

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**CARLOS EDUARDO PEREIRA REIS**

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA: um  
estudo de caso demonstrando o papel do engenheiro eletricista como consultor analista**

**Varginha**  
**2018**

**CARLOS EDUARDO PERIRA REIS**

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA: um  
estudo de caso demonstrando o papel do engenheiro eletricista como consultor analista**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica, sob orientação do Prof. Silvio Bottrel Guimarães

**Varginha  
2018**

**CARLOS EDUARDO PEREIRA REIS**

**ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA: um estudo de caso demonstrando o papel do engenheiro eletricitista como consultor analista**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em:        /        /

---

Prof. Esp. Sílvio Bottrel Guimarães

---

Prof. Me. Hugo Rodrigues Vieira

---

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

OBS.:

Dedico a todos aqueles que me apoiaram para a realização do curso e me incentivaram para que o alcance do sonho fosse realizado. Familiares, amigos, colegas, companheiros. Em especial aos meus pais, Ângela e Carlos, irmãos, Túlio, Thiago, Carlos e Kailany e minha namorada Lindsay que me acompanham desde o início, e seguirão acompanhando até o fim.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a todos que contribuíram de maneira direta ou indireta com a realização deste trabalho, em especial ao professor orientador, Sívio Bottrel Guimarães e ao Eng. Eletricista Rafael Kerner cujas orientações foram fundamentais. Aos colegas Wellerson de Carvalho, Rafael Benneton, Maria Gabriela e Alander Cunha pelas incontáveis noites de colaboração e apoio mútuo. Aos meus pais, irmãos, e namorada por todo incentivo e motivação.

“O futuro vai mostrar os resultados e julgar  
cada um segundo as suas realizações.”

Nikola Tesla

## RESUMO

O presente trabalho visa analisar a eficiência energética e qualidade de energia elétrica, demonstrando a atuação do engenheiro eletricista como consultor analista. Utilizando de equipamento do sistema elétrico no que diz respeito a problemas de qualidade de energia com o intuito de detectar, localizar e classificar os mesmos. Passando pelo atual cenário energético do Brasil, contextos e tarifações, são também demonstrados todos os fundamentos teóricos acerca dos parâmetros de análise em qualidade de energia e fenômenos eletromagnéticos causados por distúrbios. Com base em normas regulamentadoras para assegurar a confiabilidade dos dados coletados, e qualifica-los em relatório e diagnóstico baseado no estudo, é realizado um estudo de caso em uma empresa que atua na área alimentícia localizada no sul de Minas Gerais, onde é identificado problema com a eficiência energética. Dados são coletados e tratados de forma a interpretar soluções, permitindo a proposta de redimensionamento do dispositivo que solucione o problema diagnosticado com o fator de potência. Então, o objetivo principal é alcançado, ficando evidente a importância da profissão e sua fundamental contribuição para o melhoramento da energia.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia, Distúrbios da Energia Elétrica, Eficiência Energética.

## **ABSTRACT**

The present work aims at the energy efficiency and the quality of electric power, demonstrating a performance of the electrical engineer as an analyst consultant. Using the electrical system equipment that does not need an energy evaluation system in order to detect, locate and classify them. Going through Brazil's current energy scenario, contexts and tariffs are also demonstrated in all theoretical foundations on the determinants of energy quality analysis and electromagnetic phenomena for disturbances. Based on regulatory standards to ensure the date of data collection, and qualify for reports and diagnoses based on studies, a case study is conducted at a company located in the research area located in the south of Minas Gerais, where it is a problem with an energetic energy. The data are collected and processed in order to interpret solutions, allowing the resizing of a problem solving model. So, the main goal is to get the importance of the profession and its fundamental contribution to the improvement of energy.

**Keywords:** Energy Quality, Electrical Energy Disorders, Energy Efficiency.

## LISTA DE EQUAÇÕES

26

Equação (02).....	36
Equação (03).....	38
Equação (04).....	38
Equação (06).....	44
Equação (07).....	48
Equação (08).....	63
Equação (09).....	63
Equação (10).....	64
Equação (11).....	65

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Principais distúrbios em formas de onda relacionados à qualidade de energia .....	24
Figura 2 –Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos .....	25
Figura 3 – Triângulo de potências .....	247
Figura 4 – Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica .....	249
Figura 5 – Transitório oscilatório provocado pelo chaveamento de um banco de capacitores	30
Figura 6 – Elevação de tensão de 60% originado por uma falta fase - terra .....	31
Figura 7 – Afundamento de tensão de 30% originado por uma falta fase - terra.....	33
Figura 8 – Afundamento de tensão causada pela partida de um motor .....	33
Figura 9 – Interrupção de tensão devido a falha de um sistema trifásico .....	34
Figura 10 – Desequilíbrio de tensão em consumidor residencial.....	37
Figura 11 – Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem .....	39
Figura 12 – Exemplo de recortes de tensão .....	30
Figura 13 – Etapas relacionadas à avaliação de qualidade de energia .....	45
Figura 14 – Analisador PowerLogic® ION7650 .....	46
Figura 15 – Câmera termográfica FLIR TG165 .....	47
Figura 16 – Instalação do analisador PowerLogic® ION7650 .....	47
Figura 17 – Imagem termográfica de fase 1 .....	57
Figura 18 – Imagem termográfica de fase 2 .....	57
Figura 19 – Imagem termográfica de fase 3 .....	57
Figura 20 – Imagem real do barramento de entrada .....	58
Figura 21 – Imagem termográfica do barramento de neutro .....	58
Figura 22 – Imagem real do barramento de neutro .....	59
Figura 23 – Catálogo de unidades capacitivas trifásicas comerciais.....	67
Figura 24 – Catálogo de banco de capacitores trifásicos comerciais .....	68

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Percentual de participação de geração, inseridos no SIN. (%) .....	20
Gráfico 2- Distribuição de fator de potência médio referente ao período total da análise .....	52
Gráfico 3- Tensão média entre fases V12 por faixa horária .....	54
Gráfico 4- Tensão média entre fases V23 por faixa horária.....	55
Gráfico 5- Tensão média entre fases V31 por faixa horária.....	56
Gráfico 6- Distorção Harmônica Total em V1 .....	61
Gráfico 7- Distorção Harmônica Total em V2 .....	61
Gráfico 8- Distorção Harmônica Total em V3 .....	62

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Grupamentos de unidades consumidoras divididas por tensão fornecida.....	22
Tabela 2 – Faixa de classificação para pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1kV (380/220).....	49
Tabela 3 – Classificação das variações de tensão de curta duração .....	50
Tabela 4 – Fator de potência geral por dia da semana e média geral .....	51
Tabela 5 – Tensão média entre fases V12 por dia e média geral .....	53
Tabela 6 – Tensão média entre fases V23 por dia e média geral .....	54
Tabela 7 - Tensão média entre fases V31 por dia e média geral .....	55
Tabela 8 - Distorções de tensões média geral entre 16 a 22 de novembro.....	60
Tabela 9 – Maior potência ativa no período ne análise .....	63
Tabela 10 –Comparações entre valores dimensionados e comerciais de banco de capacitor ..	67

## LISTA DE ABREVIACÕES E UNIDADES

A	- ampère
ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
ABRADEE	- Associação Brasileira de Distribuição de Energia
CCEE	- Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
F	- farad, unidade capacitiva
h	- horas
MAE	- Mercado Atacadista de Energia Elétrica
min	- minutos
n, $\mu$ , m, k, M, G	- nano, micro, mili, kilo, mega e giga respectivamente
NOS	- Operador Nacional do Sistema
PCH	- Pequenas Centrais Hidrelétricas
PDE	- Plano Nacional de Energia
Pu	- <i>per unit</i> , “por unidade”
rad	- radianos
TUSD	- Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	- Tarifa do Uso de Sistema de Distribuição
V	- volt
VA	- volt-ampère
Var	- volt-ampère reativo
W	- watt

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
<b>2 POR QUE SE PREOCUPAR COM A QUALIDADE DE ENERGIA E EFICÁCIA ENERGÉTICA? .....</b>	<b>18</b>
<b>3 CONTEXTO E LEGISLAÇÃO NO BRASIL .....</b>	<b>19</b>
<b>3.1 Regulação e Fiscalização .....</b>	<b>20</b>
3.1.1 Tarifação da Energia Elétrica .....	21
<b>4 DEFINIÇÃO DOS DISTÚRBIOS QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA..</b>	<b>24</b>
<b>4.1 Fator de Potência .....</b>	<b>25</b>
<b>4.2 Transitórios .....</b>	<b>28</b>
4.2.1 Transitório Impulsivo .....	29
4.2.2 Transitório Oscilatório.....	29
<b>4.3 Variações de Tensão de Curta Duração .....</b>	<b>30</b>
4.3.1 Salto de Tensão (Swell).....	31
4.3.2 Depressão de Tensão (Sag).....	31
4.3.3 Interrupção.....	34
<b>4.4 Variações de Tensão de Longa Duração .....</b>	<b>35</b>
4.4.1 Sobretensão Sustentada .....	35
4.4.2 Subtensão Sustentada .....	35
4.4.3 Interrupções Sustentadas .....	36
<b>4.5 Desequilíbrio de Tensão .....</b>	<b>36</b>
<b>4.6 Distorção na Forma de Onda .....</b>	<b>37</b>
4.6.1 Desvio de Nível CC.....	38
4.6.2 Harmônicos.....	38
4.6.3 Interharmônicos .....	39
4.6.4 Corte (Notch).....	40
4.6.5 Ruídos.....	41
<b>4.7 Flutuação de Tensão.....</b>	<b>41</b>
<b>4.8 Variação de Frequência .....</b>	<b>41</b>
<b>5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ACERCA DE MODELAGEM ESTATÍSTICA....</b>	<b>43</b>
<b>5.1 Desvio Padrão Amostral .....</b>	<b>43</b>
<b>6 ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>45</b>
<b>6.1 Identificação do Problema .....</b>	<b>45</b>
<b>6.2 Metodologia e Parâmetros de Medição .....</b>	<b>46</b>
6.2.1 Fator de Potência .....	48
6.2.2 Níveis de Tensão em Regime Permanente .....	49
6.2.3 Termografia .....	49
6.2.4 Variações de Tensão de Curta Duração.....	50
6.2.5 Harmônicos de Tensão .....	50
<b>6.3 Coleta de Dados e Análise dos Resultados .....</b>	<b>51</b>
6.3.1 Fator de Potência .....	51
6.3.2 Níveis de Tensão em Regime Permanente .....	53
6.3.3 Equilíbrio de fases em regime permanente – Análise Termográfica.....	56
6.3.4 Variações de tensão de curta duração.....	59
6.3.5 Harmônicos de tensão.....	59
<b>6.4 Soluções Propostas para o Problema Identificado .....</b>	<b>62</b>

<b>7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>69</b>
<b>7.1 Conclusões .....</b>	<b>69</b>
<b>7.1 Recomendações para trabalho futuro .....</b>	<b>69</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>71</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia elétrica é essencial para a qualidade de vida da população. Fornecida como um produto comercial, vem ganhando destaque o estudo da sua qualidade, principalmente pelo fato de que sua falta pode provocar desligamentos ou mau funcionamento de equipamentos elétricos, o que pode ocasionar perdas financeiras para as empresas, desconforto para os usuários e comprometimento da segurança das pessoas.

O tema proposto para este trabalho, está relacionado a uma grande área de engenharia elétrica atual, a eficiência energética e qualidade de energia elétrica. Portanto, o conceito de boa qualidade de energia está ligado ao funcionamento adequado e sem falhas das cargas elétricas existentes em um sistema elétrico e que pressupõe tensões e frequência dentro de valores nominais e sem oscilações ou perturbações.

No Brasil, existe uma série de resoluções publicadas pelo órgão regulador, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), as quais serão tomadas como base técnica a resolução normativa 414 (2010) e no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (2017), e seguindo a metodologia de parametrização das características e identificação de irregularidades da energia elétrica a partir dos procedimentos apresentados por Dugan (2002) e Martinho (2009).

Exibe-se neste trabalho a execução do engenheiro eletricista como consultor analista em qualidade de energia e eficiência energética, através da realização de um estudo de caso em uma empresa alimentícia localizada no sul de Minas Gerais, estabelecendo critérios e métodos de coleta de dados, abordagem de informações, e realização de diagnósticos que permita implementar soluções que eliminem ou atuem aos efeitos dos problemas identificados.

Para que os objetivos deste trabalho sejam alcançados, mostra-se brevemente o cenário energético nacional, determinando seu contexto, tratando das atuais legislações e tarifações, abordando normas e técnicas que abrangem, principalmente as instalações elétricas industriais. Posteriormente, são exploradas as bibliografias (MARTINHO, 2009; DUGAM, 2002) mencionando as anomalias, e distúrbios energéticos que afetam as instalações elétricas.

O estudo é executado através de equipamentos de medição de alta precisão, no caso o ION 7650 SCHNEIDER, mensurando todas as grandezas elétricas e fenômenos que possam trazer algum transtorno ao processo produtivo ou ao sistema de distribuição elétrica, também faz o uso da câmera termográfica Flir TG165 para averiguação do equilíbrio de tensões entre fases. Com a coleta de dados, o profissional consultor visa aplicar de uma forma pratico-

teórico toda a técnica que se faz necessária para obter uma energia eficiente e de qualidade, demonstrando assim todos os aspectos necessários para o cumprimento do trabalho realizado pelo engenheiro, estabelecendo métodos e critérios para a tratativa de informações diagnosticadas no estudo, visando assim, implementar possíveis soluções ou confirmar efeitos de eventuais distúrbios identificados.

## **2 POR QUE SE PREOCUPAR COM A QUALIDADE DE ENERGIA E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA?**

Para entender a importância da qualidade de energia é necessário primeiramente entender seus conceitos iniciais. Basicamente em uma definição física, a qualidade de energia está diretamente relacionada aos fenômenos que alteram as formas de onda de tensão e corrente e suas amplitudes (harmônicas). Estas deformações nas ondas, influenciam diretamente na tensão, corrente e frequência ocasionando assim problemas gerais que vão desde perdas na transmissão por efeito joule, a danificar equipamentos gerais das quais estão utilizando a energia com ausência de qualidade. Devido à alta exigência do consumidor final, preocupado este com o alto custo da energia, somado a problemas pelos quais a ausência de qualidade de energia os causam tantos transtornos, (iluminação com variação, interferências em equipamentos eletrônicos sensíveis as variações, máquinas com sobreaquecimento, etc.), fazem com que a qualidade de energia tenha se tornado assunto recorrente das cadeiras de estudo, projeto, adequação, e soluções inovadoras para o mercado de engenharia de energia em geral. Outro fator importante relacionada a eficiência energética está diretamente ligada ao consumidor final, que quando não segue os padrões estabelecidos pela agência reguladora (ANEEL), está sujeito a multas da mesma, e encontrar esse fator de equilíbrio, para que não ocorra prejuízo nem para os fornecedores (geração, transmissão e distribuição), quanto para os consumidores finais em geral é um desafio. Por todos estes motivos supracitados, é que se faz necessário a preocupação direta dos efeitos da qualidade de energia e eficiência energética, procura por novas fontes de solução para problemas corriqueiros, e apresentação de inovação para o setor, com intuito de impactar a todos que estão inseridos direta ou indiretamente.

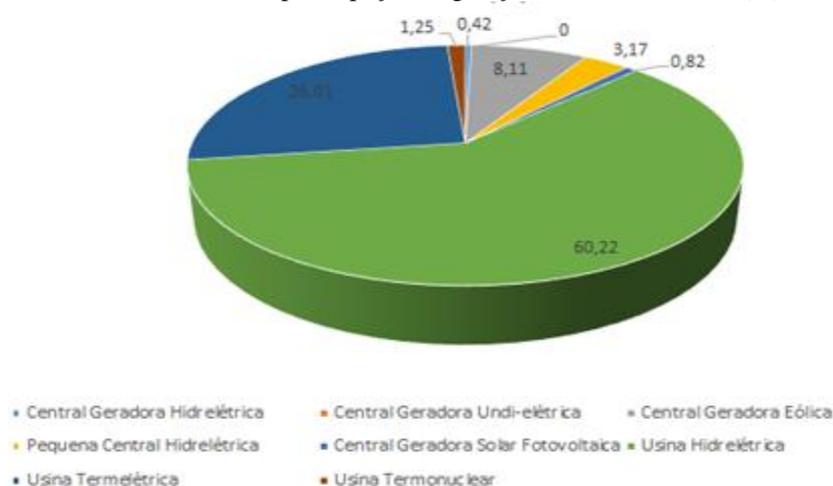
### **3 CONTEXTO E LEGISLAÇÃO NO BRASIL**

O Brasil conta com o Sistema Interligado Nacional (SIN) do qual possui como componentes usinas geradoras de energia, linhas de transmissão, linhas de distribuição, entre outros componentes diversos, que juntos fazem uma integração que abrange todo o território brasileiro. A função desse sistema é conectar as usinas geradoras aos centros de carga das distribuidoras localizados em cada região e permitir que diferentes regiões permutem energia entre si, evitando, com isso, que diferentes regimes de chuvas entre regiões afetem o abastecimento de energia elétrica em nível nacional.

