta apenas os valores médios identificados pelo analisador de QEE. As considerações quanto aos valores máximos e mínimos não serão possíveis pois os mesmos não foram obtidos para este caso.

#### 5.3.1 Tensão de linha

Nesta situação, o Gráfico 29 apresenta o comportamento da tensão de linha do QDF, onde o novo compressor está instalado. Após a verificação dos dados coletados, foi criado o Quadro 25 onde apresenta-se os valores médios de tensão para cada fase. Percebe-se que a tensão de alimentação do circuito está dentro da faixa de tensão adequada, conforme o Quadro 1. Com relação aos valores máximos e mínimos, os mesmos não foram gerados pelo equipamento, impossibilitando sua análise.

**Gráfico 29 - Comportamento da tensão de linha do sistema para a terceira medição.**



Fonte: Autor (2019).

**Quadro 25 - Valores médios da tensão de linha obtidos na terceira coleta de dados.**

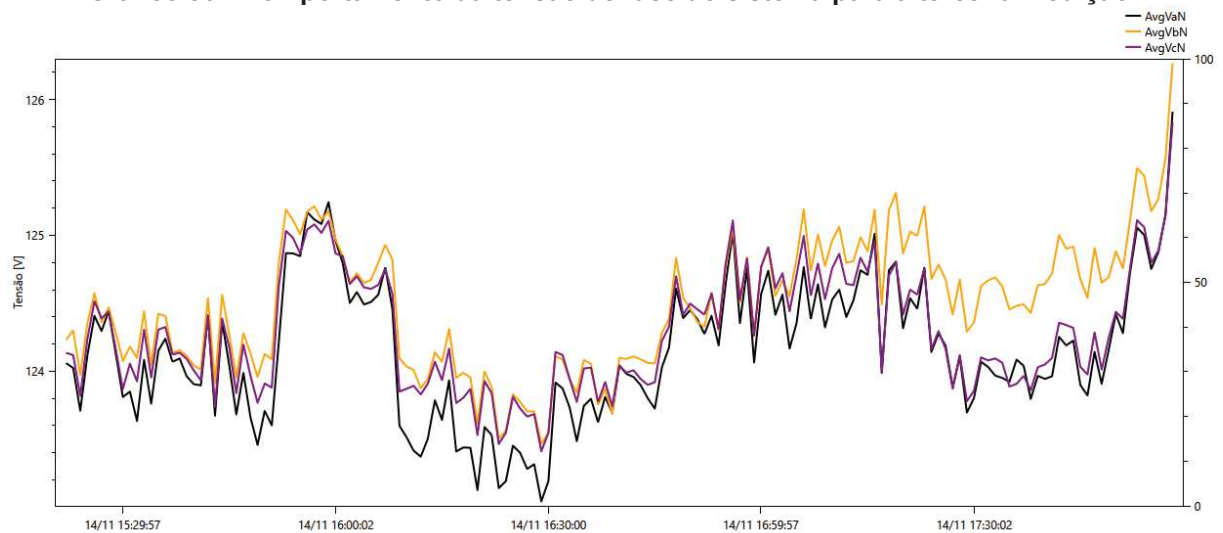
	$V_{AB}$ [V]	$V_{BC}$ [V]	$V_{CA}$ [V]
Valor Médio	215,51	214,88	215,54

Fonte: Autor (2019).

### 5.3.2 Tensão de fase

Para a tensão de fase coletada, o Gráfico 30 apresenta as curvas de tensão médias verificadas para ambas as fases.

**Gráfico 30 - Comportamento da tensão de fase do sistema para a terceira medição.**



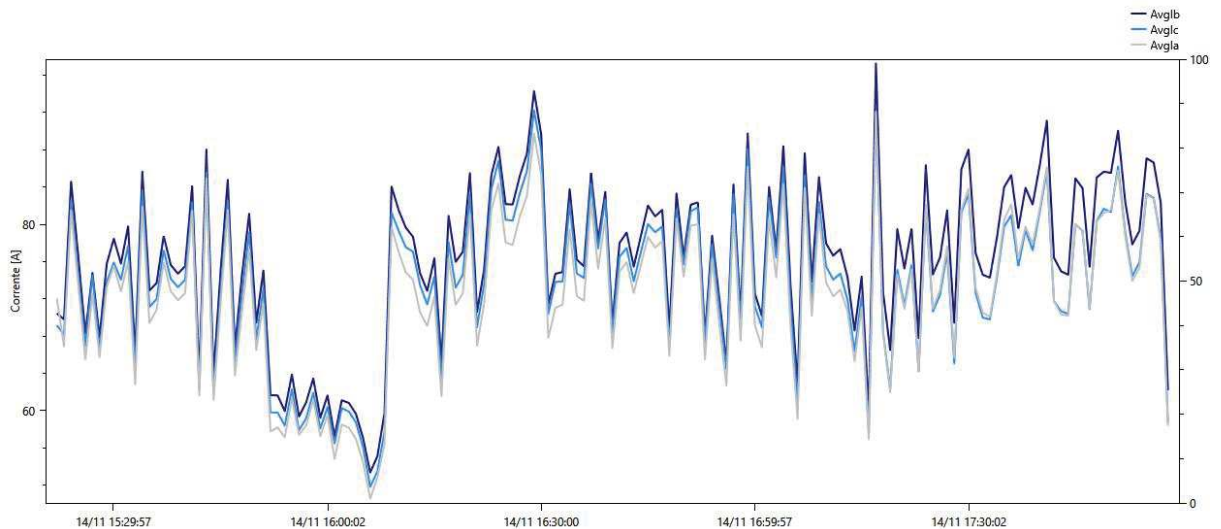
Fonte: Autor (2019).

Comparando os valores do Gráfico 30 com os do Quadro 1 verifica-se que a tensão de fase encontra-se dentro das características adequadas de funcionamento.

### 5.3.3 Corrente de linha

Considerando a corrente de linha detectada pelo analisador da QEE, o Gráfico 31 trás a representação das correntes médias coletadas durante o terceiro estudo.

**Gráfico 31 - Comportamento da corrente de linha identificada na terceira medição.**



Fonte: Autor (2019).

