

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS – UNIS – MG
ENGENHARIA ELÉTRICA
JHONNATAN DIAS ESTEVES

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA: Estudo de caso aplicado em uma empresa
de forjamento**

Varginha
2016

JHONNATAN DIAS ESTEVES

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA: Estudo de caso aplicado em uma empresa
de forjamento**

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

**Varginha
2016**

JHONNATAN DIAS ESTEVES

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA: Estudo de caso aplicado em uma empresa
de forjamento**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS – MG, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovado em / /

Prof. Me Eduardo Henrique Ferroni

Prof. Me Hugo Rodrigues Vieira

Eng. Eletricista Luiz Antônio da Silva Silvério

OBS.:

Dedico este trabalho a todos os que sempre me apoiaram, em especial ao meu pai Francisco Antônio Esteves, minha mãe Maria José Dias. Ao professor orientador Me. Eduardo Henrique Ferroni. A minha namorada e amigos que contribuíram de forma indireta ou diretamente com este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por ter me dado sabedoria, força e saúde para sempre superar as dificuldades da vida. A minha família, minha namorada e amigos que fizeram parte desta caminhada em rumo a sonhada graduação em Engenharia Elétrica. E ao meu orientador professor Me. Eduardo Henrique Ferroni

A mente que se abre a uma nova ideia jamais
voltará a seu tamanho original
(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho tem como principal objetivo apresentar um estudo de caso em análise de qualidade de energia elétrica em uma empresa de forjamento localizada no município de Varginha, sul de Minas Gerais. Tendo como foco a apresentação de resultados obtidos em medições que foram feitas com o analisador de qualidade de energia Fluke, modelo 435 para coleta de amostras de níveis de tensão, fator de potência e harmônicos para comparação com os parâmetros especificados no modulo 8 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST). Com os baixos valores de Fator de Potência medidos, mostram que a utilização de um banco de capacitores é uma forma a se considerar para se obter uma redução nas penalidades aplicadas pela concessionária de energia da região.

Palavras-chave: Qualidade de Energia. Fator de Potência. PRODIST. Estudo de Caso. Medições.

ABSTRACT

This work aims to present a case study on electric power quality analysis in a forging company located in the city of Varginha, South of Minas Gerais. Focusing on the presentation of results in measurements that were made with the power quality analyzer Fluke 435 model to collect voltage levels of samples, power factor and harmonic for comparison with the parameters specified in module 8 of the Procedure Electricity distribution in the National Electricity System (PRODIST). With the low power factor values measured show that the use of a capacitor bank is a way to be considered to obtain a reduction in the penalties imposed by the energy concessionaire in the region.

Keywords: Power Quality. Power factor. PRODIST. Case study. Measurements.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Tensão X corrente no resistor	17
Figura 2 - Tensão X Corrente no indutor	18
Figura 3 - Triângulo das potências	19
Figura 4 - Tipo de carga X Fator de Potência	20
Figura 5 - Corrente típica transitória impulsiva causada por relâmpagos	23
Figura 6 - Utilização de para-raios e aterramentos ao longo da linha para amortecimento das correntes transitórias	23
Figura 7 - Locais passíveis de receber e conduzir descargas atmosféricas	24
Figura 8 - acoplamento capacitivo	24
Figura 9 - Transitório provocado por chaveamento de capacitor	25
Figura 10 - Transitório de baixa frequência causado pela energização de banco de Capacitores	26
Figura 11 - Transitório provocado por ferorresonância causado pela energização de transformadores a vazio	26
Figura 12 - Afundamento de tensão devido a uma falta monofásica	28
Figura 13 - Afundamento de tensão devido à corrente de partida um motor grande porte	28
Figura 14 - Salto de tensão	29
Figura 15 - Interrupção de curta duração	30
Figura 16 - Desequilíbrio de tensão alimentador residencial	33
Figura 17- Representação das distorções harmônicas ímpares até a 13 ^a ordem	35
Figura 18 mostra como as correntes harmônicas, principalmente de 3 ^a ordem são induzidas magneticamente nos fios neutro e telecomunicações	35
Figura 19 - Tensão de recorte gerada por conversor DC trifásico	37
Figura 20 - Ruído em onda de tensão	37
Figura 21 - Flutuação da tensão característica do <i>flickers</i>	38
Figura 22 - Variação de frequência em uma subestação	38
Figura 23 - Exemplo de fatura com tarifação de energia reativa ocasionada pelo baixo fator de potenciada empresa	39
Figura 24 - Representação das subestações e cargas	40
Figura 25 - Ângulo δ ou ângulo binário.....	41
Figura 26 - Efeito da variação de carga	42
Figura 27 - Efeito da variação da corrente de campo	43

Figura 28 - Comportamento genérico do motor síncrono	43
Figura 29 - Conexão e circuito típico de um filtro <i>shunt</i>	45
Figura 30 - Analisador de Qualidade de Energia Elétrica FLUKE, modelo 435	49
Figura 31 - Amostragem dos níveis de tensão fundamental encontrados	54
Figura 32 - Amostragem dos níveis de tensão em 200 milissegundos (12 ciclos) Encontrados	55
Figura 33 - Amostragem do fator de potência	56
Figura 34 - Amostragem da potência ativa	57
Figura 35 - Comparação entre o FP e W	58
Figura 36 - Picos de harmônicas	59
Figura 37 - Harmônicas totais	60

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A - Ampére

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica

BC - Banco de Capacitores

FP - Fator de Potência

K - Unidade multiplicadora por 1000

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

P - Potência

PRODIST - Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional

Q - Potência Reativa

S - Potência Aparente

SEB – Sistema Elétrico Brasileiro

Trafo - Transformador

V - Volt

VA - Volt-Ampere

Var - Volt-Ampere Reativo

VArh - Volt-Ampere Reativo por Hora

W - Watt

Wh - Watt por Hora

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	15
3 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS	17
3.1 Fator de potência	17
3.2 Categorias e características típicas de fenômenos eletromagnéticos	21
3.2.1 Transitórios ou transientes	22
3.2.1.1 Impulsivos	22
3.2.1.2 Oscilatórios	25
3.2.2 Variações de tensão de curta duração	26
3.2.2.1 Afundamentos de tensão	27
3.2.2.2 Salto de tensão	29
3.2.2.3 Interrupção de curta duração	29
3.2.3 Variações de tensão de longa duração	30
3.2.3.1 Sobretensões	30
3.2.3.2 Subtensões	31
3.2.3.3 Interrupções sustentadas	32
3.2.4 Desequilíbrio de tensão	32
3.2.5 Distorção na forma de onda	33
3.2.5.1 DC <i>offset</i>	33
3.2.5.2 Harmônicos	34
3.2.5.3 Inter-harmônicos	36
3.2.5.4 Recorte (<i>Notching</i>)	36
3.2.5.5 Ruído (<i>Noise</i>)	36
3.2.6 Flutuação de tensão	37
3.2.7 Variações na frequência	38
4 A EMPRESA	39
4.1 Sobre a empresa	39
4.2 O problema	39
4.3 Cargas	39
4.4 Motor síncrono	40
4.4.1 Efeito da variação de carga	41
4.4.2 Efeito da variação da corrente de campo	42
4.5 Filtros	44
4.5.1 Filtro <i>Shunt</i>	44
5 NORMATIZAÇÃO	46
5.1 Fator de potência	46
5.2 Distúrbios de tensão	46
5.3 Desequilíbrio de tensão	47
5.4 Harmônicos	47
6 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	49
6.1 Equipamento de medição	49
6.2 Parâmetros de medição	50
6.2.1 Fator de potência	50
6.2.2 Nível de tensão	50
6.2.3 Harmônicos	51

7 ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
7.1 Tensão RMS	53
7.2 Fator de potência	55
7.3 Distorção de harmônicos	58
8 Conclusão	61
REFERÊNCIAS.....	62

1 INTRODUÇÃO

A energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento socioeconômico de um país ou região. De alguma forma, está presente em toda a cadeia de produção, distribuição e uso final de bens e serviços.

De acordo com Deckemann e Pomilio (2016) o termo qualidade de energia elétrica (QEE) é utilizado para expressar as mais variadas características da energia elétrica entregue pelas concessionárias aos consumidores, ou mais abrangentemente define-se como sendo uma medida do quanto à energia elétrica poderá ser utilizada pelos consumidores, sendo que essa medida inclui características de continuidade de suprimento e de conformidade com alguns parâmetros considerados como desejáveis para uma operação segura, tanto do sistema supridor como das cargas elétricas.

Alves (2010) aponta que, academicamente, qualidade de energia elétrica é a disponibilidade desta, com forma de onda sensorial e pura, sem que ocorram alterações na amplitude, originado de uma fonte de potência infinita.

Em suma, o termo qualidade da energia engloba uma série de fenômenos que abrange áreas de interesse de sistemas da energia elétrica até problemas que se relacionam com a comunicação em redes de transmissão de dados.

De acordo com a Norma Brasileira Regulamentara - NBR 5410 (2008) de forma abrangente a qualidade de energia é o provimento de energia elétrica que envolve a distribuição livre de perturbações, tendo em vista que o próprio consumo e a presença de fenômenos naturais já ocasionam oscilações no sistema.

Segundo Okumoto (2010) a qualidade da energia elétrica é um tema que vem promovendo diversas discussões por parte dos profissionais na área de engenharia elétrica, concessionárias de energia, fabricantes de equipamentos eletroeletrônicos e consumidores finais. O assunto está ligado a um conjunto de alterações que tem ocorrido, devido a inúmeros fatores, no fornecimento de energia aos consumidores.

O avanço do consumo de energia elétrica no Brasil juntamente com custo elevado da manutenção e da construção de novas instituições elétricas trouxe a necessidade de desenvolver novos estudos, propiciando a utilização consciente e evitando desperdícios. A monitorização da qualidade de energia elétrica, registrando variações nos parâmetros do sistema elétrico, surge como uma ferramenta de análise capaz de qualificar o desempenho do fornecimento de energia elétrica dentro de critérios de conformidade adotados.

Os consumidores de energia elétrica, em especial os comerciais e industriais, têm utilizado, cada vez mais, equipamentos sensíveis em seus processos. A susceptibilidade destes equipamentos tem como consequência o comprometimento da qualidade de produtos e serviços. Além disto, a paralisação em processos produtivos representa custos elevados.

Um sistema de gerenciamento pode auxiliar fornecedores e consumidores de energia elétrica para que estes possam planejar, projetar e operar o sistema elétrico, de forma a garantir a compatibilidade deste com os equipamentos e processos que ele supre.

Diante do exposto pretende-se estudar o funcionamento do sistema de instalações elétricas utilizadas numa empresa de forjamento do sul de minas que está enfrentando dificuldades energéticas, onde o relé da cabine de medição primária está desligando com cerca de 30% a menos da carga programada. E a partir de aí propor uma melhoria no seu sistema elétrico interno de forma a corrigir os problemas.

2. EVOLUÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

De acordo com Alves (2010) a preocupação com a qualidade da energia elétrica fornecida aos consumidores nasceu junto com as primeiras experiências comerciais relacionadas com a geração, transmissão e distribuição de energia, no século XIX. Já em 1934 a legislação brasileira estabelecia, em seu Código de Águas, os primeiros indicadores de controle sobre esta qualidade.

A regulação da qualidade da energia elétrica foi extremamente vagarosa, pois a primeira regulamentação sobre qualidade de energia elétrica, extremamente simples e tecnicamente insuficiente, somente veio a público com a publicação da Portaria DNAEE nº 047/1978, 44 anos depois que o Decreto nº 24.643/1934 efetivou a primeira citação sobre o tema (JANNUZZI, 2007).

O Decreto nº 24.643 de 10 de julho de 1934, o Código de Águas foi o marco regulatório. Como pode se observar em alguns de seus artigos que tratam sobre o tema. Vejamos:

Art. 178. No desempenho das atribuições que lhe são conferidas, a Divisão de Águas do Departamento Nacional da Produção Mineral fiscalizará a produção, a transmissão, a transformação e a distribuição de energia hidroelétrica, com o tríplice objetivo de:

- a) **assegurar serviço adequado;**
- b) fixar tarifas razoáveis;
- c) garantir a estabilidade financeira das empresas.

Parágrafo único - Para a realização de tais fins, exercerá a fiscalização da contabilidade das empresas.

Art. 179. Quanto ao serviço adequado a que se refere a alínea “a” do artigo precedente, resolverá a administração, sobre:

- a) **qualidade e quantidade do serviço;**
- b) extensões;
- c) melhoramentos e renovação das instalações;
- d) processos mais econômicos de operação;

Art. 119. O regime legal e regulamentar da exploração dos serviços de energia elétrica tem por objetivo:

- a) **assegurar um serviço tecnicamente adequado às necessidades do país e dos consumidores;**

Art. 120. Compete à Administração Pública resolver sobre:

- a) as condições técnicas, a qualidade e quantidade do serviço;

Art. 141. São de responsabilidade total do concessionário os encargos correspondentes a:

(...)

II - obras necessárias para atender aos níveis de **continuidade e de qualidade de serviço** fixados pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica - DNAEE, bem como aquelas atribuíveis ao concessionário em conformidade com as disposições regulamentares vigentes (BRASIL, 2006, *Grifo nosso*).

Segundo Alves (2010) durante muito tempo a preocupação com o assunto era focada, exclusivamente, no objetivo de diminuir as horas de interrupção sustentada de energia. Já nas décadas de 1970 e 80, questões como distorções harmônicas e cintilação luminosa (flicker),

começaram a ser intensamente discutidas pela comunidade do setor elétrico nacional, resultando em alguns procedimentos impostos pelas concessionárias quando do atendimento de novas cargas industriais, entretanto, não se estabeleceu uma legislação específica sobre o assunto.

De acordo com Bernardo (2013) a regulação da continuidade do fornecimento de energia no Brasil teve três marcos históricos: a Portaria DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, nº 46/1978, responsável por inaugurar a regulação da continuidade no Sistema Elétrico Brasileiro (SEB); a Resolução ANEEL nº 24/2000, responsável pela adequação da regulação da continuidade a um novo contexto institucional do SEB e a Audiência Pública nº 46/2010, que instaurou uma série de mudanças nas etapas de definição de limites para os indicadores de qualidade, visando aperfeiçoar a metodologia como um todo.

3 FENÔMENOS ELETROMAGNÉTICOS

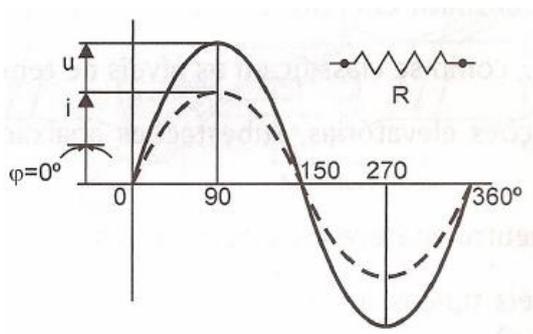
Para se fazer a análise de qualidade de energia é preciso que se entenda um pouco das características dos fenômenos e grandezas eletromagnéticas que podem causar algum tipo de impacto na qualidade da energia elétrica.

3.1 Fator de potência

Quando se fala em fator de potência é necessário que se entenda sobre carga lineares e cargas não lineares.

De acordo com Capelli (2013, p. 76) carga linear é aquela em que se aplica a lei de Ohm, ou seja, a tensão é igual ao produto da corrente pela resistência. O resistor é um tipo de carga linear. A Figura 1 ilustra a corrente elétrica em fase com a tensão. Isso significa que se aumentarmos a tensão aplicada no resistor, a corrente aumentaria na mesma proporção.

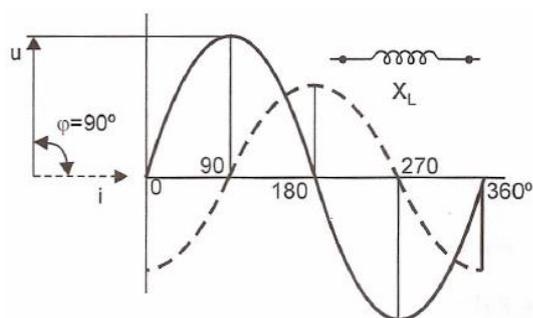
Figura 1 - Tensão X corrente no resistor



Fonte (CAPELLI. 2013, p. 76)

O mesmo não ocorre em indutores. Na verdade, esses componentes oferecem oposição às variações de corrente e, por essa razão, a tensão em um circuito puramente indutivo está 90° adiantada em relação à corrente ($\varphi = 90^\circ$), conforme a Figura 2. Portanto, o indutor não é uma carga linear.