É importante notar que parte da região norte brasileira, que representa apenas cerca de 2% da demanda nacional de energia elétrica, não está integrada ao SIN. Esta pequena parcela não atendida pelo SIN tem seu suprimento fornecido por pequenos sistemas isolados, constituídos principalmente na região amazônica. A tendência é que os sistemas isolados sejam gradualmente integrados ao SIN.

Quanto à geração, a matriz energética brasileira é principalmente hidrelétrica. Cerca de 60% da capacidade de geração de energia do Brasil provêm de usinas hidrelétricas de grande e médio portes e de PCH's (Pequenas Centrais Hidrelétricas), 26% de termelétricas, 8,11% eólicas, sendo estas as de maiores destaques na participação da geração conforme pode ser observado no Gráfico 1. Ressalte-se que as usinas termelétricas são acionadas durante os períodos de estiagem, com o objetivo de poupar os reservatórios das usinas hidrelétricas, ou por desabastecimento dos mesmos. (ANEEL,2018)

Gráfico 1 - Percentual de participação de geração, inseridos no SIN. (%)



Fonte: (ANEEL, 2018)

A predominância das usinas hidrelétricas é justificada pela disponibilidade do elevado potencial hidrelétrico brasileiro, com grandes rios de planalto, alimentados por chuvas tropicais abundantes, constituindo uma das maiores reservas de água doce do mundo.

O Plano Decenal de Expansão de Energia – PDE 2022, divulgado em dezembro de 2013, ao incorporar uma visão integrada da expansão da demanda e da oferta da energia no período de 2013 a 2022 prevê investimentos da ordem de R\$ 1,2 trilhão, dos quais 22,6% correspondem à oferta de energia elétrica, com implantação da capacidade instalada de geração de energia elétrica, com ampliação da capacidade instalada de geração de energia elétrica de 119,5 GW, em 2012, para 183,1 GW, em 2022 (ANEEL, 2018).

### 3.1 Regulação e Fiscalização

Devido à alta capacidade de geração existente no país, somada a complexidade territorial e desafios inerentes ao setor, sua gestão legislativa é constituído por: órgão regulador e fiscalizador das atividades setoriais, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a empresa para a coordenação de operação dos sistemas interligados Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), e a instituição encarregada da gestão das transações comerciais e do mercado atacadista, denominada inicialmente Mercado Atacadista de Energia Elétrica (MAE), sucedido pela Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE). A estrutura regulatório – normativa inicialmente prevista foi revisada em 2001/2002, nesse período, o país enfrentou uma grave crise de racionamento de energia elétrica, o que motivou

a realização dos estudos para correção de disfuncionalidades do modelo em vigente (WALVIS, 2014).

### 3.1.1 Tarifação da Energia Elétrica

A tarifa cobrada pela distribuidora do consumidor cativo de acordo com a Associação Brasileira de Distribuidores de Energia Elétrica (ABRADEE) é definida em R\$/KWh. Na sua composição três importantes fatores são considerados:

- a) Custo com a aquisição de energia elétrica;
- b) Custo com o transporte de energia elétrica até o consumidor, ou seja, transmissão e distribuição;
- c) Encargos e tributos.

A Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) e a Tarifa do Uso do Sistema de Transmissão (TUST) são dois subcomponentes tarifários que remuneram os custos com de operação e de manutenção das redes de distribuição e transmissão, respectivamente. Em 2014, a ABRADEE realizou o cálculo com a composição tarifária média do Brasil, incluindo todos os tipos de consumidores, e concluiu que o valor de energia elétrica é correspondente a 35% do valor total da tarifa; encargos e tributos respondem por 39%, e distribuição e transmissão abocanham 18% e 8%, respectivamente (ABRADEE, 2014).

Logo, as tarifas de fornecimento de energia elétrica são definidas com bases em dois componentes: demanda de potência e consumo de energia. A demanda de potência é medida em quilowatt e correspondente a média de potência elétrica solicitada pelo consumidor à empresa distribuidora. O consumo é medido em quilowatt-hora (kWh) ou em megawatt-hora (MWh) é correspondente ao valor acumulado pelo uso de potência elétrica disponibilizada ao consumidor ao longo de um período de consumo, normalmente de 30 dias. As tarifas de demanda de potência são fixadas em reais por quilowatt (R\$/kW) e as tarifas de consumo de energia elétrica são fixadas em reais por megawatt-hora (R\$/MWh) e especificadas nas contas mensais do consumidor em reais por quilowatt-hora (R\$/kWh).

Nem todos os consumidores pagam tarifas de demanda de potência. Isso depende da estrutura tarifária na qual o consumidor está esquadado. Define –se Estrutura tarifária como sendo o conjunto de tarifas aplicáveis aos componentes de consumo de energia elétrica e/ou demanda de potência, de acordo com a modalidade de fornecimento.

No Brasil, conforme a Tabela 1, as tarifas de energia elétrica estão estruturadas em dois grandes grupos de consumidores: “grupo A” e “grupo B”.

Em alta tensão, as tarifas são binômias, sendo que a alta tensão as tarifas são denominadas de “A” e são divididas em 6 subgrupos.

Em baixa tensão, as tarifas são monômias, sendo que a baixa tensão são denominados de “B” e são divididos em 4 subgrupos.

Tabela 1 - Grupamentos de unidades consumidoras divididas por tensão fornecida

<b>Grupamentos</b>	<b>Descrição</b>
<b>GRUPO A</b>	Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 KV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômia
Subgrupo A1 -	Igual ou superior a 230 KV
Subgrupo A2 -	88 KV a 138 KV
Subgrupo A3 -	69 KV
Subgrupo A3a -	30 KV a 44 KV
Subgrupo A4 -	2,3 KV a 25 KV
Subgrupo AS -	Inferior a 2,3 KV, a partir de sistema subterrâneo de distribuição
<b>GRUPO B</b>	Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 KV, caracterizado pela tarifa monômia
Subgrupo B1 -	Residencial
Subgrupo B2 -	Rural
Subgrupo B3 -	Demais classes
Subgrupo B4 -	Iluminação pública

Fonte: (ANEEL, 2008)

Estas tarifas foram implementadas no início da década de 80, com o objetivo de estimular o consumidor a modificar o perfil de consumo e/ou demanda, para reduzir suas exigências nos horários em que o sistema está mais sobrecarregado. Em outras palavras, essas tarifas objetivam induzir a melhoria do fator de carga, bem como estimular a redução do consumo nos meses que os reservatórios de hidrelétricas estão sendo esvaziados.

As tarifas horo-sazonais são divididas em: - Tarifas Azuis; - Tarifas Verdes; Conforme resolução 456 de 2000 da ANEEL, tem –se:

- a) Tarifa Azul: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.
- b) Tarifa Verde: modalidade estruturada para aplicação de tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência.
- c) Tarifa Branca: Compreende os consumidores inscritos no grupo B, que forem considerados de baixa renda, com exceção daqueles incluídos nos grupos B4 e B1. Para estes, a tarifa cobrada pelo varia em função da hora utilizada.

Segundo ANEEL (2008), são cobradas em função do horário do dia e época do ano:

- a) Horário de ponta (HP): período definido pela concessionária e com por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça - feira de carnaval, dia de finados e os demais feriados definidos por lei federal, considerando as características do seu sistema elétrico.
- b) Horário fora de ponta (HFP) período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.
- c) Período úmido (U): período de 5 (cinco) meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.
- d) Período seco (S): período de 7 (sete meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

A Tarifa Azul é definida com demanda de potência (kW) um valor para o horário de ponta (HP) e um valor para horário fora de ponta (HFP) e consumo de energia (kWh) um valor para horário de ponta em período úmido (PU), um valor para horário fora de ponta em um período úmido (FU), um valor para horário de ponta em período seco (PS), e um valor para horário fora de ponta em período seco (FS).

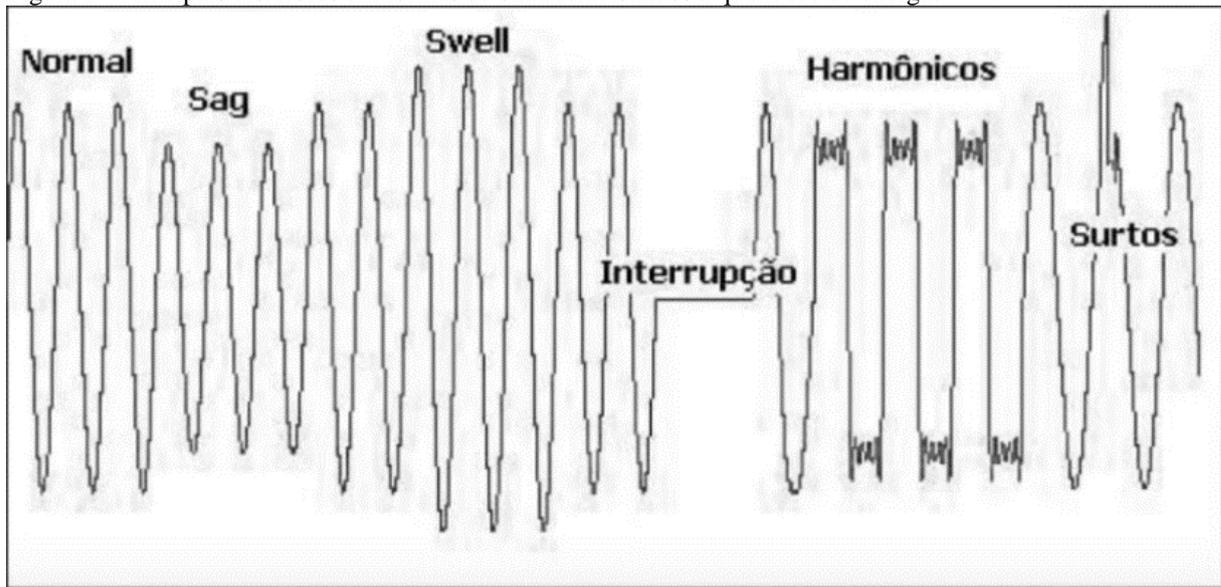
A Tarifa Verde é definida com demanda de potência (kW) um valor único, e o consumo de energia (kWh) um valor para o horário de ponta em período úmido (PU), um valor para o horário fora de ponta em período úmido (FU), um valor para horário de ponta em período seco (PS), e um valor para horário fora de ponta em período seco (FS) (WALVIS, 2014).

A escolha do modelo tarifário horário azul ou verde é facultativa, sendo o consumidor responsável por identificar qual enquadramento é mais vantajoso, de acordo com o seu perfil de consumo. Aqui se faz pertinente a análise e consultoria por parte do profissional engenheiro eletricitista.

#### 4 DEFINIÇÃO DOS DISTÚRBIOS QUE AFETAM A QUALIDADE DE ENERGIA

A Figura 1 ilustra, a partir de diferentes formas de onda, os distúrbios comumente encontrados em sistema elétrico que afetam a qualidade de energia.

Figura 1 - Principais distúrbios em formas de onda relacionados à qualidade de energia



Fonte: (MARTINHO, 2009, p. 16)

A Figura 2, apresentada por Dugan (2002, p.14), mostra as categorias dos itens de qualidade e as características típicas dos fenômenos que contribuem para a perda da qualidade de um suprimento elétrico. Tais características mostram o conteúdo espectral, duração típica juntamente com a amplitude típica dos efeitos.

Figura 2 - Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos nos sistemas elétricos.

	Categorias	Duração Típica	Magnitude Típica de Tensão
1	Transitório	-	-
1.1	Impulsivo	-	-
1.1.1	Nanosegundos	< 50 ns	-
1.1.2	Microsegundos	50 ns – 1 ms	-
1.1.3	Milisegundos	> 1 ms	-
1.2	Oscilatório	-	-
1.2.1	Baixa frequência	0,3 – 50 ms	0 – 4 pu
1.2.2	Média frequência	20 $\mu$ s	0 – 8 pu
1.2.3	Alta frequência	5 $\mu$ s	0 – 4 pu
2	Varição de curta duração	-	-
2.1	Instantânea	-	-
2.1.1	Interrupção	0,5 – 30 ciclos	< 0,1 pu
2.1.2	Afundamento	0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 pu
2.1.3	Elevação	0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 pu
2.2	Momentânea	-	-
2.2.1	Interrupção	30 ciclos – 3 s	< 0,1 pu
2.2.2	Afundamento	30 ciclos – 3 s	0,1 – 0,9 pu
2.2.3	Elevação	30 ciclos – 3 s	1,1 – 1,4 pu
2.3	Temporária	-	-
2.3.1	Interrupção	3 s – 1 min	< 0,1 pu
2.3.2	Afundamento	3 s – 1 min	0,1 – 0,9 pu
2.3.3	Elevação	3 s – 1 min	1,1 – 1,2 pu
3	Varição de longa duração	-	-
3.1	Interrupção sustentada	> 1 min	0,0 pu
3.2	Subtensão	> 1 min	0,8 – 0,9 pu
3.3	Sobretensão	> 1 min	1,1 – 1,2 pu
4	Desbalanceamento de tensão	Permanente	0,5 – 2%
5	Distorção na forma de onda	-	-
5.1	Offset CC	Permanente	0 – 0,1 %
5.2	Harmônicos	Permanente	0 – 20%
5.3	Interharmônicos	Permanente	0 – 2%
5.4	Recorte	Permanente	-
5.5	Ruído	Permanente	0 – 1%
6	Flutuação de tensão	Intermitente	-
7	Variações de frequência	< 10 s	-

Fonte: (DUGAN, 2002, p. 14)

Para analisar a qualidade de energia e eficiência energética é necessário a caracterização dos fenômenos eletromagnéticos que interferem a energia elétrica. No texto a seguir detalha-se cada um dos itens, explicando os fatos geradores, problemas e possíveis medidas a serem tomadas para evitar tais fenômenos.

#### 4.1 Fator de Potência

A corrente elétrica total que circula numa carga qualquer é resultante da soma vetorial de duas componentes de corrente elétrica. Uma componente que é denominada de corrente

ativa e a outra que é denominada de corrente reativa. A soma vetorial da corrente ativa e da corrente reativa é denominada de corrente aparente.

Como exemplo de cargas que consomem energia reativa temos: transformadores, motores de indução, reatores. Como exemplo de cargas que fornecem energia reativa tem – se: capacitores, motores síncronos (superexcitados), condensadores síncronos e etc.

Por Convenção temos que as cargas que consomem energia reativa são denominadas de cargas indutivas. As cargas que fornecem energia reativa são denominadas de cargas capacitivas. As cargas que não consomem e nem fornecem energia reativa são chamadas de cargas resistivas.

As cargas indutivas necessitam de campo eletromagnético para seu funcionamento, por isso sua operação requer potência ativa e potência reativa. Potência ativa é aquela que efetivamente realiza trabalho, gerando calor, luz, movimento. É medida em kW. Já a potência reativa é usada apenas para criar e manter os campos eletromagnéticos das cargas indutivas. É medida em kVAr.

A potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, ocupando um espaço no sistema elétrico que poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa.

Fator de potência, apresentado na Equação (01) é definido como a relação entre a potência ativa e a potência aparente consumidas por um dispositivo ou equipamento, independente das formas que as ondas de tensão e corrente apresentem. Esse valor varia entre 0 e 1. Indica a eficiência do uso da energia elétrica. Quanto mais próximo de 1 seu valor, mais eficiente é considerado o sistema em questão (CAPELLI,2016).

$$FP = \frac{P}{S} = \cos(\theta_V - \theta_I) \quad (01)$$

Onde:

FP = Fator de Potência

P = Potência Ativa [W]

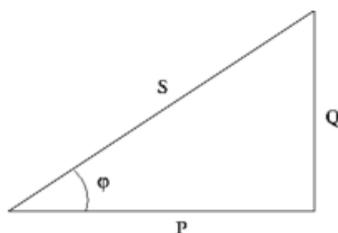
S = Potência Aparente (composto pelo valor modular da potência complexa) [VA]

$\theta_V$  = Ângulo de fase de tensão [°]

$\theta_I$  = Ângulo de fase de corrente [°]

O triângulo das potências ilustrado na Figura 3 relaciona as potências ativa, aparente e reativa.

Figura 3 - Triângulo das potências.



Fonte: (CAPELLI, 2016, p 70)

Onde:

S = Potência aparente

P = Potência ativa

Q = Potência reativa

$\varphi$  = Ângulo de defasagem entre as potências aparente e ativa

Em um motor, a potência útil é aquela que se transforma em torque mecânico no motor. A reativa gera o magnetismo e calor nos enrolamentos (perdas), e a potência aparente é a soma da potência útil e o desperdício. Segundo Capelli, (2016, p. 80), quanto menor a potência reativa, menor o desperdício, ou seja quanto maior o fator de potência, mais eficaz é o sistema.