### 5.3.4 Interrupção, desequilíbrio e flutuação de tensão

Devido a este estudo ter ocorrido de forma momentânea na análise das características elétricas do compressor, não foi possível constatar fenômenos de interrupção e afundamentos no fornecimento de energia. No entanto, quando levado em consideração a faixa de tempo menor que 1 segundo, o analisador da QEE não possui capacidade para verificação.

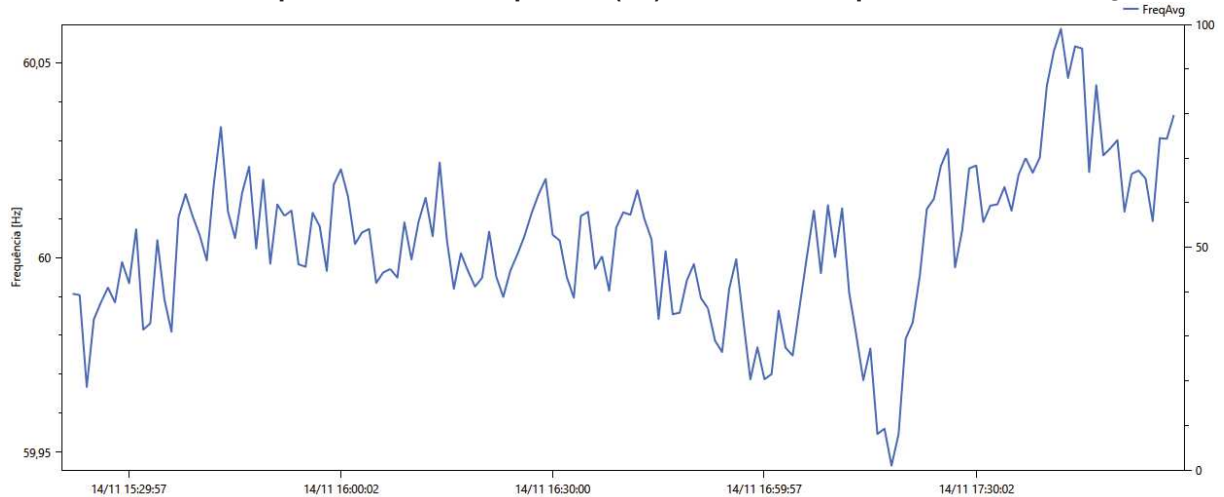
Sobre as componentes dos fatores  $V_-$ ,  $V_+$  e FD para o cálculo do desequilíbrio de tensão, o analisador de QEE não contempla este fornecimento, assim como o Pst e Plt relativo ao estudo da flutuação de tensão.

Considerando a tensão de linha e de fase, verifica-se que não houve a ocorrência de afundamento temporário de tensão para mais de 1 minuto.

### 5.3.5 Variações de frequência

De acordo com o Gráfico 32, constata-se que os valores colhidos encontram-se dentro da faixa adequada de funcionamento, sendo esta, definida entre 59,9 e 60,1 Hz de acordo com o Módulo 8 do Prodist.

**Gráfico 32 - Comportamento da frequência (Hz) média medida para a terceira medição.**

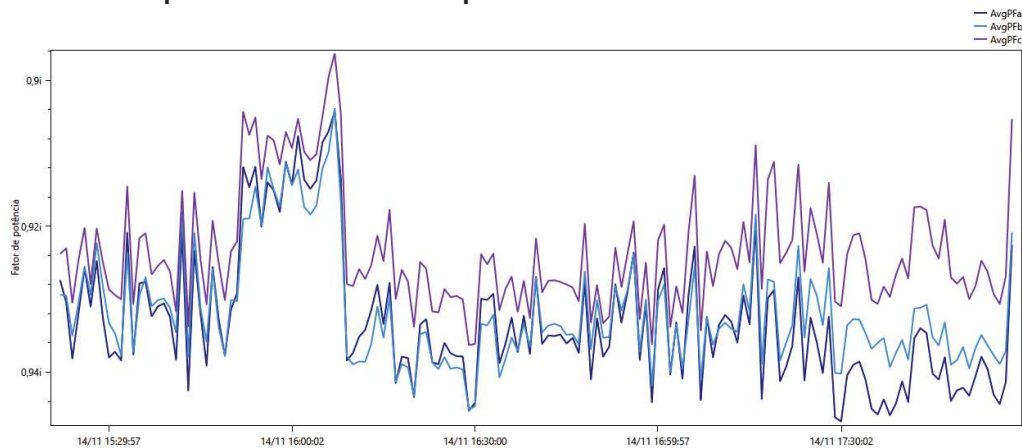


Fonte: Autor (2019).

### 5.3.6 Fator de potência

O fator de potência médio verificado para o funcionamento do compressor durante a medição dos valores encontra-se por volta de 0,93 indutivo para ambas as fases. O Gráfico 33 apresenta as curvas coletadas para a variação do FP para ambas as fases da instalação.