Figura 2 - Tensão X Corrente no indutor



Fonte: (CAPELLI, 2013).

Segundo Capelli (2013, p. 77), o capacitor também não é caracterizado como uma carga linear, mas como ele opõe-se às oscilações de tensão, ela ficará atrasado ($\varphi = -90^\circ$) se comparado a corrente elétrica.

Uma carga que seja não linear se baseia no termo impedância, e não na resistência. A resistência sempre será constante independente da frequência, ao contrário a impedância sim, varia com a frequência, já no indutor é alterada da seguinte forma como mostra a equação (1):

$$XL = 2 \pi . f . L \quad (1)$$

Onde: XL é a reatância indutiva, L é a Indutância em *Henry*s, f é a frequência em *Hertz*, π é aproximadamente 3,14.

A impedância do capacitor é controlada pela equação (2):

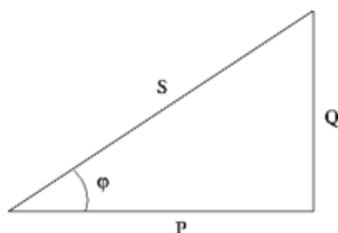
$$XC = \frac{1}{2 . \pi f C} \quad (2)$$

Onde: XC é a reatância capacitiva, C é a Capacitância em *Farads*, f é a frequência em *Hertz*, π é aproximadamente 3,14.

Normalmente, as cargas de um circuito são constituídas de resistores, indutores e capacitores. Nem sempre a energia que se aplica nas cargas não lineares realiza trabalho. Parte desta potência é perdida e é chamada de energia reativa.

O triângulo das potências como é ilustrado na Figura 3 exemplifica as relações entre as potências ativa, aparente e reativa.

Figura 3 - Triângulo das potências.



Fonte: (CAPELLI, 2013).

Onde: S é a potência aparente, P a potência ativa e Q a potência reativa e φ é o ângulo de defasagem entre as potências aparente e ativa.

A hipotenusa do triângulo-retângulo que é a maior fonte entre as demais é a potência aparente. A potência que realiza o trabalho é chamada de potência ativa ou útil sendo está a que é consumida pela carga.

A potência reativa é perdida no meio do sistema e quanto menor esta perda for, será melhor será para o sistema. Seguindo o teorema Pitagórico, tem-se que:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3)$$

Matematicamente, pela relação da trigonometria nota-se que a potência útil é o cosseno do ângulo de defasagem entre a potência ativa e aparente.

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (4)$$

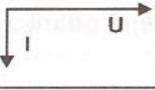
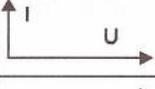
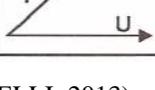
Onde: O fator de potência (FP) é o $\cos(\varphi)$, também pode ser desenvolvido com os valores anotados de potência reativa (P) e potência ativa (Q) ou ainda através das energias ativa (EA) e energia reativa (ER) ou pela razão entre a potência ativa (P) potência aparente (S). (Capelli 2013, p. 79)

$$FP = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} = \frac{EA}{\sqrt{EA^2 + ER^2}} = \frac{P}{S} \quad (5)$$

O resultado do consumo de potência útil em um motor é o torque mecânico no eixo do mesmo. A potência reativa causa o magnetismo e aquecimento dos enrolamentos, a soma da potência útil e do desperdício é a potência aparente.

De acordo com Capelli (2013, p. 80), quanto menor for o desperdício menor será a potência reativa e como consequência menor será o fator de potência e mais eficiente fica o sistema. A Figura 4 exemplifica o fator de potência de acordo com sua carga relacionada.

Figura 4 - Tipo de carga X Fator de Potência.

Tipo de carga	Relação fasorial	Fase	Fator de potência	P Absorvido pela carga	Q Absorvido pela carga
Resistiva		$\varphi = 0$	$\text{COS}\varphi = 1$	$P > 0$	$Q = 0$
Indutiva		$\varphi = +90^\circ$	$\text{COS}\varphi = 0$	$P = 0$	$Q > 0$
Capacitiva		$\varphi = -90^\circ$	$\text{COS}\varphi = 0$	$P = 0$	$Q < 0$
Resistiva e Indutiva		$0 < \varphi < +90^\circ$	$1 > \text{COS}\varphi > 0$	$P > 0$	$Q > 0$
Resistiva e Capacitiva		$-90^\circ < \varphi < 0$	$0 < \text{COS}\varphi < 1$	$P > 0$	$Q < 0$

Fonte: (CAPELLI, 2013).

Se o sistema tiver um baixo $\cos(\varphi)$ o sistema terá um baixo fator de potência e isso será prejudicial para o circuito elétrico. Não será só a instalação que será prejudicada, mas sim toda a rede que está ligada a ela.

De acordo com o Decreto nº 479 de 20 de março de 1992 do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE), estabeleceu-se que o menor valor aceito para o fator de potência será de 0,92, sendo este válido para todo o território nacional. Com isso os consumidores que tiverem fator de potência abaixo de 0,92 deverão ser tarifados pela concessionária de energia local.

Segundo Capelli (2013), 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.

3.2 Categorias e Características Típicas de Fenômenos Eletromagnéticos

O Quadro 1 mostra os espectros típicos, duração e tensão de acordo com cada categoria dos fenômenos eletromagnéticos. As informações descritas são muito importantes para descrever e classificar os resultados, medições e descrever os fenômenos encontrados que podem causar problemas na qualidade de energia elétrica.

Quadro 1 – Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos em Sistemas de potência.

Categorias	Espectro típico	Duração típica	Tensão típica
1. Transitórios			
1.1 Impulsivos			
1.1.1 Nanossegundos	5ns ascensão	< 50ns	
1.1.2 Microssegundos	1µs ascensão	50ns – 1ms	
1.1.3 Milissegundos	0,1ms ascensão	> 1ms	
1.2 Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 p.u.
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20µs	0 – 8 p.u.
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5µs	0 – 4 p.u.
2. Variações de Tensão de Curta Duração			
2.1 Instantâneas			
2.1.1 Sag (Afundamento)		0,5 – 30 ciclos	0,1 – 0,9 p.u.
2.1.2 Swell (Elevação)		0,5 – 30 ciclos	1,1 – 1,8 p.u.
2.2 Momentâneas			
2.2.1 Interrupção		0,5 ciclos – 3s	< 0,1 p.u.
2.2.2 Sag (Afundamento)		30 ciclos – 3s	0,1 – 0,9 p.u.
2.2.3 Swell (Elevação)		30 ciclos – 3s	1,1 – 1,4 p.u.

2.3 Temporárias		
2.3.1 Interrupção	$3s - 1 \text{ min}$	$< 0,1 \text{ p.u.}$
2.3.2 <i>Sag</i> (Afundamento)	$3s - 1 \text{ min}$	$0,1 - 0,9 \text{ p.u.}$
2.3.3 <i>Swell</i> (Elevação)	$3s - 1 \text{ min}$	$1,1 - 1,2 \text{ p.u.}$
3. Variações de Tensão de Longa Duração		
3.1 Interrupção Sustentada	$> 1 \text{ min}$	$0,0 \text{ p.u.}$
3.2 Subtensão	$> 1 \text{ min}$	$0,8 - 0,9 \text{ p.u.}$
3.3 Sobretensão	$> 1 \text{ min}$	$1,1 - 1,2 \text{ p.u.}$
4. Desequilíbrio de Tensão	Estacionário	$0,5 - 2\%$
5. Distorção da Forma de Onda		
5.1 <i>DC Offset</i>	Estacionário	$0 - 0,1\%$
5.2 Harmônicas	Estacionário	$0 - 20\%$
5.3 Inter-harmônicas	Estacionário	$0 - 2\%$
5.4 <i>Notching</i> (Corte de Tensão)	Estacionário	
5.5 Ruído	Estacionário	$0 - 1\%$
6. Flutuação de Tensão	Intermitente	$0,1 - 7\%$
7. Variação de Frequência	$< 10s$	

Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

3.2.1 Transitórios ou transientes

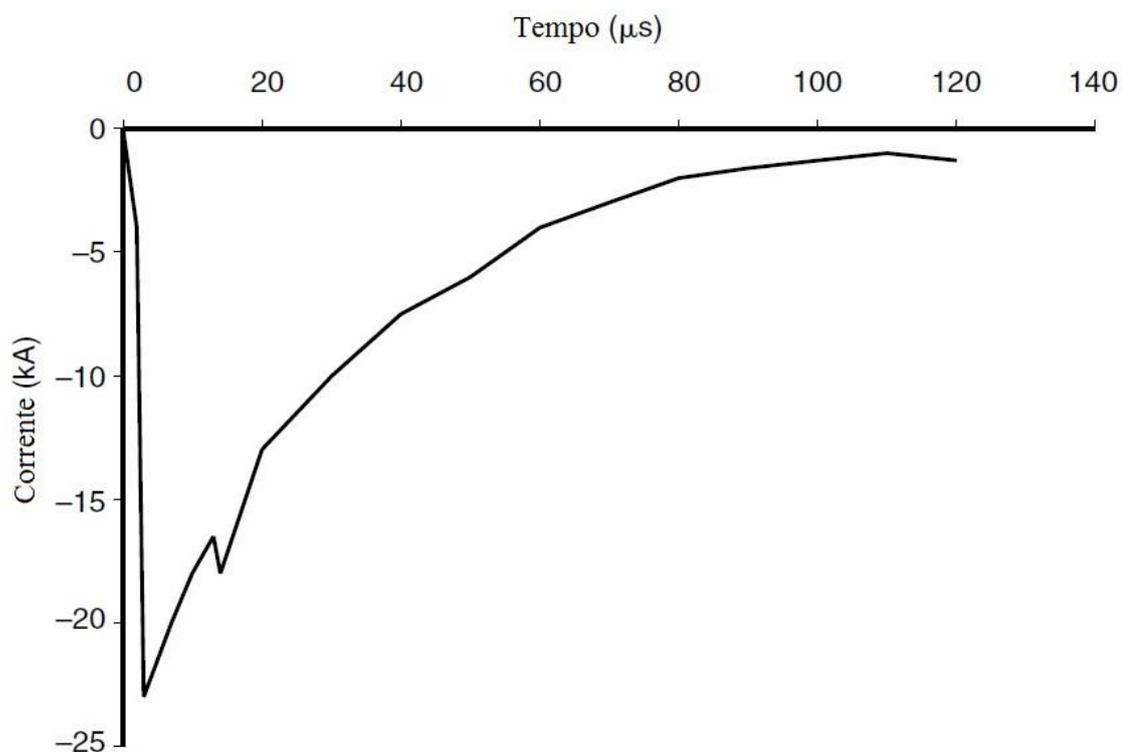
Segundo Dugan (2002, p. 15) o termo transiente tem sido citado em muitas análises de variações do sistema elétrico de potência para especificar algum evento indesejável ou o espaço de tempo que ocorre a mudança de uma variável que desaparece durante o período de transição de um estado estacionário para outro.

Os fenômenos transientes podem ser classificados em duas categorias, em impulsivos e oscilatórios. Estes transientes refletem a forma de onda de uma corrente ou tensão.

3.2.1.1 Impulsivos

Segundo Dugan (2002, p. 15) o transiente impulsivo é uma mudança brusca na frequência, corrente ou tensão diferente da utilizada no sistema elétrico. Os transitórios geralmente são qualificados em relação ao seu tempo de subida e descida e geralmente são causados por descargas atmosféricas,

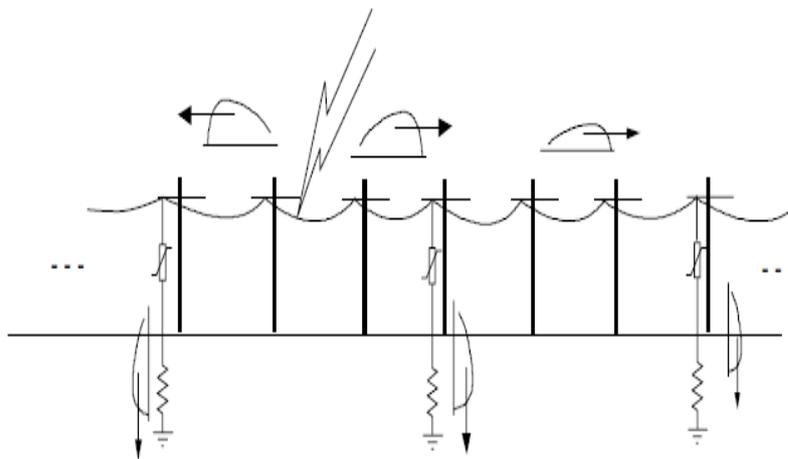
Figura 5 - Corrente típica transitória impulsiva causada por relâmpagos.



Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

Os transientes podem ser rapidamente corrigidos por componentes do circuito elétrico utilizando para raios e aterramentos instalados ao longo da linha de transmissão como mostra a Figura 6.

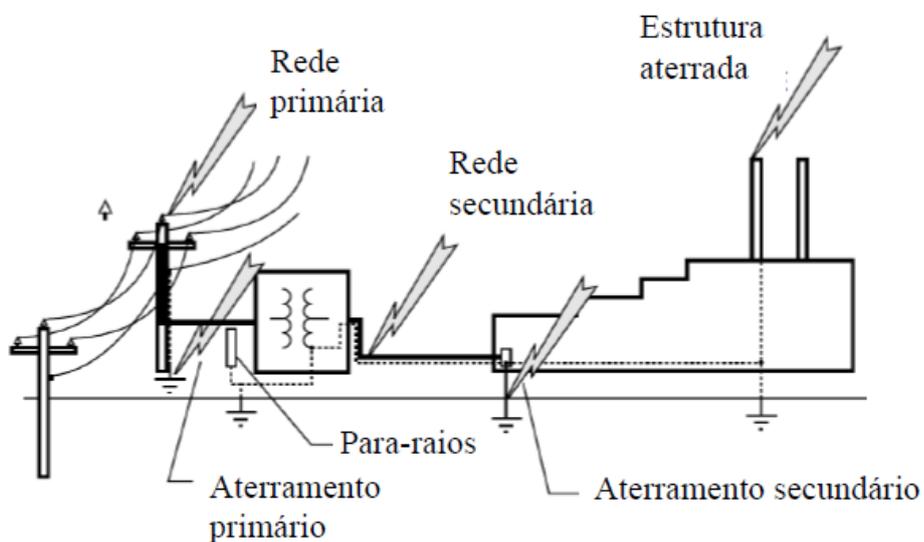
Figura 6 - Utilização de para-raios e aterramentos ao longo da linha para amortecimento das correntes transitórias.



Fonte: (DUGAN, 2002).

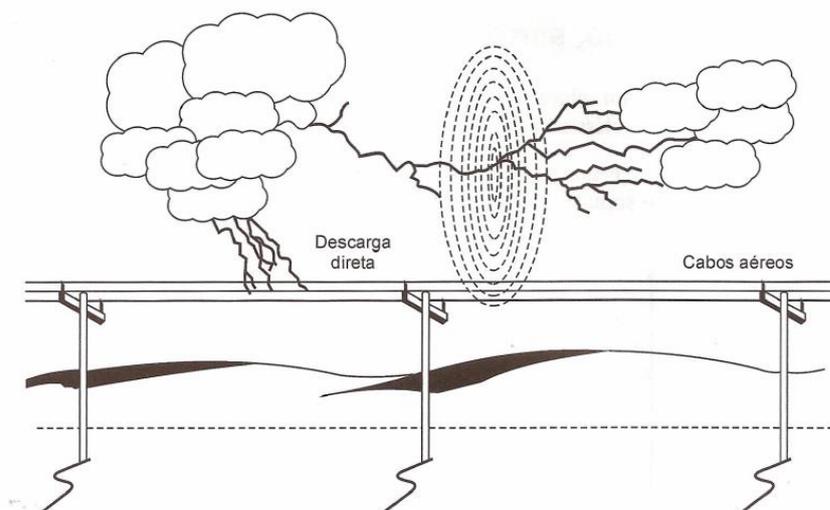
Os raios podem atingir de forma direta ou indiretamente vários locais da rede elétrica como mostra a Figura 7, ou ainda provocar variações no circuito através de indução magnética das descargas que ocorreram a uma longa distância, conforme representado na Figura 8.

Figura 7 – Locais passíveis de receber e conduzir descargas atmosféricas.



Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

Figura 8 - acoplamento capacitivo



Fonte: (CAPPELI, 2013, P 100)

3.2.1.2 Oscilatórios

Segundo (DUGAN, 2002), transiente oscilatório é uma mudança brusca de frequência durante as condições de regimes estacionários de corrente, tensão ou ambos, e pode ser bidirecional na polaridade (positiva e negativa). O transiente oscilatório de é constituído de tensão e corrente que muda sua polaridade rapidamente e pode ser bidirecional nas polaridades positivas ou negativas. O seu espectro é definido pela frequência predominante, duração e magnitude da tensão, como baixa, média ou alta frequência, conforme descrito no Quadro 2.

Quadro 2 - Classificação dos transitórios oscilatórios

Categorias	Espectro típico	Duração típica	Tensão típica
1. Transitórios Oscilatórios			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 p.u.
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20 μ s	0 – 8 p.u.
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 μ s	0 – 4 p.u.

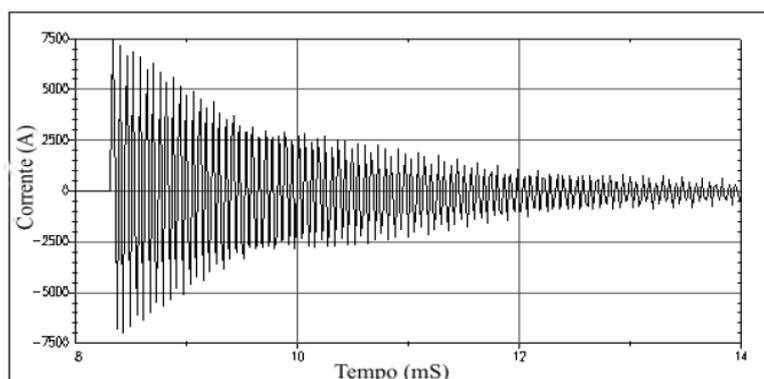
Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Os transientes de alta frequência (acima de 500KHz) com duração de microssegundos, são geralmente o resultado de uma resposta do sistema local a um transiente impulsivo.

Transientes oscilatórios de média frequência (ente 5 e 500KHz) com duração de dezenas de microssegundos.

A ativação ou operação do capacitor “*back-to-back*” resulta em correntes transitórias de dezenas de kHz como mostra a Figura 9.

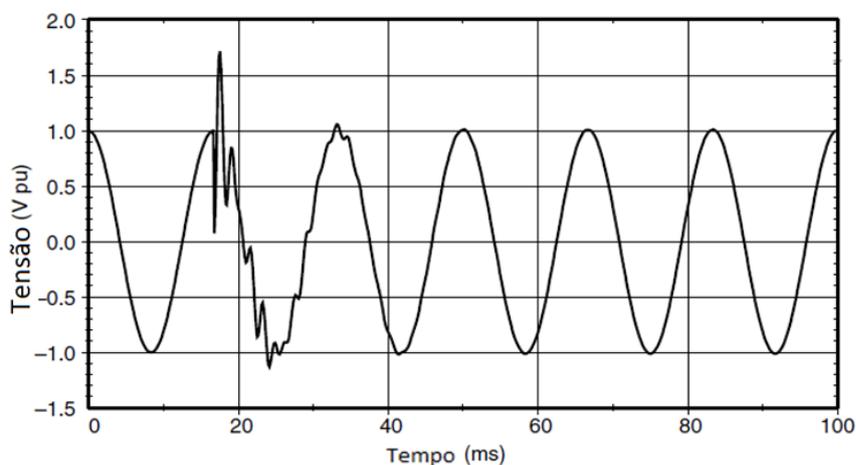
Figura 9 – Transitório provocado por chaveamento de capacitor.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Segundo Dugan (2002), os transientes oscilatórios de baixa frequência podem ser causados principalmente pela energização de capacitores, conforme representado na Figura 10.

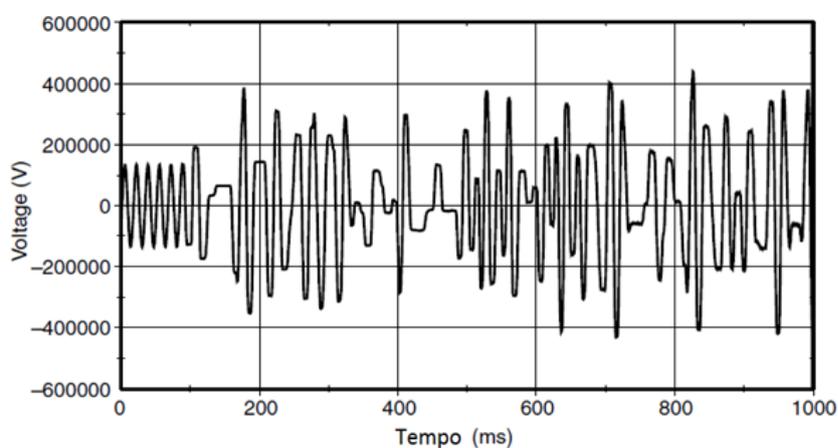
Figura 10 – Transitório de baixa frequência causado pela energização de banco de capacitores.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002, p. 18).

Os transientes oscilatórios com frequências inferiores a 300 Hz, geralmente podem estar associados a energização de transformadores sem carga como ilustrado na Figura 11.

Figura 11 – Transitório provocado por ferorrresonância causado pela energização de transformadores a vazio.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.2 Variações de Tensão de Curta Duração

As variações de tensão de curta duração (VTCD) são variações dos valores RMS de tensão e podem ser definidas pelo Quadro 1, em:

- a) Instantâneas: duração entre 0,5 e 30 ciclos
- b) Momentâneas: duração entre 30 ciclos e 3 segundos
- c) Temporárias: duração entre 3 segundos e 1 minuto

As variações de tensão de curta duração normalmente são oriundas da energização de grandes cargas que precisam de uma alta corrente de partida ou por conexões soltas ou conexões intermitentes dos cabos elétricos. Dependendo da falha, condições do sistema podem ocorrer quedas de tensões (*SAGS*), elevações de tensões (*Swells*) ou até mesmo interrupções.

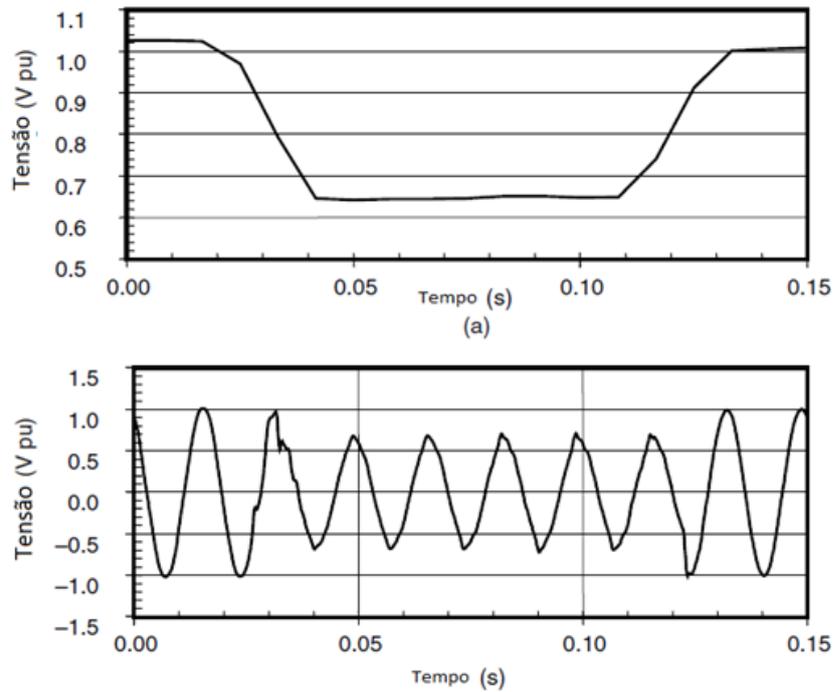
3.2.2.1 Afundamentos de tensão

Segundo Dugan (2002), afundamento de tensão (*sag* ou *dip*) é a diminuição para entre 0,1 e 0,9 *pu* em RMS da tensão ou corrente com duração entre 0,5 ciclo e 1 minuto. O número de afundamentos as características perante uma determinada falta podem depender de vários fatores, como:

- a) tipo da falta: trifásica, bifásica, monofásica;
- b) sua localização em relação aos consumidores que estão ligados na rede: dependendo do ponto da falta, o afundamento de tensão pode influenciar um grande número de consumidores;
- c) impedância da falta pode influenciar a amplitude do afundamento de tensão;
- d) tipo de ligação dos transformadores, está diretamente ligada aos níveis de tensão e corrente;
- e) filosofia de proteção adotada no sistema.

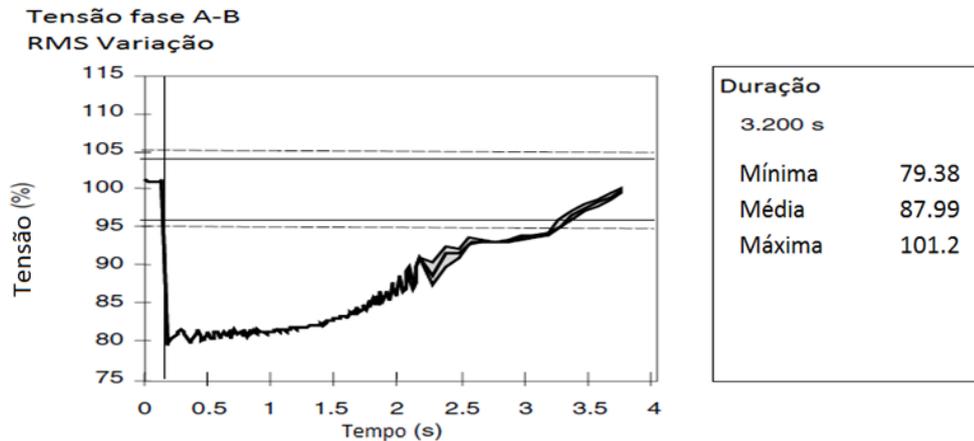
A Figura 12 mostra o afundamento de tensão causado por uma falta monofásica e a Figura 13 ilustra um afundamento de tensão devido à corrente de partida de um motor de grande porte.

Figura 12 - Afundamento de tensão devido a uma falta monofásica.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Figura 13 - Afundamento de tensão devido à corrente de partida um motor grande porte.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Os equipamentos eletrônicos que utilizam microprocessadores são os tipos de cargas mais sensíveis aos afundamentos.

3.2.2.2 Salto de tensão

De acordo com Dugan (2002, p. 27) o salto de tensão (*Swell*) é definido como um aumento entre 1,1 e 1,8 pu tensão eficaz, na frequência da rede, com duração entre 0,5 ciclo a 1 minuto.

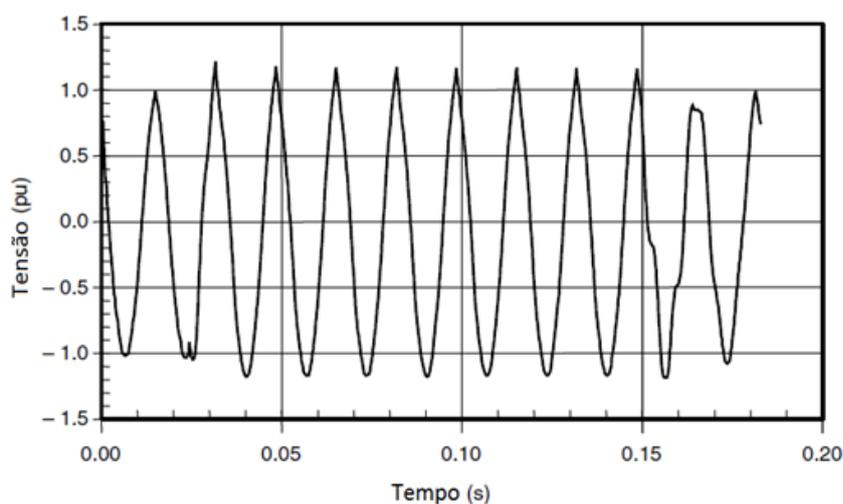
As causas mais comuns estão associadas as condições de falha do sistema, mas não são tão comuns quanto os afundamentos de tensão.

Segundo Dugan (2002, p. 27) a ocorrência de faltas no sistema elétrico, os saltos de tensão ocorrem nas fases que não são atingidas pela falta.

Em sistemas que não tenham aterramento e com impedância de sequência zero infinita, tensão fase-neutro nas fases não aterradas podem chegar a 1,73 pu.

A Figura 14 mostra um salto de tensão devido à uma falta de fase-terra.

Figura 14 - Salto de tensão.



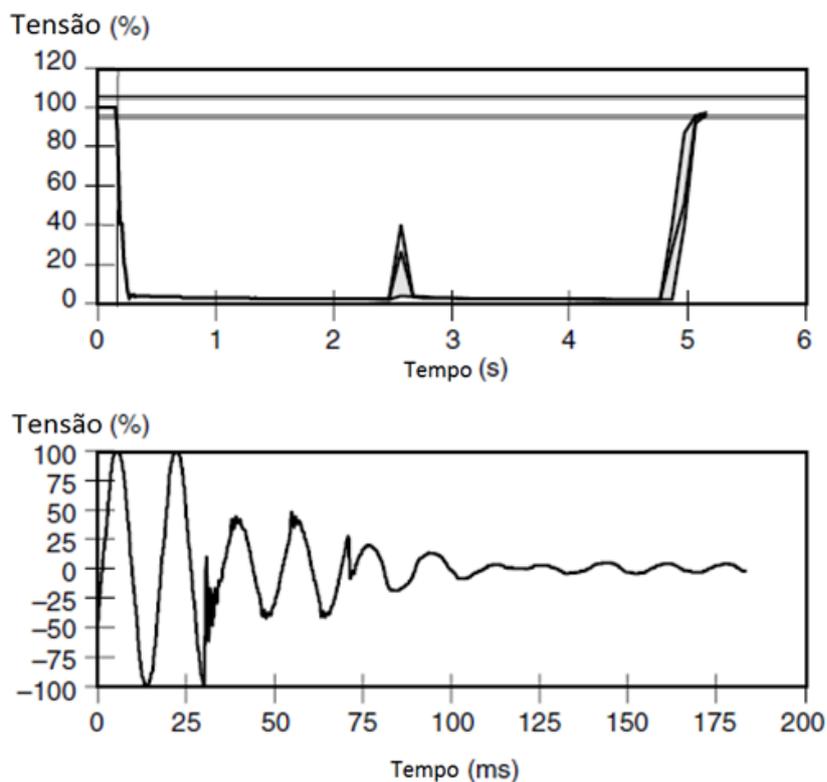
Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.2.3 Interrupção de curta duração

Conforme o Quadro 1, interrupção de curta duração ocorre quando a corrente ou tensão assume um valor menor que 0,1 pu, por um período de tempo não superior a 1 minuto.

A Figura 15 representa uma interrupção de curta duração típica de falta onde o dispositivo de proteção interrompeu o fornecimento e tentou religar em seguida, não sendo satisfatório desligando novamente a na segunda religação restabeleceu o fornecimento de energia (Silvério, 2016).

Figura 15 - Interrupção de curta duração.



Fonte: Adaptado (DUGAN).

Segundo Silvério (2016) apud Martinho (2009) a correção no nível do usuário final envolve principalmente a utilização de UPS do inglês, (*Uninterrupt Power System*) ou em português sistema ininterrupto de energia, e grupo de motor gerador que têm o objetivo de manter a tensão de alimentação de um equipamento ou sistema dentro de um valor especificado, mas que são soluções caras, sendo necessário avaliar o retorno do investimento.

3.2.3 Variações de Tensão de Longa Duração

As chamadas VTLD são variações nos valores RMS das tensões com tempo de superior a 1 minuto.

3.2.3.1 Sobretensões

Segundo Dugan (2002), diferentemente dos transitórios onde a sobretensão pode ser classificada como baixa, média e alta frequência, no caso de variação de longa duração estão

na frequência do sistema caracterizadas pelo aumento de tensão RMS superior a 1,1 pu com duração superior a 1 minuto.

Normalmente as sobretensões são provocadas por:

- a) perdas de cargas;
- b) energização de capacitores;
- c) variação de compensação de reativo do sistema
- d) transformadores com taps ajustados incorretamente.

