

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS
ENGENHARIA ELÉTRICA
PEDRO BORGES NANI

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA E TERMOGRAFIA EM UM SISTEMA
ELÉTRICO: um estudo de caso**

Varginha
2017

PEDRO BORGES NANI

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA E TERMOGRAFIA EM UM SISTEMA
ELÉTRICO: um estudo de caso**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Msc. Eduardo Henrique Ferroni.

**Varginha
2017**

PEDRO BORGES NANI

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA E TERMOGRAFIA EM UM SISTEMA
ELÉTRICO: um estudo de caso**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas- UNIS pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: 04/12/2017

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

Prof. Me. Helciner Vitor Ferreira

Prof. Me. Josué Alexandre Aquino

OBS:

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da força de vontade, a minha família e minha namorada Wanda, que estão juntos comigo nessa batalha diária, aos amigos que conheci durante o curso. Ao meu orientador Eduardo Ferroni, que esteve sempre presente. Aos meus amigos Luiz Antônio e Ederson Reis que me ajudaram nas pesquisas na área da qualidade de energia.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo prestar serviço da qualidade de energia e termografia em uma empresa de mineração localizada na cidade de Três Corações. Os distúrbios relacionados à qualidade de energia e termografia serão apresentados, bem como o conjunto que define a qualidade de energia. Técnicas preditivas de manutenção do sistema elétrico serão apresentadas neste trabalho. Com a utilização do equipamento de qualidade de energia FLUKE modelo 435, a instalação será realizada em dois pontos distintos da empresa, um momento na cabine primária e outro na cabine de comando de carga, ambos os casos em regime permanente de cargas. Os dados serão extraídos para o software *PowerLog*, que posteriormente afim de um tratamento mais preciso, serão lançados em Excel, formalizando assim, os distúrbios recorrentes do estudo. Em outro momento, a termografia será aplicada em conjunto, detectando possíveis aquecimentos de fase, chaves de comando, relés e todo conjunto dos painéis elétricos. Por fim, com todos os dados em mãos, soluções viáveis serão propostas, para corrigir os distúrbios que poderão surgir.

Palavras-chave: Qualidade de energia. Manutenção preditiva. Eficiência do sistema.

ABSTRACT

This work aims at service of quality of energy and thermograph in a mining company located in the city of TrêsCorações. The disturbances related to energy quality and thermographies are reported as well as the set that define an energy quality. Previous techniques of maintenance of the electrical system and presented in this work. With the use of the FLUKE model 435 power quality equipment, an installation is carried out at two different points in the company, one moment in the primary cabin and the other in the cargo control cabin, both cases in permanent carriage. The data are extracted into PowerLog software, which affiliate to a more precise treatment, were released in Excel, thus formalizing the recurring disorders of the study. At another time, a terminology is applied together, detecting possible phase resources, command keys, relays and all set of electrical panels. Finally, with all the data in hand, viable and proposed solutions, to correct the disturbances that wish to arise.

Keywords: *Energy quality. Predictive maintenance. System efficiency.*

1 INTRODUÇÃO	8
2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	10
3 DISTÚRBIOS ASSOCIADOS A QUALIDADE DE ENERGIA	12
3.1 Transitórios Oscilatórios	12
3.2 Transitórios Impulsivos	13
3.3 Variações de tensão de curta duração	14
3.4 Variações de tensão de longa duração	14
3.5 Interrupção momentânea	15
3.6 Interrupção temporária	15
3.7 Interrupção Sustentada ou Longa Duração	15
3.8 Surto de tensão	16
3.9 Afundamento de tensão de curta duração	16
3.10 Flutuação de tensão	17
4 REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA	18
4.1 Valores mínimos do Fator de Potência	19
5 HARMÔNICOS	22
5.1 Efeito distorcivo e saturação magnética	22
5.2 Sequência de fase das harmônicas	24
5.3 Efeitos das fases relativas das harmônicas	25
6 TERMOGRAFIA	27
6.1 Radiação infravermelha	28
6.2 Técnicas de inspeção termográfica	29
6.3 Tipos de manutenções nos sistemas	31
7 RESOLUÇÕES NORMATIVAS	32
7.1 Qualidade do produto	32
7.2 Compensação aos consumidores	33
7.3 Normas regulamentadoras	34
7.3.1 Fator de Potência	34
7.3.2 Harmônicos	34
7.3.3 Desequilíbrio de tensão	36
7.3.4 Flutuação de tensão	36
7.3.5 Variação de tensão de curta duração	37
7.3.6 Variação de frequência	37
8 MÉTODOS UTILIZADOS EM MATERIAIS	38
8.1 Metodologia de medição	38
9 RESULTADOS	40
9.1 Afundamentos de tensão	42
9.2 Fator de Potência	44
9.4 Imagens termográficas	48

10 CONCLUSÃO.....	54
REFERÊNCIAS	55

1 INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro é dividido em diversos segmentos que compõe sua estrutura, desde a geração, distribuição e o uso da energia elétrica pelos clientes. Com a crescente demanda de energia elétrica no país, as concessionárias são obrigadas a fornecer energia de qualidade às empresas. Por sua vez, as empresas necessitam fazer um uso adequado da mesma e minimizar as perdas no sistema elétrico interno. Para isto, deve-se ter uma gerência para manter o sistema elétrico em perfeita harmonia, onde qualidade da energia provém da eficiência energética.

Diversos fatores envolvem a qualidade da energia, que é formada por fenômenos que fazem parte do sistema elétrico e por isso deve-se divulgar e reconhecer os setores envolvidos com o consumo, a transmissão e geração de energia elétrica. Distorções de tensões e correntes localizadas nos pontos de acoplamento comum, como dentro das próprias instalações dos consumidores de energia estão ligadas a correção do fator de potência, racionalização de energia e aumento da produtividade. (PAULILO, 2013). Existem indicadores que compõe algumas particularidades. Podem-se destacar cinco itens:

- a) Caráter aleatório nas ocorrências de distúrbios de QEE;
- b) Inevitabilidade técnica de ocorrências destes distúrbios;
- c) Variado nível de sensibilidade dos consumidores;
- d) Dificuldade de executar controle prévio da QEE, visto que geração, transmissão, distribuição e consumo da energia ocorrem juntos;
- e) Grande área de vulnerabilidade dos SE, representado por milhares de quilômetros de linhas de transmissão, subtransmissão e distribuições aéreas. (PAULILO, 2013).

A gestão do sistema elétrico engloba a área de manutenção que a cada dia tem se tornado mais estratégica para as empresas, onde o ativo fique disponível e em condições de operação. Devido a este fato, métodos de manutenção corretiva, preditiva e preventiva devem ser avaliados, a fim de promover uma metodologia capaz de atingir cada componente ou o conjunto desse sistema. Segundo Silva (2014), a manutenção preditiva consiste em programas especiais, que são orientados para o controle de máquinas e equipamentos em serviço. Seu objetivo é detectar falhas e mudanças do estado físico que obrigam a ter serviços de manutenção, prevendo com antecedência quebras, paradas ou danos maiores.

Para Diniz (2013), a atividade que envolve a manutenção vem com o passar dos anos sofrendo modificações e exigindo cada vez mais do profissional de manutenção, técnicas que possam ser usadas a fim de promover um maior enfoque em segurança, meio ambiente,

qualidade dos produtos e serviços. Com o passar dos anos, o termo manutenção cresceu saindo de uma cultura de correção de falhas para uma cultura de evitação, de bloqueio de falhas, maior eficiência, maior eficácia de uma simples correção, para um reparo definitivo, sem necessidade de retrabalho.

2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

O marco da eficiência energética no Brasil foi à lei 10.295 de 2001 que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e uso Racional de energia elétrica. A lei estipula que aparelhos comercializados e fabricados no Brasil deverão seguir um nível máximo de consumo específico de energia ou mínimo de eficiência energética. O Comitê Gestor de Indicadores e de Níveis de eficiência Energética- CGIEE começou a aplicar a lei de utilização adequada de energia nos motores de indução trifásicos, em função do elevado consumo de energia. Estima-se que cerca de 30% é correspondente ao consumo total do país e que 50% desse consumo são industriais (VIANA et al,2012).

Segundo Martins (1999) os índices de perdas de energia elétrica no Brasil comparado com outros padrões internacionais é muito elevado, e pode ser justificado pelas características do sistema elétrico nacional, da dimensão continental do país e da geração hidrelétrica, causando grandes fluxos energéticos entre as diversas regiões brasileiras.

Para Silvério (2016) com a crescente redução dos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas no Brasil, nas regiões Sudeste e Centro Oeste, nos anos de 2014 a 2015, obrigaram o operador nacional do sistema (ONS) a aumentar o uso das termelétricas, que produz energias mais caras do que as usinas hidroelétricas, este fato elevou, demasiadamente o custo da geração elétrica. O PLD (Preço de Liquidação das Diferenças) atingiu um máximo de R\$ 822,83, em 2014 e tentando suprir os efeitos do desequilíbrio entre a receita e despesas das concessionárias distribuidoras, um empréstimo de aproximadamente R\$ 17,78 bilhões teve de ser feito em bancos públicos e privados. A ANEEL teve de impor um valor de teto para a PLD de R\$ 388,48 a partir de 2015 para poder evitar que a PLD gerasse prejuízo para as distribuidoras.

Foram implantadas no ano de 2015 as bandeiras tarifárias de acordo com a resolução Normativa nº 547 de abril de 2013 que permitiam um aumento de R\$ 1,50 para cada quilowatt-hora - kWh consumidos, denominado bandeira amarela e R\$ 3,00 para cada 100 kWh consumidos na bandeira vermelha para as mais caras. Visto que não eram suficientes as bandeiras tarifárias, foi criada uma resolução homologatória nº 1.858 de 27 de fevereiro de 2015 aprovaram uma revisão Extraordinária de Tarifas (RTE) para algumas concessionárias de distribuição.

Quadro1: Percentual de reajuste RTE.

Distribuidora	Efeito RTE
CELESC	24,8%
BANDEIRANTE	24,9%
DME-PC	27,6%
ENERSUL	27,9%
CEMIG	28,8%
CPFL PAULISTA	31,8%
ELETROPAULO	31,9%
COPEL	36,4%
AES SUL	39,5%

Fonte: Adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2015).

3 DISTÚRBIOS ASSOCIADOS A QUALIDADE DE ENERGIA

Segundo Paulilo (2013) o termo qualidade de energia envolve áreas de interesse dos sistemas de energia elétrica até mesmo com sistema de transmissão de dados. Por exemplo, a qualidade de energia em uma determinada barra do sistema elétrico é adversamente afetada por uma ampla variedade de distúrbios. O que se pode entender de transitório:

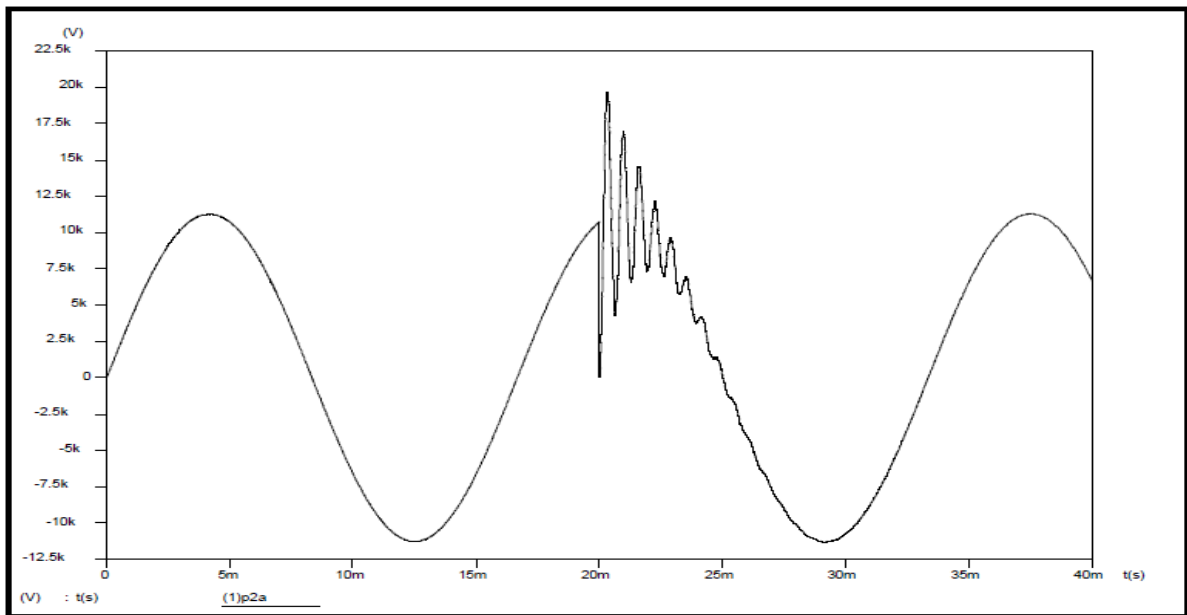
Os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Geralmente, a duração de um transitório é muito pequena, mas de grande importância, uma vez que submetem equipamentos a grandes solicitações de tensão e/ou corrente. (PAULILO, 2013,p.30).

Existem dois tipos de transitórios: Os impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, causados por chaveamentos.

3.2 Transitórios oscilatórios

Um transitório oscilatório acontece quando há uma alteração no estado de regime permanente de tensão e/ou corrente. Os transitórios de baixa frequência acontecem na maioria das vezes em subestações e suas causas são por vários motivos independentes. A energização por banco de capacitores é uma das causas mais frequentes, onde uma faixa de oscilação de tensão entre 300 e 900 Hz , com magnitude máxima por volta de 2 pu, possui valores típicos de 1,3 a 1,5pu, com tempo de 0,5 a 3 ciclos que depende do amortecimento do sistema. O uso dos capacitores empregado pelas indústrias traz uma responsabilidade maior no âmbito de condição de ressonância provocado por altas frequências entre a concessionária e as indústrias, podendo gerar um grande aumento das tensões transitórias, com variações de 3 a 4 pu.

Figura 1: Transitório proveniente do chaveamento de um banco de capacitores.