Um baixo fator de potência causa mais problemas do que apenas desperdício na instalação. Ter uma baixa defasagem angular significa maior quantidade de energia reativa que circula pelas linhas de alimentação, portanto um baixo fator de potência prejudica não só a instalação, mas também a rede na qual ela está ligada, por isso as instalações com fator de potência menores a 0,92 estão sujeitas à multa na fatura de energia elétrica.

Segundo Capelli, (2016, p. 82), as consequências mais significativas do baixo fator de potência são:

- a) Acréscimo na conta de energia elétrica;
- b) Limitação da capacidade dos transformadores;
- c) Quedas e flutuação da tensão;
- d) Sobrecarga nos dispositivos de manobra (chaves, contadores etc.) e consequente redução da vida útil;
- e) Perdas na linha por efeito joule:

- f) Necessidade de aumento dos condutores;
- g) Necessidade de aumento dos equipamentos de proteção.

A correção do fator de potência consiste em equilibrar a quantidade de energia reativa indutiva com a energia reativa capacitiva de forma que uma neutralize a outra. A utilização de compensadores estáticos ainda é pouco utilizada devido ao custo maior, e o compensador síncrono, por ser uma máquina girante, tem como desvantagem a necessidade da manutenção periódica, sendo necessário parar o compensador, além de apresentar um custo maior que a instalação de bancos de capacitores (CAPELLI, 2016).

A utilização de capacitores para correção do fator de potência é uma das formas mais utilizadas na indústria pela simplicidade e custo, no entanto no momento da energização os capacitores tendem a manter a tensão zero e para isso a corrente passa pelo capacitor como se estivesse em curto e essa variação de corrente num curto espaço de tempo carrega o capacitor com uma tensão elevada, que ao ser descarregada na rede pode provocar um transiente impulsivo que pode chegar a 1,3 a 1,5 Por Unidade (pu). (DUGAN, 2002, p. 17).

O entendimento do fator de potência se faz necessário, uma vez que todo excesso de potência reativa é tarifado pela concessionária, mesmo que esta potência não resulte essencialmente na produção de trabalho. Segundo a Resolução Normativa 414/2010 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010. p. 95), o valor de referência para fator de potência é 0,92. Ou seja, o módulo da potência ativa consumida deve ser igual ou maior do que 92% do valor modular da potência complexa entregue. Alterações neste valor indicam excesso de potência reativa, o que deve ser corrigido.

## **4.2 Transitórios**

Transitórios são caracterizados como eventos indesejáveis no sistema, que são de curta duração, mas podem implicar tensões e correntes nos equipamentos que superem as condições nominais de funcionamento.

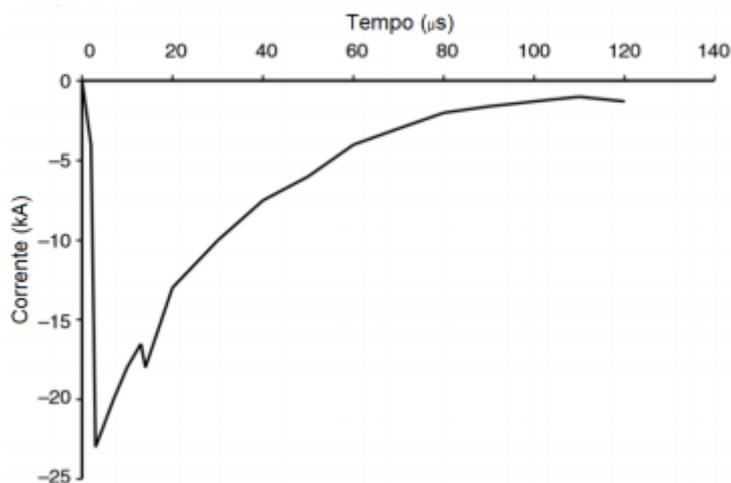
A duração de um transitório é pequena, porém de grande importância, uma vez que os equipamentos presentes nos sistemas elétricos estarão submetidos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. Fenômenos transitórios podem ser classificados em dois grupos: os chamados transitórios impulsivos e os oscilatórios, causados por descargas atmosféricas e por chaveamentos respectivamente.

#### 4.2.1 Transitório Impulsivo

Os transitórios impulsivos são normalmente causados por descargas atmosféricas. Definida por alterações imediatas nas condições de regime permanente de tensão e/ou corrente, apresenta impulsos unidirecionais de polaridade, sendo, positivas e negativas.

A Figura 4, ilustra a característica de um transitório impulsivo, a descarga atmosférica provoca o distúrbio no sistema, atingindo o máximo sinal, alcançando uma corrente elétrica de aproximadamente 23 kA, este impulso ocorre em 4  $\mu$ s após a descarga, sua amplitude reduz a metade do seu valor no intervalo em 25  $\mu$ s. Sua estabilidade é alcançada após de 80  $\mu$ s do fenômeno relacionado.

Figura 4 - Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica.



Fonte: (DUGAN, 2002, p. 16)

Transitórios impulsivos normalmente não são percebidos em pontos muito distantes de sua origem, porem quando incidem sobre as linhas de transmissão, tem como seu principal caminho o condutor fase, no primário ou no secundário, causando altas sobreensões no sistema.

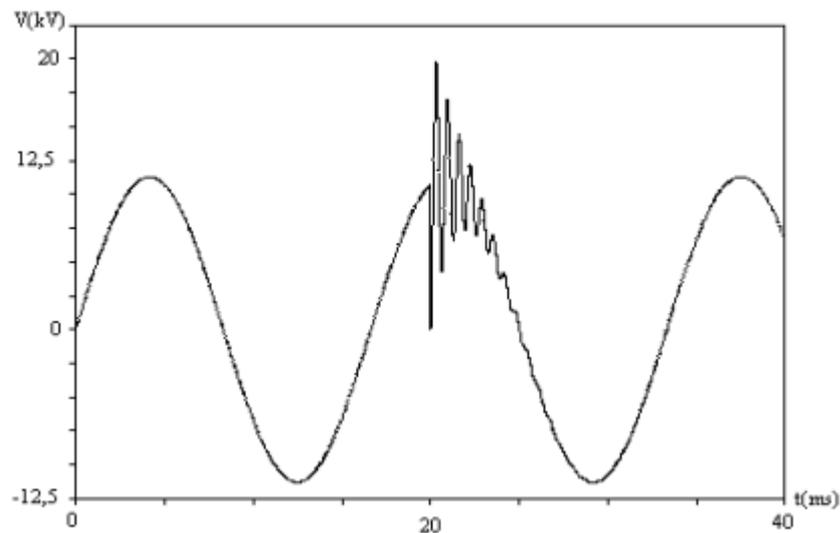
#### 4.2.2 Transitório Oscilatório

Denominado como transitório oscilatório é uma subta alteração indesejável na condição permanente de tensão e/ou corrente, também apresentam impulsos unidirecionais de

polaridade. Os transitórios oscilatórios são decorrentes de energização de linhas, corte de carga indutiva, eliminação de faltas, chaveamento de bancos de capacitores e transformadores.

É observado na Figura 5, a representação do comportamento de sinal elétrico de um sistema, provocado pelo acionamento de um banco de capacitores.

Figura 5 - Transitório oscilatório provocado pelo chaveamento de um banco de capacitores.



Fonte: (DUGAN, 2002. p. 18)

Cuidados especiais devem ser tomados em instalações elétricas com bancos automáticos de capacitores, pois o chaveamento destes capacitores sempre provocará transitórios que podem danificar equipamentos elétricos mais sensíveis. Filtros de alta frequência e transformadores isoladores são recomendados para proteger contra este tipo de transitório.

### 4.3 Variações de Tensão de Curta Duração

As variações de tensão de curta duração, são geralmente causadas por condições de faltas no sistema elétrico e pela energização de grandes blocos de carga que requeram elevadas correntes de partida.

Dependendo da localização de falta e das condições operacionais do sistema, a falta pode causar uma elevação de tensão (*Swell*), uma depressão de tensão (*Sag*) ou, ainda a perda completa da tensão (*Interrupção*).

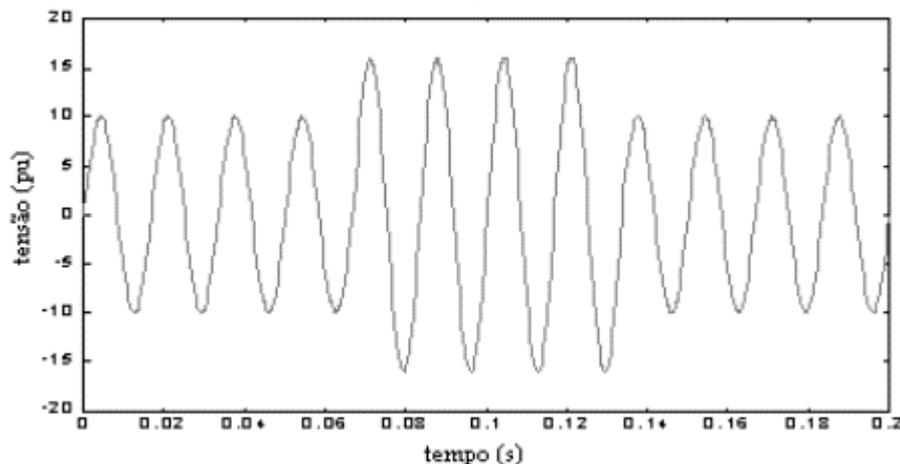
A seguir, são descritos os tipos de variação de tensão de curta duração, bem como apresentados respectivamente nas Figuras 6, 7 e 9, gráficos que ilustram cada um.

#### 4.3.1 Salto de Tensão (Swell)

Elevação de tensão, também conhecida como “*swell*”, é definida como um aumento de 1,1 pu e 1,8 pu na tensão eficaz, para a mesma frequência de rede com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. (DUGAN, 2002).

A Figura 6 ilustra uma elevação de tensão causada por uma falta fase-terra, no caso, a elevação foi analisada numa fase sã do circuito, sendo comum acontecer nesta fase uma elevação de tensão. Nota-se um acréscimo de 60 % na tensão por um período de 4 ciclos.

Figura 6 - Elevação de tensão de 60 % originado por uma falta fase-terra.



Fonte: (DUGAN, 2002. p. 19)

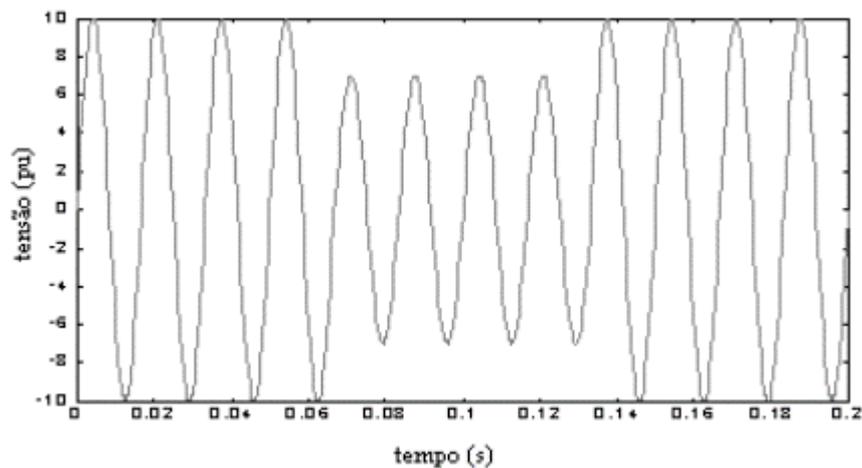
Segundo Martinho (2009), este fenômeno está associado com as condições de falta no sistema, principalmente aos curtos-circuitos fase-terra, visto que nestas condições as fases não defeituosas tendem a sofrer uma elevação de tensão. Dugan (2002), afirma que este fenômeno pode também estar associado a saída de grandes blocos de cargas ou a energização de capacitores, porém com uma incidência pequena se comparada com sobreensões provenientes de faltas fase-terra nas redes de transmissão.

O salto de tensão pode causar sérios danos a banco de capacitores, aumento de luminosidade, conduzir à má operação de equipamentos, ou até mesmo a queima de aparelhos eletrônicos com a queima de varistores e do diodo zener.

#### 4.3.2 Depressão de Tensão (*Sag*)

Afundamento de tensão, também conhecido como “sag”, nada mais é do que, como o próprio nome diz, uma subtensão de curta duração caracterizada por uma redução no valor eficaz de tensão, entre 0,1 e 0,9 pu, na frequência fundamental, com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. (OLIVEIRA). A Figura 7 mostra um afundamento de tensão típico, resultante de uma falta fase-terra. Observa-se um decréscimo de 30 % na tensão por um período de aproximadamente de 4 ciclos.

Figura 7 - Afundamento de tensão de 30 % originado por uma falta fase-terra.

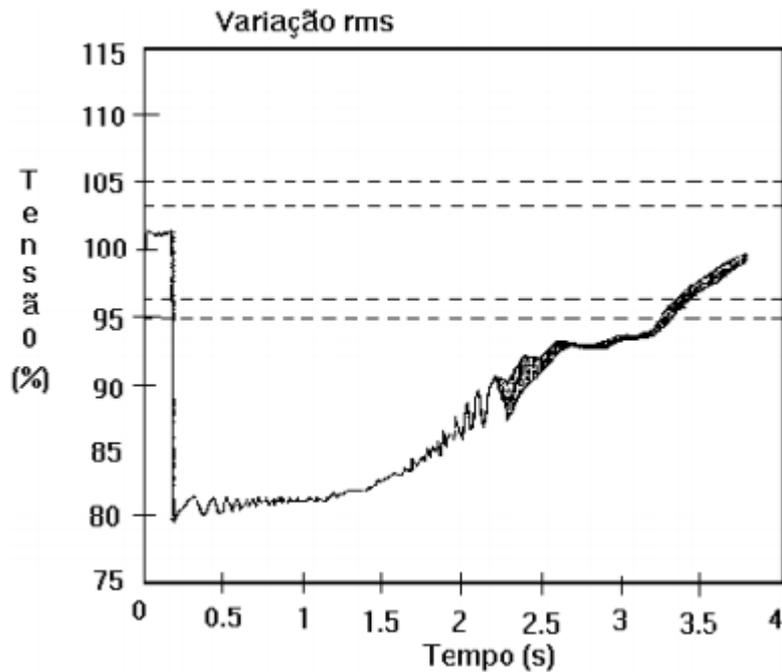


Fonte: (DUGAN, 2002, p. 22)

Este tipo de distúrbio está associado, principalmente, a faltas em sistemas de transmissão e distribuição. Mas pode também ser causado pela energização de grandes cargas, partidas de grandes motores e pela corrente de energização de um transformador.

Como é conhecido, durante a partida de um motor de indução, este absorve uma corrente de 6 a 10 vezes a corrente nominal, resultando em uma queda significativa na tensão de suprimento. Para ilustrar o afundamento de tensão causada pela partida de um motor de indução tem-se a Figura 8.

Figura 8 - Afundamento de tensão causado pela partida de um motor.



Fonte: (DUGAN, 2002, p.22)

Observa-se que, neste caso a tensão cai rapidamente para 0,8 pu e, num período de tempo de aproximadamente 3 segundos, retorna a seu valor nominal.

Martinho (2009, p.41), afirma que este tipo de distúrbio pode afetar e comprometer o funcionamento, ou até mesmo a vida útil de equipamentos, principalmente aqueles microcontrolados ou que dispõem de circuitos eletrônicos para seu funcionamento. Considerando ainda que dispositivos eletrônicos e computacionais fazem de uso de memória volátil, que se referem a memórias eletrônicas que são apagadas após serem desligadas, qualquer comprometimento na energia que possa provocar o travamento ou desligamento deste tipo de memória, levará à perda de dados, o que pode comprometer o controle de processos, além da perda de segurança de produtividade.

A solução mais empregada para minimizar os efeitos dessas perturbações e para alimentação das cargas mais sensíveis é o emprego de sistemas nobreaks, ou ainda, a utilização de transformadores ferro – ressonantes, conhecidos também como CUTs (Constant Voltage Transformers). No caso dos afundamentos de tensão provocados por partida de motores, modernamente são empregados os sistema de partida suave (soft – start), que

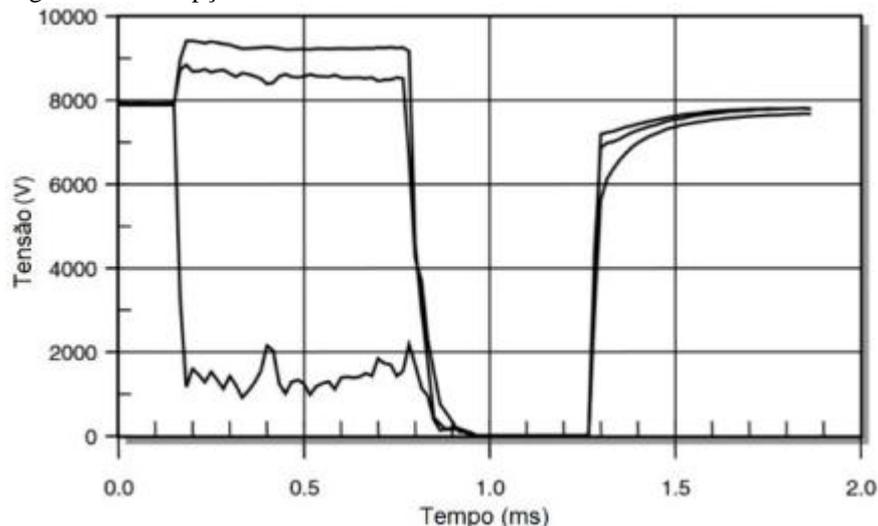
proporcionam a partida do motor de forma gradativamente e controlada, eliminando os picos de corrente existentes nas partidas convencionais.