**Gráfico 33 - Comportamento do fator de potência identificado durante a terceira medição.**

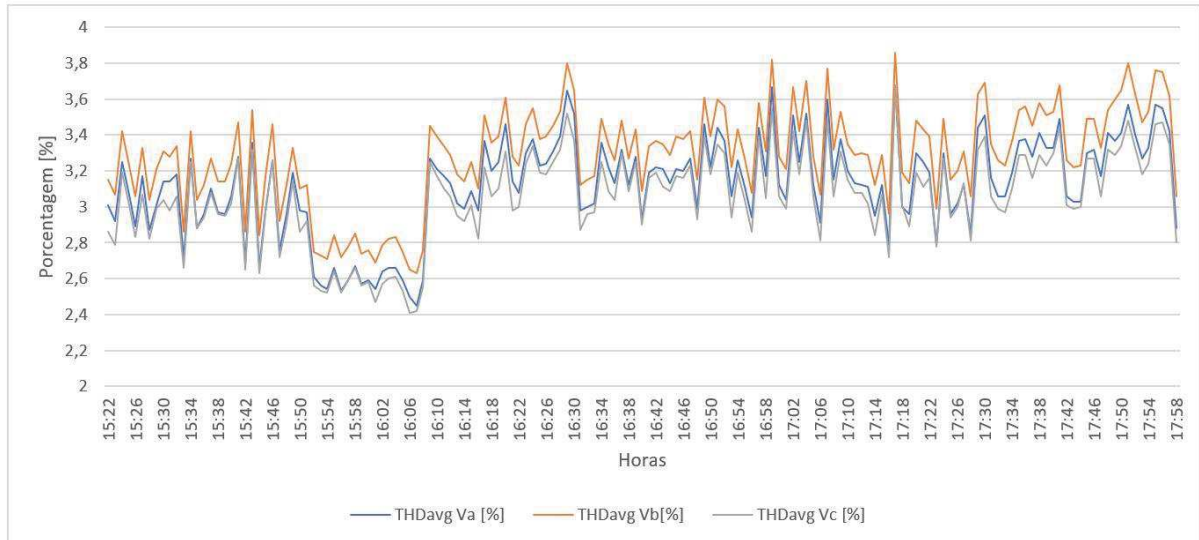


Fonte: Autor (2019).

### 5.3.7 Harmônicos de tensão

Abaixo serão exibidos os resultados referentes às medições realizadas no painel de força do compressor, a fim de identificar as distorções harmônicas totais de tensão ( $THD_v$ ), de acordo com o Gráfico 34.

**Gráfico 34 - Comportamento das distorções harmônicas totais de tensão para cada fase.**



Fonte: Autor (2019).

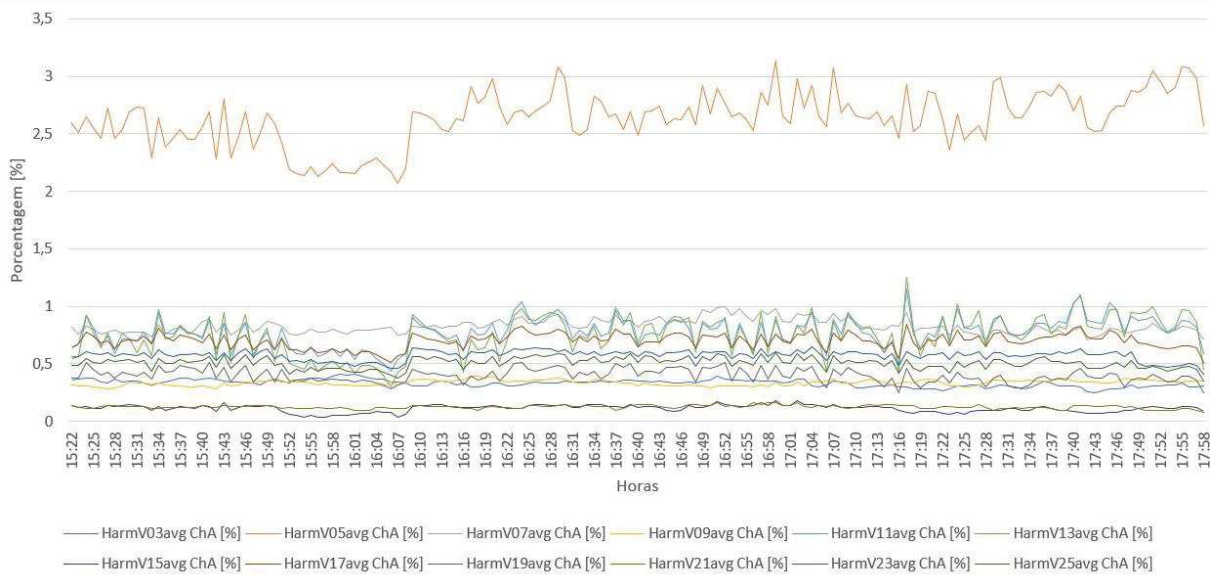
Analisando o comportamento da  $THD_v$  sob a ótica de amostras locais, percebe-se que a incidência de harmônicos na rede é mais que o dobro do que ocorria quando a análise foi realizada na entrada de energia da unidade.

Assim, verificou-se o valor de médio de 3,15 % como a taxa da distorção harmônica total de tensão para ambas as fases que alimentam o inversor. Este fator sofre contribuição devido ao chaveamento eletrônico do inversor para controle de velocidade do eixo do motor.

Conforme item 5.1.7 e 5.2.7, percebe-se que a fase B também apresenta valores superiores aos mostrados para as fases A e C relativo à  $THD_v$ .

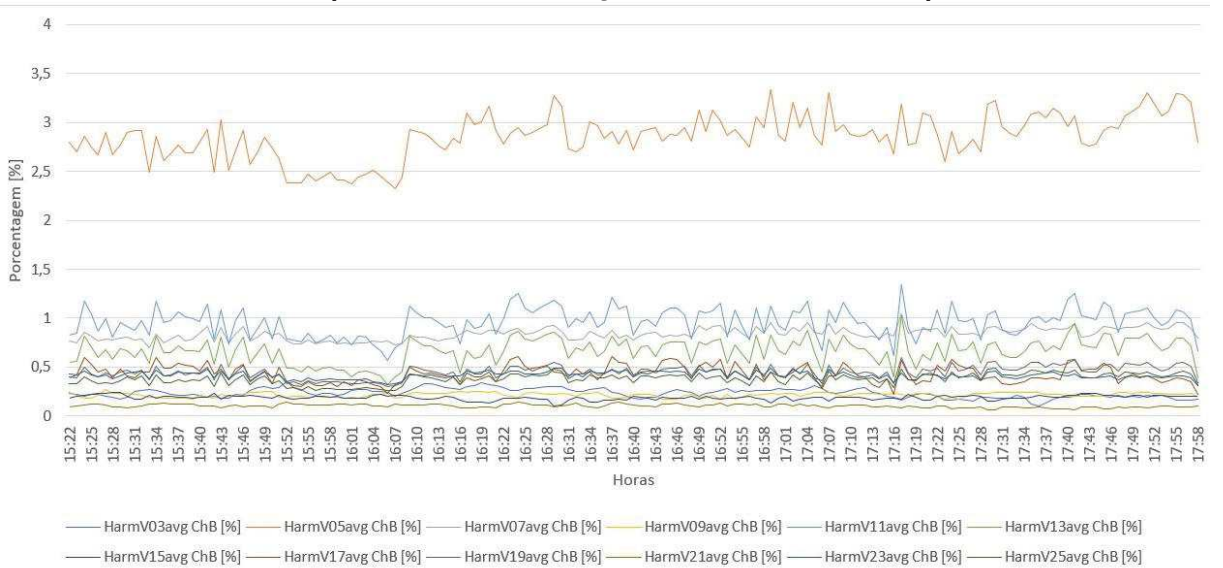
Assim, os Gráficos 35, 36 e 37, apresentam, respectivamente, para as fases A, B e C, as componentes ímpares dos harmônicos individuais de tensão, da 3° até a 25° ordem, bem como a ocorrência de valores significativos para os harmônicos de 5°, 7° e 13° ordem.