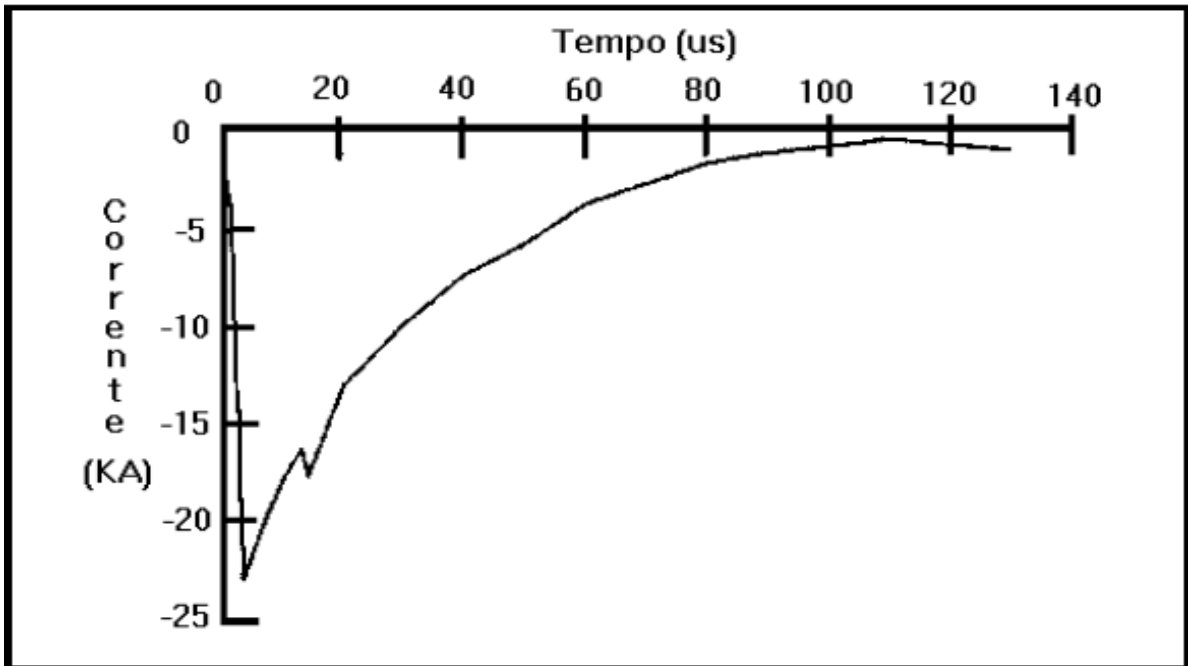
Fonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA (2008).

3.3 Transitórios impulsivos

Para UFU, (2008) ocasionado por descargas atmosféricas, um transitório impulsivo pode ser definido como uma alteração repentina nas condições de regime permanente da tensão corrente ou ambas, caracterizando-se por apresentar impulsos unidirecionais em polaridade (positivo ou negativo) e com frequência bastante diferente daquela da rede elétrica. A figura 2 ilustra uma corrente típica de um transitório impulsivo, oriundo de uma descarga atmosférica.

Os transitórios impulsivos geralmente são definidos por um tempo de subida e outro de descida do impulso, os quais, também, podem ser expressos pelo seu Conteúdo espectral. Para exemplificar, um impulso transitório definido como 1,2. x 50 ms e 2000V, significa que o impulso atinge seu valor máximo de 2000V em um tempo de 1,2 ms e, posteriormente, decai até a metade de seu valor máximo, no tempo de 50 ms. (UFU, 2008, p.27)

Figura 2: Corrente transitória impulsiva oriunda de uma descarga atmosférica.



Fonte: UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, (2008).

3.3 Variações de tensão de curta duração

De acordo com Paulilo (2013) as variações de tensão de curta duração ocorrem quando energiza grandes cargas que exigem altas correntes de partida, por intermitentes de falhas nos bornes dos cabos do sistema. Com a falha e de tais condições, pode ocorrer um afundamento momentâneo de tensão ("*sag*"), uma elevação momentânea de tensão ("*swell*"), ou mesmo uma parada completa do sistema elétrico.

3.4 Variações de tensão de longa duração

Comumente chamadas de variações de longa, são bem parecidas com as variações de tensão de curta duração, o que difere é o tempo que essas tensões ficam no sistema elétrico com um tempo superior a três minutos. Normalmente as causas são por saídas de grandes blocos de carga, perda de fase dentre outros.

3.5 Interrupção momentânea

Para Martinho (2012), o que caracteriza uma interrupção momentânea é a ausência de tensão ou valores que sejam menores que 10% da tensão nominal, num período entre 0,5 ciclos e três segundos, o que caracteriza uma falta fase-terra ou fase-fase.

Mesmo que a interrupção seja rápida, pode acarretar alguns problemas que são graves e perdas financeiras associadas ao distúrbio. Caso a parada ocorra por alguns segundos, já é suficiente o bastante para danificar equipamentos eletrônicos, ou mesmo desligá-los abruptamente, retardando o funcionamento do equipamento.

A interrupção causa danos em equipamentos eletrônicos que armazenam dados, principalmente aqueles que são magnéticos que são fáceis de terem seus sistemas corrompidos.

3.6 Interrupção temporária

A causa principal para as interrupções temporárias são provenientes de dispositivos de proteção como os religadores onde ao detectar uma falta acionam dispositivos de proteção contra curto-circuito. A interrupção temporária ocorre quando há ausência de tensão ou quando existir tensões menores que 10% a nominal, em um período que ocorre entre três segundos e um minuto. As faltas fase-terra pode ser causada pela queda de galhos de árvores nas redes aéreas, ou até mesmo descargas atmosféricas que provocam uma parada temporária.

3.7 Interrupção Sustentada ou Longa Duração

Segundo Martinho (2012), uma interrupção que perdura mais de um minuto é dita como uma interrupção sustentada. Esse tipo de distúrbio ocorre quando necessita de uma manobra para o restabelecimento da energia. Diversas são as causas que podem causar interrupção, como descargas atmosféricas e atuação de dispositivos de proteção (fusíveis) outrora algum acidente onde também obrigue a desenergização por certo período, e as faltas, tanto fase-terra quanto fase-fase, que acionam os dispositivos de proteção obrigando a manutenção para a eliminação da mesma.

Um projeto de rede elétrica deve ser minuciosamente analisado de modo a minimizar os distúrbios, diminuindo seus efeitos na rede. O uso de UPS's, geradores de energia alternativa, reguladores e religadores de energia podem ser previamente utilizados. Uma

interrupção sustentada faz com que equipamentos parem de funcionar, o que gera enormes problemas, principalmente no que se refere a prejuízos financeiros e materiais.

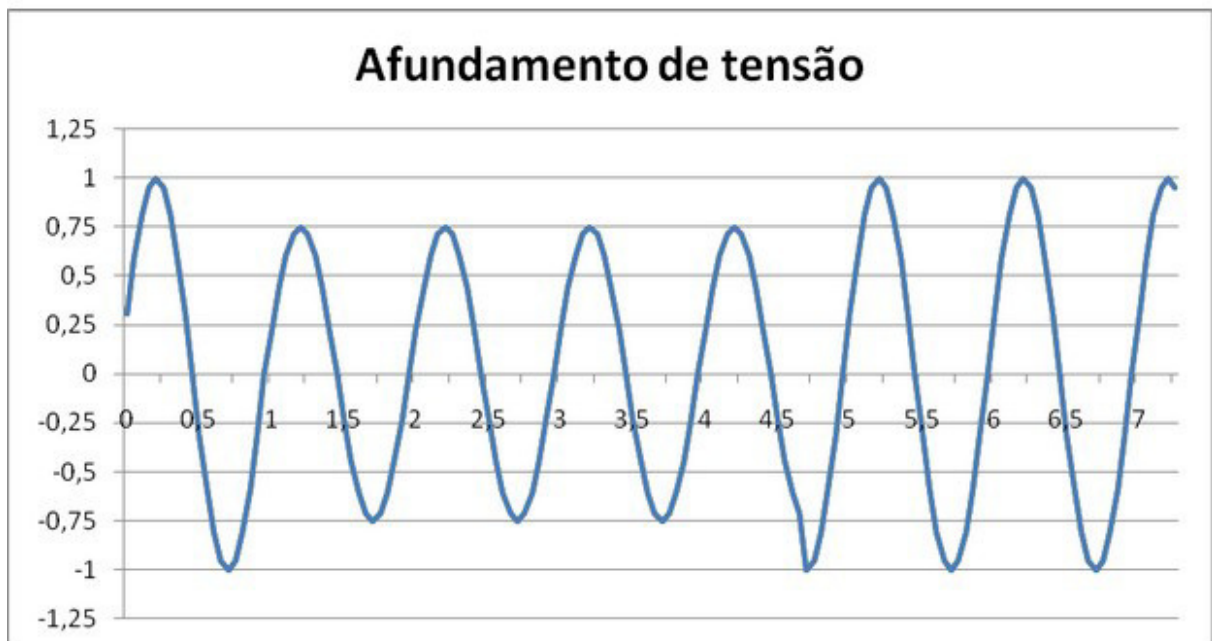
3.8. Surto de tensão

Define-se surto de tensão o momento em que a tensão na rede elétrica aumenta consideravelmente, onde seu pico máximo ocorre num instante de tempo. Esse tipo de surto ocorre principalmente quando há descargas atmosféricas, e pode-se dividir em dois tipos diferentes, o surto induzido ou indireto e surto conduzido ou direto.

3.9 Afundamento de tensão de curta duração(SAG)

Afundamento de tensão geralmente acontece quando há uma alteração no valor eficaz da tensão, na faixa de 0,1 e 0,9 pu da frequência fundamental. Normalmente, esses tipos de distúrbio são associados a falhas no sistema, curto-circuitos na rede de distribuição.

Figura 3: Afundamento de tensão característico de um de alimentador de circuito elétrico.



Fonte: Araújo e kanasiro, (2008).

3.10 Flutuações de tensão

Segundo Fernandes (2008) o termo flutuação de tensão se dá pelas variações de correntes impostas por cargas. Usa-se o termo "*flicker*" para definir o impacto do fenômeno elétrico "flutuação de tensão" na incidência de luz nos sistemas luminosos.

Para ANEEL, o cálculo da sensação de cintilação é dado de modo a avaliar o tão incômodo é o efeito da cintilação luminosa nos pontos de iluminação do consumidor final. Alguns fatores implicam a utilização de uma terminologia a fim de avaliar esses fenômenos. Dentre os cálculos de formulação de cintilação tem-se:

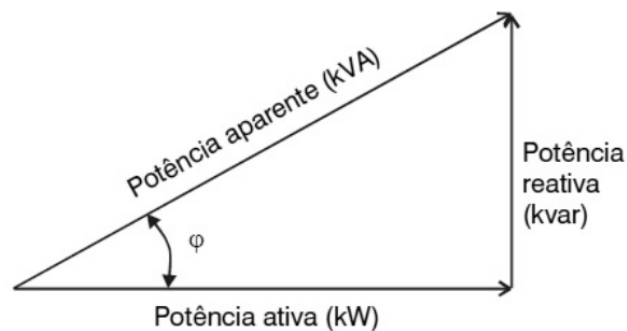
- a) Severidade de curta duração - P_{st}
- b) Severidade de longa duração - Plt
- c) Valor diário do indicador P_{st}
- d) Valor semanal do Plt
- e) Fator de transferência - FT

Para os cálculos dos indicadores, são estabelecidos junto às normas da IEC procedimentos que visam estabelecer os níveis de severidade de cintilação associados à flutuação de tensão. Os valores provêm da medição e processamento das tensões dos barramentos, posteriormente passadas para níveis de sinal da sensação de cintilação que, mais adiante, são classificados em faixas de probabilidade de ocorrência. O Fator de transferência pode ser calculado através da relação entre o valor dado de P_{st} e Plt . O indicador Plt é composto por 12 valores consecutivos de P_{st} .

4 REDUÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA

Segundo Martinho (2012) a priori, para entender como o fator de potência influencia na rede elétrica, deve-se rever os conceitos que o envolvem. O fator de potência (FP) nada mais é que o ângulo de defasagem formado entre a potência ativa a aparente baseado no triângulo de potências conforme a Figura 1.

Figura 1: Triângulo de potências.



Fonte: O autor.

Potência aparente: Define-se como potência aparente toda potência que será utilizada de uma fonte geradora de energia, sendo assim a soma vetorial da potência útil P (ativa) com a potência reativa (Q). O módulo e ângulo são calculados pela Expressão 1:

$$S = \sqrt{(P^2 + Q^2)}, \text{ onde o ângulo } \phi = \text{tg}^{-1}(Q/P). \quad (1)$$

Onde,

S = Potência aparente

P = Potência ativa

Q = Potência reativa

Potência ativa: É a potência que é utilizada para trabalho. É escrita pela letra P e a sua unidade é *watt*. Em sistemas monofásicos a expressão da potência útil fica: $P = U \cdot I \cdot \cos\phi$, e nos sistemas trifásicos tem-se a expressão: $P = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \cos\phi$, em que:

U_f = tensão de fase

If= corrente de fase

Ul= tensão de linha

Il = corrente de linha

ϕ = ângulo formado pelas potências útil e aparente

Potência reativa: A potência reativa é a componente da potência aparente que não realiza trabalho. A unidade é Var e em sistemas monofásicos tem-se: $Q = U \cdot I \cdot \text{sen}\phi$. E em sistemas trifásicos: $Q = 3 \cdot U_f \cdot I_f \cdot \text{sen}\phi$.

4.1. Valores mínimos do Fator de Potência

Para Martinho (2012), o Brasil estabeleceu um padrão do fator de potência estipulado em 0,92 indutivos durante o período diurno e capacitivo durante a madrugada de acordo com a resolução 456 da ANEEL de 2000. O artigo 64 da norma determina que a concessionária deva cobrar um valor para as instalações com alimentação em média tensão de 2300 V. A resolução diz que a empresa pode ou não cobrar esse ajuste do (FP) em baixa tensão. A seguir a tabela 2 relaciona os países com seus respectivos fatores de potência.