#### 4.3.3 Interrupção

De modo geral, as interrupções quase sempre irão causar o desligamento ou mau funcionamento dos equipamentos eletrônicos. Uma interrupção de curta duração ocorre quando a tensão de suprimento decresce para um valor menor que 0,1 pu por um período de tempo não superior a 1 minuto. (DUGAN, 2002, p. 20).

Algumas interrupções podem ser percebidas por um afundamento de tensão quando estas são devidas a faltas no sistema superior. O afundamento de tensão ocorre no período de tempo entre o início de uma falta e a operação do dispositivo de proteção do sistema. A Figura 9 mostra uma interrupção momentânea devido a afundamento de tensão de 80 % de uma das fases de um sistema trifásico, criando uma instabilidade, provocando o acionamento do dispositivo de proteção após 7 ms, ocorrendo a interrupção. Decorridos de 4 ms, religadores são acionados para restabelecer a conexão.

Figura 9 - Interrupção de tensão devido a falha de um sistema trifásico.



Fonte: (DUGAN, 2002. p.21)

As soluções para estas interrupções normalmente devem partir das concessionárias, que devem mudar o sistema de proteção. Do lado dos consumidores devem ser instalados sistemas interruptos de suprimento (*Nobreaks*) para as cargas críticas e mais sensíveis a essas interrupções.

## 4.4 Variações de Tensão de Longa Duração

As variações de tensão de longa duração englobam variações de valor eficaz da tensão durante um tempo superior a 1 minuto. (DUGAN, 2002).

Portanto, são considerados distúrbios de regime permanente. São classificados em sobretensões, subtensões ou interrupções sustentadas. Todas elas são geralmente causadas por variações de carga e por operações de chaveamento do sistema, sendo descritas a seguir.

### 4.4.1 Sobretensão Sustentada

As sobretensões são caracterizadas pelo aumento do valor eficaz da tensão para 1,1 pu à 1,2 pu durante um tempo superior a 1 minuto. Ocorrem com menor frequência e, nos casos em que sua presença for constatada na entrada de energia, a distribuidora deverá ser imediatamente comunicada para regulação de tensão de suprimento.

As sobretensões de longa duração podem ser o resultado do desligamento de grandes cargas ou da energização de banco de capacitores. Transformadores cujo taps são conectados erroneamente também podem causar sobretensões.

Dentre algumas opções para a solução de tais problemas, destaca-se a troca de banco de capacitores fixos por bancos automáticos, possibilitando um controle maior do nível de tensão e a instalação de compensadores estáticos de reativos.

### 4.4.2 Subtensão Sustentada

Uma subtensão é caracterizada por decréscimo do valor eficaz da tensão para 0,8 pu a 0,9 pu, na frequência da rede, e com período de duração superior a 1 minuto.

As subtensões são causadas por sobrecargas em alimentadores, a entrada ou saída de um banco de capacitores que, conseqüentemente, o excesso de reativo transportados pelos circuitos de distribuição, o que limita a capacidade do sistema no fornecimento de potência ativa e ao mesmo tempo eleva a queda de tensão. As subtensões causam o aumento das perdas por aquecimento em motores de indução, parada de operação de dispositivos eletrônicos e desligamento de sistemas de comando de motores.

As medidas corretivas para subtensões é a instalação de estabilizadores de tensão no caso de cargas mais sensíveis e de menor potência ou, ainda, transformadores de tap variável e dispositivos de compensação de impedância, tais como capacitores.

#### 4.4.3 Interrupções Sustentadas

Interrupção sustentada se define quando a tensão de suprimento permanece em zero por um período de tempo superior a 1 minuto. Ao ocorrer uma falta de caráter permanente, o dispositivo de proteção executa três ou quatro tentativas de reestabelecer o sistema até que o bloqueio definitivo seja efetuado. Quando ocorrem são permanentes e requerem intervenção humana para restaurar o sistema à condição operacional.

Martinho (2009) diferencia as interrupções sustentadas programadas das inesperadas. São programadas quando provocadas pelo agente de distribuição e fornecimento de energia, para procedimentos de manutenção ou determinadas manobras que demandam o desligamento de fornecimento. As interrupções inesperadas, por outro lado, ocorrem sem que possam ser antecipadas ou evitadas, como eventos decorrentes de descargas atmosféricas, ruptura de condutores por fenômenos naturais ou acidentes, entre outros.

Seja a interrupção de natureza sustentada ou inesperada, o sistema elétrico deve ser projetado e operado de forma a garantir que:

- a) O número de interrupções seja mínimo.
- b) Uma interrupção dure o mínimo possível.
- c) O número de consumidores afetados seja pequeno.

Qualquer desligamento de equipamentos de forma sustentada nas indústrias acarreta prejuízos elevados. No caso de interrupção sustentada o prejuízo é ainda maior, visto que o tempo de duração é muito grande, comparado com o da interrupção de curta duração, retardando o processo produtivo.

#### 4.5 Desequilíbrio de Tensão

Também chamado de Desbalanceamento de Tensão, refere-se à má distribuição das fases em um sistema, de forma que exista excesso de carga em uma ou mais fases, em relação à média geral do sistema (DUGAN, 2002. p.24).

Parâmetro dado em valores percentuais, é possível ser calculado por meio da equação (2) (PRODIST, 2016. p. 25):

$$FD\% = \frac{V_-}{V_+} \times 100 \quad (2)$$

Sendo:

FD = Fator de Desequilíbrio

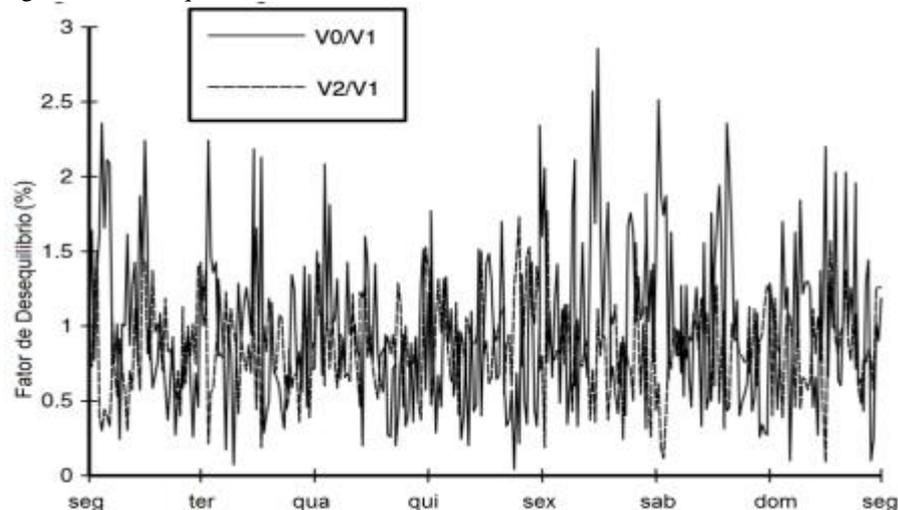
$V_-$  = Magnitude da tensão de sequência negativa (eficaz)

$V_+$  = Magnitude da tensão de sequência positiva (eficaz)

Deste desequilíbrio, podem resultar sobrecarga de componentes estruturais das instalações, o que exigiria investimentos além do necessário para condicionar o sistema a cargas que, se melhor distribuídas nos barramentos, poderiam ser evitados.

A Figura 10 apresenta um gráfico de desbalanceamento que alcança picos de quase 3%, em um consumidor residencial

Figura 10 - Desequilíbrio de tensão em consumidor residencial



Fonte: (DUGAN, 2002. p.25)

#### 4.6 Distorção na Forma de Onda

Segundo Dugan (2002), a distorção de forma de onda é o desvio, em regime permanente, da forma da corrente ou tensão em relação ao sinal senoidal puro.

Existem alguns tipos principais de distorções de forma de onda, os quais são representados a seguir:

- a) Desvio do Nível CC;
- b) Harmônicos;
- c) Interharmônico;
- d) Corte (Notch);
- e) Ruídos.

#### 4.6.1 Desvio de Nível CC

A presença de tensão CC ou corrente CC em sistema elétrico CA é denominado “DC offset”. Dugan (2002), afirma que este fenômeno pode ocorrer devido ao efeito de retificação de meia onda.

O nível CC em redes de corrente alternada pode levar à saturação de transformadores, resultando em perdas adicionais e redução de vida útil. Pode também causar corrosão eletrolítica dos eletrodos de aterramento e de outros conectores.

#### 4.6.2 Harmônicos

Harmônicos são tensões ou correntes senoidais que tem frequências múltiplas na frequência fundamental. Somadas às componentes fundamentais de tensão e corrente, estes harmônicos distorcem as formas de onda e são oriundas de equipamentos e cargas com características não-lineares instaladas no sistema de energia.

Segundo a ANEEL (2016. p. 22), utilizam-se as seguintes formulações para medição da distorção harmônica individual Equação (03) e total Equação (04), para comparação com parâmetros preestabelecidos de referências globais.

$$DIT_h \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (03)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{m\acute{a}x}} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (04)$$

Onde:

$DIT_h$  = Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

$DTT$  = Distorção harmônica total de tensão

$V_h$  = Tensão harmônica de ordem h

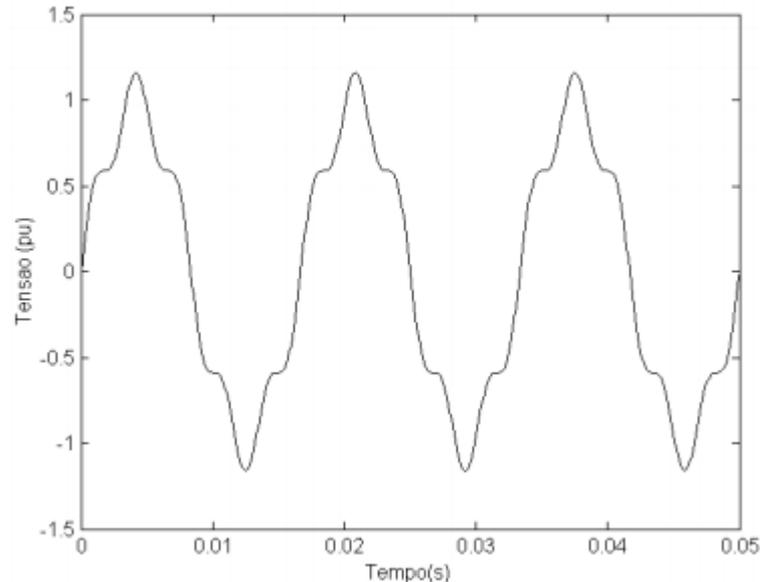
h = Ordem harmônica

$h_{m\acute{a}x}$  = Ordem harmônica máxima

$V_1$  = Tensão fundamental medida

A Figura 11 evidencia as deformações na forma de onda por consequência de distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.

Figura 11 - Forma de onda com distorções harmônicas de 3ª e 5ª ordem.



Fonte: (DUGAN, 2002. p. 26)

A injeção de corrente harmônica, por parte de consumidores, os quais utilizam da operação de cargas não – lineares como fornos a arco, fornos de indução, conversores estáticos, inversores de frequência, máquinas de solda, lâmpadas fluorescentes entre outros, pode causar distorção na forma de onda da concessionária, ou seja, estas deformações prejudicam não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica.

#### 4.6.3 Interharmônicos

São formas de ondas de tensões e correntes que apresentam componentes de frequência que não são múltiplos inteiros da frequência com a qual o sistema é suprido e designado a operar. Normalmente originados de conversores de frequência estática, fornos de indução, dispositivos que produzem arcos voltaicos, entre outros.

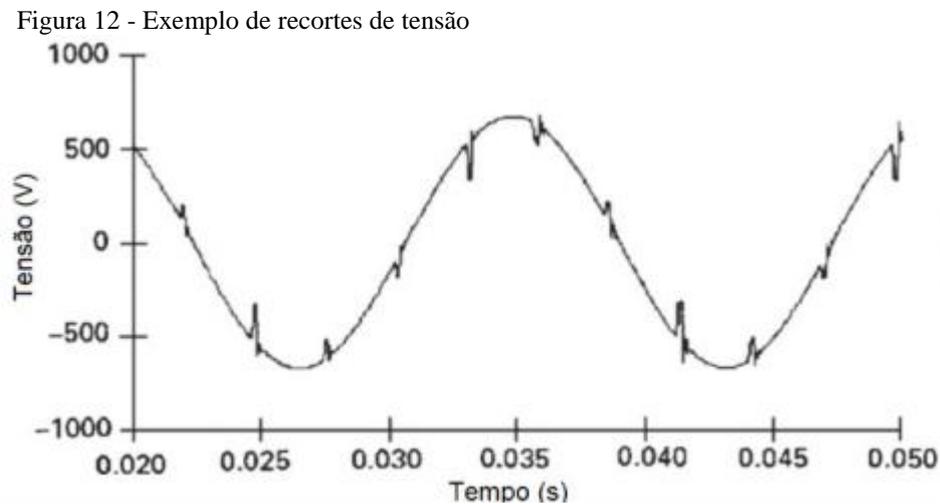
Os efeitos deste fenômeno não são bem conhecidos, mas é admitido que podem afetar a transmissão de sinais portadores e a induzir *flicker* (oscilação) visual no display de equipamentos, lâmpadas fluorescentes, monitores, etc. (DUGAN, 2002. p.27).

Por não serem múltiplos de frequência da rede, normalmente são desconsiderados em análise de qualidade de energia, devido à pequena influência em valores nominais e comerciais pertinentes às normas de tarifação e controle.

#### 4.6.4 Corte (*Notch*)

Corte é um distúrbio periódico da tensão, causado pela operação normal dos equipamentos que utilizam eletrônica de potência. Por se tratar de um comportamento contínuo do sinal, o recorte é identificado por meio de análise de harmônicas, uma vez que ele próprio é também uma distorção harmônica. No entanto, por sua natureza e pelas altas frequências das componentes associadas, estes distúrbios podem não ser lidos corretamente por medidores de harmônicos e, por isso, costumam ser tratados como casos especiais (DUGAN, 2002. p. 27).

Podem-se observar na Figura 12 que em determinados momentos de transposição de correntes entre fases do conversor trifásico, ocorre um curto-circuito que tende a zerar a tensão, instantaneamente, comprometendo a qualidade do sinal.



Fonte:(DUGAN, 2002. p. 28)

A principal fonte causadora de corte de tensão são os conversores trifásicos. Em virtude do alto grau harmônico associado a este efeito, o circuito sai do estado de recorte quase imediatamente, não havendo tempo de zerar absolutamente o valor de tensão.

#### 4.6.5 Ruídos

Ruído é definido como um sinal elétrico indesejado, contendo uma larga faixa espectral com frequências menores que 200 kHz, as quais são superpostas às tensões ou correntes de fase, ou encontradas em condutores de neutro em linhas de transmissão. (DUGAN, 2002).

Normalmente, este tipo de interferência é resultado de operações defeituosas de equipamentos, instalação inadequada de componentes no sistema da concessionária ou dos consumidores e aterramentos impróprios.

O problema pode ser minimizado com o uso de filtros, transformadores isoladores e alguns condicionadores de linha.

#### 4.7 Flutuação de Tensão

Flutuação de tensão são variações sistemáticas no perfil da tensão ou uma série de variações aleatórias na magnitude da tensão, as quais, normalmente não excedem o limite especificado de 0,95 pu até 1,05 pu.

Referido na literatura também como *flicker* (DUGAN, 2002. p. 28), termo derivado do inglês que apresenta o efeito de “pisca” que lâmpadas apresentam quando o sistema onde estão inseridas recebe este tipo de distúrbio.

Qualquer carga que apresenta variação de corrente, principalmente da componente reativa, pode causar flutuação de tensão, tais como, fornos a arco, laminadores, máquinas de solda, etc.

#### 4.8 Variação de Frequência

Variações na frequência de um sistema elétrico são definidas como sendo desvios no valor da frequência fundamental deste sistema. No Brasil, a frequência fundamental é de 60 Hz. (DUGAN, 2002).