**Gráfico 35 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase A.**



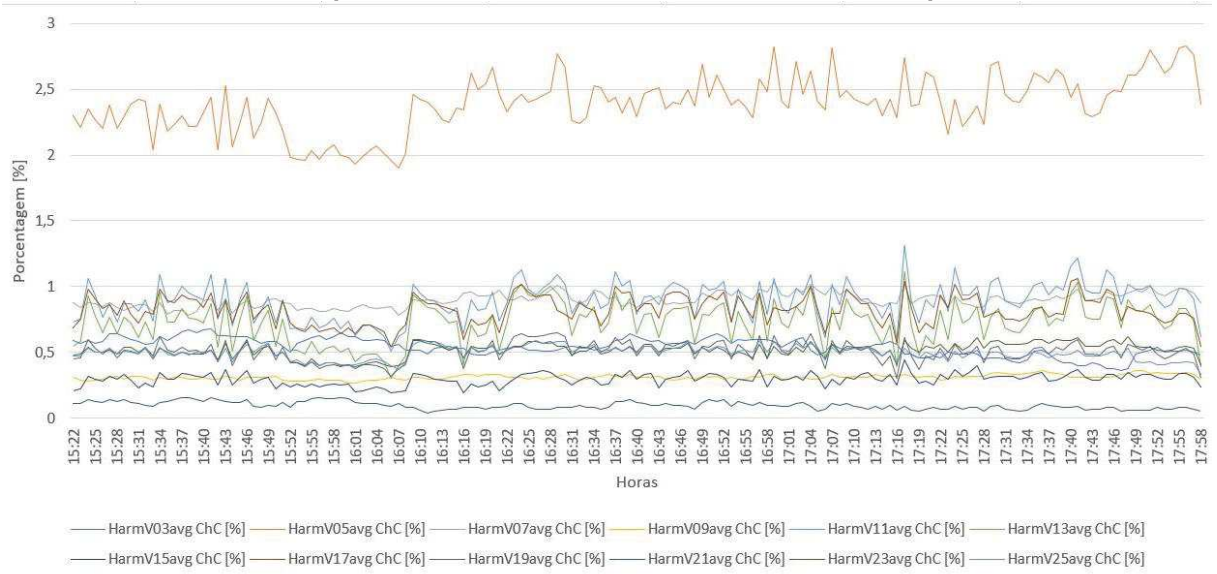
Fonte: Autor (2019).

**Gráfico 36 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase B.**



Fonte: Autor (2019).

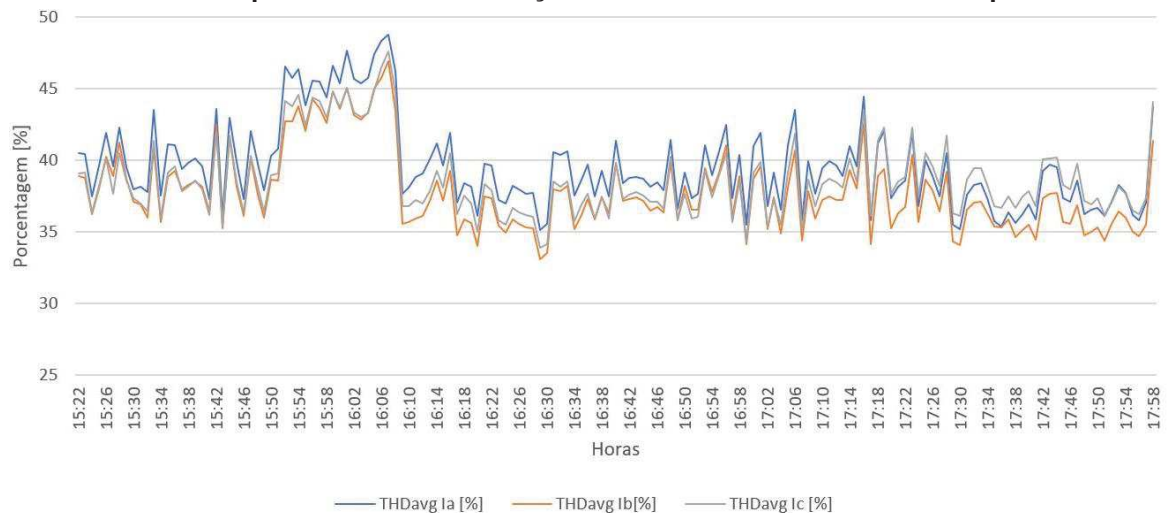


**Gráfico 37 – Comportamento da distorção harmônica individual para a fase C.**

Fonte: Autor (2019).

### 5.3.8 Harmônicos de corrente

O Gráfico 38 apresenta os resultados referentes às medições realizadas no local para as distorções harmônicas totais de corrente (THDi).