Quadro 2: Relação país x fator de potência.

Espanha 0,92	Bélgica 0,95
Coreia 0,93	Alemanha 0,96
França 0,93	Suíça 0,96
Portugal 0,93	Argentina 0,95

Fonte: Adaptado de Martinho (2012).

Vários fatores propiciam o baixo fator de potência. Devem-se levar em consideração os transformadores que operam em vazio e que trabalham em certo período, e até mesmo o superdimensionamento dos transformadores provocam a queda do fator de potência.

O somatório dos equipamentos de um determinado circuito define com exatidão o FP. Quanto maior for o número de equipamentos de um dado sistema com baixo fator de potência, maior é a chance de esse circuito ter um FP baixo (MARTINHO,2012).

As perdas por baixo fator de potência fazem com que as concessionárias multem os consumidores, o que causa desperdício de energia por efeito Joule. Quanto menor for o fator de potência de um circuito, mais o transformador irá trabalhar e maior será a seção dos cabos condutores que transportam essa energia.

Tabela 3: Relação fator de potência x seção nominal do condutor.

Seção relativa	Fator de potência
1,00	1,00
1,23	0,90
1,56	0,80
2,04	0,70
2,78	0,60
4,00	0,50
6,25	0,40
11,10	0,30

Fonte: Adaptado de Martinho (2012).

Ainda de acordo com Martinho (2012), alguns métodos são utilizados para correção do fator de potência, como capacitores que minimizam o reativo na rede elétrica. De fato, uma consultoria é importante para averiguar possíveis problemas causados pelo reativo, como levantamento das cargas presentes, tempo de atuação de cada uma e como cada carga reage a tensão aplicada a ela. Existem três possibilidades de colocação de capacitores de modo que atuem em diferentes situações, dentre eles pode-se citar:

- a) Banco fixo de capacitores: Banco fixo de capacitores são ligados diretamente nos barramentos. Possui um baixo custo na instalação, e por esse motivo é conhecido como um fator problemático por trabalhar com cargas muito dinâmicas, excedendo por compensação.
- b) Banco semiautomático: Comparado com o banco fixo, esse tipo de instalação é feito junto com as cargas. Cada banco de capacitores irá atender um grupo de cargas (entrada e saída), sendo o custo elevado, o que propicia um maior investimento. Pode acontecer também na

maioria dos casos o chaveamento excessivo dos capacitores em carga, não chegando às vezes a descarregar, danificando os dispositivos.

- c) Banco de acionamento automático de capacitores: São o mais caro de todos os três tipos. É indicado para cargas que sejam mais dinâmicas. Seu funcionamento baseia-se em pequenos bancos que são acionados independentes. Cada capacitor é acionado de modo que melhore a eficiência do circuito com o fator de potência, e esse acionamento é feito por um gerenciador em função de dados captados na medição de corrente de carga.

5 HARMÔNICOS

Uma distorção harmônica é formada por várias frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental. A deformação periódica é delimitada pela relação não linear entre corrente e tensão. Seguindo deste mesmo princípio, as não linearidades que podem ocorrer no sistema são as descontinuidades ocasionadas pelo chaveamento das correntes em conversores eletrônicos, compensadores estáticos e pontes retificadoras.

As cargas possuem uma influência considerável com relação a essas distorções onde ocorre o aparecimento das frequências Inter harmônica, além de harmônicas moduladas. Os fornos elétricos a arco é um exemplo de equipamento onde é comum o aparecimento de harmônicos. Eles possuem dezenas de megawatts de potência e por isso são tratados como um grande problema quando inseridos nos sistemas elétricos. (DECKMANN et al. 2017).

5.1 Efeitosdistorcivo e saturaçãomagnética

Uma curva de magnetização de um núcleo de um transformador é representada pela seguinte Equação 2 de característica não linear:

$$\varphi(t) = 2\text{sen}(2\pi ft) \quad (2)$$

$$i(t) = k\varphi(t) \cdot 1,3^{(\varphi(t))^2}$$

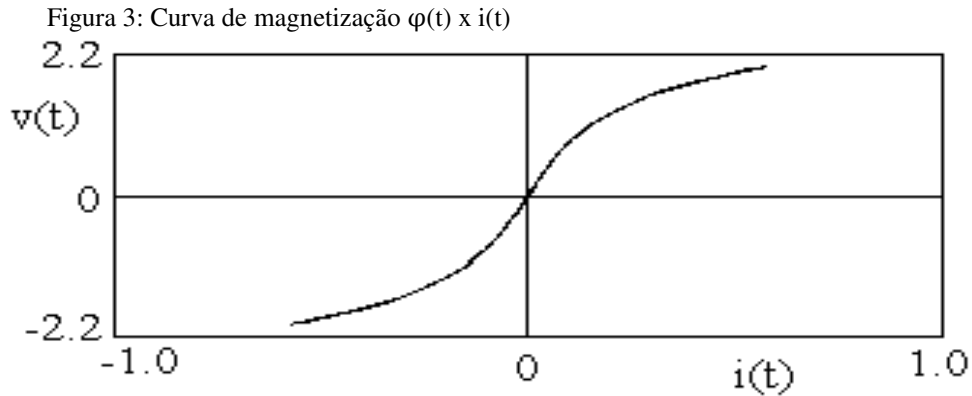
$$v(t) = \frac{d\varphi}{dt}$$

Onde (t) = variação de tempo

$i(t)$ = variação de tempo em relação à corrente (i).

$v(t)$ = variação de tempo em relação à tensão (v).

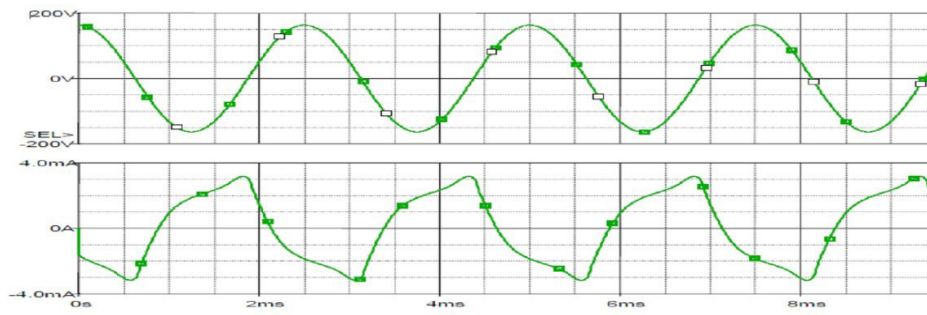
Para Deckmann e Pomilio (2017) determina-se a frequência como 50 Hz, onde resulta a característica (t) por $i(t)$ representado na Figura 1, que se aproxima da curva de magnetização típica. Em uma função denominada ímpar em que $f(x) = -f(-x)$ ou $(i) = -(-i)$.



Fonte: DSE-FEEC-UNICAMP, 2017.

Para uma tensão de excitação senoidal numa frequência de 400 Hz, resulta em fluxo senoidal, onde a forma de onda da corrente de magnetização aparece de acordo com a Figura 4:

Figura 4: Efeito distorcivo devido à característica não linear de núcleo ferromagnético. Tensão senoidal imposta, corrente resultante e espectro da corrente.



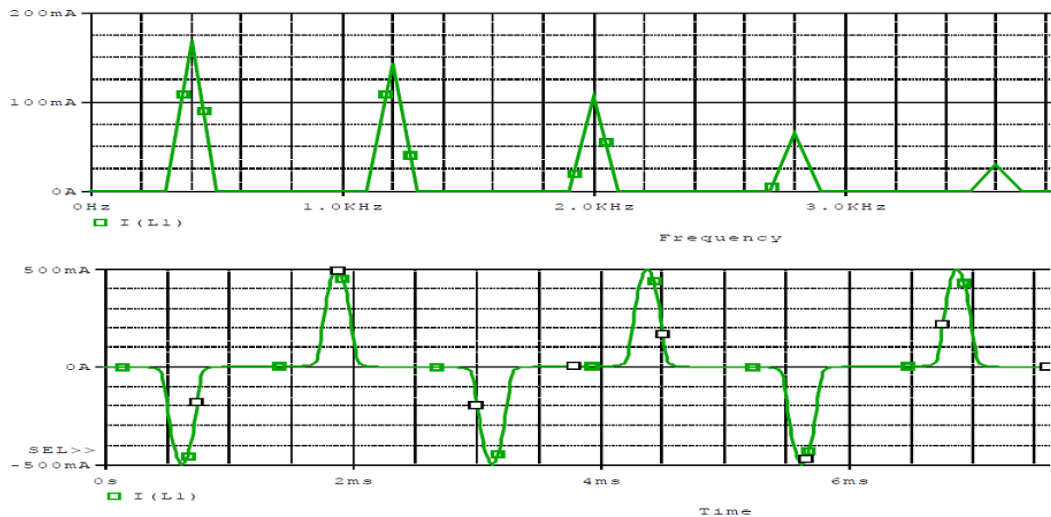
Fonte: DSE-FEEC-UNICAMP, 2017.

Para as não linearidades recorrentes das harmônicas ímpares, aparecem amplitudes decrescentes. Em um transformador, a corrente de magnetização se soma a corrente de carga. Caso a carga seja linear, a tensão é senoidal e a corrente na carga também será senoidal. Denomina-se joelho da curva de magnetização o momento em que a curva se aproxima do ponto onde a corrente se torna distorcida. A corrente criada é de porcentagem baixa em relação à corrente nominal do dispositivo, o que faz com que a distorção relativa fique pequena.

As não linearidades possuem características de uma função par $f(x) = f(-x)$ que não são usuais em cargas elétricas. Os problemas provenientes de mau funcionamento de cargas não

lineares e provocam a inserção das harmônicas pares no sistema, o que difere somente à fenômenos produzidos por arcos elétrico.

Figura 5: Corrente de magnetização e espectro com aprofundamento da saturação de transformador por efeito de aumento na tensão aplicada.



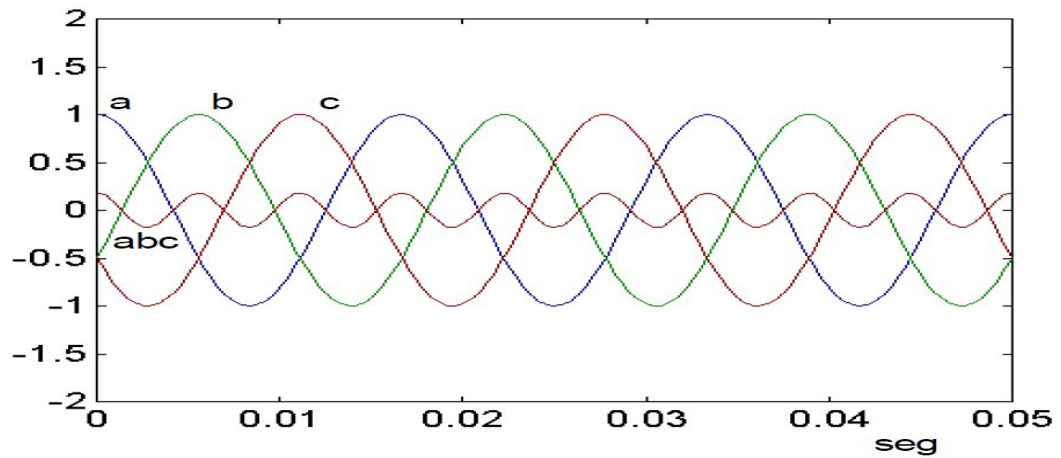
Fonte: DSE-FEEC-UNICAMP, 2017.

5.2 Sequência de fase dasharmônicas

A sequência de fase é de suma importância e deve ser analisada com cautela, pois qualquer desequilíbrio que ocorra faz surgir componentes de sequência oposta em cada harmônica. A Figura 4 mostra as harmônicas de ordem 3 e as tensões com sequência positiva (abc). As Figuras 6 e 7 mostram as harmônicas de terceira e quinta ordem com sequência zero, e outra com sequência negativa, respectivamente.

A sequência zero indica que pode circular uma corrente pelo neutro em conexão estrela a 4 fios, ou pela malha em triângulo, no caso em ligação delta.(DECKMANN et al. 2017)

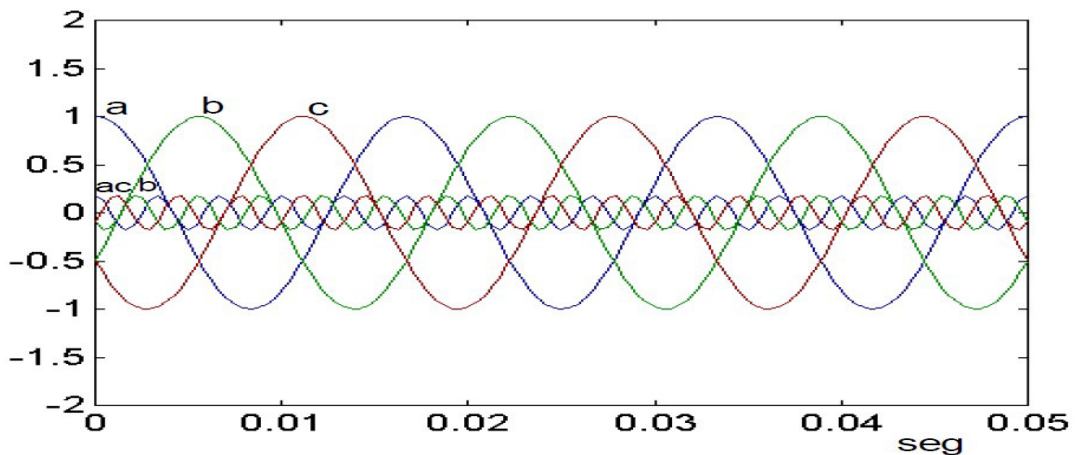
Figura 6: Harmônicas de terceira ordem com sequência zero.



Fonte: DSE-FEEC-UNICAMP, 2017.

A Figura 7 mostra a quinta harmônica equilibrada. As harmônicas possuem sequência negativa.