Em qualquer instante, a frequência depende do balanço entre a carga e a geração disponível. Quando este equilíbrio é alterado, pequenas variações de frequência deverão ocorrer.

Variações de frequência que ultrapassam os limites de operação (variações na faixa de  $60 \pm 0,5$  Hz) podem ser causadas por faltas em sistemas de transmissão, saída de um grande bloco de cargas ou pela saída de operação de uma grande fonte de geração.

As variações de frequência podem afetar a operação normal de máquinas rotativas, mas, devido a interconexão dos sistemas elétricos modernos, estes distúrbios são raros de acontecer. Eles são mais prováveis de acontecer em sistema de consumidores que possuem geração própria, quando passam a operar na configuração isolada.

## **5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA ACERCA DE MODELAGEM ESTATÍSTICA**

Em análise das coletas de dados dos fenômenos eletromagnéticos que produzem os distúrbios apresentados anteriormente, é possível implementar soluções que venham restabelecer os indicadores propostos pelas normas vigentes, proporcionando eficiência energética e qualidade de energia. Para que estes problemas sejam sanados, é importante que os dados coletados sejam manuseados de forma a manter a confiabilidade do estudo.

Martinho (2009, p.23) demonstra que não basta apenas coletar os dados, mas também compreendê-los e, principalmente, torna-los compreensíveis às pessoas interessadas, as quais muitas vezes não possuem conhecimentos técnicos necessários para realizar esta interpretação ou tratamento dos valores apurados.

O engenheiro analista deve, a partir de ferramentas estatísticas qualificar os dados coletados, assegurando a correta representação amostral de tais registros, e trata-los de forma coerente e para que possa ser apresentado de maneira compreensível ao interlocutor.

No texto a seguir, é apresentado uma das maneiras de realizar o tratamento dos dados, sendo uma importante ferramenta estatística denominada como desvio padrão amostral, onde permite atribuir confiabilidade ao processo de tratamento dos dados.

### **5.1 Desvio Padrão Amostral**

Com o intuito de apresentar o grande número de dados coletados por meio de medição instrumental, é usado como ferramenta estatística o desvio padrão amostral, onde segundo Triola (2008, p.76), trata-se de um tipo de medida de variação, que representa um desvio médio a partir da média aritmética, que por sua vez é uma representação de variação dos termos reais medidos em torno da média aritmética destes valores.

Apresentar estes valores em relatório ou laudo, de forma compreensível e compactada, demanda o tratamento dos dados. Assim, após a coleta e tubulação dos dados, estes são submetidos ao modelo estatístico representado pela Equação (05), que determinará sua média aritmética.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n X_i \quad (05)$$

Sendo:

$\bar{x}$  = Média Aritmética de valores amostrais;

$n$  = Quantidade de valores no conjunto de dados;

$\Sigma$  = Operador matemático somatório;

$X_i$  = Cada um dos valores amostrais coletados.

O valor da média aritmética é obtida com o somatório dos dados coletados, e posteriormente dividido pela quantidade de dados, originando em um único valor. De posse ao valor da média aritmética, e dos dados originais, realiza-se uma nova operação estatística, apresentado na Equação (06), proporcionando o desvio padrão amostral.

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^n (X_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (06)$$

$S$  = Desvio Padrão Amostral;

$\Sigma$  = Operador matemático somatório;

$\bar{x}$  = Média Aritmética de valores amostrais;

$n$  = Quantidade de valores no conjunto de dados amostrais.

Associado a um determinado desvio padrão, por meio de um valor médio dos conjuntos de dados amostrais, é possível tabelar os resultados das médias aritméticas agrupadas dentro de indicadores e regras estabelecidas por normas.

Com isto, todos os dados coletados no estudo a seguir foram submetidos às técnicas e ferramentas estatísticas, tornando compreensíveis as pessoas que não tenham uma profunda compreensão técnica dos fenômenos.

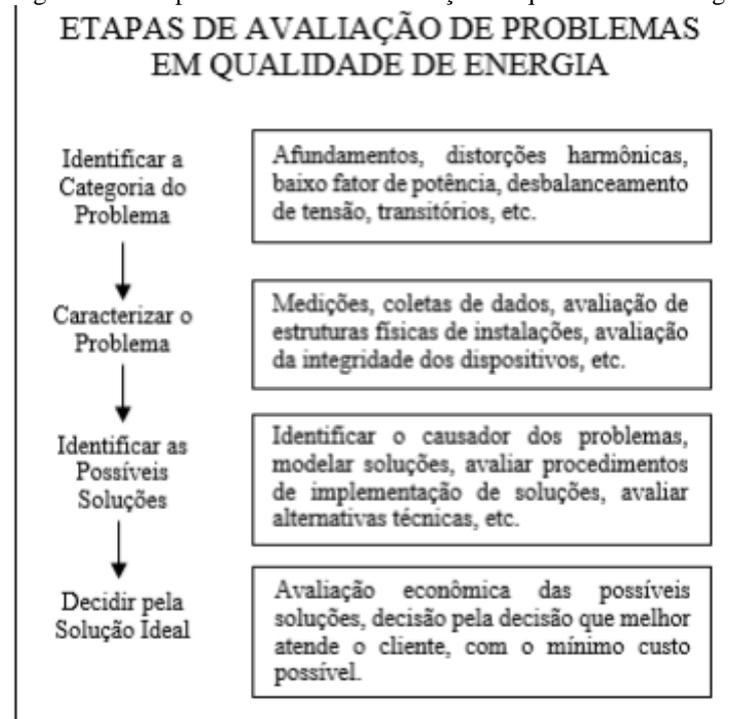
## 6 ESTUDO DE CASO

Com intuito de observar em campo os fenômenos eletromagnéticos, foi realizado um estudo de caso em uma empresa que atua no setor de produção de alimentos localizada na cidade de Machado – MG.

Embora não seja possível apresentar todas as características e detalhes da planta estudada, é válido ressaltar que na indústria analisada, existem diversas cargas indutivas como compressores, motores elétricos e demais equipamentos que demandam um grande consumo de energia elétrica, e que a princípio é necessário uma análise detalhada.

O fluxograma apresentado na Figura 13, é um roteiro sugerido por Dugan (2002, p.8) para a avaliação de condições e soluções para distúrbios de qualidade de energia.

Figura 13 - Etapas relacionadas à avaliação de qualidade de energia.



Fonte: Adaptado de Dugan (2002)

### 6.1 Identificação do Problema

Em reunião com responsáveis da empresa, foram apresentadas faturas energéticas onde são identificadas taxas de cobranças sobre o excesso de potência reativa, caracterizada como o baixo fator de potência, este problema se deve ao fato que a planta industrial da empresa sofreu alterações recentes, o representante informou que a empresa já possui banco capacitivo, porém após as alterações da planta o problema com a potência reativa iniciou. Uma vez que os limites permitidos na norma são infringidos, dependendo do horário, são afetados os valores pagos nas tarifas de energia. (AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010).

Também é destacado, a preocupação do representante da empresa com relação a preservação da vida útil dos dispositivos instalados, que em alguns casos são sensíveis a variações permanente da tensão eficaz.

Com base nos problemas relatados e identificados, tornou-se possível a instalação de dispositivo analisador de qualidade de energia e eficiência energética, bem como o uso do estudo termográfico, no sentido de registrar dados amostrais de diversas características do sinal elétrico no painel de entrada de instalação, para análise e tratamentos dos dados.

## 6.2 Metodologia e Parâmetros de Medição

Para obter os dados coletados, foi utilizado o analisador de energia PowerLogic® ION7650, de fabricação da empresa Schneider Electric, apresentado na Figura 14.

Figura 14 - Analisador PowerLogic® ION7650



Fonte: o autor.

Junto a coleta de dados, para detecção de desequilíbrios e sobrecargas elétricas, é utilizado a câmera termográfica FLIR TG165, apresentada na Figura 15.

Figura 15 - Câmera termográfica FLIR TG165.



Fonte: o autor.

O equipamento foi instalado junto aos barramentos de entrada da empresa, imediatamente após o medidor da concessionária de energia. O equipamento instalado pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 - Instalação do Analisador PowerLogic® ION7650



Fonte: o autor.

Por meio de configuração, foi determinado parâmetros de medição com base no módulo 8 do PRODIST, o qual estabelece critérios e indicadores de qualidade de energia e eficiência energética relacionados aos fenômenos eletromagnéticos já discutidos.

Os parâmetros relacionados a eficiência energética, a qualidade de energia e fenômenos eletromagnéticos, obedecem certos critérios, ou são submetidos a determinados

limites estabelecidos pela própria norma (AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017).

Com base no levantamento dos possíveis distúrbios e preocupações alegadas pelo representante da empresa estudada, torna-se interessante os seguintes parâmetros para a realização do estudo:

- a) Fator de Potência;
- b) Níveis de Tensão em Regime Permanente;
- c) Equilíbrio de Fases em Regime Permanente – Análise Termográfica;
- d) Variações de Tensão de Curta Duração;
- e) Harmônicos de Tensão.

O texto a seguir define cada um dos parâmetros para o estudo.

#### 6.2.1 Fator de Potência

O fator de potência, já referenciado anteriormente, é definido na documentação do módulo 8 do PRODIST como a Equação (07) a seguir:

$$fp = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \text{ ou } \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} \quad (07)$$

Onde:

fp = Fator de Potência;

P = Potência Ativa;

Q = Potência Reativa;

EA = Energia Ativa;

ER = Energia Reativa.

A norma estabelece como critério mínimo de 0,92 (ou 92%) tendo como base o fator de potência 1,0 (ou 100%) tanto indutivo como capacitivo (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010, p.96).

Se o fator de potência infringir o limite de 0,92, por intervalos de tempo de 1 hora, a potência reativa excedente dos limites impostos será tarifada.

A norma estabelece critérios de horários para a aplicação de cobranças sobre reativos excedentes.

§ 1o Para a apuração do ERE [...] deve-se considerar:

I – o período de 6 (seis) horas consecutivas, compreendido, a critério da distribuidora, entre 23h 30min e 6h 30min, apenas os fatores de potência “T” inferiores a 0,92 capacitivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora “T”; e  
II – o período diário complementar ao definido no inciso I, apenas os fatores de potência “T” inferiores a 0,92 indutivo, verificados em cada intervalo de 1 (uma) hora “T”. (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010, p. 98)

### 6.2.2 Níveis de Tensão em Regime Permanente

O módulo 8 do PRODIST define os valores de tensão como adequada, precária ou crítica como demonstrado na Tabela 2.

Tabela 2 - Faixa de classificação para pontos de conexão em Tensão Nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220).

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de Variação da Tensão de Leitura (Volts)</b>
<b>Adequada</b>	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
<b>Precária</b>	$(331 \leq TL \leq 350 \text{ ou } 399 \leq TL \leq 403) / (191 \leq TL \leq 202 \text{ ou } 231 \leq TL \leq 233)$
<b>Crítica</b>	$(TL < 331 \text{ ou } TL > 403) / (TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017 p.42)

### 6.2.3 Termografia

Partindo da premissa de que empresas de grande porte consomem alto índice de energia, o estudo termográfico é de suma importância para detectar e prevenir consumos, falhas, desgastes desnecessários para os equipamentos da empresa, aumentar a segurança e confiabilidade do sistema, identificar defeitos ou anomalias antes de ocorrer uma falha no sistema produtivo entre outras vantagens.

Termografia ou termovisão, como algumas vezes é denominada, é uma técnica de detecção da distribuição de energia térmica emitida pela superfície de um ou vários corpos ou objetos, por radiação. É um método não invasivo, capaz de detectar, visualizar e gravar diferentes níveis de distribuição de temperatura através de superfície de um objeto. A termografia sem contato permite o estudo da temperatura dos corpos, através da radiação infravermelha emitida pelos mesmos usando uma câmera radiométrica.

Faz-se o uso do equipamento neste para analisar o desequilíbrio elétrico entre fases. O desequilíbrio elétrico pode ocorrer por várias causas, como um problema de alimentação, a tensão menor numa das fases ou falhas de isolamento de rolamentos de motores. As conexões podem sofrer degradação por pequenos desequilíbrios na tensão, que reduzem a tensão fornecida e levam os motores e outros equipamentos a consumir uma corrente excessiva e a fornecer um torque menor, ocasionando estresse mecânico, apresentando falhas prematuras.

Um desequilíbrio maior pode ocasionar a queima de um fusível, reduzindo a operação a uma só fase. Entretanto, a corrente desequilibrada retorna a fase neutra, levando a fornecedora de energia a multar a fábrica por ocasionar “picos” de consumo.

#### 6.2.4 Variações de Tensão de Curta Duração

O PRODIST não define padrões de desempenho para variações de tensão de curta duração, porém a norma classifica este fenômeno eletromagnético conforme demonstra a Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação das variações de tensão de curta duração.

<b>Classificação</b>	<b>Denominação</b>	<b>Duração</b>	<b>Amplitude em relação à 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 pu
	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 pu
	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, 2017. p. 29)

#### 6.2.5 Harmônicos de Tensão

Conforme mensurado anteriormente, harmônicos são distorções e sobreposições de sinais elétricos cuja frequência é múltipla da fundamental da rede, onde no Brasil é definida em 60 Hz.

Onde no PRODIST (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2017, p.23) define que para distorção harmônica total, para consumidores com tensão de barramento inferior a 1kV, um percentual máximo de 10% sobre a tensão nominal do barramento.

### 6.3 Coleta de Dados e Análise dos Resultados

O analisador de qualidade de energia foi instalado no barramento de entrada da empresa, onde permaneceu fazendo as leituras por 1 semana, este período se deve ao fato que a norma estabelece número de leituras para avaliar determinado fenômeno.

O período de análise dos fenômenos eletromagnéticos ocorreu do dia 16 a 22 de novembro de 2018, onde foram registrados 1008 leituras, com intervalos de tempo de 10 minutos espaçando cada dado, totalizando 168 horas analisadas.

#### 6.3.1 Fator de Potência

Os dados coletados foram dispostos em termos de horas do dia conforme apresentados na Tabela 4 e com gráfico ilustrativo dos valores para a média geral de leituras conforme visto no Gráfico 2, por meio de tratamentos estatísticos apropriados. Isso garante que, mesmo apresentados de forma resumida, ainda é preservada a confiabilidade das leituras.

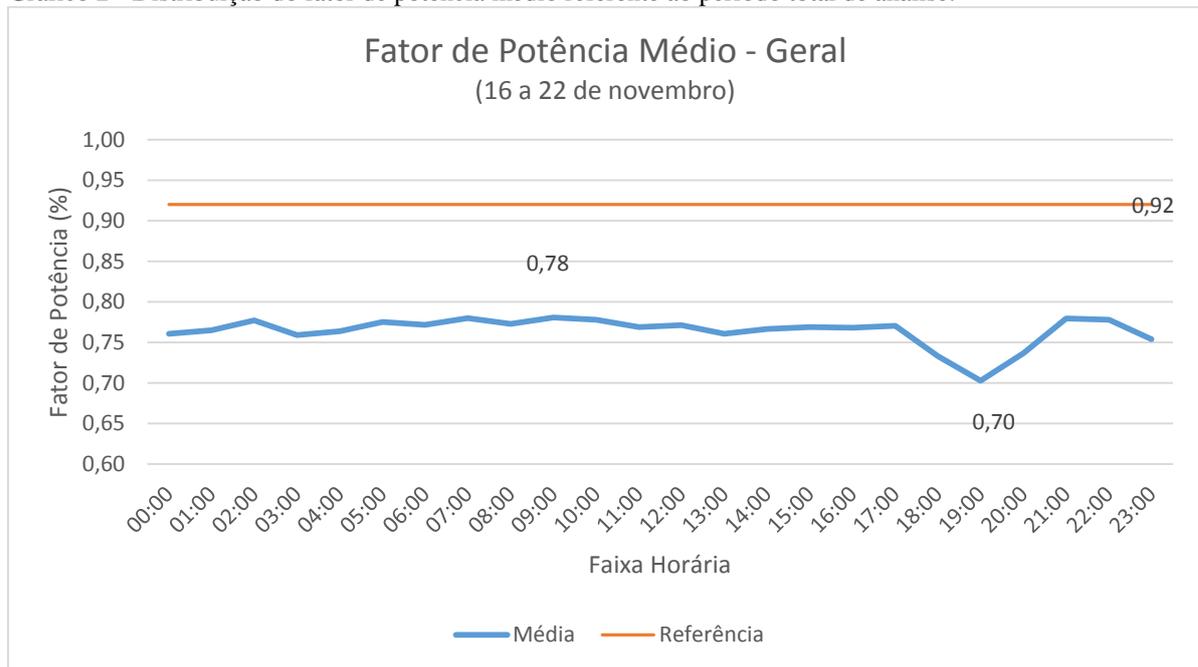
Tabela 4 - Fator de potência médio por dia da semana e média geral.