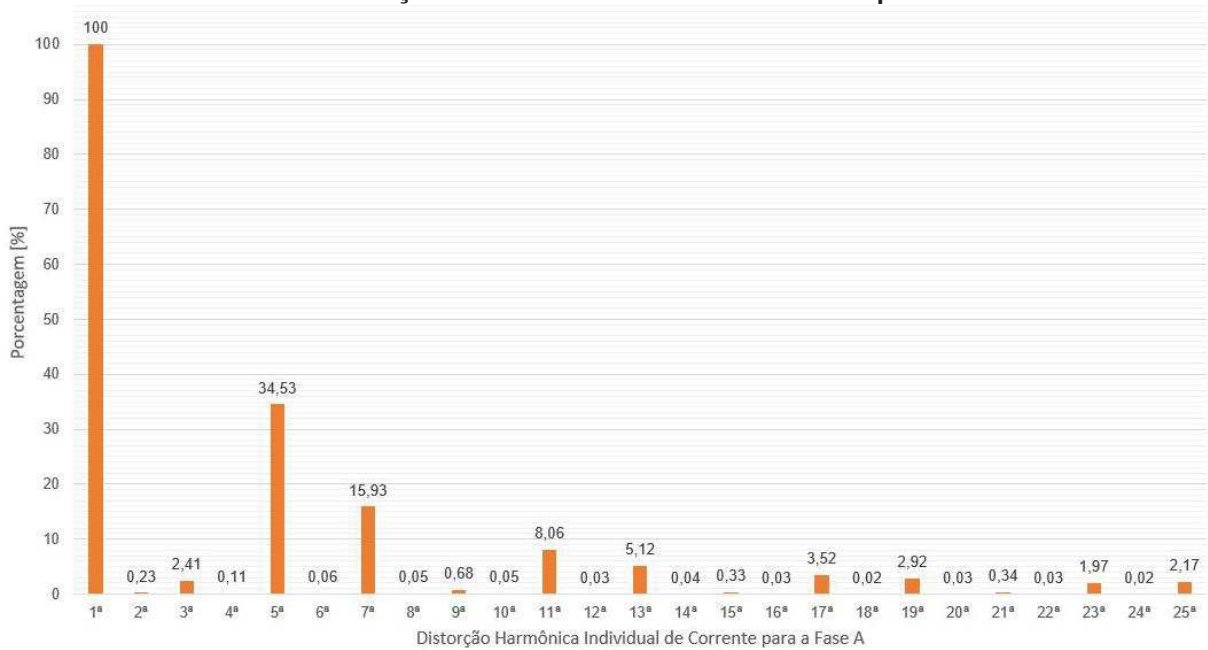
**Gráfico 38 – Comportamento das distorções harmônicas totais de corrente para cada fase.**

Fonte: Autor (2019).

Diferentemente do que ocorreu nas seções 5.1.8 e 5.2.8 e também devido a análise ter sido realizada durante o horário comercial da indústria, não foi possível visualizar a ocorrência dos distúrbios harmônicos no período noturno e nos finais de semana. Percebe-se ainda a incidência de distorções harmônicas de correntes entre 45 % e 50 % para ambas as fases analisadas.

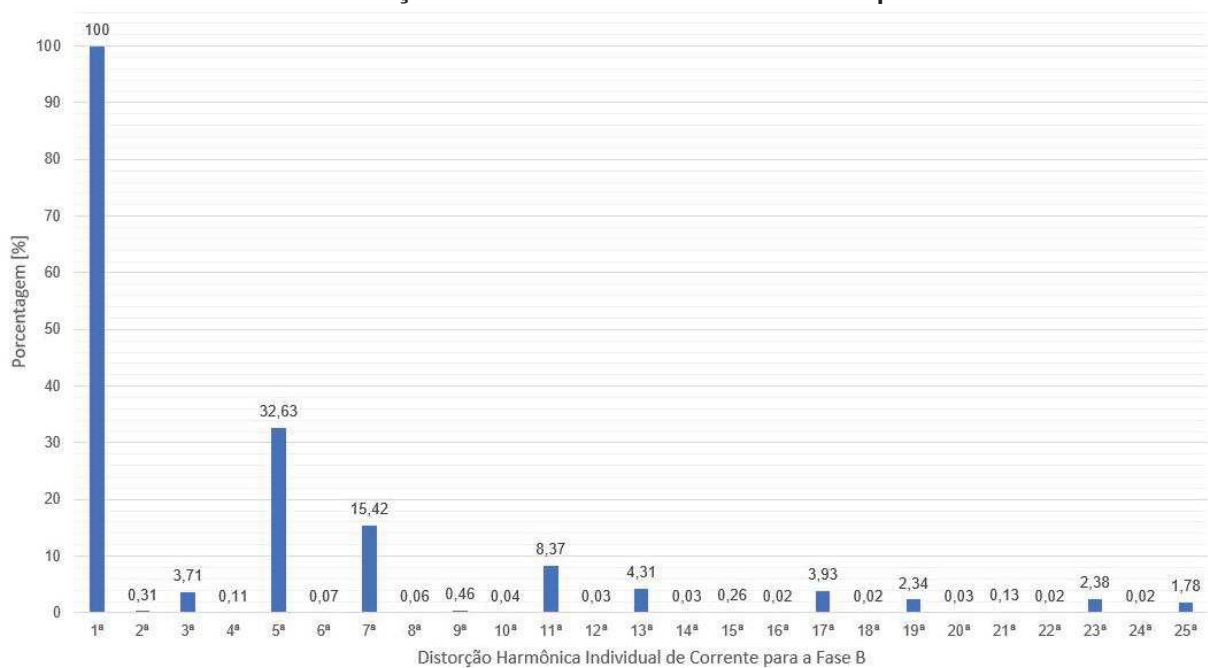
Para as distorções harmônicas individuais de corrente neste terceiro cenário, os Gráficos 39, 40 e 41 retratam os valores encontrados referentes às fases A, B e C.

**Gráfico 39 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase A.**



Fonte: Autor (2019).