A sobretensão pode ser agravada com a potência reativa fornecida pelos bancos de capacitores, que aumenta com o quadrado da tensão durante uma condição de sobretensão e pode causar:

- a) dispositivos eletrônicos podem sofrer danos durante condições de sobretensão;
- b) transformadores, cabos, disjuntores TCs TPs e máquinas rotativas geralmente não apresentam falhas imediatas, entretanto quando submetidos à sobretensão podem ter as suas vidas úteis reduzidas;
- c) relé de proteção também poderão apresentar falhas de operação.

3.2.3.2 Subtensões

Segundo Silvério (2016) apud Dugan (2002), a subtensão é caracterizada pela redução na tensão RMS inferior a 0,9 pu com duração superior a 1 minuto

Normalmente as subtensões são provocadas por:

- a) sobrecarga dos alimentadores ou equipamentos;
- b) desligamento de bancos de capacitores;
- c) baixo fator de potência.

A subtensão é função da corrente, do fator de potência e da impedância do rede, por este motivo, os consumidores mais distantes da subestação estão submetidos à tensão menor devido a maior impedância dos cabos e cargas ligadas ao longo do alimentador. Quanto menor o fator de potência do sistema maiores são as perdas reativas e por consequência maior a queda de tensão. (Silvério 2016, p. 42)

Os problemas causados pela subtensão geralmente são:

- a) possível operação de equipamentos de proteção com interrupção de equipamentos eletrônicos microprocessados;
- b) aumento no tempo de partida de motores de indução;
- c) aumento da corrente no estator de motores provocando aquecimento e redução da vida útil;
- d) redução da potência reativa produzida pelos capacitores.

3.2.3.3 Interrupções sustentadas

Segundo Dugan (2002), são caracterizadas como interrupções sustentadas quando se tem a ausência de tensão RMS por mais de 1 minuto e comumente são ocasionadas por interrupções não programadas, como a queima de elos fusíveis, abertura de disjuntor, rompimento de cabos ou interrupções programadas para manutenção.

Em interrupções que sejam frutos de falhas no sistema, os equipamentos como religador ou disjuntores com religação automatizada, podem ser religados após ter ocorrido algum tipo de evento transitório como pássaros que fecharam curto circuito na rede, galhos de árvores encostando nos fios, etc. Em caso de não solução da anomalia que ocasionou o desligamento da rede, deverá ser acionada a equipe de campo para fazer a manutenção manual do sistema.

3.2.4 Desequilíbrio de tensão

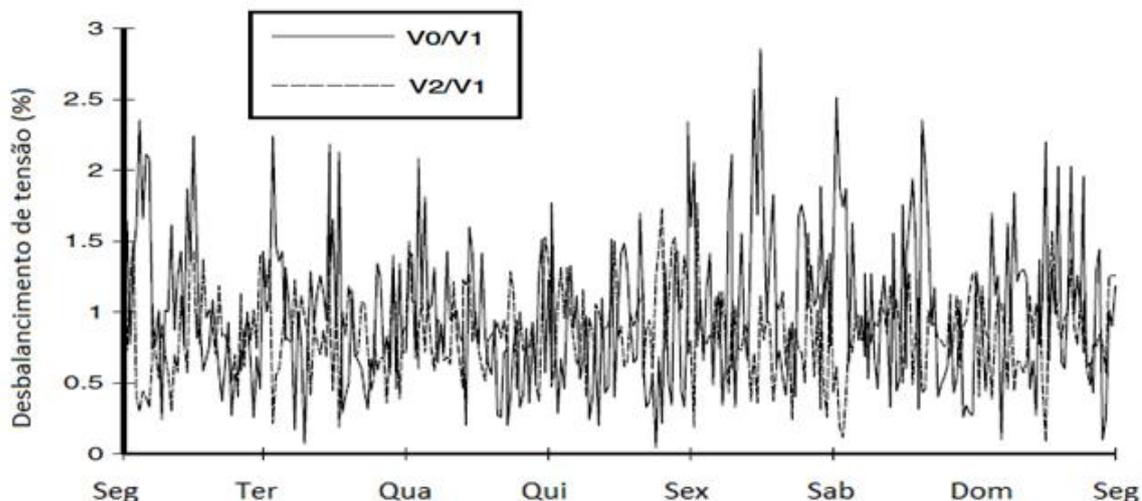
Segundo Dugan (2002) o desequilíbrio de tensão é definido como o desvio máximo da tensão trifásica dividido pela média das tensões trifásicas pode ser definido como o desvio máximo da média das tensões trifásicas ou correntes, dividido pela média das tensões de fase ou de três correntes, expressa em percentagem entre 0,5 a 2% em regime permanente provado principalmente pela distribuição das cartas monofásicas nos circuitos trifásicos de forma que a corrente elétrica que circula pelas fases seja diferentes.

O desequilíbrio também pode ser definido pela razão entre os componentes de sequência negativa, ou zero, sobre o componente de sequência positiva das componentes simétricas. (Dugan, 2016 p. 27)

O desequilíbrio de tensão é aceito até 2% em redes monofásicas e em redes trifásicas um valor acima de 5% é considerado grave.

A Figura 16 exemplifica o desequilíbrio das componentes em um alimentador.

Figura 16 - Desequilíbrio de tensão alimentador residencial.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.5 Distorção na forma de onda

Segundo Dugan (2002), a distorção na forma de onda é definida quando ocorre uma variação no estado estacionário da forma de onda senoidal ideal e é caracterizada de acordo com sua forma espectral de desvio, e são divididas em 5 tipos de distorção da forma de onda:

- a) DC *offset*;
- b) Harmônicos;
- c) Inter-harmônicos;
- d) Recorte (*Notching*);
- e) Ruído (*Noise*).

3.2.5.1 DC *offset*

A presença de uma tensão DC em um sistema de distribuição AC é chamado de DC *offset*, sendo este decorrente de algum tipo de distúrbio geomagnético. Se no sistema houver por menor que seja um vestígio de corrente contínua, pode precipitar a saturação dos transformadores e a corrosão dos pontos de aterramento

3.2.5.2 Harmônicos

São denominados harmônicos as ondas senoidais periódicas com frequência múltipla inteira da frequência do sistema, geralmente produzidos por cargas não lineares. Os níveis de distorção harmônica são descritas em função da magnitude e ângulos de cada componente individual.

A Tabela 1 cita os exemplos de frequências ímpares que são os mais encontrados no sistema de 60 Hz.

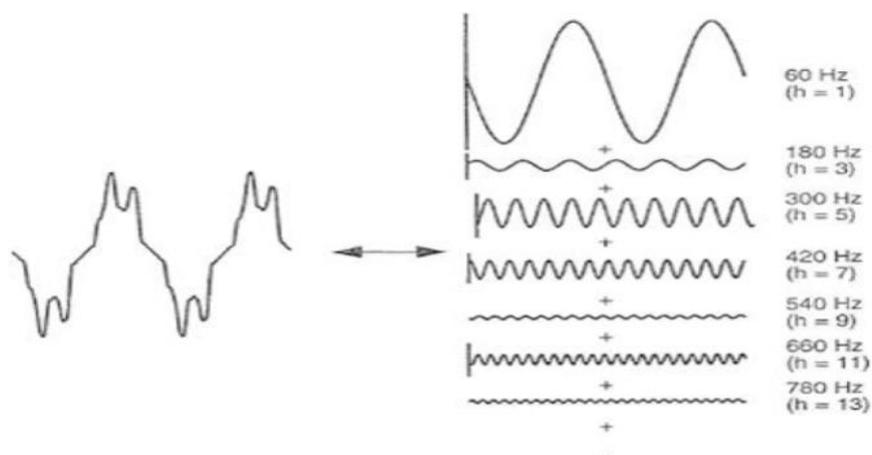
Tabela 1 – Sequência dos componentes harmônicos.

Ordem	Frequência em Hz
Fundamental	60
3°	180
5°	300
7°	420
9°	540
11°	660
13°	480

Fonte: o autor.

A distorção da forma da onda provocada pelos harmônicos pode ser representada pela série de *Fourier* como uma somatória dos harmônicos presentes. A Figura 17 representa a distorção da onda da senóide fundamental de 60 Hz em função da presença dos harmônicos ímpares até a 13ª ordem. (Silvério, 2016 p. 45)

Figura 17– Representação das distorções harmônicas ímpares até a 13ª ordem.



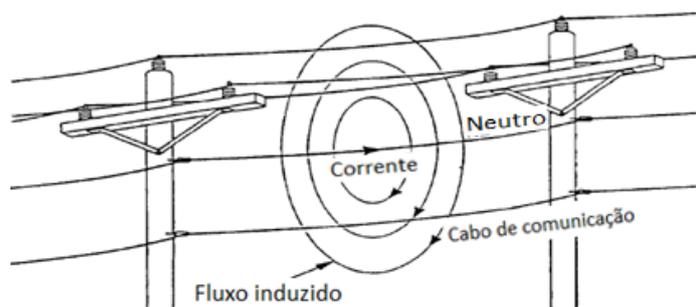
Fonte: (DUGAN, 2002).

Segundo Capelli os principais problemas causados pelas distorções harmônicas, são:

- aquecimento dos cabos;
- disparo de dispositivos de proteção;
- ressonância;
- EMI - interferências eletromagnéticas transmitidas pelos cabos ou irradiadas pelo ar;
- queda de tensão devido à redução do fator de potência;
- excesso de corrente de neutro.

A Figura 18 mostra como as correntes harmônicas, principalmente de 3ª ordem são induzidas magneticamente nos fios neutro e telecomunicações.

Figura 18 - Interferência magnética de correntes harmônicas.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

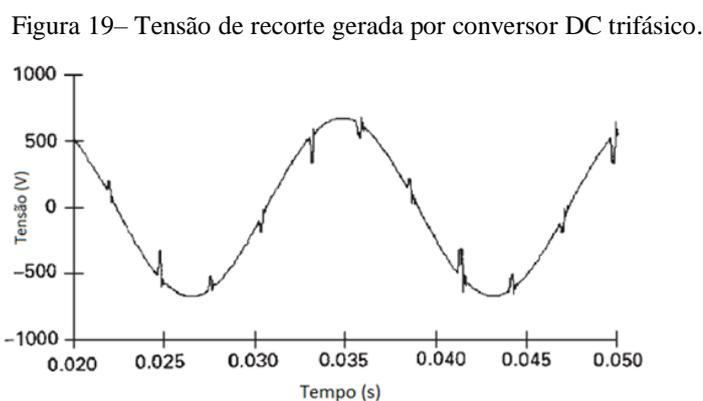
3.2.5.3 Inter-harmônicos

Os inter-harmônicos são ondas de frequências não inteiras e diferentes das múltiplas inteiras da frequência fundamental, eles podem ser notados como frequências discretas ou com espectro de banda larga. As principais fontes de inter-harmônicos são: conversores, fornos de indução e dispositivos que utilizam arco elétrico. Inter-harmônicos geralmente são resultado da conversão de frequência e não são constantes.

3.2.5.4 Recorte (Notching)

Recorte é uma perturbação periódica da tensão causada pelo funcionamento normal dos dispositivos eletrônicos de energia quando a corrente é comutada de uma fase para outra. Como o recorte ocorre de forma contínua, os componentes de frequências associadas podem ser bastantes elevados e não podem ser facilmente caracterizados em equipamentos de medição normalmente utilizados para a análise de harmônica. (Dugan, 2002 p. 27)

De acordo com Silvério (2016) apud Dugan (2002) a Figura 19 mostra um exemplo de conversor trifásico de corrente contínua que comuta uma fase para outra. Neste período há um curto circuito momentâneo entre duas fases, puxando a tensão mais próximo de zero.



Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

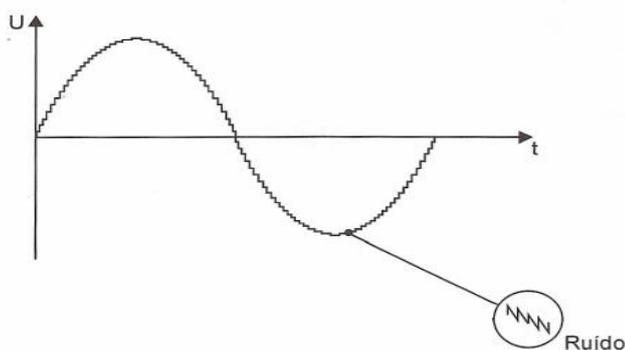
3.2.5.5 Ruído (Noise)

O ruído é caracterizado como qualquer tipo de distorção malquiada nas ondas de tensão ou corrente de amplitude pequena, sem frequência definida que se junte à forma de onda inicial. Comumente, dispositivos eletrônicos são os provocadores, como por exemplo os retificadores,

fornos a arco e indução eletromagnética, sendo amplificadores em circuitos mal aterrados e atenuados com utilização de filtros.

Basicamente, o ruído consiste em qualquer distorção indesejada de sinal que não pode seja classificado como distorção harmônica ou transiente e podem provocar perturbações em equipamentos eletrônicos microprocessadores. A Figura 20 ilustra um ruído numa onda de tensão alternada. (Dugan, 2002 p. 28)

Figura 20 - Ruído em onda de tensão.



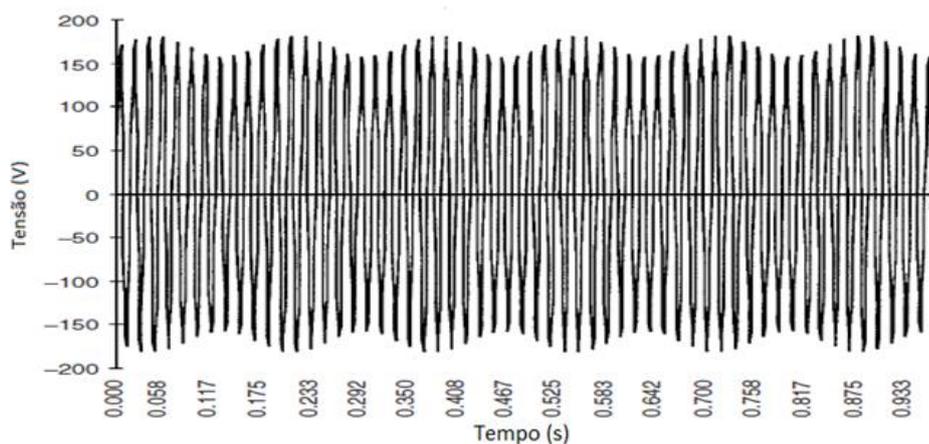
Fonte: (CAPELLI, 2013).

3.2.6 Flutuação de Tensão

Flutuação de tensão são oscilações que variam de 0,9 a 1,1 *pu* e podem apresentar variações contínuas e rápidas. Este fenômeno é facilmente identificado quando se tem a cintilação na iluminação. A cintilação é uma consequência da variação da tensão sobre as lâmpadas. Este fenômeno é muito comum onde se tem compressores de ar.

A Figura 21 mostra um exemplo típico de variação de tensão.

Figura 21– Flutuação da tensão característica do *flickers*.



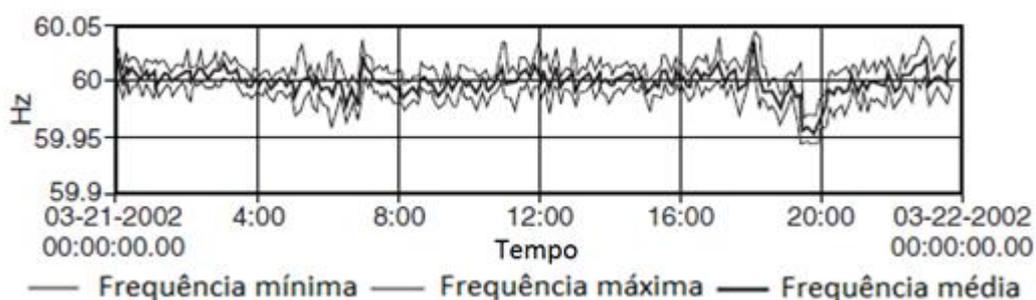
Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

3.2.7 Variações na frequência

Variação de frequência, são desvios no valor da frequência fundamental, geralmente provocados pela entrada ou saída de grandes cargas do sistema elétrico de potência.

A Figura 22 ilustra um exemplo típico de variação de frequência em uma subestação de 13Kv.

Figura 22– Variação de frequência em uma subestação.



Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

4 A EMPRESA

Neste capítulo será apresentada a estrutura e as características da empresa que propiciou a realização deste estudo de caso.