Figura 7: Harmônicas de quinta ordem com sequência negativa.



Fonte: DSE-FEEC-UNICAMP, 2017.

5.3 Efeitos das fases relativas das harmônicas

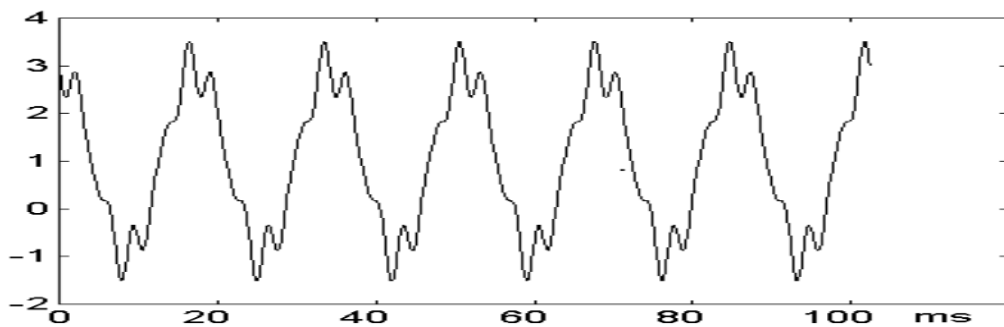
Na frequência fundamental, o que determina o fluxo de potência na rede é a fase gerada entre as tensões e correntes harmônicas. Uma harmônica fluindo em uma dada direção existe outra de mesma magnitude que transfere energia de forma negativa no sentido oposto. Fontes ("sources") e atratores ("sinks") são os fatores que determinam as correntes harmônicas.

Uma simples mudança de fase pode modificar o estado da forma de onda, onde não se altera seu valor eficaz ou RMS. Na Equação 3 tem-se a 5ª e 6ª harmônicas de mesma fase inicial:

$$v(t) = 1 + 2 \cos(2\pi \cdot 60t) + 0,4\text{sen}(2\pi \cdot 300t) - 0,2\text{sen}(2\pi \cdot 420t) \quad (3)$$

Um gráfico com as mesmas características de composição espectral é criado de acordo com equações 3 e 4. A Figura 8 mostra com detalhes a fase inicial nula para a quinta e sétima harmônicas:

Figura 8: Fase inicial nula para a quinta e sétima harmônicas.



Fonte: DSE-FEEC-UNICAMP, 2017.

Com a presença de harmônicos em um sistema de potência, uma gama de fatores indesejados pode ocorrer:

- a) Excitação de correntes ou tensões ressonantes entre indutâncias e capacitâncias
- b) Aparecimento de vibrações e ruído;
- c) Sobreaquecimento de núcleos ferromagnéticos;
- d) Sobreaquecimento de capacitores;
- d) Erro de medição de grandezas elétricas;
- e) Erro de controle de conversores;
- f) Erro de atuação de proteção;
- g) Sobrecorrente de neutro;
- f) Interferências e ruídos eletromagnéticos.

6 TERMOGRAFIA

De acordo com Henrique (2006, p.8) em meados de 1800 um astrônomo alemão conhecido como Sir Friedrich W. Herschel descobriu o infravermelho. Sabendo que a luz solar continha todas as cores visíveis ao espectro eletromagnético, Friedrich impulsionado por seus estudos quis então descobrir quais cores eram responsáveis pelo aquecimento dos objetos. Com um prisma, papelão e termômetros com bulbos pretos, Herschel mediu a temperatura das diferentes cores, observando um aumento da temperatura à medida que movia o termômetro de violeta para o vermelho no espectro criado pela luz do sol atravessando o prisma, notando que a temperatura mais quente ia além da luzvermelha.

A energia proveniente do calor é uma onda invisível que possui um comprimento de onda muito longo para ser detectado pelo olho humano. A luz que nós humanos conseguimos captar está situada na faixa de $0,4\mu\text{m}$ até $0,7\mu\text{m}$ do comprimento de onda do espectro eletromagnético, vindo logo depois o intervalo corresponde ao infravermelho situado entre $0,7\mu\text{m}$ até 1 mm.

A termografia infravermelha utiliza como técnica para diagnóstico a visualização e verificação instantânea do comportamento térmico dos objetos. O calor obtido pela câmera termográfica pode ser quantificado, sem contato com o material que está sendo analisado. Isso faz com que avalie com mais precisão os problemas por aquecimento. Um exemplo de imagem termográfica, é mostrado na Figura 9:

Figura 9: Análise termográfica de um transformador.



Fonte: FLIR, 2014.

6.2. Radiação infravermelha

Para Pela (2015), a radiação infravermelha (IV) são comprimentos de onda que variam de 0,8- 1.000 μ m que pode ser dividido em três situações: Radiação infravermelha curta, radiação infravermelha média e radiação infravermelha longa, 0,8 - 1,5 μ m, 1,5 -5,6 μ m, 5,6 - 1000 μ m, respectivamente. Todas essas ondas estão situadas no espectro eletromagnético entre a luz visível e as micro-ondas. A emissão dos raios ocorre com a temperatura diferente do zero absoluto, temperatura essa que a vibração molecular é cessada. Temperaturas que estão acima de certo valor de $K = -273^\circ$ produz um movimento molecular, de acordo com a equação de STEFAN-BOLTZMANN a seguir:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (5)$$

Onde:

E = Energia total emitida (W/m²)

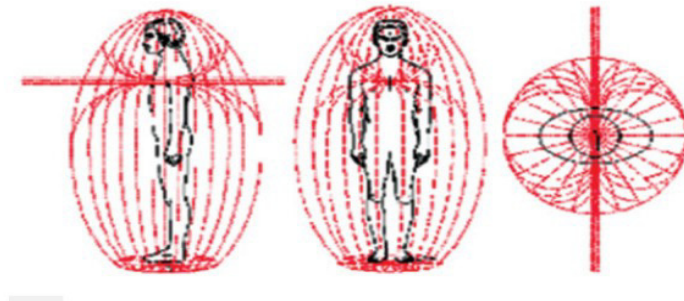
ε = emissividade

σ = 5,67 x 10⁻⁸ w/m²K⁴

T = temperatura absoluta em graus Kelvin

Para ter o infravermelho necessita de uma fonte primária que é o calor, denominado calor radiante, que não é visível, mas pode ser sentida pela emissão de calor, conforme a Figura 10:

Figura 10: Radiação infravermelha emitida pelo corpo humano.



Fonte: Pela, 2015.

6.3 Técnicas de inspeção termográfica

Segundo Júnior (2010), as técnicas de inspeção termográfica nada mais é que a inserção de uma dada tensão térmica no objeto a ser analisado, medindo sua temperatura distribuída sobre sua superfície, de tal forma que os problemas sejam mostrados como uma descontinuidade por exemplo. Dentre as possíveis situações tem-se:

- a) As tensões térmicas causadas pelo próprio objeto em análise, como um equipamento elétrico, instalações com fluido quente e frio, etc.
- b) Tensões térmicas com manobras específicas geralmente por meio da radiação ou condução. De acordo com as técnicas de inspeção, em ambas as situações deve-se ter como conhecimento prévio a distribuição de temperatura da superfície como uma referência comparativa da distribuição real. "O caso mais simples ocorrerá quando a distribuição da temperatura for uniforme e as descontinuidades de manifestarem como áreas quentes". (JUNIOR, 2010, p.169).

Figura 11: Equipamento de análise termográfica.



Fonte: Manual FLIR, 2016.

Para Fluke Corporation e The Snell Group (2009), a resolução de um dado problema nem sempre é de fácil solução, pois depende de uma profunda compreensão das variáveis como, transferência de calor, radiometria,, utilização de câmera e falha dos equipamentos. “A experiência do profissional de termografia também é contada”. Radiometria é a detecção e a medição de energia eletromagnética radiante, especificamente na parte infravermelha do espectro. FLUKE CORPORATION E THE SNELL GROUP,2009,p.11).

Não existem problemas quanto ao manuseio do equipamento de termografia, o profissional está apto a trabalhar com o equipamento quando este faz um treinamento básico e prática para assimilar as diferentes anomalias que se pode deparar na inspeção termográfica. A interpretação adequada da imagem térmica geralmente é mais difícil, podendo trazer problemas futuros caso o profissional falte com um treinamento mais eficaz e experiência prática comtermovisores.

Segundo ainda Fluke Corporation e The Snell Group (2009), para se obter retorno de investimento em termografia devem-se qualificar e certificar profissionais de termografia a fim de obter um resultado esperado, buscando o treinamento, experiência e realização de testes em umas das três categorias de certificação conforme a tabela a seguir:

Quadro 4: Níveis de certificação para profissionais de termografia.

NÍVEL1	Qualificado para colher dados de alta qualidade e classificar os dados com base em critérios de aprovação/reprovação por escrito.
NÍVEL2	Qualificado para montar e calibrar equipamentos, interpretar dados, gerar relatórios e supervisionar pessoal de nível 1.
NÍVEL3	Qualificado para desenvolver procedimentos de inspeção, interpretar códigos importantes e gerenciar programas incluindo a supervisão ou realização de treinamentos e testes.

Fonte: Adaptado de FLUKE, 2009.

6.4 Tipos de manutenções nos sistemas

A manutenção preventiva e preditiva difere no método de análise do profissional em uma determinada situação e o objeto a ser analisado.

Preventiva (MP): A manutenção é dita preventiva quando o trabalho é programado para o equipamento e/ou objeto a ser analisado quando está no seu pico máximo. A manutenção preventiva minimiza os problemas como falhos e mau funcionamento, mantendo os níveis necessários para rendimentos e segurança nas instalações.

Preditiva (MPv): De acordo com Fluke Corporation e The Snell Group (2009), Manutenção preditiva é o monitoramento das condições de desgaste com um determinado nível de tolerância. Esse método é usado normalmente para equipamentos mais caros e que necessitam de maior atenção quando este exerce um papel importante numa fábrica por exemplo.

7 RESOLUÇÕES NORMATIVAS

De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (2016) no âmbito que trata sobre as legislações e as normas que regem a qualidade de energia elétrica é o chamado PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), onde o módulo 8 referente a qualidade de energia estabelece alguns procedimentos que deve-se levar em consideração, onde aborda a qualidade do produto e do serviço prestado.

O que define a qualidade do produto são as condições em que ele se situa, os fenômenos e parâmetros com valores de referencia, que esteja conforme com a tensão em regime permanente e as perturbações na forma de onda de tensão.

Ainda de acordo com ANEEL (2016), a observância da qualidade de energia deve ser feito por:

- a) Consumidores com instalações conectadas em qualquer classe de tensão de distribuição;
- b) Produtores de energia;
- c) Distribuidoras;
- d) Agentes importadores ou exportadores de energia elétrica;
- e) Transmissoras detentoras de Demais Instalações de Transmissão -DIT;
- f) Operador Nacional do Sistema -ONS.

7.1 Qualidade do produto

Para ANEEL (2016) a seção 8.1 refere-se a qualidade do produto, onde os fenômenos de QEE (Qualidade da energia elétrica) são caracterizados. A seguir, listam-se os aspectos referentes à qualidade do produto:

- a) Tensão em regime permanente;
- b) Fator de potência;
- c) Harmônicos;
- d) Desequilíbrio de tensão;
- e) Flutuação de tensão;
- f) Variações de tensão de curta duração;
- g) Variação de frequência.

Sobre a tensão em regime permanente, são estabelecidos os limites adequados críticos e precários, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão caso houver

excesso sobre os limites de indicadores, critérios de medição, de registro e dos prazos de compensação ao consumidor.

O item 2.5.1 do módulo da seção 8.1 da ANEEL que trata sobre os valores de referência, diz que todo valor de tensão de energia elétrica deve ser comparado com o valor de tensão referência, que é a tensão nominal ou contratada, de acordo com a tensão do ponto de conexão. Com relação à tensão contratada junto as distribuidoras, a tensão nos pontos de conexão inferior a 1kV deve estar na faixa nominal do sistema.

Para o item 2.6, que trata sobre as obtenções de leituras, é aconselhável o uso do princípio da amostragem digital. Os equipamentos que realizam as leituras de medição devem estar de acordo com os requisitos mínimos:

- a) Taxa amostral de 16 amostras por ciclo;
- b) Conversor A/D de sinal de tensão de 12bits;
- c) Precisão na leitura de até 1% da leitura.

Os equipamentos de leitura devem averiguar os valores calculados dos indicadores individuais, a tabela de medição e o histograma de tensão.

7.2 Compensação aos consumidores

Segundo o item 2.13 da seção 8.1 da ANEEL, “a distribuidora deve compensar os titulares das unidades consumidoras que estiveram submetidas a tensões de atendimento com transgressão dos indicadores DRP ou DRC e os titulares daquelas atendidas pelo mesmo ponto de conexão.” (ANEEL, 2016, p.20). De acordo com ANEEL (2016), para o cálculo de compensação deve-se utilizar a Expressão 6:

$$Valor = \left[\left(DRP - \frac{DRP_m}{100} \right) \cdot k_1 + \left(DRC - \frac{DRC_m}{100} \right) \cdot k_2 \right] \cdot EUSD \quad (6)$$

Onde:

$k_1 = 0$, se $DRP \leq DRP_m$;

$k_1 = 3$, se $DRP > DRP_m$;

$k_2 = 0$, se $DRC \leq DRC_m$;

$k_2 = 7$, para unidades consumidoras atendidas em Baixa Tensão, se $DRC > DRC_m$;

$k_2 = 5$, para unidades geradoras atendidas em Média Tensão $DRC > DRC_m$;

$k_2 = 3$, para unidades consumidoras atendidas em Alta Tensão $DRC > DRC_M$;

DRP = valor do DRP expresso em %, apurado na última medição;

$DRP_M = 3\%$;

DRC = valor do DRC expresso em %, apurado na última medição;

$DRC_M = 0,5\%$;

EUSD = valor do encargo de uso do sistema de distribuição correspondente ao mês de referência da última medição;

7.3 Normas regulamentadoras

7.3.1 Fator de Potência

A regulamentação diz que para tensões que sejam inferiores a 230kV, de unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras, o fator de potência deve estar situado na faixa de 0,92 centésimos ou 1 (ideal), no caso indutivo e 0,92 centésimos capacitivo.