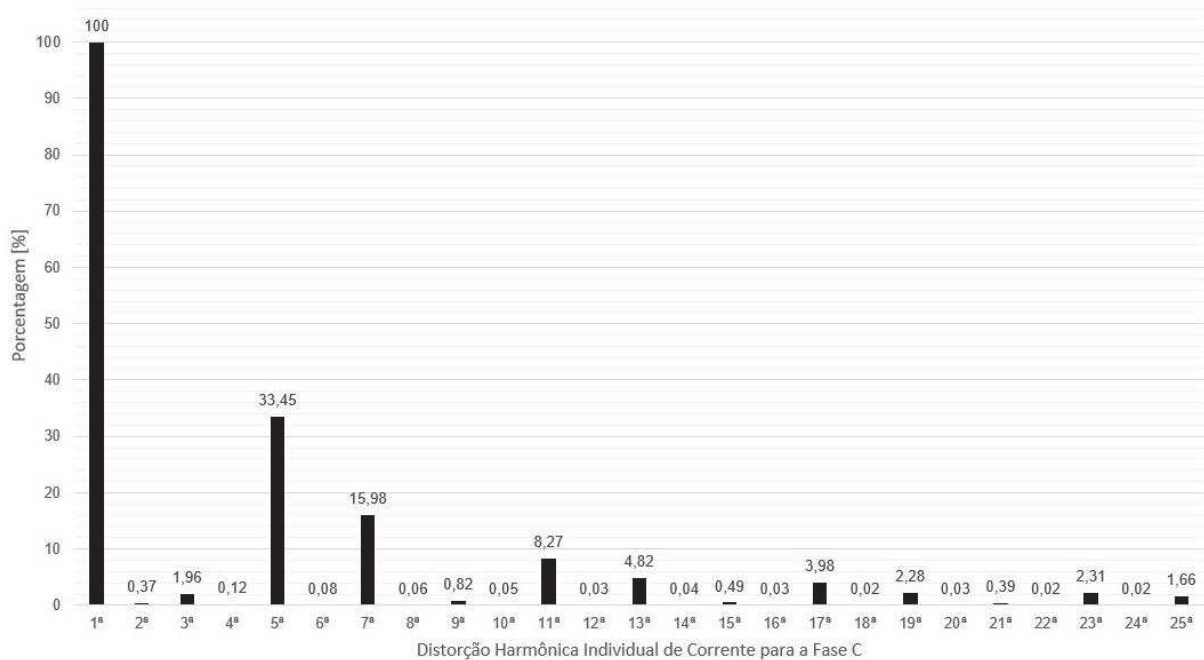
**Gráfico 40 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase B.**



Fonte: Autor (2019).



Gráfico 41 – Distorção harmônica individual de corrente para a fase C.



Fonte: Autor (2019).

Por fim, o Quadro 26 apresenta na cor vermelha, os valores que ultrapassaram o limite estipulado pela norma IEEE 519, confirmando que o inversor ali instalado é um equipamento gerador de harmônicos de corrente na rede elétrica da Bompel.

Quadro 26 – Comparação das distorções harmônicas individuais de correntes por fase entre a IEEE 519 para a terceira medição.

ORDEM (°)	Fase A (%)	Fase B (%)	Fase C (%)	IEEE 519 (%)
1	100	100	100	
3	2,41	3,71	1,96	10
5	34,53	32,63	33,45	10
7	15,93	15,42	15,98	10
9	0,68	0,46	0,82	10
11	8,06	8,37	8,27	4,5
13	5,12	4,31	4,82	4,5
15	0,33	0,26	0,49	4,5
17	3,52	3,93	3,98	4
19	2,92	2,34	2,28	4
21	0,34	0,13	0,39	4
23	1,97	2,38	2,31	1,5
25	2,17	1,78	1,66	1,5

Fonte: Autor (2019).

Analisando os dados relativos às distorções harmônicas individuais de corrente, percebe-se que o inversor que atua no controle da partida e do funcionamento do compressor é um dispositivo gerador de distúrbios elétricos na rede. Este fator é explicado devido ao chaveamento eletrônico no qual é realizado para controle da velocidade do eixo.

Por fim, vale destacar que as componentes de 5° e 11° ordem mais que dobraram em relação aos valores pré-determinados pela IEEE 519, enquanto que as demais componentes identificadas em vermelho também obtiveram valores significativos e acima do normativo.

## 6 CONCLUSÃO

O objetivo principal deste trabalho foi de realizar um estudo referente à qualidade da energia elétrica e da eficiência energética em uma indústria situada na cidade de Toledo-PR com ênfase na mitigação das características elétricas dispostas no módulo 8 do Prodist, além de compará-las com normas internacionais vigentes. Desta forma, com o emprego de um analisador de grandezas elétricas para medição dos distúrbios pôde-se verificar os pontos positivos e negativos com relação às instalações elétricas locais.

Para o estudo, verificou-se três cenários diferentes, sendo o primeiro, anterior ao *retrofit* do compressor, a fim de obter um diagnóstico das instalações elétricas da fábrica durante sete dias. Em um segundo estudo e após a realização da modernização do novo processo, foi verificado novamente com o analisador de QEE as grandezas elétricas das instalações no decorrer de uma semana. Por fim, realizou-se durante uma terceira análise os dados relativos ao funcionamento do novo compressor, com observância às características elétricas em aproximadamente três horas.

Ao analisar os valores medidos da tensão de linha e de fase para ambos os cenários, é possível afirmar que houve significativa mudança nos valores mínimos de tensão verificadas, haja vista que, na primeira medição detectou-se valores de tensão de linha ( $V_{BC}$ ) igual a 162,05 V e tensão de fase ( $V_{CN}$ ) de aproximadamente 89 V. Para os valores máximos, nota-se que em nenhum caso houve a ocorrência de tensões fora da faixa adequada de tensão. Para as tensões médias coletadas, conclui-se também que não houveram medidas suficiente para afirmar que a tensão em regime permanente estivesse comprometida.

Realizando uma amostragem dos dados nas respectivas tabelas dos apêndices deste trabalho, em que são separadas 1008 leituras válidas com amostragem entre dez minutos cada, constata-se que os índices da DRP e DRC para a tensão média se encontram dentro da faixa adequada recomendada pelo Prodist que equivale a 3% e 0,5% respectivamente.

Para as correntes de linha, nas quais apresentam o comportamento das cargas atuantes nas instalações, percebe-se a ocorrência de um padrão entre as coletas de dados. Comparando o item 5.1.3 com o 5.2.3 percebe-se que no segundo caso, as correntes máximas identificadas são menores, tendo em vista que o sistema já não

contemplava mais o compressor de 50 cv acionando através de partida direta. Para a corrente de linha coletada do terceiro cenário, verifica-se que a demanda por corrente elétrica é bem variável neste intervalo de tempo, atingindo desde valores próximos a 50 A quanto para aproximadamente 100 A.