4.1 Sobre a empresa

A empresa tem sua sede na cidade de Varginha no sul de MG e tem como foco de trabalho o forjamento de peças para câmbio para veículos pesados utilizados na construção civil, no transporte de cargas e máquinas agrícolas

4.2 O problema

O fator de potência abaixo do limite especificado pelo Módulo 8 do PRODIST e pela concessionária de energia local que é de 0,92 foi identificado através das penalidades aplicadas pela concessionária de energia.

Figura 23 - Exemplo de fatura com tarifação de energia reativa ocasionada pelo baixo fator de potência da empresa.

Descrição	Valores Faturados		
	Quantidade	Tarifa/Preço	Valor(R\$)
Demanda Ativa kW HFP/Único	1.100	11,85708677	13.042,78
Energia Ativa kWh HFP/Único	121.100	0,42570344	51.552,67
Energia Ativa kWh HP	2.100	1,59878288	3.357,42
Energia Reativa kWh HFP/Único	17.500	0,33075514	5.788,19
Energia Reativa kWh HP	1.400	0,33075514	463,04

Fonte: O autor, adaptado de fatura de energia elétrica.

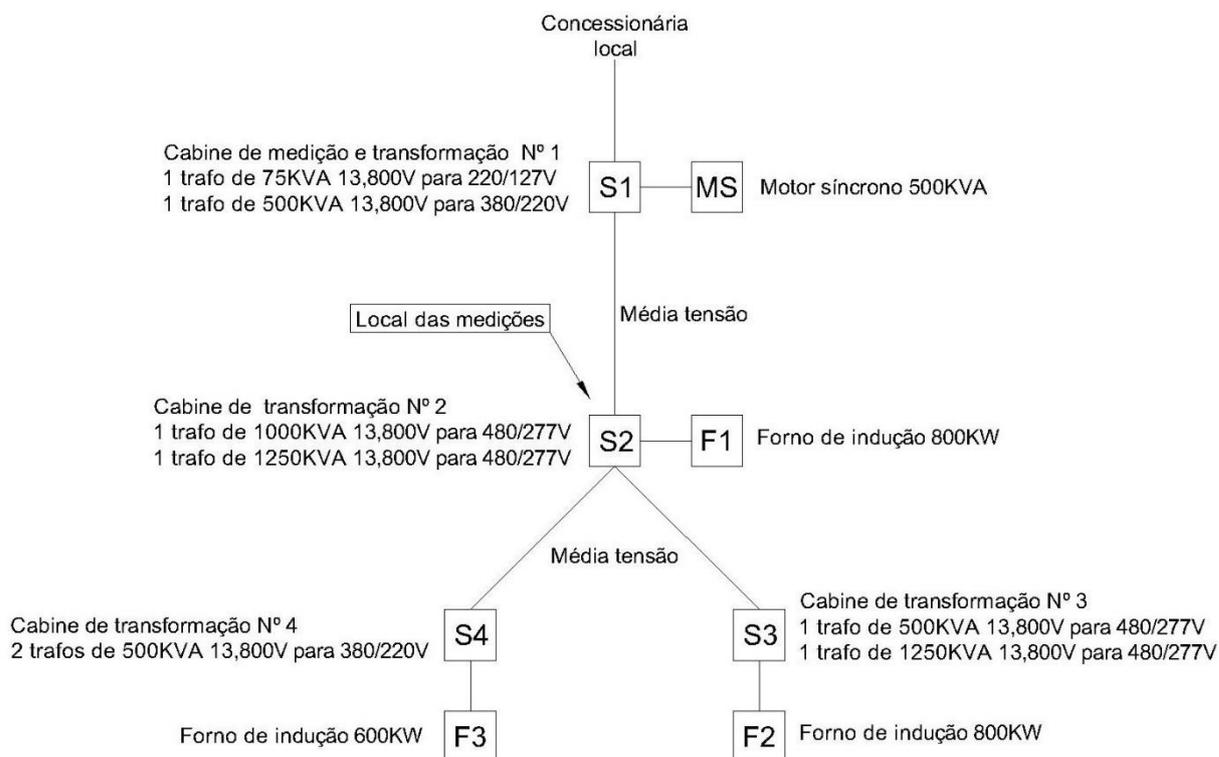
Facilmente pode-se identificar o baixo fator de potência na conta de energia observando o valor da multa aplicada. Então este estudo faz-se necessário para identificar a causa do problema e à partir deste ponto desenvolver uma solução viável para o problema.

4.3 Das subestações

Atualmente a empresa conta com uma carga total em transformadores trifásicos de 5575KVA divididos em 4 subestações de energia sendo a subestação de N° 1 subestação de medição em média tensão com transformação para baixa tensão contendo 1 transformador de

500KVA dedicado aos motores e 1 transformador de 75KVA para o escritório administrativo da empresa. As subestações posteriores são dedicadas apenas aos fornos de indução distribuídos da seguinte forma: subestação N° 2 contem 2 transformadores (1 trafo de 1000KVA e 1 trafo de 1250KVA), a subestação de N° 3 conta com 2 transformadores (1 trafo de 500KVA e 1 trafo de 1250KVA) e a subestação N° 4 dispõe de 2 transformadores de 500KVA cada.

Figura 24 – Representação das subestações e cargas.



Fonte: O autor, 2016.

4.4 Motor síncrono

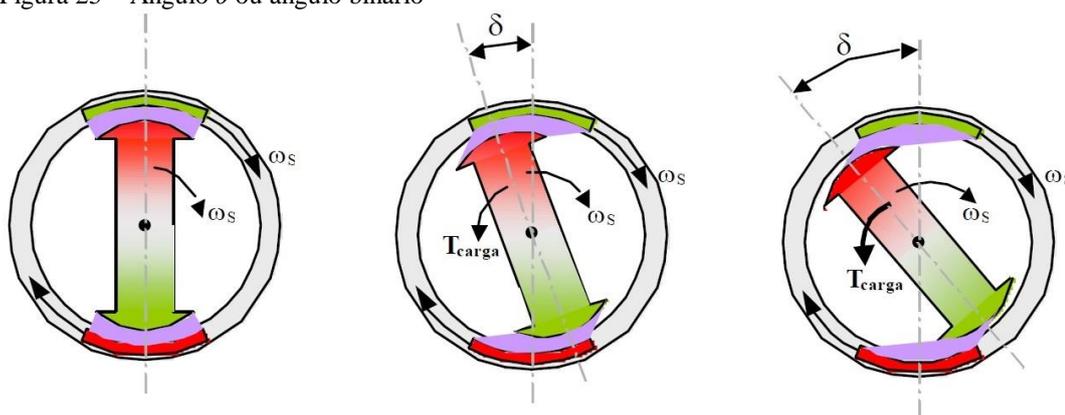
O motor síncrono opera em sincronismo com o sistema de alimentação. Este tipo de motor está sendo usado com maior frequência nas indústrias, devido as características únicas que possuem. Tais características são: torque elevado, velocidade constante mesmo com variações de cargas, baixo custo de manutenção, rendimento elevado e a capacidade de atuar como compensador síncrono para corrigir o fator de potência do circuito são uns dos principais motivos que estão resultando na escolha dos motores síncronos para acionamento de grandes cargas.

Os motores síncronos podem atuar com diversas cargas e basicamente com velocidade constante. Normalmente são conectados em paralelo com a entrada do sistema de alimentação

de potência da concessionária, cuja a potência é superior à dos motores e da carga, portanto o motor fica funcionando em paralelo com toda a carga instalada, isto significa que a tensão e a frequência são sempre constantes independente da potência consumida pelo motor.

Durante a operação do motor síncrono, são gerados dois campos magnéticos, sendo o campo magnético do rotor e o campo magnético girante. Como estes dois campos magnéticos nunca ficam perfeitamente alinhados, sempre haverá um defasamento entre os dois campos como podemos ver na Figura 25, esta defasagem é medida pelo ângulo δ , apelidado de binário.

Figura 25 – Ângulo δ ou ângulo binário

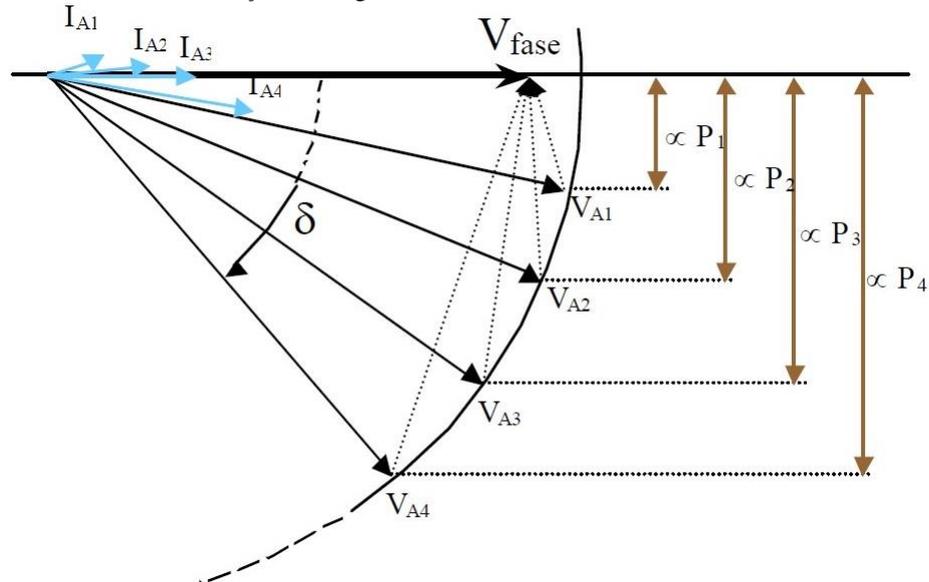


Fonte: adaptado de Motores Síncronos.

4.4.1 Efeito da variação de carga

Quando se tem uma carga ligada a rede do motor, o mesmo desenvolverá o binário (defasagem entre os ângulos do campo magnético do rotor e o campo magnético girante) suficiente para manter a carga girando a velocidade síncrona. A Figura 25 mostra o que acontece quando a carga sobre o motor varia. Partindo de uma situação correspondente a I_{A1} e a V_{A1} , se o binário resistente aumentar o rotor começa a diminuir a velocidade.

Figura 26 – Efeito da variação da carga



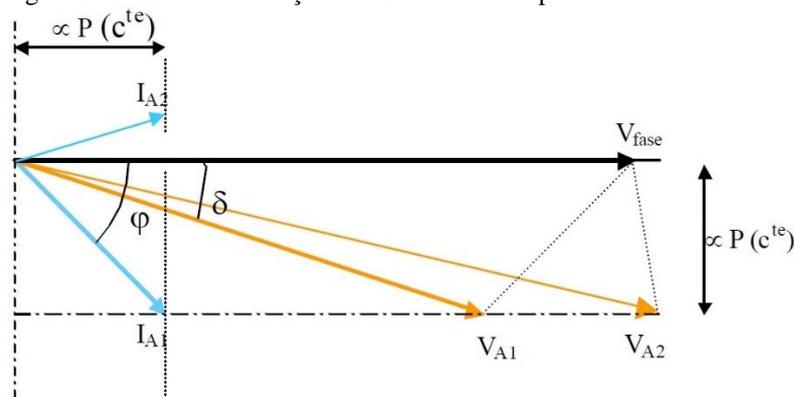
Fonte: adaptado de Motores Síncronos.

Com esta diminuição de velocidade, o ângulo de binário δ aumenta e o binário induzido pelo motor aumenta conseqüentemente. Com o aumento do binário do motor, o rotor acelera até atingir novamente a velocidade de sincronismo, embora com um ângulo de binário maior. A fórmula $V_A = k\phi\omega$, sendo que V_A depende apenas da corrente de campo e da velocidade. Como a velocidade é constante quando não se altera a frequência e como não se alterou a corrente de campo, então o módulo da tensão induzida $|V_A|$, deverá permanecer constante, mesmo existindo alterações na carga. Mas a projeção de V_A , e os valores de $\text{sen}\delta$ e $I_A \cos\phi$ aumentam, isto é, o vetor V_A desloca-se para baixo, sobre uma circunferência que implica no aumento de $jX_s I_A$ tem que aumentar para igualar a V_{FASE} , com isso implica que I_A aumente, ou seja, a potência absorvida pelo motor será maior.

4.4.2 Efeito da variação da corrente de campo

Observando a Figura 26, situação em que o motor funciona com o fator de potência capacitivo (I_{A1} , V_{A1}). Aumenta-se o valor da corrente de campo e conseqüentemente aumenta o valor de V_A mas não causa impacto na potência ativa. Esta apenas é alterada quando a carga varia. Como a variação de corrente de campo I_F não altera a velocidade de rotação considerando que a carga não seja alterada, com isso a potência absorvida pelo motor é constante. Se a tensão da rede permanecer constante, V_{fase} também é constante. Desta forma os intervalos de V_A , $\text{sen}\delta$ e $I_A \cos\phi$ proporcionais à potência, tenderão a permanecerem constantes. Com o aumento de I_F aumenta-se V_A .

Figura 27 – Efeito da variação da corrente de campo

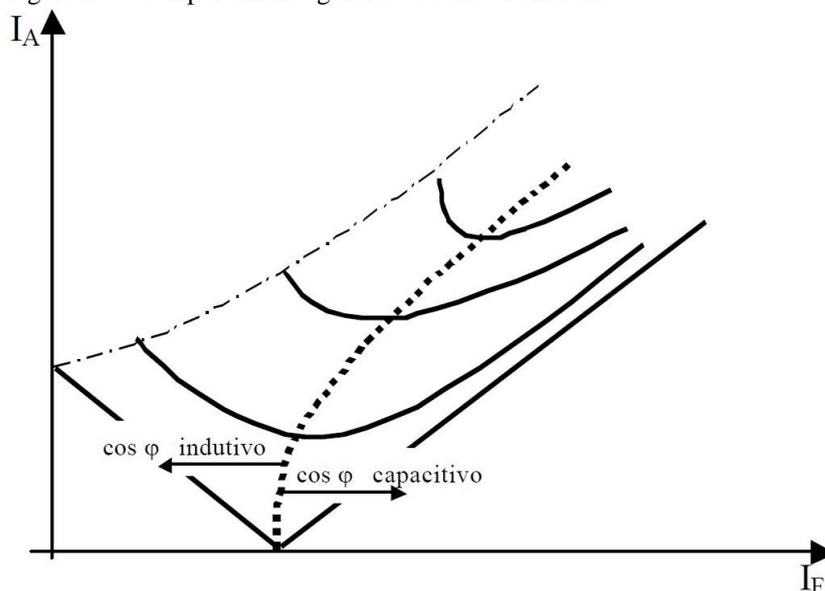


Fonte: adaptado de Motores Síncronos.

A medida que V_A aumenta o valor da corrente I_A diminui e depois aumenta. Para valores baixos de V_A , a corrente I_A , aparece atrasada e o motor se comporta como uma carga indutiva, consumindo potência reativa. Aumentando I_F , a corrente I_A vai diminuindo, tornando-se cada vez menos indutiva e passa por uma situação em que está em fase com V_{fase} e o motor comporta-se como uma carga resistiva. Adiantando-se a V_{fase} o motor passar a ter características de uma carga capacitiva e fornece potência reativa à rede.

Na Figura 28 é representado o comportamento genérico do motor síncrono em função das correntes I_F e I_A . Cada uma das possíveis curvas correspondem a um valor diferente de potência. Para cada curva a corrente I_A mínima ocorre para um fator de potência unitário e para qualquer outro ponto da curva, existe uma energia reativa fornecida ou consumida.

Figura 28 – Comportamento genérico do motor síncrono



Fonte: adaptado de Motores Síncronos.

Controlando a corrente de campo, controla-se consumo ou a produção de energia reativa e com isso o motor síncrono consegue compensar o fator de potência.

Devido ao fato de o motor síncrono ser instalado em paralelo com a entrada da rede elétrica, o mesmo se torna muito eficiente para atender aos parâmetros desejados pela concessionária. Mas em alguns casos o reativo por ser uma consequência de harmônicos na parte interna da empresa e neste caso devem ser instalados filtros próximos aos geradores de harmônicos para evitar que a empresa não tenha perdas energéticas no circuito interno.

4.5 Filtros

De acordo com Kimbark (1971) o aumento das distorções harmônicas que ocorre em sistemas não lineares pode comprometer toda a qualidade de energia da instalação como: aquecimento dos cabos, perdas por efeito *joule*, aumento de consumo entre outras consequências. Mas o uso de filtros tem a finalidade de mitigar os efeitos harmônicos em determinada faixa de frequência desejável e quando se tem problemas de perturbação o uso de filtros é a solução mais viável.