7.3.2 Harmônicos

Para as distorções harmônicas, é feita uma terminologia onde se aplica as formulações dos cálculos com vetores de referência conforme o quadro 5 a seguir:

Quadro 5: Terminologia.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h \%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT \%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	H
Ordem harmônica máxima	$H_{máx}$
Ordem harmônica mínima	H_{min}
Tensão fundamental medida	V1

Fonte: Adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, (2016).

Tem-se as expressões para cálculo das grandezas de $DIT_h \%$ e $DTT \%$ na Equação 7:

$$DITh \% = \left(\frac{V_h}{V_1}\right) \times 100(7)$$

$$DTT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmax} V_h^2}}{V_1} \times 100$$

É importante considerar o espectro harmônico no intuito de se obter o cálculo da distorção total dentro de uma faixa de frequências que compreende da fundamental, no caso do Brasil 60 Hz, até no mínimo a vigésima quinta ordem harmônica ($hmin = 25$). Para ter-se uma referência no planejamento elétrico, determina os valores de referência para as distorções harmônicas, no caso, a referência para distorções harmônicas individuais referidas a percentagem da tensão fundamental.

Tabela 6: Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental).

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]				
	$V_n \leq 1$ kV		$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5	6	4,5	2,5
	7	6,5	5	4	2
	11	4,5	3,5	3	1,5
	13	4	3	2,5	1,5
	17	2,5	2	1,5	1
	19	2	1,5	1,5	1
	23	2	1,5	1,5	1
	25	2	1,5	1,5	1
	>25	1,5	1	1	0,5
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5	5	4	2
	9	2	1,5	1,5	1
	15	1	0,5	0,5	0,5
	21	1	0,5	0,5	0,5

Pares	>21	1	0,5	0,5	0,5
	2	2,5	2	1,5	1
	4	1,5	1	1	0,5
	6	1	0,5	0,5	0,5
	8	1	0,5	0,5	0,5
	10	1	0,5	0,5	0,5
	12	1	0,5	0,5	0,5
	>12	1	0,5	0,5	0,5

Fonte: Adaptado de AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, (2016).

7.3.3 Desequilíbrio de tensão

Para Agência Nacional de Energia Elétrica (2016) o desequilíbrio de tensão deve-se ter como base de referência uma terminologia, metodologia de medição, instrumentação e valores de referência para tal desequilíbrio. Uma metodologia de medição deve ser eficaz a ponto de coletar informações por meio de recursos computacionais.

Um valor de referência deve ser inferior a 2%, com exceção da Baixa Tensão. Esse valor é referência base para um planejamento elétrico em termos de qualidade de energia, que será apresentado como uma resolução específica, após coleta de dados em período de experiência.

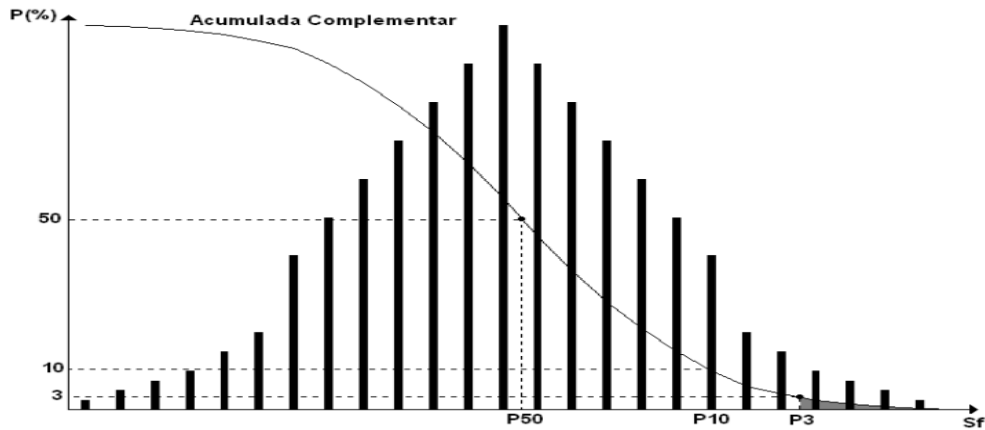
7.3.4 Flutuação de tensão

A legislação determina que para uma flutuação de tensão de um barramento do sistema de distribuição, a cintilação luminosa no consumidor deve ser avaliada de modo que em sua unidade tenham pontos alimentados por baixa tensão, sendo a avaliação do incômodo de cintilação imprescindível no sistema. Para cálculo do P_{ste} P_{ltd} dispõe das seguintes formulações 1.3:

$$P_{st} = \sqrt{(0,0314P_{0,1} + 0,0525P_1 + 0,0657P_3 + 0,28P_{10} + 0,08P_5)} \quad (8)$$

Onde P_i ($i = 0,1; 1; 3; 10; 50$) corresponde ao nível de sensação de cintilação que foi ultrapassado durante o período de tempo i %, a partir da função de distribuição acumulada complementar dado pelas normas previstas da IEC A Figura 12 mostra claramente a Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação.

Figura 12: Distribuição Acumulada Complementar da Sensação de Cintilação.



Fonte: Módulo 8- Qualidade de Energia Elétrica, PRODIST, ANEEL, 2016, p.27.

Segundo Agência Nacional de Energia Elétrica (2016) o indicador Pst serve para demonstrar os níveis de cintilação luminosa relacionados a flutuação de tensão num período de 10 minutos. Já a grandeza Plt apresenta a severidade dos níveis de cintilação luminosa associados à flutuação de tensão num período de 2 horas através de 12 valores consecutivos de Pst .

7.3.5 Variação de tensão de curta duração

Para medidas entre fase e neutro, definido como $VTCD$, é caracterizado também pela frequência de ocorrência, que corresponde a quantas vezes em cada combinação de duração e amplitude ocorrem em um determinado período de tempo, no barramento que está sendo monitorado.

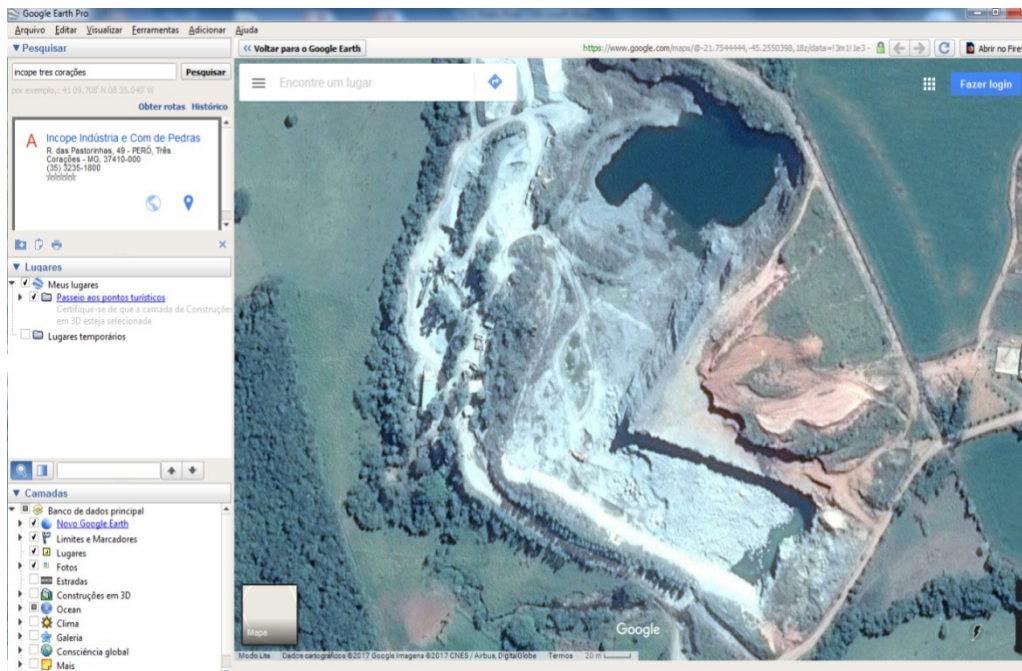
7.3.6 Variação de frequência

A operação ocorre no limite entre 59,9 a 60,1 Hz. Quando ocorre a saída da faixa de frequências, dentro de um prazo de 30 segundos o retorno para a faixa de 59,9 a 60,1 deverá acontecer. Com relação a cortes de geração ou de carga, durante os distúrbios e recuperação do ponto de equilíbrio carga-geração, a frequência não deve passar 66 Hz ou ser inferior a 56,5 Hz nas condições extremas. A permanência acima de 62 Hz poderá ficar num período máximo de 30 segundos, e um valor acima de 63,5 Hz por no máximo 10 segundos. A frequência abaixo de 58,5 Hz por no máximo 10 segundos e um valor que seja inferior a 57,5 Hz num período máximo de 5 segundos.

8 MÉTODOS UTILIZADOS E MATERIAIS

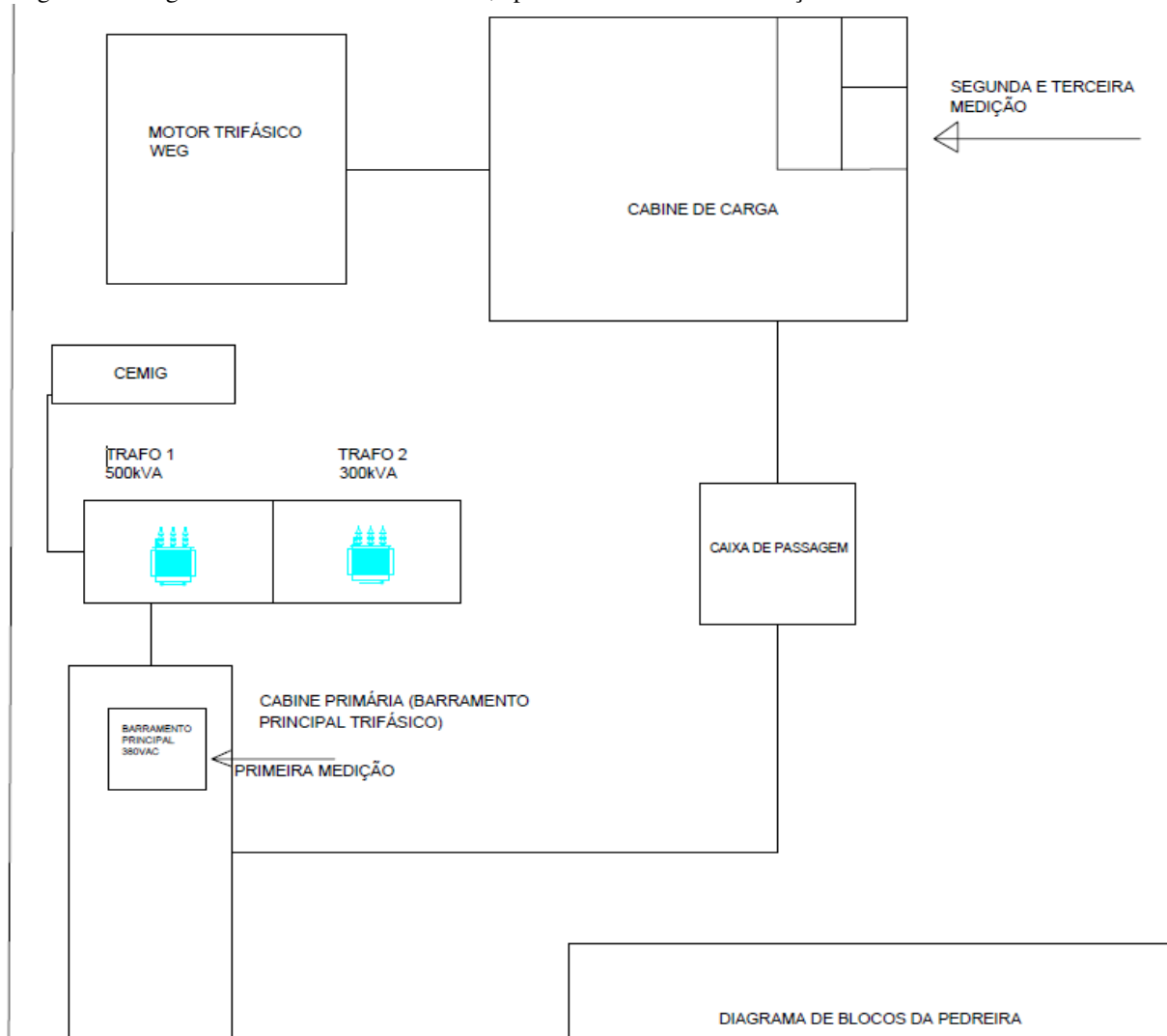
Para a realização dos trabalhos foi necessário ficar a par dos fenômenos que ocorrem no sistema elétrico. Para isso, foi realizada a medição das harmônicas de tensão e corrente, potência e todos os parâmetros que compõe a qualidade de energia. A Figura 13 mostra o local da empresa, onde foram realizadas as medições, nas Cabines primárias, no barramento trifásico, e secundário, correspondente a Cabine de cargas, onde está localizado o motor de 300 cv. A Figura 14 representa o diagrama de blocos, detalhando os pontos de medição.

Figura 13: Localização da empresa mineradora.



Fonte: O autor.

Figura 14: Diagrama de blocos da mineradora, apontando os locais de medição.



Fonte: O autor.

8.1 Metodologia de medição

Para as medições, foi utilizado como ferramenta o analisador de qualidade de energia FLUKE mod. 435, seguindo as recomendações de medição da norma Prodist Módulo 8 (ANEEL,2015).

Como complemento do trabalho, uma análise termográfica foi feita, registrando pontos que poderiam estar sobreaquecido. Dados como tensão das fases, sequência das fases, harmônicas, e todos os distúrbios provenientes da energia elétrica estão registrados pelo analisador FLUKE. A configuração do equipamento foi feita para trabalhar com os parâmetros da PRODIST. Na opção *Limits* do equipamento acessando o Setup, tem-se:

- a) *VRMS* –Tensão;
- b) *THD* –Harmônicos;
- c) *Plt*–Flicker;
- d) *Dip*– Afundamento de tensão de curta duração(Quedas);
- e) *Swell*– Elevação de tensão de curta duração(Picos);
- f) Mudança rápida de tensão;
- g) Balanceamento de carga –Desequilíbrio;
- h) Frequência;
- i) Sinalização Principal.