Com relação aos fenômenos de desequilíbrio, interrupção e flutuação da tensão, o presente analisador da QEE empregado não dispunha de informações suficientes para fazer um estudo mais aprofundado destes requisitos.

Para os requisitos relativos às variações de frequência nas instalações, o Módulo 8 do Prodist recomenda a oscilação dos valores entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Entretanto, durante o estudo da primeira coleta de dados, percebeu-se a ocorrência de 39 valores fora do permitido, enquanto que no segundo cenário em questão, esse valor caiu para 24. É perceptível neste estudo que houve uma otimização dos resultados para este caso.

Já para o fator de potência, fica claro que a indústria em questão deve investir na instalação de um banco de capacitores para correção do fator de potência interno. Para a primeira análise, verificou-se o pagamento de R\$ 187,70 relativo ao baixo FP enquanto que no mês de outubro esse valor subiu para R\$ 205,38. Com o intuito de corrigir o FP da instalação que encontra-se na faixa de 0,85, para valores acima de 0,94, recomenda-se a instalação de um banco de capacitores do tipo automático com potência instalada de aproximadamente 60 kVAr, com o emprego de um controlador para verificação constante desta variável.

Avançando o estudo para os níveis de THDv, fica perceptível com a comparação entre a Tabela 2 e a Tabela 4 que houve um aumento dos distúrbios relacionados às formas de onda da tensão. Com relação às distorções individuais de tensão, verifica-se a forte influência de harmônicos de 5°, 7°, 11° e 13° ordem. Comparando os níveis medidos com as normas técnicas adotadas para distorção na tensão, é possível concluir que o índice THDv e suas componentes harmônicas individuais apresentam amostras de valores fora dos limites estabelecidos e portanto não podem ser consideradas como um distúrbio grave na qualidade de energia.

Sobre as distorções harmônicas de corrente, estas apresentaram níveis mais elevados quando comparadas com as distorções na tensão. Durante o horário comercial em que a indústria encontrava-se em funcionamento, o índice TDHi apresenta valores baixos e que condizem com a norma IEEE 519 e Prodist. No entanto, quando a fábrica encerra seu processo de produção e a corrente de carga

diminui, o nível THDi sofre um aumento considerável chegando a aproximadamente 40%.

Esta correlação entre o nível de distorção harmônica total de corrente verificada e o valor da corrente eficaz fundamental pode ser explicada da seguinte forma: quando ocorre da indústria operar em plena carga, a corrente elétrica da instalação é elevada, e por consequência, a corrente de alimentação das cargas não lineares é considerada baixa. Dessa maneira, as distorções harmônicas por elas produzidas afetam menos o nível da THDi já que o valor da corrente eficaz é elevado. No entanto, quando o horário comercial da indústria se encerra, a instalação já não se encontra a plena carga, e então, a corrente de alimentação das cargas não lineares se sobressai fazendo com que o conteúdo harmônico por elas produzido aumente de forma significativa o valor percentual da TDHi.

Como os níveis de TDHi mais elevados pode-se sugerir que sejam instalados filtros de harmônicas tanto nos painéis QDF e CCM's quanto diretamente nas cargas, como por exemplo, junto ao novo compressor instalado.

Com relação às distorções harmônicas individuais de corrente, é possível verificar que as componentes que apresentam nível mais elevado até o fim do processo produtivo são as produzidas principalmente pelos inversores de frequência. Foi verificado ainda que, as componentes de maior intensidade são principalmente as de 5°, 7°, 11° e 13° ordem.

Por fim, o desenvolvimento deste trabalho foi importante e significativo sobre o aspecto da aprendizagem e aprofundamento nos conhecimentos voltados para a área da QEE, no que se refere às medições, aos estudos sobre as principais normas e procedimentos nacionais e internacionais.

Para proposta de trabalhos futuros recomenda-se:

- Um estudo mais aprofundado com relação a filtros (ativos e passivos) a fim de combater a incidência de harmônicos de tensão e corrente nas instalações elétricas da Bompel;
- Simular a inclusão de filtros ativos no alimentador principal da unidade e comparar as reduções harmônicas para o caso de utilização de filtros passivos. Verificar ainda a relação custo x benefícios entre as aplicações;
- Realizar a coleta de dados nos CCM's da fábrica, com o intuito de levantar demais características elétricas da unidade;
- Elaborar os quadros de carga e os diagramas elétricos dos painéis da unidade;

- Prover a disposição de um analisador de qualidade da energia elétrica mais robusto e que seja capaz de verificar todos os itens dispostos no Módulo 8 do Prodist.
- Sobre o assunto da eficiência energética, verificar os potenciais equipamentos e/ou processos que gerem desperdícios de energia, além de implementar ações que possam resultar na economia da fatura de energia. Tais ações para a redução do consumo podem abranger o sistema de iluminação da unidade que dispõe de inúmeras luminárias do tipo fluorescente acionada através de reatores, melhorias no sistema de climatização em relação à área fabril, do sistema de ar comprimido, as cargas indutivas, entre outros.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétricos Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA ANEEL: “Resolução Nº 505, de 26 de novembro de 2001.

ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo: Altliber, 2001.

ALVES, Mário F. **QEE – Qualidade de Energia Elétrica**. Pontifícia Universidade Católica. Belo Horizonte, p. 110. 2010.

ANDRADE, Jucinara H. M. **Qualidade da Energia Elétrica – Normas e Regulamentações sob a Ótica do Consumidor**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 52. 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5410: Instalações elétricas de baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2008.

AZEVEDO, G. T; ROMÃO, E. C; MENEGATTI, C.R. **Correção de distorções harmônicas em sistemas elétricos através da interferência destrutiva**. Universidade de São Paulo. Lorena. 2019.

BACH, A; PINTO, L. S. **Avaliação da Distorção Harmônica em uma Indústria Alimentícia**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, p. 145. 2014.

BATISTA, Oureste E. **Gestão Energética Industrial: Uma abordagem frente a inteligência empresarial**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, p. 145. 2014.