Hora	16/nov	17/nov	18/nov	19/nov	20/nov	21/nov	22/nov	Média	Desvio
00:00	0,8137	0,7937	0,7708	0,8243	0,8168	0,6618	0,6422	76,05%	±0,0764
01:00	0,8267	0,8099	0,7618	0,8248	0,8211	0,6565	0,6536	76,49%	±0,0783
02:00	0,8383	0,8327	0,789	0,8323	0,8276	0,6618	0,657	77,70%	±0,0820
03:00	0,8111	0,8097	0,7706	0,8081	0,8122	0,6584	0,6422	75,89%	±0,0758
04:00	0,8092	0,8203	0,7417	0,8157	0,8105	0,6573	0,6919	76,38%	±0,0672
05:00	0,8195	0,8097	0,7782	0,7863	0,7623	0,6592	0,8109	77,52%	±0,0551
06:00	0,8142	0,8196	0,766	0,7824	0,7795	0,6433	0,7966	77,16%	±0,0597
07:00	0,8054	0,8067	0,7647	0,7913	0,8212	0,6529	0,8171	77,99%	±0,0591
08:00	0,8159	0,8051	0,7947	0,8005	0,7662	0,6443	0,7822	77,27%	±0,0589
09:00	0,8194	0,8081	0,8044	0,8135	0,8148	0,6474	0,7566	78,06%	±0,0625
10:00	0,8201	0,8115	0,7944	0,7962	0,8044	0,6479	0,7724	77,81%	±0,0594
11:00	0,8093	0,8128	0,7694	0,8011	0,7475	0,6503	0,7925	76,90%	±0,0573
12:00	0,8251	0,826	0,792	0,8164	0,6821	0,6575	0,7983	77,11%	±0,0707
13:00	0,806	0,7992	0,8074	0,8235	0,6734	0,6478	0,7672	76,06%	±0,0708
14:00	0,814	0,8178	0,7948	0,8308	0,6792	0,6615	0,7677	76,65%	±0,0689
15:00	0,8232	0,8278	0,7833	0,8199	0,6929	0,6577	0,7761	76,87%	±0,0676

<b>16:00</b>	0,8068	0,8199	0,798	0,8176	0,6949	0,6491	0,7903	76,81%	±0,0677
<b>17:00</b>	0,7635	0,8387	0,8282	0,8053	0,7003	0,626	0,8319	77,05%	±0,0804
<b>18:00</b>	0,7187	0,798	0,7645	0,7057	0,7068	0,6388	0,7995	73,32%	±0,0579
<b>19:00</b>	0,669	0,7762	0,7019	0,6388	0,7051	0,6319	0,7965	70,28%	±0,0638
<b>20:00</b>	0,6536	0,835	0,776	0,7483	0,7076	0,6157	0,8193	73,65%	±0,0822
<b>21:00</b>	0,7825	0,8481	0,8627	0,8384	0,687	0,6378	0,7996	77,94%	±0,0858
<b>22:00</b>	0,8171	0,8465	0,8507	0,8198	0,6679	0,6644	0,778	77,78%	±0,0799
<b>23:00</b>	0,7988	0,8063	0,8138	0,8093	0,6683	0,6394	0,7414	75,39%	±0,0731

Fonte: o autor.

Gráfico 2 - Distribuição do fator de potência médio referente ao período total de análise.



Fonte: o autor.

É visível ao observar o gráfico, que durante todo o momento de trabalho da empresa, o fator de potência indutivo está abaixo da referência, onde seu limite estabelecido é de 0,92. Tendo como maior valor registrado 0,78 e menor registro 0,70. Deve –se levar em conta que no período das 23h 30 min as 6h 30min, totalizando 6 (seis) horas consecutivas, não é contabilizado nas tarifas para o fator de potência indutivo. (AGENCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2010).

Isso ocorre em virtude de predominância de cargas puramente indutivas, onde a empresa opera com o funcionamento de vários motores elétricos e grandes compressores para a execução de sua tarefa.

Portanto, o fato é relatado à empresa, juntamente com sugestões para solucionar o problema com o fator de potência irregular e em inconformidade a norma.

### 6.3.2 Níveis de Tensão em Regime Permanente

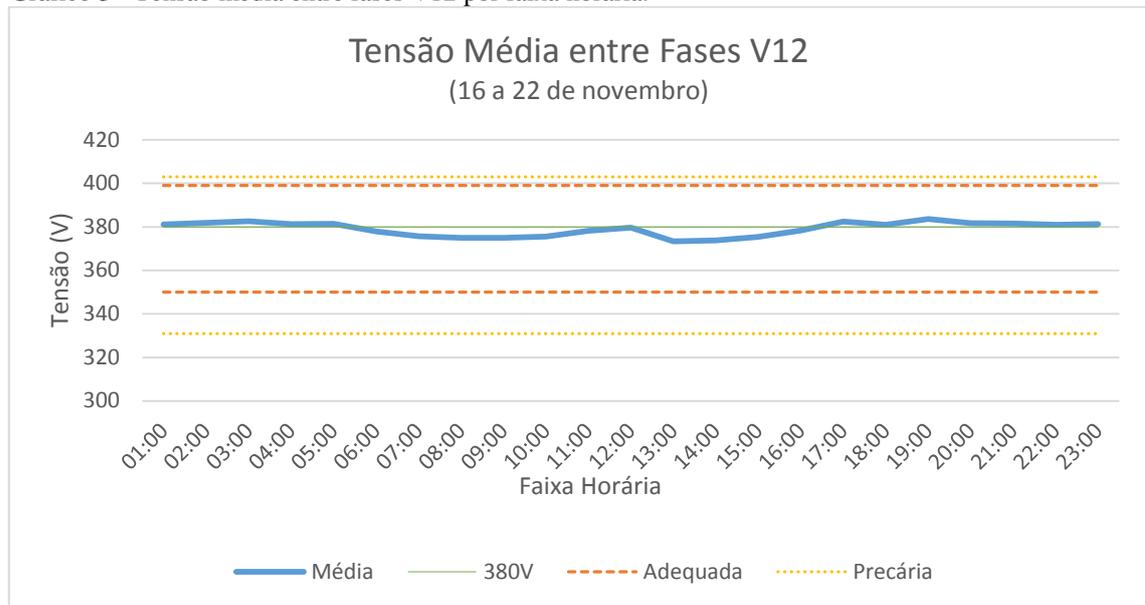
Assim como para o fator de potência, os dados coletados ao longo do período de medição foram agrupados obedecendo os métodos estatísticos apropriados, de forma que os dados tratados e ponderados traduzam o cenário real. Em seguida, foram produzidas as Tabelas 5, 6 e 7, bem como os Gráficos 3, 4 e 5, que ilustram o comportamento dos valores de tensão em regime permanente, no período monitorado.

Tabela 5 - Tensão média entre fases V12 por dia e média geral.

Hora	16/nov	17/nov	18/nov	19/nov	20/nov	21/nov	22/nov	Média	Desvio
00:00	380,12	379,87	377,06	376,83	379,40	385,73	386,68	380,81	±3,9147
01:00	378,90	381,23	378,26	377,30	379,62	386,67	386,13	381,16	±3,7842
02:00	378,90	380,43	381,75	381,33	380,95	386,64	383,37	381,91	±2,4819
03:00	379,01	381,64	379,94	382,64	382,95	386,37	385,97	382,65	±2,7847
04:00	380,81	377,90	378,14	380,22	382,00	386,16	383,70	381,28	±2,9681
05:00	379,73	378,22	377,09	378,58	385,72	386,73	383,53	381,37	±3,8949
06:00	375,51	375,32	376,40	374,04	381,77	382,56	379,19	377,83	±3,3618
07:00	374,25	372,88	372,14	371,51	380,42	382,62	376,24	375,72	±4,2957
08:00	371,61	373,06	369,80	370,67	382,92	384,85	371,51	374,92	±6,2274
09:00	371,86	373,08	373,08	371,02	379,64	383,78	372,30	374,97	±4,8134
10:00	372,76	373,20	374,11	371,23	379,26	382,78	375,19	375,50	±4,0848
11:00	376,98	378,35	375,87	377,73	382,62	380,97	375,24	378,25	±2,6816
12:00	378,36	377,24	379,46	378,62	384,12	380,95	379,17	379,70	±2,2520
13:00	369,48	370,65	367,47	370,28	384,80	381,32	369,42	373,34	±6,7873
14:00	368,51	372,27	369,65	371,56	384,11	381,93	368,37	373,77	±6,5088
15:00	371,79	373,40	371,94	373,86	384,75	381,07	370,47	375,33	±5,4047
16:00	375,31	376,47	376,56	381,24	385,63	380,20	372,73	378,31	±4,3256
17:00	382,22	383,22	384,73	380,85	384,33	381,63	380,32	382,47	±1,6892
18:00	380,24	380,21	381,39	381,50	382,55	381,99	378,54	380,92	±1,3516
19:00	383,68	384,23	384,45	384,76	383,61	385,71	378,42	383,55	±2,3712
20:00	382,87	381,74	382,96	380,15	382,22	385,41	376,92	381,75	±2,6540
21:00	381,52	381,06	382,11	378,35	382,74	386,17	378,71	381,52	±2,6327
22:00	380,32	377,92	378,59	379,09	384,77	385,01	380,68	380,91	±2,8781
23:00	380,82	376,95	379,72	380,35	385,23	387,37	378,28	381,24	±3,7398

Fonte: o autor.

Gráfico 3 - Tensão média entre fases V12 por faixa horária.



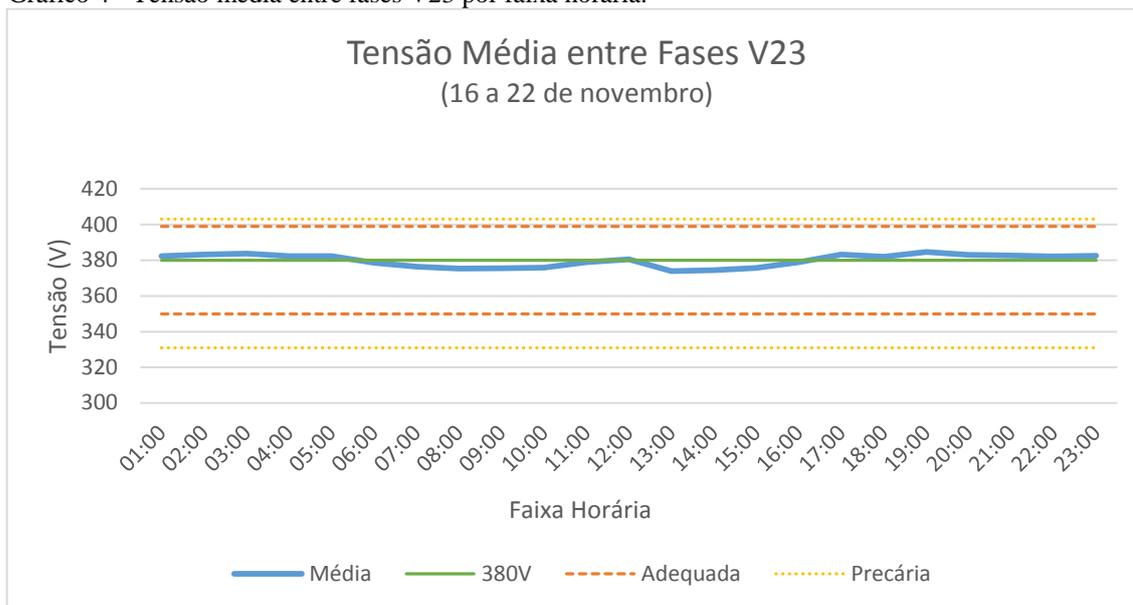
Fonte: o autor.

Tabela 6 - Tensão média entre fases V23 por dia e média geral.

Hora	16/nov	17/nov	18/nov	19/nov	20/nov	21/nov	22/nov	Média	Desvio
00:00	381,23	381,15	378,20	378,54	380,74	386,80	387,53	382,03	±3,72
01:00	380,29	382,59	379,42	378,73	380,75	387,78	386,99	382,37	±3,64
02:00	380,17	381,94	383,11	382,83	382,44	387,44	384,03	383,14	±2,24
03:00	380,12	382,61	381,29	384,10	384,26	387,20	386,55	383,73	±2,60
04:00	381,87	379,15	379,48	381,78	383,04	387,08	384,41	382,40	±2,77
05:00	380,52	379,32	378,34	379,82	386,62	387,45	384,10	382,31	±3,70
06:00	376,39	376,05	377,25	374,97	382,77	383,02	379,76	378,60	±3,28
07:00	374,63	373,33	372,99	372,46	381,38	383,38	376,94	376,44	±4,35
08:00	372,01	373,23	370,77	370,73	383,66	385,29	371,93	375,37	±6,29
09:00	372,48	373,64	373,82	371,07	380,12	384,52	372,88	375,50	±4,91
10:00	373,26	373,35	374,78	371,58	379,47	383,69	375,45	375,94	±4,22
11:00	377,79	378,47	376,70	378,19	383,19	381,96	375,75	378,87	±2,72
12:00	379,56	377,98	381,15	379,57	384,91	381,56	379,51	380,60	±2,24
13:00	369,78	370,73	368,45	370,71	385,74	382,14	369,69	373,89	±6,98
14:00	368,60	372,45	370,58	372,35	384,94	382,96	368,63	374,36	±6,76
15:00	371,96	373,85	372,57	374,29	385,11	381,80	370,65	375,75	±5,49
16:00	375,03	377,54	377,34	381,62	386,28	381,03	373,00	378,83	±4,48
17:00	383,00	384,47	385,60	381,07	384,97	382,26	381,21	383,23	±1,82
18:00	381,56	382,04	383,10	381,99	383,66	382,87	378,95	382,02	±1,54
19:00	385,05	385,90	386,28	385,34	384,93	386,56	378,75	384,69	±2,69
20:00	384,06	383,59	385,09	381,07	383,62	386,77	377,16	383,05	±3,12
21:00	382,73	382,49	383,52	379,49	383,78	387,25	379,03	382,61	±2,78
22:00	381,86	379,36	380,11	380,43	385,79	386,26	381,34	382,17	±2,76
23:00	382,03	378,12	381,48	381,41	386,44	388,38	379,13	382,43	±3,72

Fonte: o autor.

Gráfico 4 - Tensão média entre fases V23 por faixa horária.



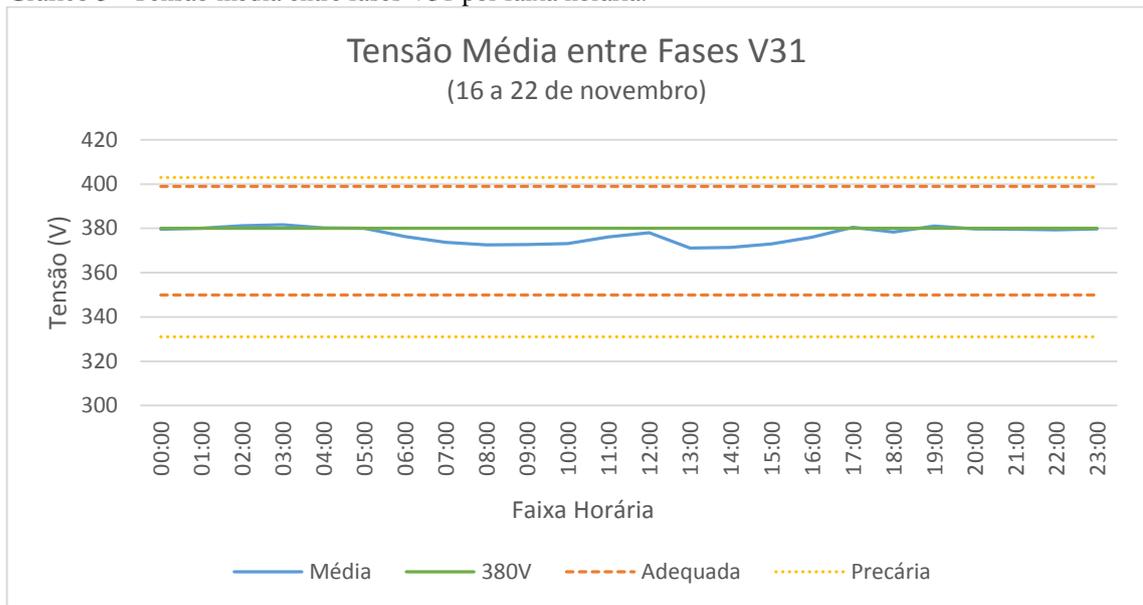
Fonte: o autor.

Tabela 7 - Tensão média entre fases V31 por dia e média geral.