9 RESULTADOS

Com os dados levantados e transferidos através do software *PowerLog*, notou-se que algumas avarias ocorreram no período em que o equipamento esteve presente na Cabine primária, onde está localizada os barramentos trifásicos. Ocorreram 15 reduções de tensão e 3 interrupções, sendo estas últimas ocasionadas pela concessionária de energia. Em outro momento, o equipamento foi conectado na Cabine de carga, a fim de detectar a origem dos afundamentos de tensão. Com isso, através das coletas dos dados, o equipamento registrou mais 24 casos de afundamento de tensão.

Com os dados registrados, foi possível verificar as amplitudes das distorções harmônicas que varia na ordem 5°, 7°, 9°, 11°, 13° e 15°, sendo as de ordem par desprezíveis para fins de estudo. Fazendo uma comparação dos dados, pode-se observar que todas as harmônicas de tensão estão dentro dos limites especificados, ou seja, dentro da faixa de 10% da tensão máxima. A Equação 9, mostra em percentagem, as harmônicas ímpares não múltiplas de 3. A Figura 13 apresenta o histograma das harmônicas de tensão não múltiplas de 3.

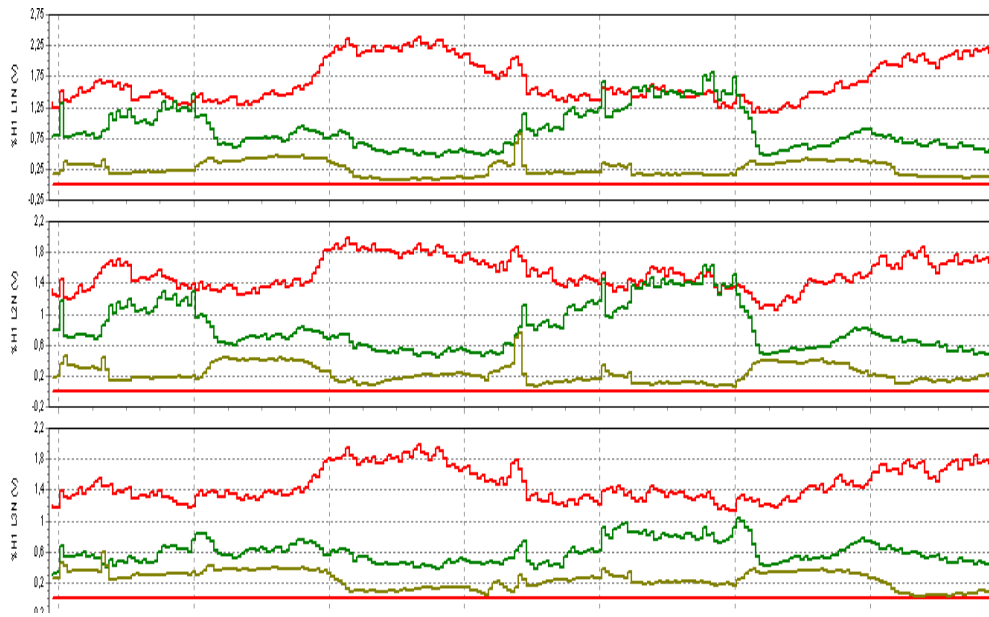
$$DTT_I \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (9)$$

Tabela 8: Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT _{95%}	10,0%	8,0%	5,0%
DTT _{P95%}	2,5%	2,0%	1,0%
DTT _{I95%}	7,5%	6,0%	4,0%
DTT _{395%}	6,5%	5,0%	3,0%

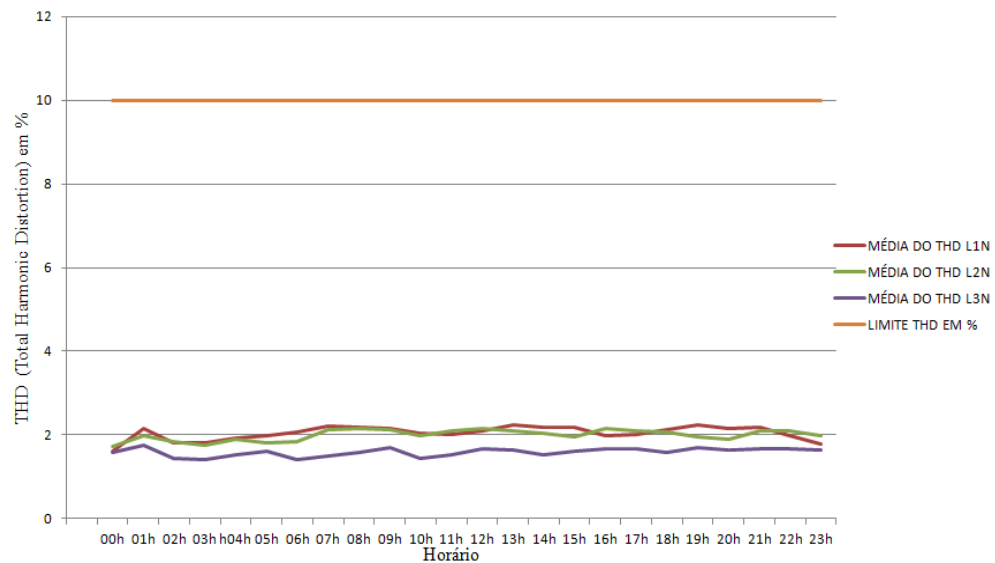
Fonte: Adaptado de Prodíst módulo 8.

Figura 13: Histograma das harmônicas de tensão não múltiplas de 3.



Fonte: Adaptado de PowerLog.

Gráfico1: Média por hora das distorções harmônicas totais de tensão (THD V).



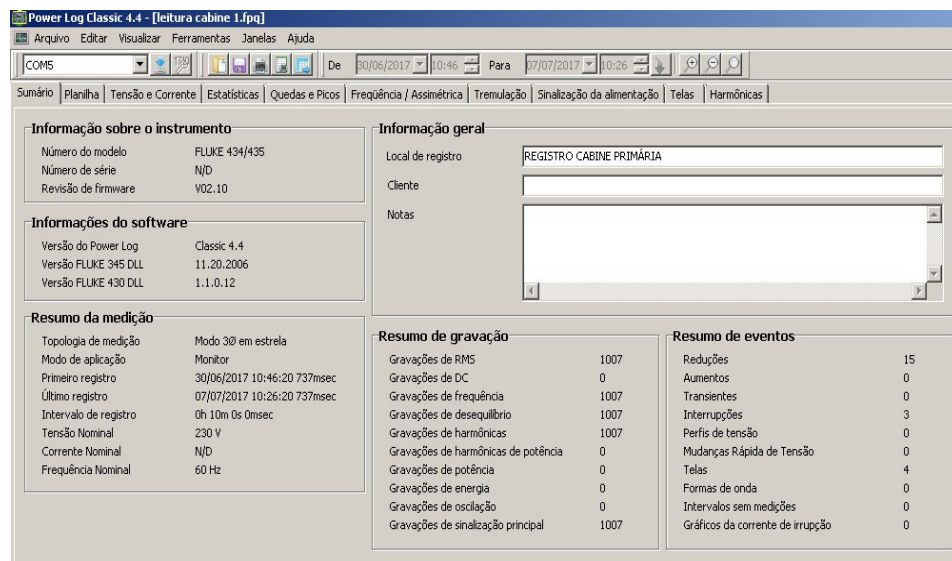
Fonte: O autor.

9.1 Afundamentos de tensão

Com os dados registrados da Cabine primária, percebeu-se a presença de 15 afundamentos de tensão, sendo o mais relevante o que perdurou aproximadamente 8 segundos, às 09h21min. A fim de averiguar o distúrbio, em outro momento foi instalado o equipamento na cabine de cargas, para poder assim, diferenciar entre problema da concessionária de energia, ou problema interno do sistema elétrico da empresa. Na segunda medição, foram registrados mais 24 casos de afundamento de tensão, surgindo a hipótese de problemas no motor de 300 cv. Assim, o cliente foi acionado a fazer manutenção do mesmo. Percebendo a avaria no motor, este optou pela troca do mesmo, por outro de 250 cv que corresponde a 80 % da demanda da empresa.

Em uma terceira medição, já com a troca do motor, não foi registrado mais nenhum problema de afundamento, com isto prova que o defeito no rolamento no motor, gerou altas correntes na entrada, diminuindo o valor da tensão, causando os afundamentos.

Figura 13: Tela de registro da Cabine primária, registrando os afundamentos de tensão.



Fonte: Adaptado de PowerLog.

O Gráfico 2, correspondente ao afundamento de tensão, mostra o ponto da queda das tensões Fase/Neutro, tendo como referência a Prodíst módulo 8, que diz que toda tensão situada 8% abaixo da tensão nominal é considerado um afundamento de tensão. Os dados foram transferidos do *PowerLog* e trabalhos em Excel, mostrando a média dos afundamentos de tensão.

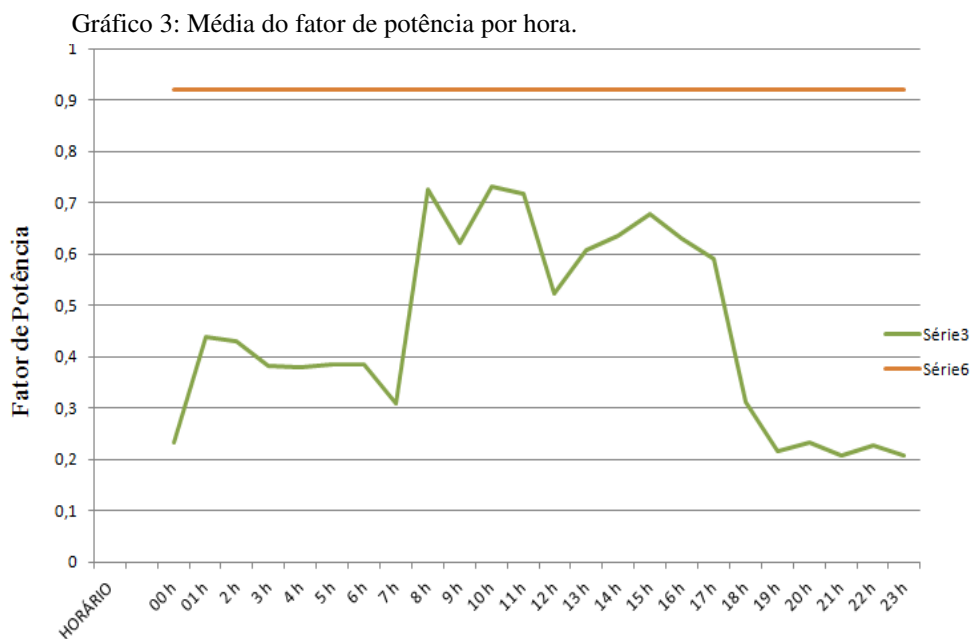
Gráfico 2: Média dos afundamentos de tensão.



Fonte: O autor.

9.2 Fator de potência

Foi identificado baixo fator de potência na segunda medição, na Cabine secundária, responsável pelo controle das cargas. Durante o período de 7 dias de leitura, o equipamento registrou dados dos fatores de potência. Com os dados extraídos para o Excel, a média por hora do fator de potência foi retirada. O Gráfico 3 mostra com exatidão, o valor mínimo de 0,92 determinado pela Prodist, em “laranja”. Nota-se que a todo o momento, o fator de potência permanece abaixo de 0,92, representado em “verde” na imagem.



Fonte: O autor.

De acordo com o gráfico, nota-se que a média do fator de potência esteve a todo o momento abaixo do valor mínimo de 0,92. Entre os horários de expediente das 7 h até as 17 h, o fator de potência se manteve abaixo do normal, o que gera multa pela concessionária de energia. O horário fora de expediente pode ignorar os valores visto que a noite não havia nenhuma máquina em operação. Por ser um valor muito baixo, a multa pela concessionária de energia não é cobrada, visto que o fator multiplicador próximo de zero (Potência ativa), resulta em uma multa 0. O que causou o baixo fator de potência na parte da noite foram os transformadores de 300kVA e 500kVA operando a vazio. Neste caso, a solução para o problema é a instalação de uma unidade capacitiva paralela a carga de maior potência, pois um banco de capacitores paralelo a entrada de energia, gera um “*looping*” de energia reativa, podendo causar um desgaste nos capacitores, provocando por esse motivo um possível aquecimento.

9.3 Cálculo para correção do fator de potência

O cálculo para dimensionamento da unidade capacitiva foi baseado na carga de 250 cv, um motor trifásico WEG que corresponde a 80% da demanda da empresa. Por ser a única carga de maior potência, o cálculo será de um único capacitor que corrija o fator de potência, instalado em paralelo com o motor. Dados de placa do motor conforme a Figura 14:

Figura14: Dados de placa do motor.



Fonte: O autor.

Em regime a plena carga, com 100% de carga sobre o eixo, de acordo com o manual para correção do fator de potência, disponibilizado pela WEG, o valor mínimo exigido é de 0,92 indutivo. Dados do motor de 4 pólos, 1785 rpm:

$$P = 185\text{kW}$$

$$\text{Cos}\phi (\text{Motor}) = 0,86$$

$$f.p \text{ desejado} = 0,92$$

$$Q1 = \arcsin(0,86) = 30,68^\circ \tag{10}$$

$$Q2 = \arcsin(0,92) = 23,07^\circ \tag{11}$$

$$Q \text{ motor} = P * \text{tg}(30,68^\circ) = 185\text{kW} * \text{tg}(30,68^\circ) = 109,76\text{kVAR}$$

$$Q \text{ capacitor} = P * (\text{tga} - \text{tgb}),$$

$$Q \text{ capacitor} = 185\text{kW} * (\text{tg}(30,68^\circ) - \text{tg}(23,07^\circ)) = 30,96\text{kVAR}$$

Onde:

$$\alpha = \arctg(Q/P)$$

$$\beta = \arcsin(\phi)$$

O valor encontrado da unidade capacitiva comercial é de **35kVAR**.