BERNARDO, Natália. **Evolução da Gestão da Qualidade de Serviço de Engenharia Elétrica no Brasil**. Universidade de São Paulo. São Carlos, p. 86. 2011.

GELLER, H. S. **Revolução Energética. Políticas para um futuro sustentável**. Editora Relume Dumará, 2003.

CAVALCANTI, E. C. T. L; NUNES, W. M. O; **Análise de distorções harmônicas referentes a uma planta industrial de distribuição de combustível**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2019.

EN 50160 - 2010. **Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks, European Committee for Electrotechnical Standardization**. 2010.

FILHO, J. M. **Instalações Elétricas Industriais: de acordo com a norma brasileira NBR 5419:2015**. 9.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2018.

GODOI, José Maria Alves. **Eficiência Energética Industrial: Um modelo de governança de energia para a indústria sob requisitos de sustentabilidade**. 127 f. Dissertação (mestrado) – Universidade de São Paulo (USP). Programa de Pós-graduação em Energia da Universidade de São Paulo, Escola Politécnica/Faculdade de Economia e Administração/Instituto de Eletrotécnica e Energia/Instituto de Física. São Paulo, 2011.

IEEE Std. 1159-2009. **IEEE Recommended Practices for Monitoring Electric Power Quality**. 2009.

IEEE Std. 519-1992, **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 1992.

ISONI, M. **A moderna eficiência energética e seus possíveis efeitos sobre o desempenho operacional de equipamentos e instalações elétricas**. 39 f. Disponível em: <[http://www.engeparc.com.br/cariboost\\_files/4-Harmonicas.pdf](http://www.engeparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf)>. Acesso em 20 de nov. de 2019.

LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

LOURENÇO, Tiago Greison Martins. **Avaliação da Qualidade de Energia Elétrica no Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará**. 141 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará (UFC). Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Fortaleza, 2012. Disponível em: <[http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4953/1/2012\\_dis\\_tgmlourenco.pdf?fbclid=IwAR3uVAGP-H4hmTBTnmTOBgV\\_1YYwaY6Fe\\_TKOAzjxNjHNs6XU7uRM32TIDw](http://www.repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/4953/1/2012_dis_tgmlourenco.pdf?fbclid=IwAR3uVAGP-H4hmTBTnmTOBgV_1YYwaY6Fe_TKOAzjxNjHNs6XU7uRM32TIDw)>. Acesso em 30 de mai. de 2019.

MAIA, Reinaldo M. **Caracterização das Variações de curta duração e seus impactos em uma planta da indústria alimentícia**. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2011.

NATURESA, Jim Silva. **Eficiência Energética, Política Industrial e Inovação Tecnológica**. 229 f. Tese (doutorado) – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, SP, 2011. Disponível em: <[http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/258233/1/Naturesa\\_JimSilva\\_D.pdf](http://repositorio.unicamp.br/jspui/bitstream/REPOSIP/258233/1/Naturesa_JimSilva_D.pdf)>. Acesso em 01 de jun. de 2019.

NOGUEIRA, L. A. H. **Conservação de energia – energia e fundamentos**. Fupai, 2006.

POLL, Fernando D. C. **Análise de Qualidade da Energia Elétrica em Baixa Tensão: estudo de caso em um Ambiente Universitário**. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, p. 91. 2013.

POMILIO, José A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica** Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Elétrica e Computação. Campinas. 2017.

RAMALHETE, Marina P.; SIMONETTI, Domingos S. L. **Aspectos de Qualidade de Energia Elétrica e Eficiência Energética em Motores de Indução Trifásicos**. Vitória, p. 5, 2009.

ROCHA, Joaquim E. **Qualidade da Energia Elétrica**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, p. 37. 2016.

SILVA, Vanessa Pereira da. **Análise da Eficiência Energética em uma Indústria Têxtil: Um estudo de caso relacionando perdas e produtividade**. 101 f. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção da Universidade da Paraíba. João Pessoa, 2013. Disponível em <<https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/tede/5235/1/arquivototal.pdf>>. Acesso em 01 de jun. de 2019.

VASCONCELLOS, A. B. D. et al. Eficiência energética e Qualidade de Energia com a Automação de Condicionadores de Ar. **O Setor Elétrico**, São Paulo, n. 65, p. 6, 2011.

TEIXEIRA, D. Â. **Análise das distorções harmônicas – Estudo de caso em um sistema industrial**, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 2009.

BOMPEL. Disponível em: <<http://bompel.com.br/>>. Acesso em 01 de jun. de 2019.

COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). **Informações Úteis**. Curitiba, 2019. Disponível em: <<https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Froot%2Fpagcopel2.nsf%2F5d546c6fdeabc9a1032571000064b22e%2Fb2f4a2f0687eb6cf03257488005939b9>>. Acesso em 10 de set. de 2019.

FLUKE. **Alicate Amperímetro**. Disponível em: <<https://www.fluke.com/pt-br/produto/teste-eletrico/alicates-amperimetros/fluke-302-plus>>. Acesso em 20 de Ago. de 2019.

IMS. IMS - Tecnologia em Expansão. **Analizador PowerNet P-600 G4**. Disponível em < <http://www.ims.ind.br/produto-detalle/powernet-p-600-g4>>. Acesso em 20 de Ago. de 2019.

## APÊNDICE A – DADOS REFERENTES A PRIMEIRA COLETA DE DADOS

1. Link de acesso às planilhas de estudos correspondentes à seção 5.1:  
<<https://drive.google.com/drive/folders/1Aqv6sBxslri5XSX0xSUvy3ee3782gMR-?usp=sharing>>.

## **APÊNDICE B – DADOS REFERENTES A SEGUNDA COLETA DE DADOS**

1. Link de acesso às planilhas de estudos correspondentes à seção 5.2:  
<<https://drive.google.com/drive/folders/1stOHUZAXK4wvFaagkX6bMnGckISLreU3?usp=sharing>>.

## APÊNDICE C – DADOS REFERENTES A TERCEIRA COLETA DE DADOS

1. Link de acesso às planilhas de estudos correspondentes à seção 5.3:

<<https://drive.google.com/drive/folders/1jpZoTcvolc0wvjxZalKMZbAdnM3kwMuM?usp=sharing>>.