Hora	16/nov	17/nov	18/nov	19/nov	20/nov	21/nov	22/nov	Média	Desvio
00:00	378,72	378,50	375,71	375,55	377,91	384,68	386,18	379,61	±4,19
01:00	377,88	380,22	377,13	376,07	378,16	385,71	385,74	380,13	±4,02
02:00	378,09	379,86	380,99	380,71	380,13	385,80	382,71	381,19	±2,46
03:00	377,97	380,39	378,91	381,44	381,75	385,43	385,15	381,58	±2,86
04:00	379,48	376,76	376,89	379,10	380,49	385,35	383,08	380,16	±3,15
05:00	378,27	376,80	375,72	377,25	384,16	385,67	382,68	380,08	±4,00
06:00	373,70	373,53	374,64	372,44	380,86	381,09	377,77	376,29	±3,60
07:00	371,95	370,56	370,14	369,40	379,06	380,99	374,37	373,78	±4,59
08:00	368,91	370,56	367,44	367,90	381,06	382,78	369,19	372,55	±6,50
09:00	369,28	370,93	370,34	368,32	378,03	382,01	369,95	372,69	±5,20
10:00	370,36	370,72	371,26	368,44	377,48	380,80	372,67	373,10	±4,41
11:00	375,00	375,79	373,70	375,26	381,03	379,20	373,25	376,17	±2,88
12:00	376,74	375,73	378,25	376,78	382,47	379,22	377,29	378,07	±2,24
13:00	367,10	368,36	365,21	367,53	383,33	379,81	366,90	371,18	±7,23
14:00	365,63	370,07	366,99	368,88	382,25	380,31	365,95	371,44	±6,92
15:00	368,99	371,56	369,47	371,27	382,50	379,42	367,98	373,03	±5,63
16:00	372,49	374,18	373,97	378,98	383,72	378,41	370,37	376,02	±4,58
17:00	380,20	381,18	382,73	378,17	382,12	379,56	379,04	380,43	±1,66
18:00	377,29	377,62	378,74	378,14	379,67	379,93	376,89	378,33	±1,17
19:00	380,96	381,67	382,15	381,66	380,72	383,61	376,91	381,10	±2,07
20:00	380,60	379,95	381,11	377,73	380,16	384,04	375,23	379,83	±2,76
21:00	379,43	379,55	380,06	376,38	380,71	384,99	376,74	379,69	±2,86
22:00	378,73	376,64	376,87	376,99	383,03	383,88	378,90	379,29	±2,99
23:00	379,13	375,35	378,14	378,54	383,68	386,50	376,66	379,72	±3,97

Fonte: o autor.

Gráfico 5 - Tensão média entre fases V31 por faixa horária.



Fonte: o autor.

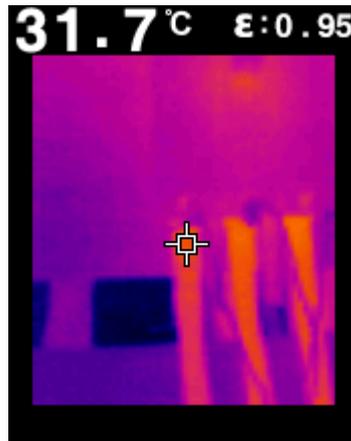
Em vista dos dados coletados, percebe-se que a tensão em regime permanente não ultrapassou os limites tidos como precários ou críticos segundo a norma, permanecendo na região considerada adequada durante todo o período de análise.

### 6.3.3 Equilíbrio de fases em regime permanente – Análise Termográfica

No instante da captura das imagens termográficas, a empresa operava com 90 % de sua carga total, onde que para a garantia do estudo, o fabricante indica que em termos ideais, os dispositivos elétricos deveriam ser examinados depois que estiverem plenamente aquecidos e em condições estáveis, submetido à pelo menos 40 % de sua carga típica.

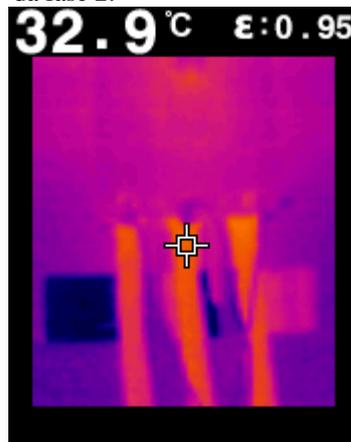
As imagens a seguir, representadas nas Figuras 17, 18 e 19, onde são as temperaturas obtidas nas fases do painel elétrico com condutores de isolamento em PVC, que fornece a entrada de energia da empresa. A Figura 20 é a imagem real do local examinado, a qual o fabricante indica pois na imagem termográfica não é nitidamente visível. Observa-se que na fase 1, o condutor encontra-se com a temperatura de 31,7 °C, a fase 2 o condutor encontra-se com a temperatura de 32,9 °C, e na fase 3 a temperatura do condutor está em 32,1 °C.

Figura 17 - Imagem termográfica da fase 1.



Fonte: o autor.

Figura 18 - Imagem termográfica da fase 2.



Fonte: o autor.

Figura 19 - Imagem termográfica da fase 3.



Fonte: o autor.

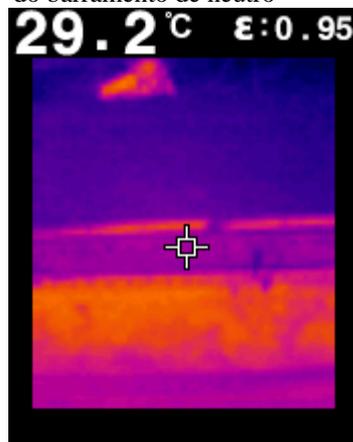
Figura 20 - Imagem real do barramento de entrada.



Fonte: o autor.

A Figura 21, representa a imagem termográfica do barramento de neutro onde é constituído por uma barra de cobre, podendo observar que a temperatura encontra-se em 29,2 °C, a Figura 22 é a imagem real do barramento de neutro, indicada pelo fabricante.

Figura 21 - Imagem termográfica do barramento de neutro



Fonte: o autor.

Figura 22 - Imagem real do barramento de neutro.



Fonte: o autor.

Em vista dos dados coletados, podem ser observadas, que a diferença de temperaturas entre as fases do sistema são mínimas, não ultrapassando a diferença de  $3,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ , provando assim que as fases estão equilibradas, não ocasionando problemas na instalação elétrica. As temperaturas obtidas nos condutores de isolamentos de PVC estão abaixo do limite estabelecido, onde o material de isolamento deve estar com a temperatura de no máximo  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  e a barra de cobre com a temperatura de no máximo  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ , não apresentando problemas técnicos na instalação.

#### 6.3.4 Variações de tensão de curta duração

Durante o período analisado, não foi constatado nenhum dado relacionado a este distúrbio. Os motores de maior potência da empresa possui partida soft-start, assim eliminando este evento. Portanto fica evidenciado que com o não aparecimento de registros não há problemas relacionados a este fenômeno, onde não justifica quaisquer investimentos em ações corretivas.

#### 6.3.5 Harmônicos de tensão

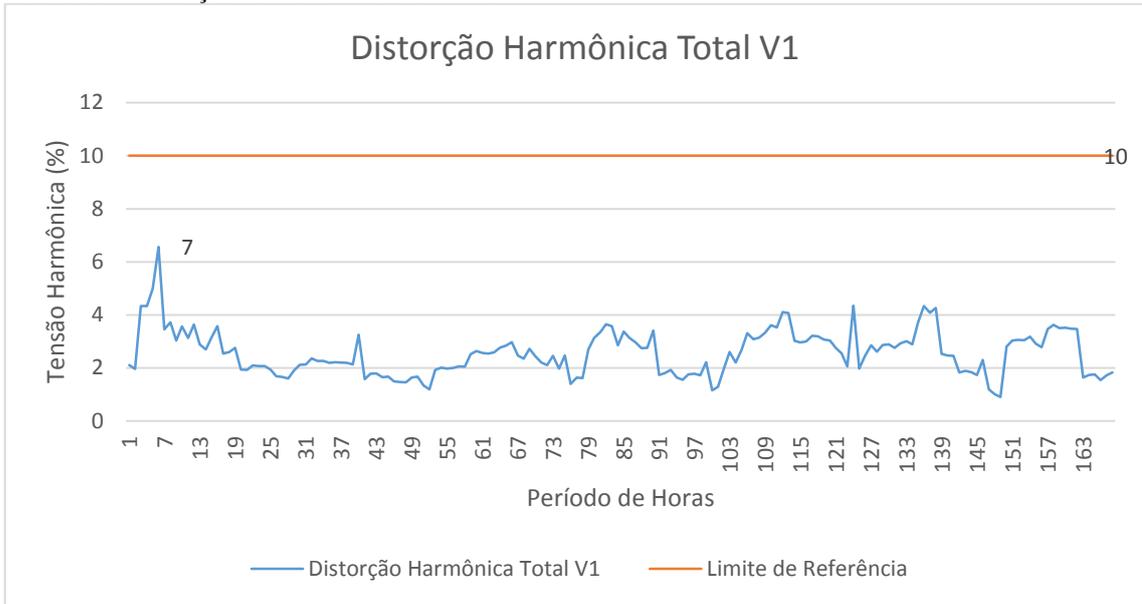
Foram coletados valores percentuais de distorção harmônica total de tensão em cada uma das fases, e comparados com os valores de referência do PRODIST. Os dados coletados são apresentados na Tabela 8 e ilustrados nos Gráficos 6, 7 e 8.

Tabela 8 - Distorções de tensões média geral entre 16 a 22 de novembro.

<b>HORA</b>	<b>Distorção média de tensão em V1</b>	<b>Desvio</b>	<b>Distorção média de tensão em V2</b>	<b>Desvio</b>	<b>Distorção média de tensão em V3</b>	<b>Desvio</b>
<b>00:00</b>	2,019	±0,497	2,164	±0,529	1,947	±0,518
<b>01:00</b>	2,004	±0,541	2,150	±0,504	1,939	±0,487
<b>02:00</b>	2,037	±0,611	2,176	±0,534	1,975	±0,508
<b>03:00</b>	2,243	±0,575	2,295	±0,593	2,143	±0,557
<b>04:00</b>	2,139	±0,492	2,382	±0,667	2,171	±0,563
<b>05:00</b>	2,272	±0,538	2,438	±0,454	2,225	±0,453
<b>06:00</b>	3,076	±0,771	3,205	±0,961	2,894	±0,786
<b>07:00</b>	3,054	±0,899	3,261	±0,925	3,107	±0,872
<b>08:00</b>	3,475	±0,610	3,667	±0,626	3,524	±0,544
<b>09:00</b>	3,088	±0,572	3,132	±0,581	3,484	±0,815
<b>10:00</b>	2,958	±0,538	2,998	±0,554	3,399	±0,855
<b>11:00</b>	2,979	±0,464	2,991	±0,486	3,365	±0,796
<b>12:00</b>	2,888	±0,437	2,971	±0,503	3,357	±0,743
<b>13:00</b>	2,885	±0,449	3,010	±0,568	3,082	±0,748
<b>14:00</b>	2,989	±0,623	3,169	±0,730	3,373	±0,947
<b>15:00</b>	2,758	±0,459	2,887	±0,514	3,055	±0,693
<b>16:00</b>	2,729	±0,606	2,836	±0,710	2,875	±0,885
<b>17:00</b>	2,681	±0,508	2,767	±0,528	2,724	±0,604
<b>18:00</b>	2,793	±1,705	2,610	±1,198	2,657	±1,310
<b>19:00</b>	2,094	±1,341	2,105	±0,993	2,202	±1,380
<b>20:00</b>	2,154	±1,510	2,057	±1,370	2,146	±1,754
<b>21:00</b>	2,186	±0,333	2,134	±1,036	2,179	±1,413
<b>22:00</b>	1,985	±0,333	1,966	±0,324	1,898	±0,376
<b>23:00</b>	2,064	±0,414	2,036	±0,448	1,985	±0,418

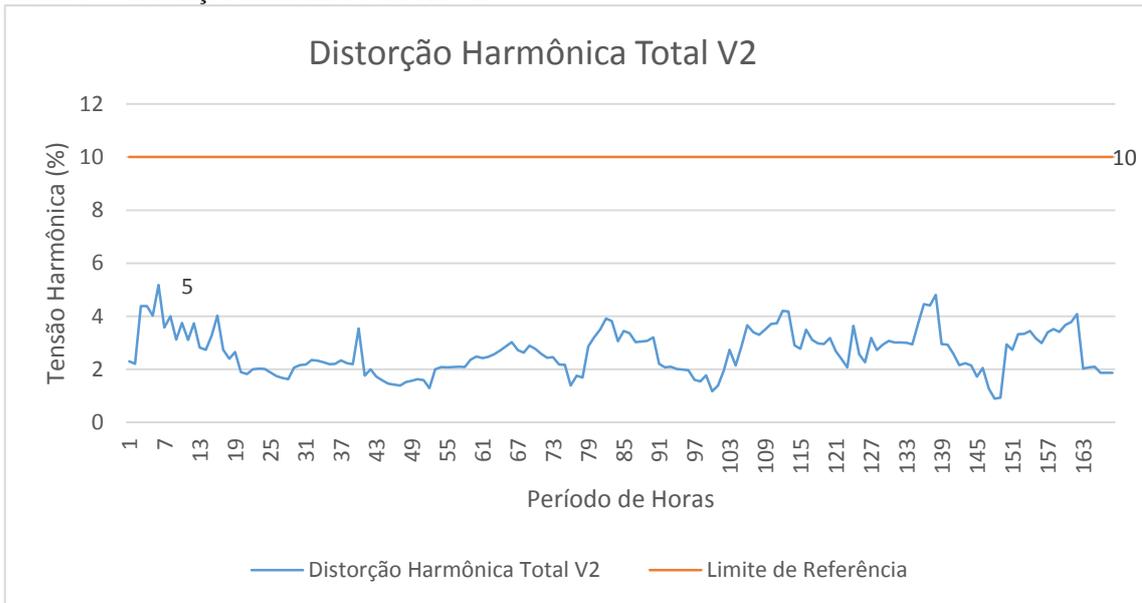
Fonte: o autor.

Gráfico 6 - Distorção harmônica total em V1.



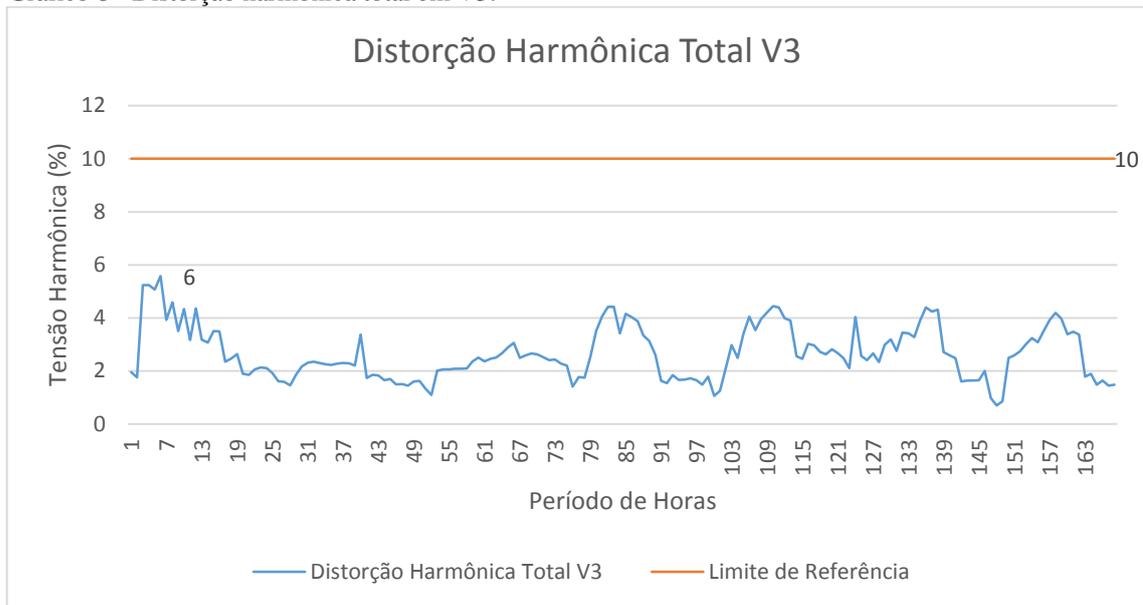
Fonte: o autor.

Gráfico 7 - Distorção harmônica total em V2.



Fonte: o autor.

Gráfico 8 - Distorção harmônica total em V3.



Fonte: o autor.

Conforme identificado nos dados coletados, e apresentado na tabela e gráficos, nenhum dos valores de harmônicos de tensão medidos no período de análise ultrapassou o limite estabelecido em norma, permanecendo na faixa adequada de distorção.

#### 6.4 Soluções Propostas para o Problema Identificado

Estão relacionadas abaixo as conclusões obtidas através da análise dos dados coletados.

- a) Fator de Potência: Incidência de fator de potência indutiva durante todo o período de atividade da empresa;
- b) Tensão de regime permanente: Nenhum problema observado;
- c) Equilíbrio de Fases em Regime Permanente – Análise Termográfica: Nenhum problema observado;
- d) Variações de tensão de curta duração: Nenhum problema observado;
- e) Distorções Harmônicas: Nenhum problema observado.