Figura15: Tabela de valores de potência reativa comercial.

Tensão (V)	Potência reativa (kvar)	Série ²⁾	Referência	Capacitância (uF) (Ligação Δ)	Dimensões Ø x H (mm)	Potências UC-WT - 60 Hz ³⁾							
						Resistor de descarga (fornecido com a UC-WT)	Corrente nominal (A)	Contator ³⁾	Disjuntor em caixa molhada ³⁾	Fusível gLgG (A) ³⁾	Código	Peso (kg)	
220	0,50	D	UC-W10,5/25 L10	9,1 x 3	80 x 156	Interno	1,3	C.W.MC9	-	2	1004598	0,54	
	0,75	D	UC-W10,75/25 L10	13,7 x 3	80 x 156	Interno	2,0	C.W.MC9	-	4	1004599	0,54	
	1,00	D	UC-W11/25 L10	18,3 x 3	80 x 156	Interno	2,6	C.W.MC9	-	4	1004600	0,54	
	1,50	D	UC-W11,5/25 L10	27,3 x 3	80 x 156	Interno	3,9	C.W.MC9	-	6	1004601	0,54	
	2,00	D	UC-W12/25 L10	36,3 x 3	80 x 156	Interno	5,2	C.W.MC9	-	10	1004602	0,54	
	2,50	D	UC-W12,5/25 L16	45,3 x 3	80 x 211	Interno	6,6	C.W.MC9	-	10	1004603	0,89	
	3,00	D	UC-W13/25 L16	54,3 x 3	80 x 211	Interno	7,9	C.W.MC9	-	16	1004604	0,89	
	6,00	E	UC-W16/25 N20	91,4 x 3	75 x 225	3 x 120 K2/3 W	13,1	C.W.MC9	DWB160B20-3DX	25	1131370	1,37	
	7,50	E	UC-W17,5/25 N22	137,1 x 3	75 x 285	3 x 66 K2/3 W	19,7	C.W.MC18	DWB160B22-3DX	35	1131373	1,75	
	10,00	E	UC-W110/25 N22	182,8 x 3	75 x 285	3 x 66 K2/3 W	26,2	C.W.MC25	DWB160B20-3DX	50	1131372	1,75	
	12,50	F	UC-W112,5/25 Q26	228,4 x 3	100 x 230	3 x 66 K2/3 W	32,8	C.W.MC32	DWB160B20-3DX	63	1191481	2,17	
	15,00	F	UC-W115/25 S26	274,1 x 3	116 x 230	3 x 82 K2/3 W	39,4	C.W.MC32	DWB160B20-3DX	63	1191483	2,59	
	17,50	F	UC-W117,5/25 S28	319,7 x 3	116 x 230	3 x 27 K2/7 6 W	45,9	C.W.MC50	DWB160B10-3DX	80	1227152	3,50	
	20,00	F	UC-W120/25 S28	365,4 x 3	116 x 230	3 x 27 K2/7 6 W	52,6	C.W.MC50	DWB160B10-3DX	100	1227155	3,50	
	25,00	F	UC-W125/25 U28	456,7 x 3	136 x 230	3 x 82 K2/3 W	68,6	C.W.MC50	DWB160B10-3DX	125	1335511	4,43	
	30,00	F	UC-W130/25 U28	548,1 x 3	136 x 230	3 x 82 K2/3 W	78,7	C.W.MC56	DWB160B125-3DX	160	1335531	4,43	
	380	0,50	D	UC-W10,5/40 L10	9,1 x 3	80 x 156	Interno	0,8	C.W.MC9	-	2	1004605	0,54
		0,75	D	UC-W10,75/40 L10	13,7 x 3	80 x 156	Interno	1,1	C.W.MC9	-	2	1004606	0,54
		1,00	D	UC-W11/40 L10	18,3 x 3	80 x 156	Interno	1,5	C.W.MC9	-	4	1004607	0,54
		1,50	D	UC-W11,5/40 L10	27,3 x 3	80 x 156	Interno	2,3	C.W.MC9	-	4	1004608	0,54
2,00		D	UC-W12/40 L10	36,3 x 3	80 x 156	Interno	3,0	C.W.MC9	-	6	1004609	0,54	
2,50		D	UC-W12,5/40 L10	45,3 x 3	80 x 156	Interno	3,8	C.W.MC9	-	6	1004610	0,54	
3,00		D	UC-W13/40 L10	54,3 x 3	80 x 156	Interno	4,6	C.W.MC9	-	10	1004611	0,54	
6,00		D	UC-W16/40 L16	91,4 x 3	80 x 211	Interno	7,6	C.W.MC9	-	16	1004612	0,89	
7,50		E	UC-W17,5/40 N20	137,1 x 3	75 x 225	3 x 120 K2/3 W	11,4	C.W.MC9	DWB160B16-3DX	20	1131374	1,31	
10,00		E	UC-W110/40 N20	182,8 x 3	75 x 225	3 x 120 K2/3 W	15,2	C.W.MC9	DWB160B16-3DX	25	1131377	1,31	
12,50		E	UC-W112,5/40 N22	228,4 x 3	75 x 285	3 x 120 K2/3 W	19,0	C.W.MC18	DWB160B22-3DX	30	1131380	1,71	
15,00		E	UC-W115/40 N22	274,1 x 3	75 x 285	3 x 120 K2/3 W	22,8	C.W.MC18	DWB160B22-3DX	35	1131381	1,75	
17,50		F	UC-W117,5/40 Q26	319,7 x 3	100 x 230	3 x 82 K2/3 W	26,6	C.W.MC25	DWB160B20-3DX	50	1191680	2,18	
20,00		F	UC-W120/40 Q26	365,4 x 3	100 x 230	3 x 82 K2/3 W	30,4	C.W.MC25	DWB160B20-3DX	60	1191681	2,18	
22,50		F	UC-W122,5/40 S26	411,1 x 3	116 x 230	3 x 82 K2/3 W	34,2	C.W.MC32	DWB160B20-3DX	63	1191683	2,59	
25,00		F	UC-W125/40 S26	456,7 x 3	116 x 230	3 x 82 K2/3 W	38,0	C.W.MC32	DWB160B20-3DX	63	1191684	2,59	
30,00		F	UC-W130/40 S28	548,1 x 3	116 x 230	3 x 66 K2/7 6 W	45,6	C.W.MC50	DWB160B25-3DX	80	1227154	3,50	
35,00		F	UC-W135/40 S28	639,5 x 3	116 x 230	3 x 66 K2/7 6 W	53,2	C.W.MC50	DWB160B25-3DX	100	1227157	3,50	
40,00		F	UC-W140/40 U28	730,9 x 3	136 x 230	3 x 120 K2/3 W	60,8	C.W.MC50	DWB160B10-3DX	100	1335524	4,43	
45,00		F	UC-W145/40 U28	822,3 x 3	136 x 230	3 x 120 K2/3 W	68,4	C.W.MC56	DWB160B10-3DX	125	1335526	4,43	
60,00	F	UC-W160/40 U28	1096,2 x 3	136 x 230	3 x 120 K2/3 W	75,0	C.W.MC56	DWB160B125-3DX	125	1335527	4,43		

Fonte: Adaptado de WEG (2016).

Cálculo do capacitor:

$$C = \frac{Q_c}{\omega V_{RMS}^2}$$

$$C = \frac{30,96 * 10^3}{377 * 380^2}$$

$$C = 660 \text{ (}\mu\text{F)}$$

A fim de averiguar o novo fator de potência, foi feito o novo cálculo do fator de potência:

$$Q_{cc} = Q_1 - Q_2$$

$$40 = 30,96 - Q_2$$

$$Q_2 = 9,04 \text{ kVAR}$$

$$S_2 = \sqrt{P^2 + Q_2^2}$$

$$S_2 = \sqrt{185^2 + 9,04^2}$$

$$\mathbf{S_2 = 185,221kVAR}$$

$$Fp_2 = \frac{P}{S_2} = \frac{185000}{185221}$$

$$Fp_2 = 0,998$$

9.4 Imagenstermográficas

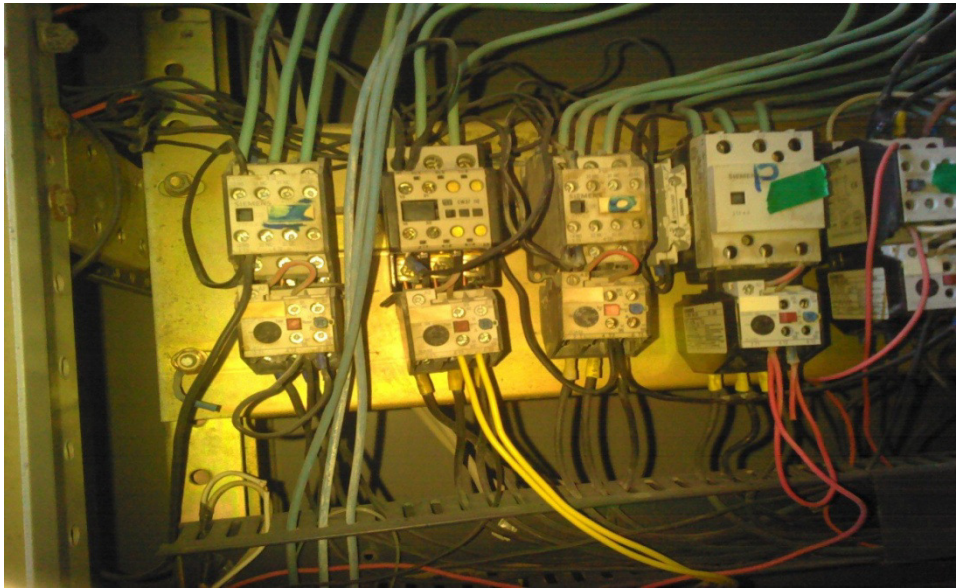
Em outro momento, utilizando o equipamento FLIR modelo E40, a coleta das imagens na Cabine secundária foi realizada. Pode analisar problemas de aquecimento nos componentes elétricos do painel. O painel comanda as correias transportadoras de pedra. A Imagem 1, representa a imagem do relé da contatora, na Cabine secundária:

Imagem 1: Captura da imagem térmica do relé da contatora.



Fonte: O autor.

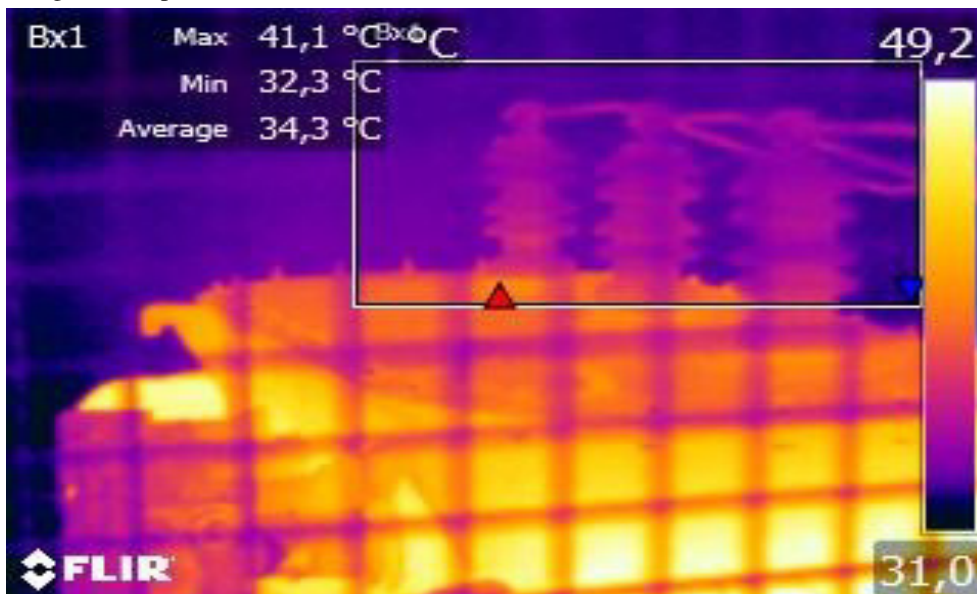
Imagem 2: Relé térmico da contatora.



Fonte: O autor.

Nota-se na Imagem 1 capturada pela câmera termográfica, que as fases “R” e “S” conectadas ao relé térmico estão aquecidas, possivelmente por problemas de contato, problema no relé ou até mesmo desbalanceamento de cargas. A Figura 3 exibe a imagem térmica do transformador de 500kVA, que está com a temperatura dentro dos limites de operação. A Figura 5 mostra a imagem térmica da contatora do painel geral da pedreira, localizada na Cabine primária.

Imagem 3: Captura térmica do transformador de 500kVA.



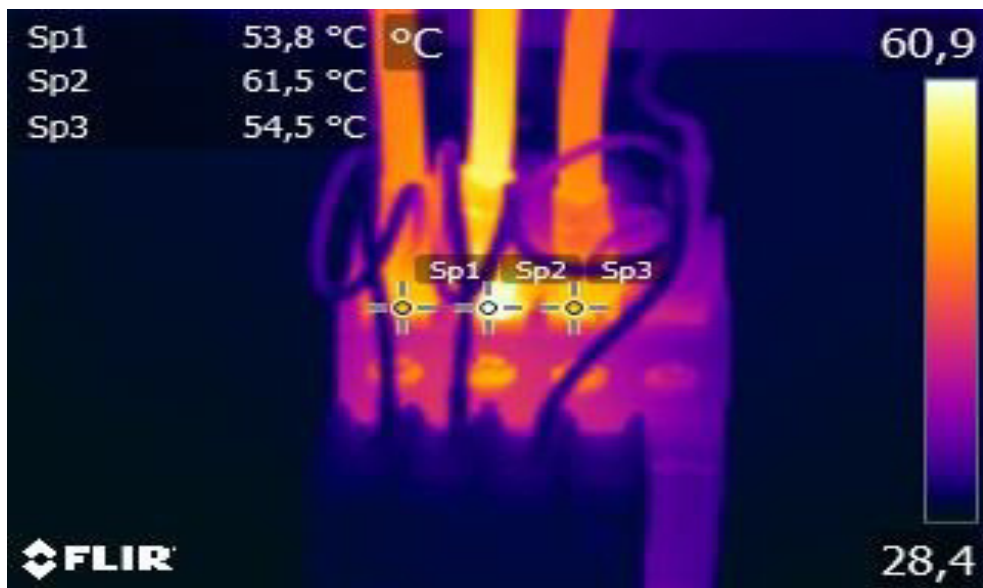
Fonte: O autor.