Os filtros passivos são construídos a partir de indutores, capacitores e resistores conectados em série ou em paralelo dependendo da finalidade. O filtro fornece uma certa quantidade de potência reativa para a rede, em que foi conectado, devido ao seu comportamento capacitivo. A potência reativa que é fornecida pelo filtro na frequência fundamental define o tamanho do mesmo (Arrillaga, Watson, 2003).

Os filtros são divididos em filtros série e filtros paralelos (*shunt*), um dos filtros mais utilizados na qualidade de energia para a correção de harmônicos é o filtro *shunt* sintonizado.

4.5.1 Filtro *shunt*

O filtro *shunt* é conectado em paralelo com a rede que seja fazer a correção e são formados por um indutor, capacitor e resistor em série, no qual é aplicado para suportar somente a corrente harmônica que o mesmo está sintonizado, e somado a uma corrente fundamental muito menor que aquela do circuito principal conforme a figura 29. Entretanto, o filtro *shunt* é mais barato que um filtro série de mesma eficácia (Carvalho, 2016).

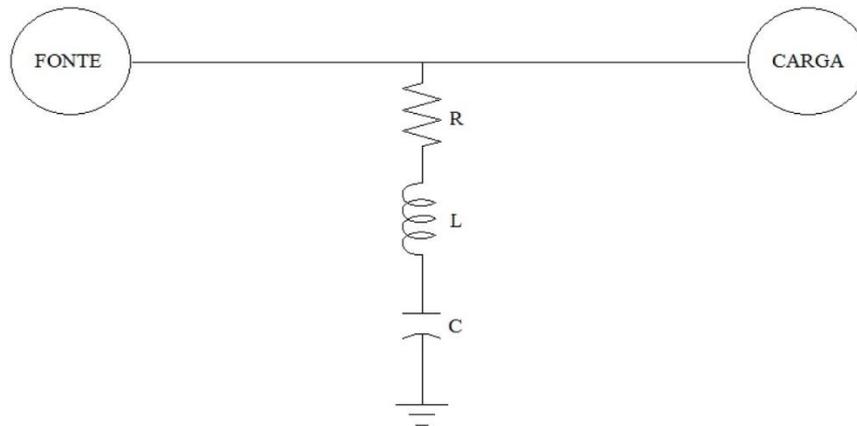
Outra vantagem do filtro *shunt* em relação ao filtro série, é que na frequência fundamental os filtros fornecem a potência reativa necessária para a correção do fator de potência (Teixeira, D., 2009).

Os filtros são divididos conforme o fator de qualidade Q , onde é definido a largura da faixa de sintonia e são divididos em dois tipos:

- a) Filtro sintonizado de alto Q , o qual é sintonizado em faixa bastante estreita para uma ou duas frequências harmônicas mais baixas como a de 5º e 7º ordem.
- b) Filtro amortecido de baixo Q , onde é conectado como shunt, oferece uma baixa impedância sobre uma largura de faixa de frequências, por exemplo a 11º a harmônicos superiores. Este segundo tipo é conhecido também como filtro passa alta.

A Figura 29 mostra como é feita a instalação de um filtro shunt no circuito de modo a corrigir os harmônicos.

Figura 29 – Conexão e circuito típico de um filtro *shunt*



Fonte: adaptado de Carvalho, 2016.

5. NORMATIZAÇÃO

De acordo com Scolari, Cerqueira e Kravetz (2013):

5.1 Fator de potência:

Para a medição serão feitas amostras de 10 em 10 minutos e comparados os resultados com o valor de referência 0,92 (Item 3.2.1, Módulo 8 do PRODIST, p 21).

5.2 Distúrbios de tensão:

- a) PRODIST - Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica: em relação às variações de tensão de curta duração, o módulo apenas as classifica de acordo com os tempos de interrupção e níveis de tensão, entretanto o item 7.6.1 do PRODIST deixa claro que não são atribuídos padrões de desempenho a estes fenômenos. Quanto às variações de tensão em regime, o módulo 8 indica, para valores nominais iguais ou inferiores a 1 kV, as faixas de tensão consideradas como sendo valores adequados, precários ou críticos dos níveis de tensão;
- b) EN 50160 – Power Quality Standard: define parâmetros de qualidade de energia em baixa e média tensões (baixa até 1kV e média de 1kV a 35kV) nos sistemas de distribuição de energia elétrica e os desvios permitidos;
- c) IEC Série 61000 – Compatibilidade Eletromagnética: trata-se de uma norma editada pela Comissão Internacional de Eletrotécnica (IEC). Estipula parâmetros relativos aos distúrbios de tensão de curta e longa duração para baixas tensões, fenômeno conhecido como compatibilidade eletromagnética que é a capacidade de os equipamentos operarem normalmente em um ambiente eletromagnético sem causar interferência em outros equipamentos, nem serem interferidos por perturbações eletromagnéticas presentes;
- d) NBR 5410 de 2004: faz menção às quedas máximas de tensão em qualquer ponto, no item 6.2.7 a NBR 5410 recomenda que em qualquer ponto da instalação a queda de tensão verificada não deve ser superior aos seguintes valores, em relação à tensão nominal de fornecimento: 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BR, no caso de transformador de propriedade da unidade consumidora; 7%, calculados a partir dos terminais secundários do transformador MT/BT da empresa distribuidora de eletricidade, quando o ponto de entrega for ali localizado; 5%, calculados a partir do ponto de entrega, nos demais casos de ponto de entrega com fornecimento em tensão secundária de distribuição; 7%, calculados a

partir dos terminais de saída do gerador, no caso de grupo gerador próprio; e em nenhum caso a queda de tensão nos circuitos terminais pode ser superior a 4%.

5.3 Desequilíbrios de tensão:

a) PRODIST - Módulo 8 – Qualidade De Energia Elétrica: No que diz respeito ao desequilíbrio de tensão, o módulo 8 recomenda que o valor máximo do desequilíbrio seja igual ou inferior a 2%. Porém, essa recomendação somente se aplica aos barramentos de AT, não havendo nenhuma recomendação para as instalações de baixa tensão.

b) EN 50160 – Power Quality Standard: define parâmetros de qualidade de energia em baixas e médias tensões (baixa até 1kV e média de 1kV a 35kV) nos sistemas de distribuição de energia elétrica e os desvios permitidos; estabelece o limite de até 2% durante 95% da semana, medido como a média dos valores eficazes em períodos de 10 minutos. E uma máxima instantânea de 4%.

5.4 Harmônicos:

a) PRODIST - Módulo 8 – Qualidade De Energia Elétrica: apresenta níveis de referência em relação às distorções harmônicas totais de tensão (DHTt) e em relação às distorções harmônicas individuais de acordo com a ordem do harmônico;

b) IEEE – 519 – 1992 – Recomendação da IEEE: recomenda os limites de distorção harmônica de tensão e corrente no ponto de conexão comum (PCC) dos sistemas de energia elétrica. Tais limites dependem do nível de tensão e de curto-circuito no ponto;

c) EN 50160 – Power Quality Standard: define parâmetros de qualidade de energia no PCC, indicando os desvios permitidos;

d) IEC 61000-2-2: define os níveis de compatibilidade para os harmônicos de tensão para redes de baixa tensão;

e) IEC 61000-2-4: estabelece os níveis de compatibilidade para redes industriais;

f) IEC 61000-3-4: se refere às limitações das harmônicas de corrente injetada na rede pública de alimentação, por equipamentos elétricos e eletrônicos que tenham uma corrente de entrada acima de 16A.

6 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Este estudo baseou-se nos valores definidos para qualidade de energia no Módulo 8 do PRODIST, foram feitas análises de tensão, corrente, frequência, harmônicas, potência, fator de potência além de outros parâmetros que possam ser utilizados afim de obter um resultado mais preciso da análise.

6.1 Equipamento de medição

Utilizou-se o aparelho de medição de qualidade de energia elétrica da marca FLUKE, modelo 435, conforme a Figura 30. O aparelho ficou instalado no painel do forno de indução 1 para medição dos parâmetros.

Figura 30 – Analisador de Qualidade de Energia Elétrica FLUKE, modelo 435.



Fonte: o autor.

6.2 Parâmetros de medições

Para este estudo de caso, foram analisados os resultados de fator de potência, nível de tensão e harmônicos, seguindo os parâmetros e metodologia definidos no Módulo 8 do PRODIST.

6.2.1 Fator de potência

Para este trabalho foi realizada a mediação do fator de potência, onde foram coletadas amostras a cada 10 minutos e comparadas com o coeficiente de referência 0,92 especificado no Módulo 8 do PRODIST, item 3.2.1, p. 21.

6.2.2 Nível de tensão

Foram feitas 592 leituras válidas, sendo esta análise, feita durante o período de utilização de 1 forno de indução de 800Kw durante 1 semana.

O aparelho foi instalado no quadro de baixa tensão do forno que trabalha com uma tensão de 440V (fase-fase). Os resultados foram comparados com os valores determinados no Quadro 4 no Módulo 8 do PRODIST.

Quadro 3 - Faixa de tensões em regime permanente para tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (440/220)

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Volts
Adequada	$(405 \leq TL \leq 462) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(383 \leq TL < 405 \text{ ou } 462 < TL \leq 466)$ $(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 383 \text{ ou } TL > 466)$ $(TL < 191 \text{ ou } TL > 233)$

Fonte: (Tabela4, Anexo 1, Módulo 8 do PRODIST, p 33).

Após conseguir as leituras válidas serão feitas as suas classificações e deverá calcular os índices das durações relativas durante a transgressão para tensão precária (DRP) e o índice para tensão crítica (DRC) de acordo com as fórmulas a seguir:

$$DRP = \frac{nlp}{1008} \cdot 100[\%] \quad (6)$$

$$DRC = \frac{nlc}{1008} \cdot 100[\%] \quad (7)$$

Onde nlp e nlc representam o maior valor entre as fases do número de leituras situadas nas faixas precária e crítica, respectivamente.

6.2.3 Harmônicos

Segundo o Módulo 8 do PRODIST, pode-se afirmar que os harmônicos são distorções da forma de onda das tensões e das correntes quando comparado a forma de onda fundamental.

Através do Módulo 8 do PRODIST obtém-se a tabela que limita os harmônicos. Estes valores servem de base para se comparar com os resultados encontrados na medição de qualidade de energia elétrica.

Tabela 2 – Valores de referência para as distorções totais de harmônicas.

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_n \leq 1 \text{ KV}$	10
$1 \text{ KV} < V_n \leq 13,8 \text{ KV}$	8
$13,8 \text{ KV} < V_n \leq 69 \text{ KV}$	6
$69 \text{ KV} < V_n < 230 \text{ KV}$	3

Fonte: (Módulo 8 PRODIST, 2015, p. 23).

Na tabela 3 é mostrado os limites de acordo com cada ordem de harmônicas.

Tabela 3 – Valores referenciais para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental V1)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]	
	$V_h \leq 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kv} < V_h \leq 13,8 \text{ kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7.5
	7	6.5
	11	4.5
	13	4
	17	2.5

	19	2	1.5
	26	2	1.5
	25	2	1.5
	>25	1.5	1
Ímpares múltiplas de 3	3	6.5	5
	9	2	1.5
	15	1	0.5
	21	1	0.5
	>21	1	0.5
Pares	2	2.5	2
	4	1.5	1
	6	1	0.5
	8	1	0.5
	10	1	0.5
	12	1	0.5
	>12	1	0.5

Fonte: (Módulo 8 do PRODIST).

7 ANALISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo será feita uma análise dos valores encontrados na medição e comparados com os valores limites determinados pelo Módulo 8 do PRODIST.

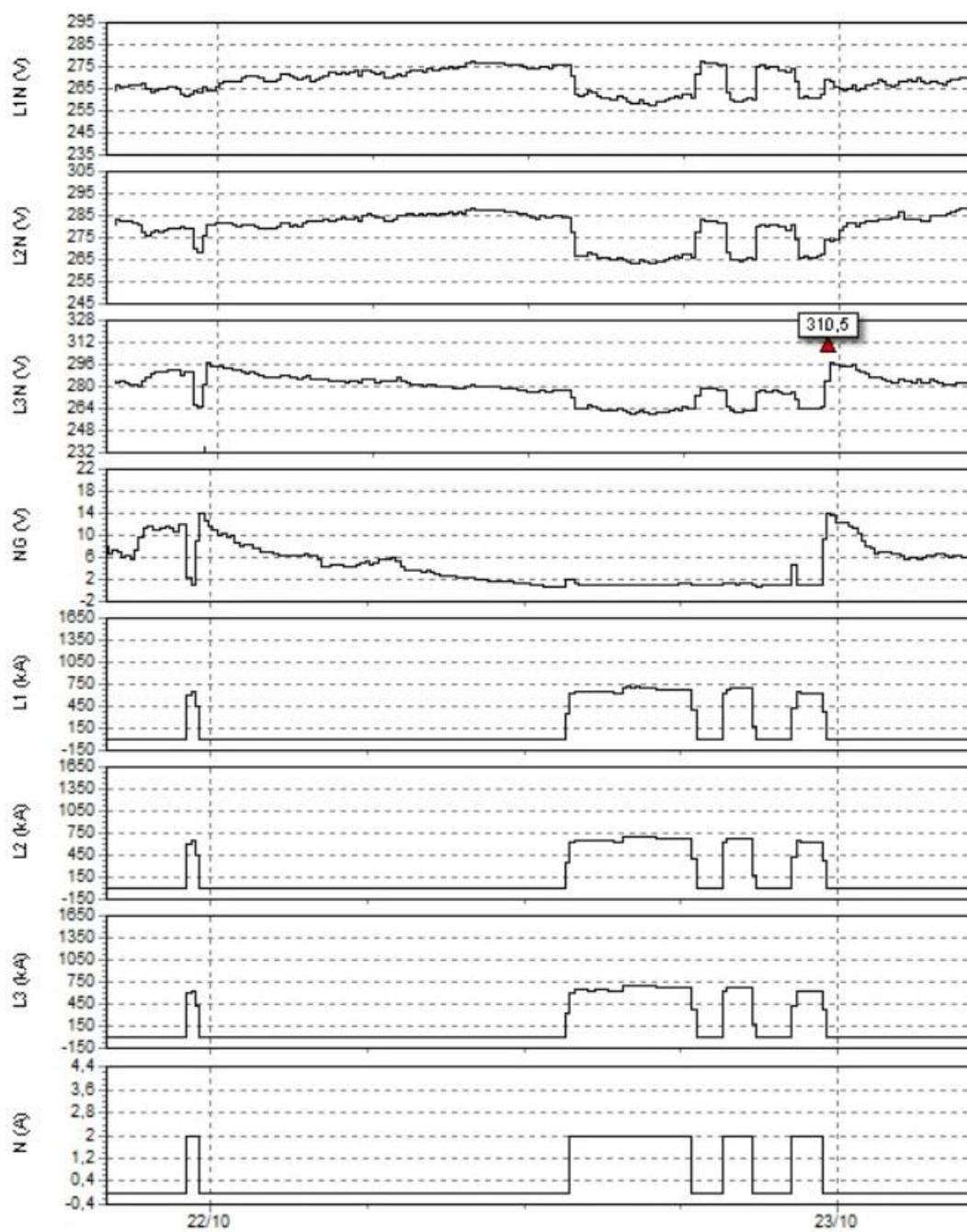
7.1 Tensão RMS

De acordo com os parâmetros referenciados pelo Módulo 8 do PRODIST, pode-se ter uma variação permitida do valor nominal da tensão, o valor permitido é de 5% para mais ou para menos da tensão fundamental. Seguindo as normas equivalentes os valores que estão dentro da variação de 5% estão de acordo com o valor nominal de qualidade.

No estudo feito na empresa de forjamento no Sul de Minas, detectou-se que que houveram alguns eventos como apresentado nas Figura 31 e 32. Observou-se que a tensão fundamental na frequência de 60 Hz cai quando a corrente aumenta, o que é natural e devido à queda de tensão.