O único problema encontrado na instalação foi referente ao fator de potência, onde é indicado como solução o redimensionamento do banco de capacitores, sendo este com operação automática. A não opção por um banco de capacitores fixo, leva ao fato que os colaboradores da empresa estudada acionam cargas indutivas ao longo de todo expediente de trabalho. Levando em conta que a empresa, em períodos de larga escala de produção, trabalha em um expediente de 24 horas por dia. Neste caso, a utilização de bancos de capacitores fixo

provocaria uma condição indesejada, lembrando que a norma regulamentadora informa que em um período de 6 horas consecutivas, a critério da distribuidora, entre 23 h 30 min e 6 h e 30 min, não há taxaço para fatores de potência indutivos inferiores a 0,92, porem há taxas para fatores de potência capacitivo. Assim, o próprio banco de capacitores poderia se tornar um agente gerador de cobrança de reativos.

Para sanar o problema apresentado, é necessário dimensionar o banco de capacitores, para tal, a princípio é preciso identificar os valores de potência ativa, reativa e aparente nos valores reais de cargas instaladas.

Para realização do cálculo, é extraído o maior valor de cargas ativas acionadas no sistema, onde é representado na Tabela 9.

Tabela 9 - Maior potência ativa no período de análise.

Potência Ativa Total (kW)	Potência Reativa Total (kVAr)	Potência Aparente Total (kVA)
162,579102	114,896627	203,184647

Fonte: o autor.

Neste momento, é utilizado o conceito de Triângulo de Potências, onde é encontrado as potências aparente e reativa ideais, as quais são necessárias para o desenvolvimento do cálculo do banco de capacitores, através da equação (01) apresentada anteriormente, utilizando posteriormente as Equação (08) e Equação (09), apresentadas a seguir:

$$\theta = \cos^{-1}(FP) \quad (08)$$

$$Q = S \cdot \sin(\theta) \quad (09)$$

Onde, para ambas as equações:

$\Theta$  = Ângulo teórico formando entre os valores de potência ativa e reativa;

FP = Fator de potência;

Q = Potência reativa;

S = Potência aparente.

Realizando as operações matemáticas, obtém-se o seguinte:

$$FP_{\text{Ideal}} = 0,92$$

$$S_{\text{Ideal}} = \frac{P_{\text{Ideal}}}{FP_{\text{Ideal}}} = \frac{167579,10}{0,92} = 182,15119 \text{ (kVA)}$$

$$\theta = \cos^{-1} 0,92 = 23,07^\circ$$

$$Q_{\text{Ideal}} = S_{\text{Ideal}} \cdot \sin(\theta) = 182151,19 \times \sin(23,07) = 71,3693 \text{ (kVAr)}$$

Assim, foram obtidos os seguintes valores:

$$P_{\text{Real}} = 167,579102 \text{ (kW)}$$

$$Q_{\text{Real}} = 114,896627 \text{ (kVAr)}$$

$$Q_{\text{Ideal}} = 71,37693 \text{ (kVAr)}$$

$$S_{\text{Real}} = 203,184647 \text{ (kVA)}$$

$$S_{\text{Ideal}} = 182,15119 \text{ (kVA)}$$

Ainda como base o conceito do Triângulo das Potências, para que seja alterado o valor modular da potência aparente para aquele definido como ideal, e assim, alcançar o fator de potência ideal de 0,92, é necessário a inserção de uma potência reativa capacitiva tal que a potência reativa resultante seja aproximadamente o valor calculado como potência reativa ideal.

O cálculo do valor de potência reativa capacitiva necessária para enquadrar o valor atual ideal é representado na Equação (10).

$$Q_{\text{Capacitivo}} = Q_{\text{Real}} - Q_{\text{Ideal}} \quad (10)$$

Sendo:

$$Q_{\text{Capacitivo}} = \text{Potência Reativa Desejada};$$

$$Q_{\text{Real}} = \text{Potência Reativa Real};$$

$$Q_{\text{Ideal}} = \text{Potência Reativa Ideal};$$

Assim, prosseguem os cálculos:

$$Q_{\text{Capacitivo}} = 114896,6727 - 71376,93 = \mathbf{43,519727(kVAr)}$$

Portanto, com o resultado da potência reativa capacitiva necessária para sanar o problema do fator de potência, cabe calcular o valor referente ao banco de capacitores que será utilizado, através da Equação (11).

$$C = \frac{Q_{\text{Capacitivo}}}{\omega V_{\text{RMS}}^2} \quad (11)$$

Onde:

C = Capacitância da Unidade Capacitiva

$Q_{\text{Capacitivo}}$  = Potência Reativa Capacitiva

$\omega$  = Frequência Angular do Sinal Elétrico (Sistema Nacional  $\omega = 377$ )

$V_{\text{RMS}}$  = Tensão Eficaz da Rede

Aplicando o cálculo, obtém a seguinte capacitância:

$$C = \frac{43519,727}{377 \times 380^2} = \mathbf{799,424(\mu F)}$$

Os valores obtidos de potência reativa capacitiva e capacitância, não coincidem aos valores de catálogos de empresas fabricantes.

É possível comparar os valores obtidos com os comerciais utilizando o catálogo da empresa WEG (2016), proporcionando o melhor dispositivo capaz de atender a demanda de correção necessária, conforme as Figuras 23 e 24.

Figura 23 - Catálogo de unidades capacitivas trifásicas comerciais

Tensão (V)	Potência reativa (kvar)	Série <sup>2)</sup>	Referência	Capacitância (uF) (Ligação Δ)	Dimensões Ø x H (mm)
220	0,50	D	UC WT0,5V25 L10	9,1 x 3	60 x 156
	0,75	D	UC WT0,75V25 L10	13,7 x 3	60 x 156
	1,00	D	UC WT1V25 L10	18,3 x 3	60 x 156
	1,50	D	UC WT1,5V25 L10	27,4 x 3	60 x 156
	2,00	D	UC WT2V25 L10	36,6 x 3	60 x 156
	2,50	D	UC WT2,5V25 L16	45,7 x 3	60 x 211
	3,00	D	UC WT3V25 L16	54,8 x 3	60 x 211
	5,00	E	UC WT5V25 N20	91,4 x 3	75 x 225
	7,50	E	UC WT7,5V25 N22	137,1 x 3	75 x 285
	10,00	E	UC WT10V25 N22	182,8 x 3	75 x 285
	12,50	F	UC WT12,5V25 Q26	228,4 x 3	100 x 230
	15,00	F	UC WT15V25 S26	274 x 3	116 x 230
	17,50	F	UC WT17,5V25 S28	319,7 x 3	116 x 290
	20,00	F	UC WT20V25 S28	365,4 x 3	116 x 290
	25,00	F	UC WT25V25 U28	456,7 x 3	136 x 290
30,00	F	UC WT30V25 U28	548,1 x 3	136 x 290	
380	0,50	D	UC WT0,5V40 L10	3,1 x 3	60 x 156
	0,75	D	UC WT0,75V40 L10	4,6 x 3	60 x 156
	1,00	D	UC WT1V40 L10	6,1 x 3	60 x 156
	1,50	D	UC WT1,5V40 L10	9,2 x 3	60 x 156
	2,00	D	UC WT2V40 L10	12,3 x 3	60 x 156
	2,50	D	UC WT2,5V40 L10	15,3 x 3	60 x 156
	3,00	D	UC WT3V40 L10	18,4 x 3	60 x 156
	5,00	D	UC WT5V40 L16	30,6 x 3	60 x 211
	7,50	E	UC WT7,5V40 N20	45,9 x 3	75 x 225
	10,00	E	UC WT10V40 N20	61,3 x 3	75 x 225
	12,50	E	UC WT12,5V40 N22	76,6 x 3	75 x 285
	15,00	E	UC WT15V40 N22	91,9 x 3	75 x 285
	17,50	F	UC WT17,5V40 Q26	107,2 x 3	100 x 230
	20,00	F	UC WT20V40 Q26	122,5 x 3	100 x 230
	22,50	F	UC WT22,5V40 S26	137,8 x 3	116 x 230
	25,00	F	UC WT25V40 S26	153,1 x 3	116 x 230
	30,00	F	UC WT30V40 S28	183,7 x 3	116 x 290
	35,00	F	UC WT35V40 S28	214,3 x 3	116 x 290
	40,00	F	UC WT40V40 U28	244,9 x 3	136 x 290
	45,00	F	UC WT45V40 U28	275,5 x 3	136 x 290
50,00	F	UC WT50V40 U28	306,2 x 3	136 x 290	

Fonte: adaptado de WEG (2016)

Figura 24 - Catálogo de banco de capacitores trifásicos comerciais

Tensão (V)	Potência reativa (kvar)	Referência	Composição capacitores Quant. x UCW (Ligação Δ)	Dimensional (C x L x A) (mm)
220	10,0	BCW10V25	3 x UCW2,5 V 25 L10 + 3 x UCW0,83 V 25 L6	266 x 193 x 263
	12,5	BCW12,5V25	3 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW0,83 V 25 L6	266 x 193 x 263
	15,0	BCW15V25	3 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW1,67 V 25 L6	266 x 193 x 263
	17,5	BCW 17,5V25	3 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW2,5 V 25 L10	266 x 193 x 263
	20,0	BCW20V25	6 x UCW3,33 V 25 L10	266 x 193 x 263
	22,5	BCW 22,5V25	6 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW0,83 V 25 L6	266 x 193 x 263
	25,0	BCW25V25	6 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW1,67 V 25 L6	266 x 193 x 263
	27,5	BCW27,5V25	6 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW2,5 V 25 L10	266 x 193 x 263
	30,0	BCW30V25	9 x UCW3,33 V 25 L10	266 x 193 x 263
	35,0	BCW35V25	9 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW1,67 V 25 L6	390 x 193 x 263
	37,5	BCW 37,5V25	9 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW2,5 V 25 L10	390 x 193 x 263
	40,0	BCW 40V25	12 x UCW3,33 V 25 L10	390 x 193 x 263
	45,0	BCW 45V25	12 x UCW3,33 V 25 L10 + 3 x UCW1,67 V 25 L6	390 x 193 x 263
	50,0	BCW 50V25	15 x UCW3,33 V 25 L10	390 x 193 x 263
380	17,5	BCW17,5V40	3 x UCW5 V 40 L10 + 3 x UCW0,83 V 40 L4	266 x 193 x 263
	20,0	BCW20V40	3 x UCW5 V 40 L10 + 3 x UCW1,67 V 40 L4	266 x 193 x 263
	22,5	BCW22,5V40	3 x UCW5 V 40 L10 + 3 x UCW2,5 V 40 L6	266 x 193 x 263
	25,0	BCW25V40	3 x UCW5 V 40 L10 + 3 x UCW3,33 V 40 L8	266 x 193 x 263
	27,5	BCW27,5V40	6 x UCW3,33 V 40 L8 + 3 x UCW2,5 V 40 L6	266 x 193 x 263
	30,0	BCW30V40	6 x UCW5 V 40 L10	266 x 193 x 263
	35,0	BCW35V40	6 x UCW5 V 40 L10 + 3 x UCW1,67 V 40 L4	266 x 193 x 263
	40,0	BCW40V40	6 x UCW5 V 40 L10 + 3 x UCW3,33 V 40 L8	266 x 193 x 263
	45,0	BCW45V40	9 x UCW5 V 40 L10	266 x 193 x 263
	50,0	BCW50V40	9 x UCW5 V 40 L10 + 3 x UCW1,67 V 40 L4	390 x 193 x 263
	60,0	BCW60V40	12 x UCW5 V 40 L10	390 x 193 x 263
	75,0	BCW75V40	15 x UCW5 V 40 L10	390 x 193 x 263

Fonte: adaptado de WEG (2016)

Como relatado anteriormente, a empresa já possui um banco capacitivo, o qual tem como referência BWC30V40 listado na Figura 24. Este banco possui 6 unidades capacitivas de referência UCW5V40, atendendo uma potência reativa de 30 kVAr.

Sendo:

$$C = 91,8 \times 6 = 550,8 \mu\text{F}$$

Portanto, como solução para o problema relatado, a empresa deve adquirir o montante de 3 unidades capacitivas de referência UCW5V40 para que o seu fator de potência chegue ao nível ideal.

Assim, o banco da empresa redimensionado será composto por 9 unidades capacitivas de referência UCW5V40, sendo igual ao banco de referência BCW45V40.

O capacitor escolhido tem o valor de potência reativa definido em 5 kVAr, onde cada unidade opera de forma gradativa, evitando que o fator de potência fique abaixo do limite estabelecido, ao fato que existe variação aleatória de fatores de potência ao longo do dia.

O banco de capacitores escolhido atende os valores dimensionados, sendo estes imediatamente superior. Comparando os valores de potência reativa e das capacitâncias somadas de cada unidade capacitiva, obtém-se a seguinte Tabela 10.

Tabela 10 - Comparação entre valores dimensionados e comerciais de banco de capacitor.

	<b>Valores Dimensionados</b>	<b>Valores Comerciais</b>
<b>Potência Reativa Capacitiva (kVAr)</b>	43,519727	45,00
<b>Capacitância (<math>\mu</math>F)</b>	799,424	826,2

Fonte: o autor

## **7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS**

Neste tópico são representadas as conclusões do presente trabalho e as recomendações para continuidade dos trabalhos nesta área do estudo.

### **7.1 Conclusões**

Desde que a energia elétrica foi apresentada, buscas para a melhor qualidade vem sendo estudadas, para que o produto em si, prestado pela concessionária atenda de forma segura e eficiente, o produto deve cada vez mais ser padronizado em virtude que as novas cargas e novas tecnologias que depende da alimentação elétrica são mais sensíveis e mais vulneráveis.

Este trabalho alcançou o objetivo inicialmente proposto, uma vez que foi possível fundamentar o estudo de caso em todos os referenciais teóricos apresentados, e cuja execução norteada por procedimentos sugeridos pelos autores citados em referência bibliográfica, bem como normatizados pelas normas pertinentes, se fez oportuna e capaz de evidenciar problema relacionado a qualidade de energia e eficiência energética. Dessa forma, fica claro o papel do engenheiro eletricista como consultor em qualidade de energia e eficiência energética, consolidando cada vez mais a profissão como solucionadora de problemas em tecnologia, bem como assegurando sua capacidade de contribuir para o desenvolvimento das sociedades e da população como um todo.

Como resultado dos estudos, foram apresentados à empresa analisada todos os detalhes acerca dos dados coletados, das informações produzidas, das conclusões alcançadas mediante análise dos indicadores, e sugestão de redimensionamento do dispositivo instalado para solucionar problemas relacionados a eficiência energética e qualidade de energia. Ainda, foi deixado claro que a solução é adequada para o cenário verificado e que, no caso de nova expansão de cargas instaladas na planta estudada, se faz necessário um novo estudo que contemple as novas condições.

### **7.2 Recomendações para trabalho futuro**

Em função da indisponibilidade de algumas informações e do tempo para a conclusão deste trabalho, recomenda-se para trabalhos futuros a apresentação de um estudo econômico

financeiro do resultado com o redimensionamento do banco, visando apresentar os valores de redução na fatura referente as multas e economia, comparada aos custo do redimensionamento do banco.

Por fim, sugere-se também estudos onde mostre as vantagens financeiras, econômica e técnicas.

## REFERÊNCIAS

ABRADEE, Associação Brasileira de Distribuidores de Energia. **Entenda a Indústria de Energia Elétrica**. Disponível em: <<http://www.abradee.org.br/publicacoes/modulo4.pdf>>. Acesso em: 4 de novembro de 2018.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 414 de 9 de setembro de 2010**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/br/en2010414.pdf>>. Acesso em: 1 de novembro de 2018.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. **Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST**. Revisão 7 de 01/01/2016. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8\\_Revis%C3%A3o\\_7.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_7.pdf)>. Acesso em: 1 de novembro de 2018.

CAPELLI, Alexandre. **Energia Elétrica: Qualidade e eficiência para aplicações industriais**. São Paulo: Saraiva, 2016. 272 p.

DUGAN, R. C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. New York: McGrawHill. 2002. 521 p.

GOMES, João P. P.; VIEIRA, Marcelo M. F. **O campo da energia elétrica no Brasil de 1880 a 2002**. Revista de Administração Pública. Rio de Janeiro: FGV. 2008. p. 295 – 321.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009. 140 p.

TRIOLA, Mario F. **Introdução à Estatística**. Tradução: Vera Regina Lima de Farias e Flores. 10ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 696 p.

WALVIS, Alida. **Avaliação das reformas recentes no setor elétrico brasileiro e sua relação com o desenvolvimento do mercado livre de energia**. 2014. Tese de Doutorado.

WEG. **Capacitores para correção do fator de potência, 2016**. Disponível em: <<http://ecatalogg.weg.net/files/wegnwt/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-catalogo-portugues-br.pdf>> Acesso em: 06 de novembro de 2018.