Imagem 4: Transformador de 500 kVA.



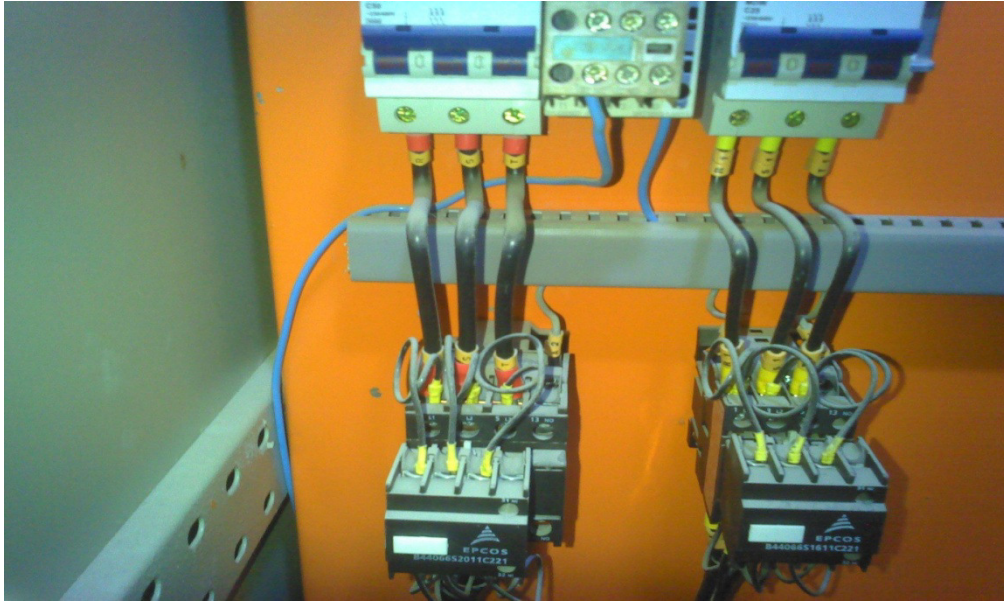
Fonte: O autor.

Imagem 5: Imagem térmica da contatora do painel geral da pedreira.



Fonte: O autor.

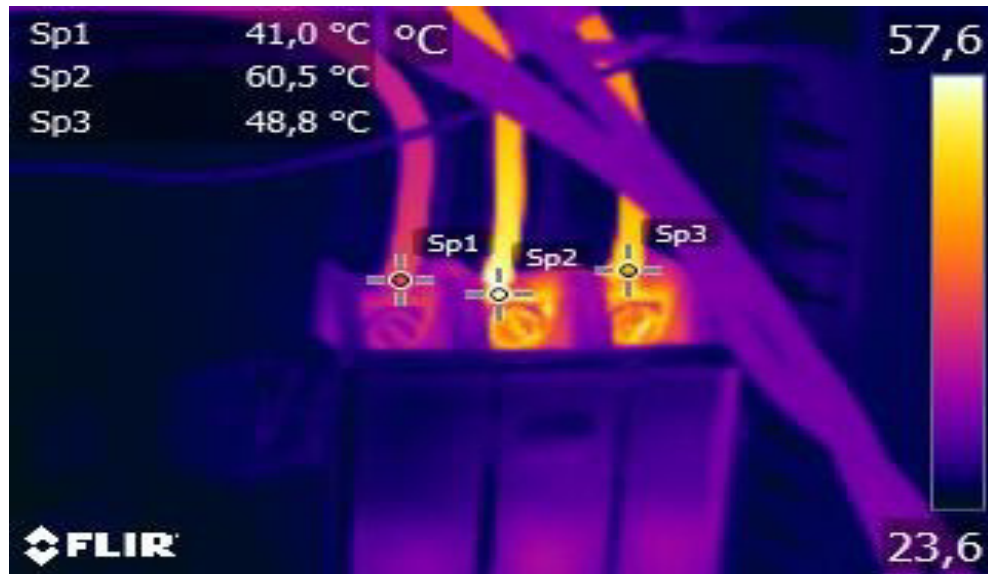
Imagem 6: Contatora do painel geral da pedreira.



Fonte: O autor.

Na imagem 5, percebe-se claramente que há um aquecimento fora do padrão de funcionamento da contatora do painel geral, localizada na Cabine primária. A fase “S” está sobreaquecida em relação às outras fases. Com uma temperatura de 61,5°C, aproximadamente 7°C de diferença das outras fases. Logo em seguida, a Imagem 7 do disjuntor, localizado no painel de alimentação primária, com problema também de aquecimento na fase “S”.

Imagem 7: Imagem térmica do disjuntor do painel de alimentação primária.



Fonte: O Autor.

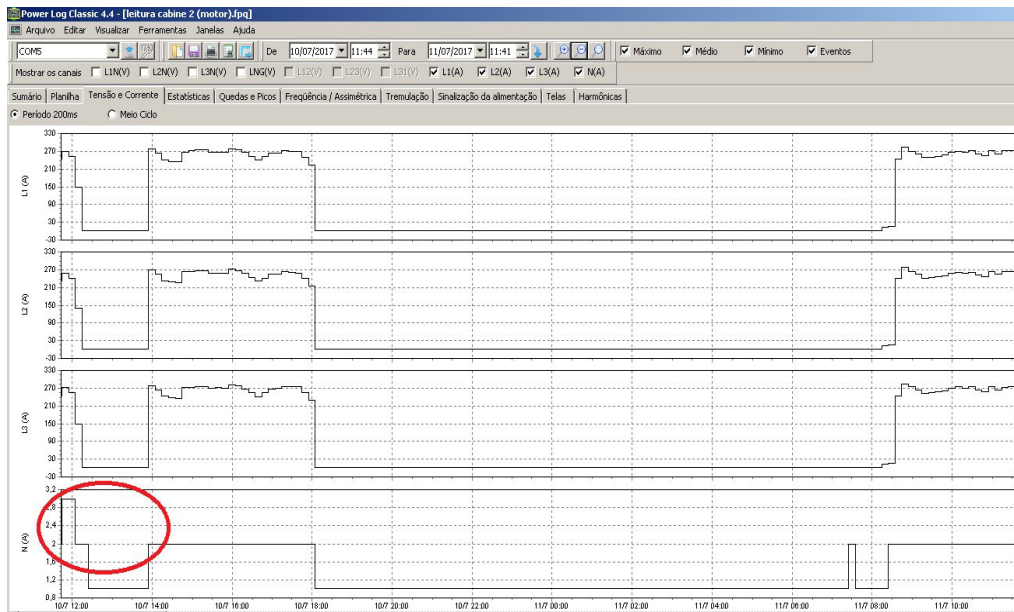
Imagem 8: Disjuntor do painel de alimentação primária.



Fonte: O autor.

Através dos estudos realizados baseado nas imagens termográficas, pode-se notar um maior aquecimento na fase “S” do sistema. Desse modo, a inspeção dos componentes, dos cabos e verificação dos apertos dos contatos foi feito, e não detectou nenhum problema. Através disso pode-se comprovar que o aquecimento de uma das fases, juntamente com a corrente no neutro, foi causado por desbalanceamento de cargas, isto é, mau dimensionamento de cargas monofásicas instalado na empresa. A fim de provar essa anomalia, a Figura 16 mostra o registro do *PowerLog* detectando a corrente de neutro, no mesmo dia em que foi feito a coleta das imagens termográficas.

Figura16: Captura das correntes L1, L2, L3 e corrente presente no neutro.



Fonte: O autor, adaptado de PowerLog.

10 CONCLUSÃO

Pelo estudo de caso feito, pode-se comprovar a existência de alguns fenômenos que influenciam na qualidade de energia, e conseqüentemente, trás a tona questões importantes de como um sistema elétrico deve operar. Com a utilização da câmara termográfica FLIR, falhas foram detectadas em pontos distintos da empresa, como aquecimento constante na fase ‘S’, onde nota-se um desbalanceamento de cargas, já que nas medições feitas com o analisador de qualidade FLUKE, havia uma corrente presenteno neutro. Se por ventura o operador/eletricista de manutenção da empresa, viesse a fazer inspeção sem o equipamento, seria quase improvável descobrir a causa do problema.

Com o analisador de qualidade FLUKE, os distúrbios foram registrados de tal forma, que pode se chegar à determinada causa do problema de afundamento de tensão. Na primeira e segunda medição, na Cabine primária e secundária (motor), os afundamentos foram de proporções relevantes. O cliente foi avisado do problema. Como tais afundamentos ocorreram durante a operação do motor de 300 cv, o cliente foi orientado a fazer uma verificação no mesmo. Ao realizar a manutenção no referido motor, percebeu-se que um rolamento estava danificado, o que causava os distúrbios. Por critério do cliente, este decidiu pela troca do motor de 300 cv por outro de 250 cv. Logo após a troca não foi registrado mais afundamentos de tensão, o que comprovou o problema, diretamente localizado no sistema elétrico interno da empresa.

A fim de solucionar os problemas por baixo fator de potência, uma unidade capacitiva foi calculada para operar em paralelo ao motor de 250 cv. Não houve a necessidade de calcular um banco de capacitores para todas as cargas, pois o motor corresponde a 80% de todo processo realizado pela empresa.

Por fim, o cliente foi orientado a rever toda carga instalada na empresa, pois a presença da corrente de neutro, juntamente com o aquecimento excessivo da fase “S”, comprovou um desbalanceamento de cargas, provocando perdas por efeito *Joule* (aquecimento). O redimensionamento das cargas monofásicas e bifásicas e a inserção da unidade capacitiva paralela ao motor trifásico de 250 cv são as possíveis soluções para aumentar a vida útil das máquinas, aperfeiçoar o sistema, e assim diminuir as multas cobradas por excesso de reativo na rede elétrica.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Prodist: **Módulo 8-Qualidade da Energia Elétrica**. Brasília, 2016.

SILVA, Adilson. A. **Termografia como ferramenta de inspeção preditiva utilizada no sistema elétrico de potência**. 9 p. (Graduando em Engenharia Elétrica)- UNIS-MG, [S.l.], 2014.

DECKMANN, S.M; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**.2008. Disponível em: <<http://www.fee.unicamp.br/dse/antenor/it012>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

DIAS OLIVEIRA, Tiago Miguel. **Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com recurso a termografia**, 2012, 148 f.Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado (Engenharia Eletrotécnica e de Computadores), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto,Portugal, 2012.Disponível em:<<http://paginas.fe.up.pt/~ee01125/files/dissertacao%20versao%20provisoria%20tiago%20oliveira.pdf>>. Acesso em: 07 out. 2016.

DINIZ, Henrique Eduardo Pinto. **Termografia Quantitativa como Ferramenta de Gestão de Ativos do Sistema Elétrico de Potência**.2013. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2013.

FERNANDES, Rodrigo Martins. **Condicionador Universal de Energia (UPQC) com estratégia de controle invertida**. 2008. 201 f. Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica (Engenharia Elétrica)- COPPE-UFRJ, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://www.pee.ufrj.br/index.php/pt/producao-academica/teses-de-doutorado/2008/2008121801-2008121801/file>>. Acesso em: 12 abr. 2017.

GRUPO WEG. Unidade Automação. **Automação: Capacitores para correção do fator de potência**. Jaraguá do Sul - SC - Brasil: [s.n.], 2016. 17 p. Disponível em: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-capacitores-para-correcao-do-fator-de-potencia-50009818-catalogo-portugues-br.pdf>>. Acesso em: 31 out. 2017.

KANASIRO, Paulo Sérgio. ARAÚJO, Marcos Roberto Carneiro. **Tecnologia em Eletrotécnica Industrial**. Belém-Pará, 2008.

MARTINHO, Edson. Interrupção Momentânea. In: MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2012. p. 55-77.

MARTINS, Maria Paula de Souza. **Inovação Tecnológica e Eficiência Energética**. 1999. 43 f. Monografia de Pós Graduação MBA em Energia Elétrica - UFRJ, Rio de Janeiro-RJ, 1999.
PELA, Flávia Porto. BIOFÍSICA. Rio de Janeiro: SESES, 2015.

PAULILO, Gilson. **Conceitos gerais sobre qualidade da energia**, 2013. Disponível em: <http://www.osetoreletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/Ed84_fasc_qualidade_energia_cap1.pdf>. Acesso em: 03 maio 2017.

SILVÉRIO, Luiz Antônio da Silva. **Análise da qualidade da energia elétrica no UNIS-MG**. 2016. 83 f. 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. Me. Eduardo Ferroni. (Engenharia Elétrica)-UNIS-MG, [S.l.], 2016.

SCHEEREN, Vinicius. **Módulo para inspeção automática de linhas de transmissão por termografia**. 2011. 51 f. Monografia (Projeto de diplomação do departamento de Engenharia Elétrica)-Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <http://www.ece.ufrgs.br/fetter/plir/tcc_scheeren.pdf>. Acesso em: 06 out. 2016.

Termografia aplicada na manutenção preditiva de sistemas elétricos. São Paulo, SP: Revista Inovação Tecnológica, 2015. Disponível em: <<http://rit.faculadeflamingo.com.br/ojs/index.php/rit/article/viewFile/173/132>>. Acesso em: 07 out. 2016.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. A Lei de Eficiência Energética. In: VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. **Eficiência Energética: Fundamentos e Aplicações**. Campinas- (SP), 2012. p. 49-50.