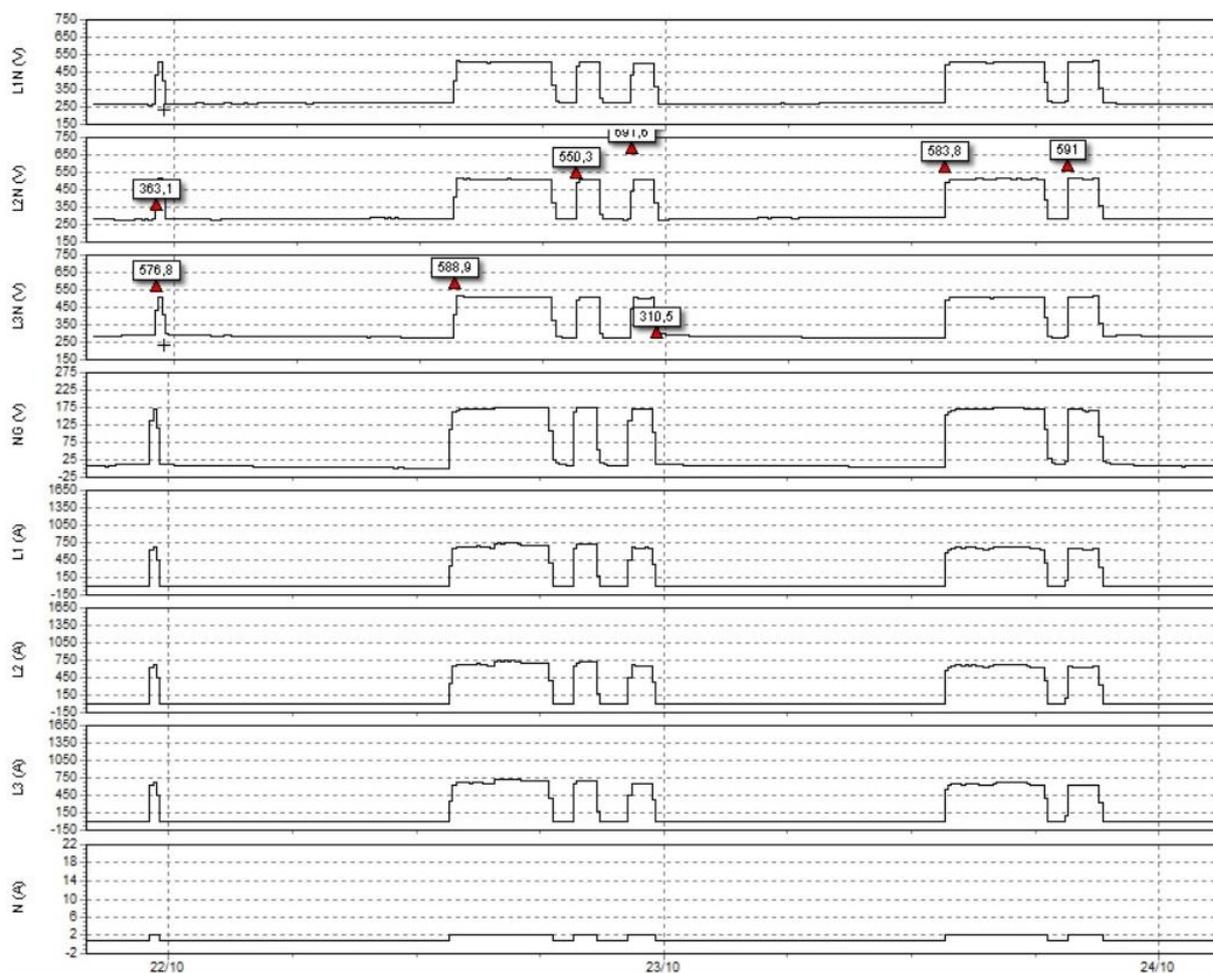
Quando a tensão é integralizada em 200 milissegundos (12 ciclos) levando em consideração as tensões de todas as frequências (tensões harmônicas) a tensão final aumenta quando aumenta a corrente. A tensão que deveria ficar em torno de 277V (fase e terra) chegou a ter pico de 609 volts e permanece na média de 500V como mostra a figura 32.

Figura 31 – Amostragem dos níveis de tensão fundamental encontrados.



Fonte: o autor.

Figura 32 – Amostragem dos níveis de tensão em 200 milissegundos (12 ciclos) encontrados.



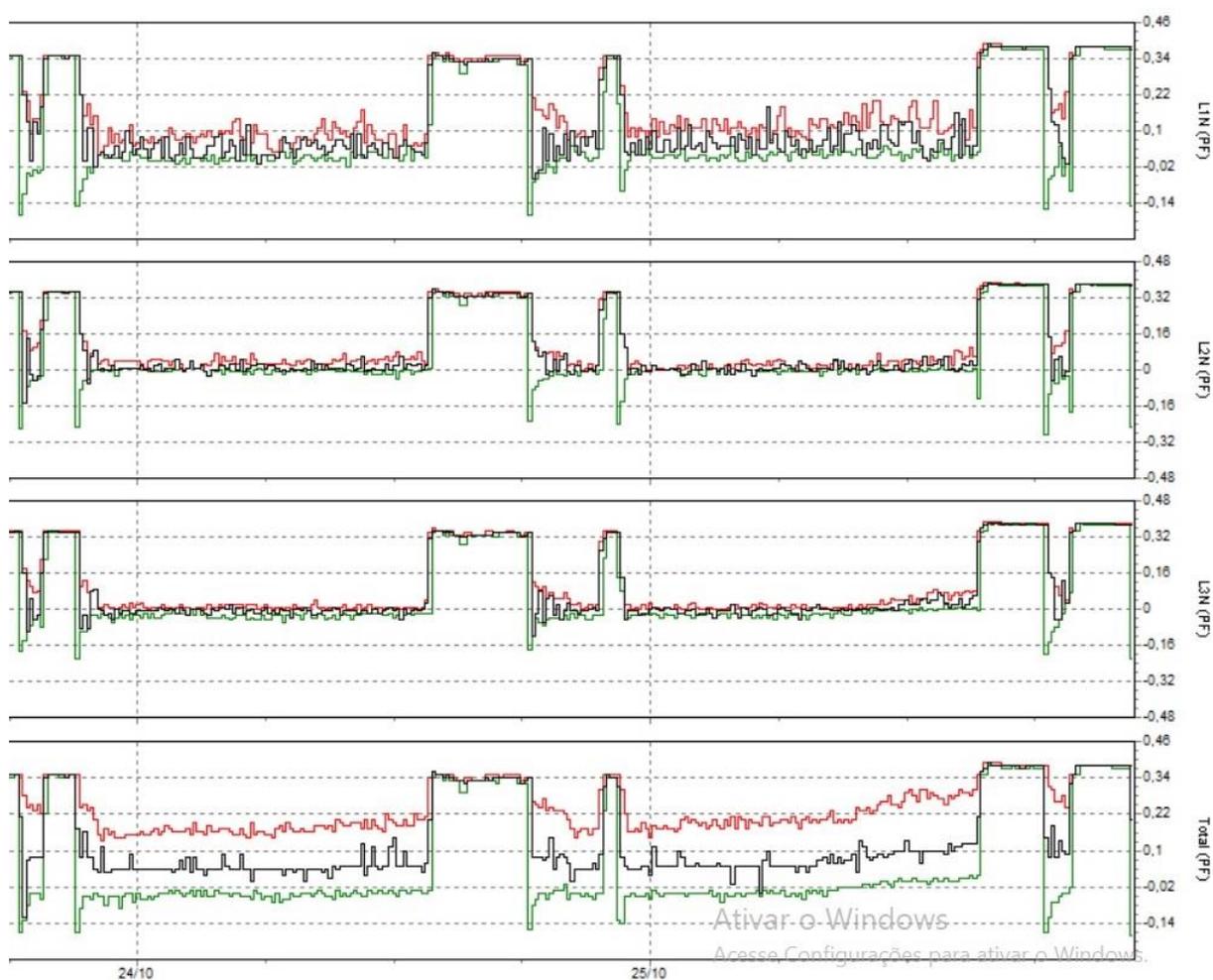
Fonte: o autor.

7.2 Fator de potência

Após a estratificação dos valores médios encontrados para o fator de potência medido no painel do forno de indução 1, observou-se que o FP se encontra extremamente baixo como mostrado na figura 33.

Os períodos onde o fator de potência está entre 0 e 0,22 é quando os fornos de indução da empresa estão desligados e existe apenas o reativo dos transformadores em vazio, quando o fator de potência sobe para um valor próximo a 0,35 são quando os fornos de indução foram ligados e estão a plena carga.

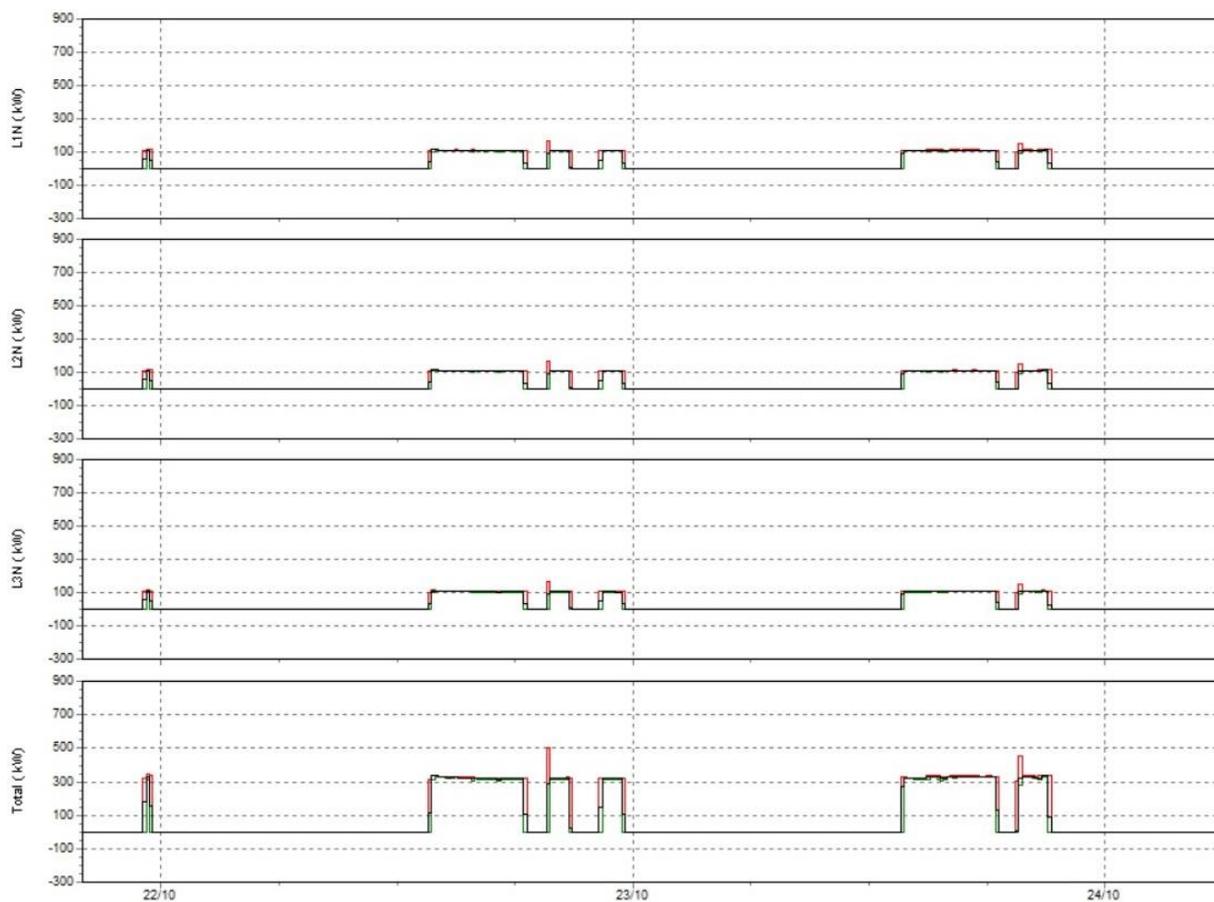
Figura 33 – Amostragem do fator de potência.



Fonte: o autor, dados encontrados através da medição.

Para poder afirmar se o fator de potência está correto precisa-se comparar a Figura 29 do fator de potência com a Figura 30 que apresenta uma amostragem da potência ativa.

Figura 34 – Amostragem da potência ativa.

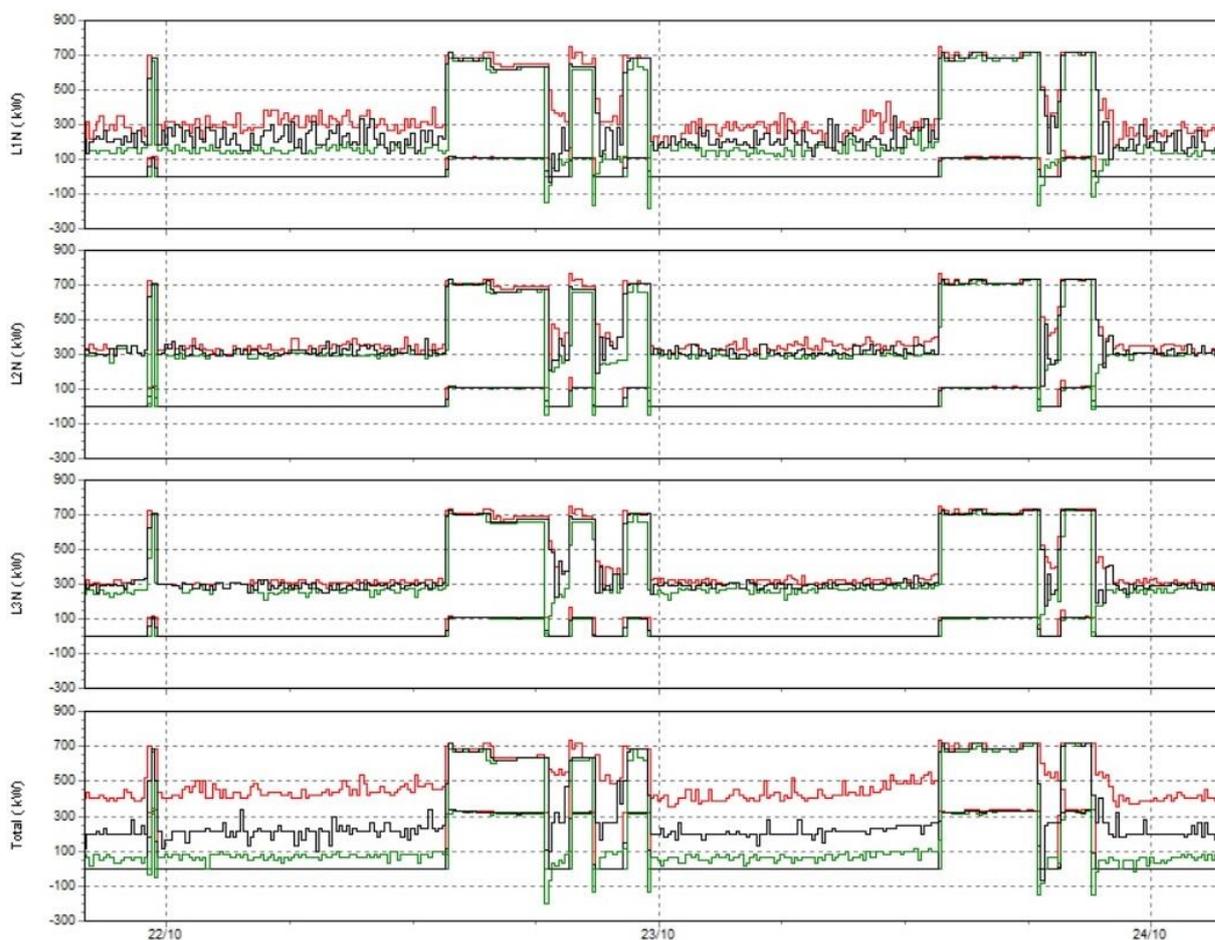


Fonte: o autor, dados encontrados através da medição.

Analisando a figura 34 percebe-se que quando o gráfico está em 0 a empresa não está operando a linha de produção e não há consumo de potência ativa, qualquer valor encontrado diferente de 0 é quando a empresa está produzindo e está consumindo energia ativa da concessionária de energia local

Sobrepondo as Figuras 33 e 34, consegue-se fazer uma melhor comparação entre o fator de potência e a potência ativa.

Figura 35 – Comparação entre o FP e W .



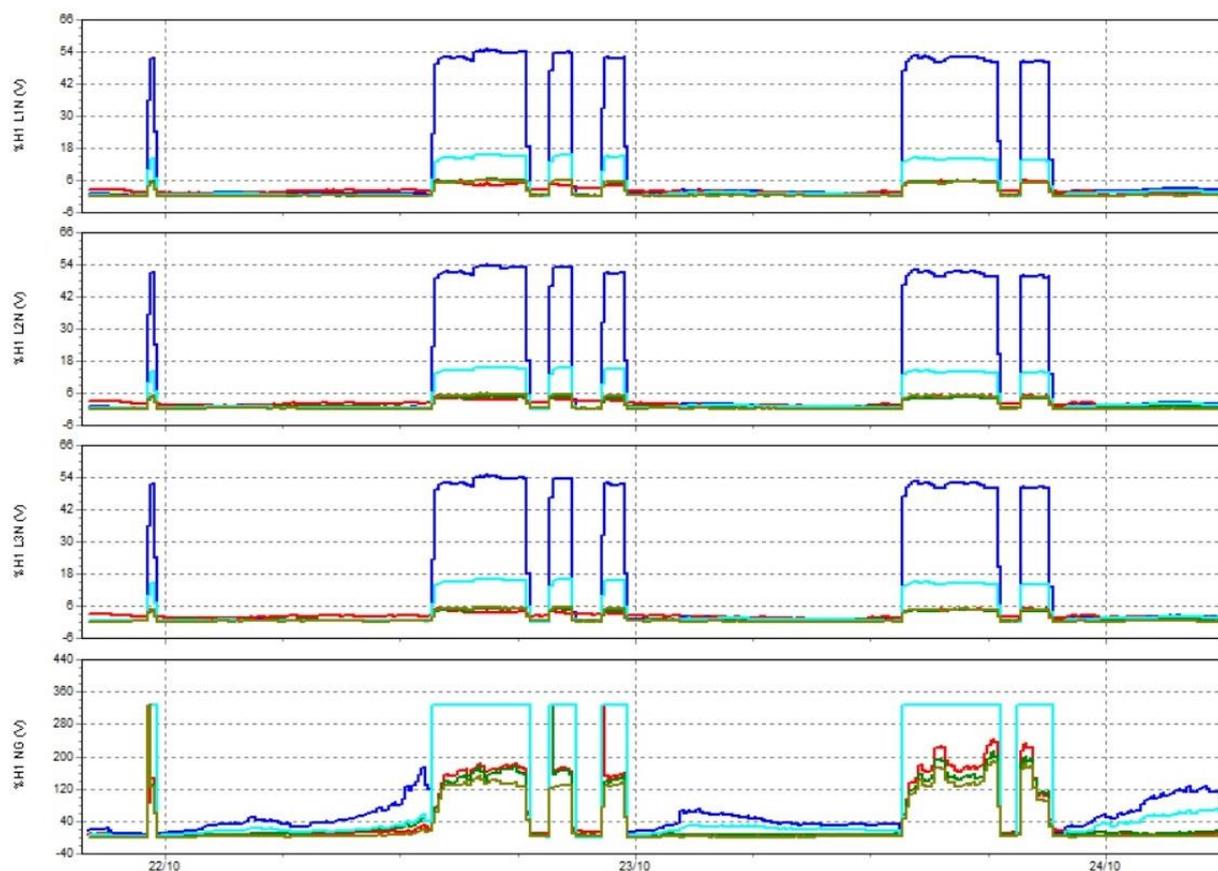
Fonte: o autor, dados encontrados através da medição.

Analisando-se a Figura 35 pode-se notar que quando não há potência ativa, o fator de potência é extremamente baixo por volta de 0,06 e não é tarifado pela concessionária. Quando há consumo de potência ativa nota-se que o fator de potência sobe em média para 0,35, neste ponto a empresa passa a ser tarifada pelo baixo fator de potência.

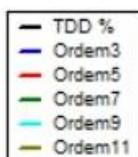
7.3 Distorção de harmônicos

Na figura 36, observa-se que há um grande aumento das harmônicas de 3ª e 9ª ordem onde os principais geradores dos harmônicos neste horário são os fornos de indução magnética através do chaveamento interno do mesmo.

Figura 36 – Picos de harmônicas.



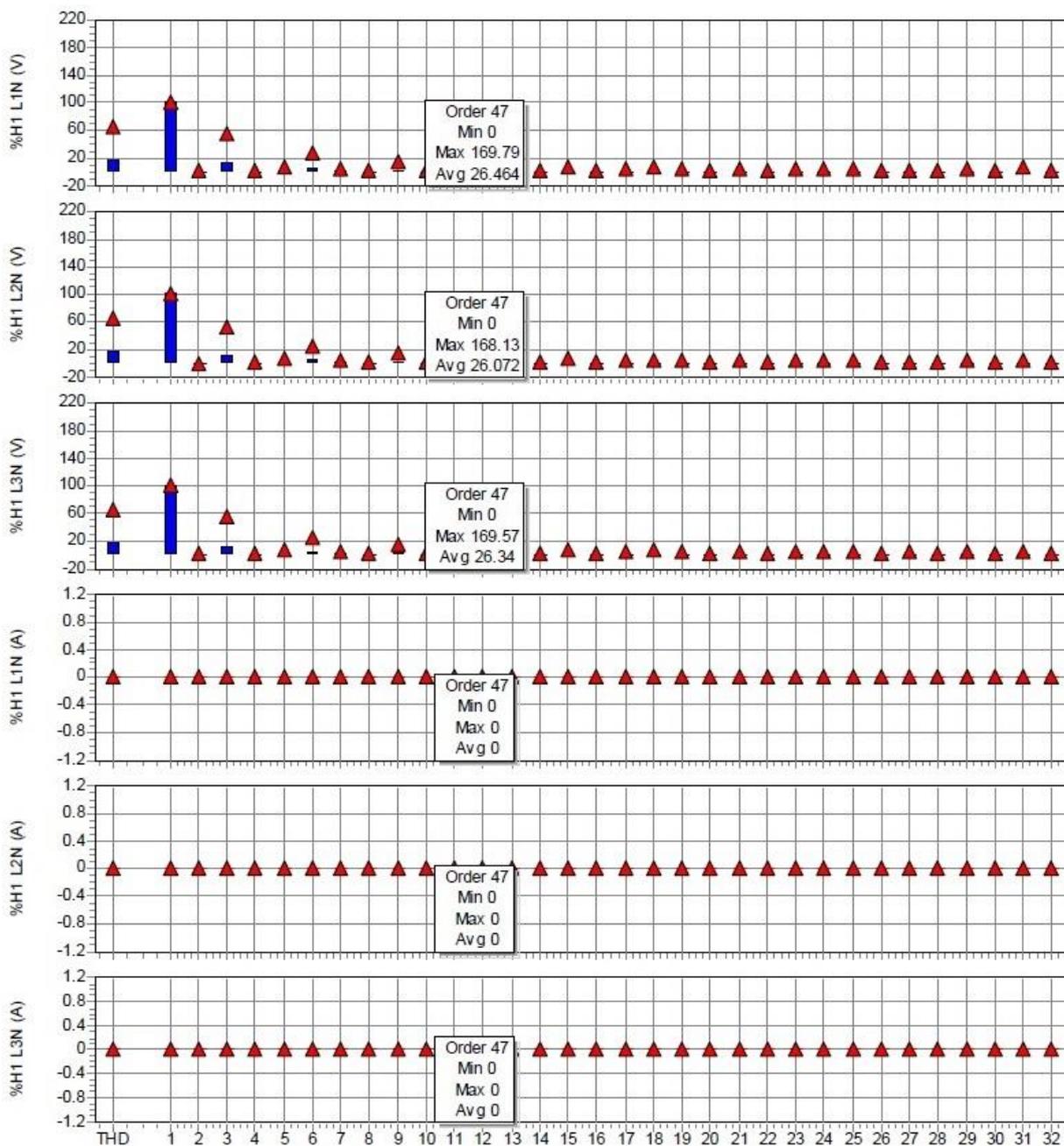
Legenda.



Fonte: o autor, dados encontrados através da medição.

A harmônica de 47ª ordem (2820 Hz) apresenta média de 26% da tensão fundamental e picos de 169%. A distorção harmônica total média foi de 16,7% com picos 69,9 %, sendo o limite recomendado de 10% como se pode notar na Figura 36.

Figura 37 – Harmônicas totais.



Fonte: o autor, dados encontrados através da medição.

8 CONCLUSÃO

Com o estudo feito a partir de um medidor de qualidade de energia, coletou-se dados suficientes para que se possa ter uma visão real do que está acontecendo no circuito elétrico da empresa. Com os valores encontrados foi possível fazer uma comparação com os valores especificados pelo Módulo 8 do PRODIST.

Com base nos valores encontrados de harmônicos, pode-se afirmar que os fornos de indução devolvem uma grande quantidade de harmônicos para o sistema elétrico da empresa. Os valores que mais foram encontrados durante as medições foram picos de harmônicos de 3ª ordem que chegaram a 69,9%, onde de acordo com o PRODIST este valor não deveria ser superior a 10%. Os harmônicos de 9ª ordem estão com valores bem acima dos limites. De acordo com o PRODIST os harmônicos de 47ª (2820 Hz) ordem que embora tenham picos muito acima do normal, podem ser desconsiderados. Para solucionar os problemas de harmônicos a empresa poderá fazer a instalação de filtros, sendo um dos tipos de filtros mais indicados é o filtro shunt sintonizado devido a ter um custo inferior quando comparado com um filtro série de mesma eficiência e dimensionado corretamente, como consequência o fator de potência que for consequência das harmônicas também poderá ser reduzido.

Após solucionar o problema de harmônicas, deverá ser feito uma avaliação minuciosa sobre o funcionamento do motor síncrono, onde deverá medir a angulação entre tensão e corrente e determinar se o motor síncrono está consumindo ou fornecendo energia reativa para o sistema e se ele está se comportando como capacitivo, resistivo ou indutivo. Caso seja detectado que o motor síncrono esteja com problemas, a empresa deverá contratar uma empresa especializada na manutenção deste tipo de motor e fazer os possíveis reparos afim de deixa-lo devidamente regulado para o circuito da empresa para que esta não seja mais multada pela concessionaria de energia local.

Os valores encontrados do fator de potência muito baixos, próximo a 0,05 não implica em multa pela concessionaria, pois neste momento não há consumo de energia ativa. A tarifação por causa do baixo fator de potência só é aplicada quando a empresa está consumindo energia ativa que é quando os fornos de indução estão ligados e o fator de potência permanece próximo a 0,35.

Assim que eliminar os problemas locais, a empresa deverá sempre que possível contratar um engenheiro eletricista capacitado para monitorar os parâmetros para que a instalação não volte a chegar no ponto crítico que chegou.

REFERÊNCIAS

ALDABÓ, R. **Qualidade na Energia Elétrica**. São Paulo: Artliber, 2001.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, revisão 6 de 01/01/2015. Disponível em: <http://www.ANEEL.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_6_Retifica%C3%A7%C3%A3o_1.pdf>. Acesso em: 11 de setembro de 2015.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Indicadores de Conformidade do Nível de Tensão em Regime Permanente, 2015. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/Indicadores_de_conformidade_nivel_tensao/> Acesso em: 21 de setembro de 2016.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 547, de 16 de abril de 2013, disponível em: <<http://www.ANEEL.gov.br/cedoc/ren2013547.pdf>>. Acesso em: 21 de setembro de 2016.

ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa Nº 414 DE 9 de Setembro de 2010. Disponível em: <<http://www.ANEEL.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em: 11 de setembro de 2015.

ALVES, M.F. and FONSECA, V.R.C. (2001) “Voltage Sag Stochastic Estimate”. IEEE Industrial Application Society, Proceedings of Annual Meeting, Chicago, USA, 2001.
BERNARDO, N. **Evolução da Gestão da Qualidade de Serviço de Energia Elétrica no Brasil**. 2013, 55p. (Projeto de Graduação). Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Elétrica. Rio de Janeiro: UFRJ, 2013.

ARRILLGA, J.; WATSON, N. **Power System Harmonics**. Chichester. Jhon Wiley & Sons, 2003.

BIGON, L. C. **Afundamento de tensão – “Voltage SAG”**. 2007, 45p. Relatório (Engenharia Elétrica). Curso de Engenharia Elétrica. Universidade São Francisco, Campinas – SP, 2007.

CARVALHO, A. D. **Análise da distorção harmônica em um ambiente industrial**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário do Sul de Minas gerais, 2016.

COPEL. **Fator de potência: como transformá-lo em um fator de economia**. Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/\\$FILE/fator_potencia.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/fator_de_potencia/$FILE/fator_potencia.pdf)>. Acesso em: 26 mai. 2016.

CAPELLI, A. **Energia Elétrica: Qualidade E Eficiência Para Aplicações Industriais**. São Paulo: Erica, 2013.

Sá, C. A. **Motores Síncronos trifásicos – fundamentos para o estudo do seu funcionamento**, FEUP, 1991

DECKMENN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica. IT – A12.** Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. UNICAMP/FEEC/DSE, 2016.

DUGAN, R. C., MCGRANAGHAN, M. F., BEATY, H. W., “**Electrical Power Systems Quality**”, MC GRAW-HILL, 1996

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

Distúrbios que afetam a qualidade da energia elétrica. *In*: DECKMENN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica. IT – A12.** Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. UNICAMP/FEEC/DSE, 2016.

FERNANDES, D. E. B. **Uma metodologia de gerenciamento da qualidade da energia elétrica.** 1999, 133p. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUCMINAS, 1999.

FLUKE, Manual do Usuário: Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos, modelo 435. Janeiro de 2012, rev.1, 2012.

GRANDI, A. L.; SIQUEIRA, M. J. Capítulo IX – Modelo de relatório de qualidade da energia elétrica atendendo aos procedimentos de distribuição (Prodist). Distribuição de energia. **O Setor Elétrico.** 2012;81(1):60-67.

IEEE STANDARDS BOARD, “IEEE Std 1159-1995-Recommended Practice For Monitoring El. Power Qual.”, USA, nov., 1995, 70p.

JANNUZZI, A. C. **Regulação da qualidade de energia elétrica sob o foco do consumidor.** 2007, 216p. Dissertação (Mestrado). Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica. Distrito Federal: ENE/FT/UnB, 2007.

MAIA, R. M. **Caracterização das variações de tensão de curta duração e seus impactos em uma planta da indústria alimentícia.** Dissertação (Mestrado). Colegiado de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2011.

Guedes, M. V. **O motor Síncrono de Polos Salientes sob Controlo Vectorial**, Caderno de Estudos de Máquinas Elétricas, nº3, pp. 5-7, Dezembro de 1991.

MARTINHO, Edson, **Distúrbios da Energia Elétrica.** 2. ed. São Paulo: Erica. 2009. 144 p.

OKUMOTO, J. C. **Avaliação da qualidade de energia elétrica de um centro cirúrgico.** Dissertação (Mestrado). UNIV, 2010. Disponível em: <http://www.osetor-eletrico.com.br/web/documentos/fasciculos/ed58_artigo_instalacoes_hospitalares.pdf>. Acesso em: 26 mai. 2016.

PALILLO, G. et all. Variações de tensão de curta duração – Parte I. **O Setor Elétrico.** p. 35-46, 2013.

PALILLO, **O Setor elétrico.** Capítulo III – Desequilíbrios de tensão. **O Setor Elétrico.** p. 42-48, 2013.

PINHEIRO, J. M. S. Qualidade da energia elétrica em sistemas de automação. **Cadernos UniFOA**, v.13, n.1, p.23-32, 2010.

PROCOBRE, Instituto Brasileiro de Cobre. **Harmônicas nas Instalações Elétricas**. São Paulo, 2001.

PROCOBRE, **Qualidade da energia – harmônicas**. São Paulo: Instituto Brasileiro de Cobre, 2003.

SANTOS, F. M. F. Qualidade de energia – comparação das Normas IEC 61000-3-2 e IEEE 519. 2007, 57p. Projeto (Graduação). Departamento de Engenharia Elétrica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro - RJ, 2007.

SCOLARI, B. S.; CERQUEIRA, F. B.; KRAVETZ, P. L. **Caracterização dos problemas relativos à qualidade de energia elétrica causados por um forno de aquecimento a indução**. TCC. Curso de Engenharia Industrial Elétrica Ênfase Eletrotécnica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Curitiba, 2013.

SILVÉRIO, L. A. S. **Análise de Qualidade de Energia Elétrica no Unis MG**. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Universitário do Sul de Minas gerais, 2016.

SOUZA JÚNIOR, E. C. **Manutenção da qualidade de energia**. 2011, 73p. Relatório (estágio). Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE. Pernambuco – PE, 2011. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/A_BAAAE8IgAD/tcc-sobre-a-manutencao-qualidade-energia-eletrica-ifpe>. Acesso em: 20 maio. 2016.