

**CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS**  
**ENGENHARIA ELÉTRICA**  
**ROBSON MORAES DE CARVALHO**

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL**

**Varginha**  
**2019**

**ROBSON MORAES DE CARVALHO**

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL**

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 Prof. Rafael Kerner Coelho dos Santos.

**Varginha  
2019**

**ROBSON MORAES DE CARVALHO**

**ANÁLISE DE QUALIDADE DE ENERGIA EM UM AMBIENTE INDUSTRIAL**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS-MG, para a obtenção de grau de bacharel pela banca examinadora composta pelos membros:

Aprovada em:    /    /

---

Prof. Rafael Kerner Coelho dos Santos

---

Prof. Esp. Roberto Larazino do Prado Mudesto

---

Profª. Esp. Adilene Maria Soares Tirelli

OBS.:

Dedico este trabalho a Deus, minha esposa Gabriela, minha filha Valentina, aos meus pais, meus irmãos e aos amigos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela saúde, inspiração e perseverança que foi me dada por todo o período da faculdade e de toda minha vida.

Ao meu orientador professor Rafael Kerner Coelho dos Santos pelo seu incentivo, orientação e dedicação para realização deste trabalho.

A minha esposa Gabriela, por todo apoio e compreensão, aos meus pais, pelo amor e incentivo. Aos meus colegas de faculdade que se tornaram grandes amigos (Anderson, Antoniel, Marcos) sempre presente em todas as horas proporcionando momentos inesquecíveis. Aos professores Me. Eduardo Henrique Ferroni e Me. Hugo Rodrigues Vieira pela atenção, dedicação e paciência.

Aos demais professores do centro universitário UNIS, pelos ensinamentos cedidos nesses anos tendo sua parcela de contribuição na minha formação como ser humano e profissional.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para  
recomeçar de novo com mais inteligência.”

Henry Ford.

## RESUMO

O presente trabalho amplia os conhecimentos teóricos e práticos acerca de qualidade de energia das cargas elétricas por meio de análise das causas e efeitos que possam afetar equipamentos e máquinas de uma instalação industrial. Inicialmente foi feito o levantamento da situação atual do setor através de um analisador de qualidade de energia e posteriormente serão confrontados os dados colhidos com normas vigentes, apresentando em seguida uma proposta para a melhoria da eficiência energética. O trabalho aborda um estudo de caso em um setor produtivo de rerrefino do óleo lubrificante de uma planta industrial na região de Minas Gerais sobre o fenômeno elétrico e parâmetros conhecido como, níveis de tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, harmônico, variação de frequência e fator de potência, abrangendo toda a gama que envolve seu comportamento. A análise da situação da planta estudada deixou clara a influência de cargas não lineares no sistema, pois o mesmo produziu níveis de harmônica de corrente acima do máximo permitido pela norma. No que tange à aplicação da técnica de sintonia dos filtros para correção das harmônicas, notou-se através dos cálculos que os filtros sintonizados são adequados para a filtragem das componentes harmônicas identificadas, devido à baixa impedância e pequena faixa de frequência nas frequências harmônicas em que se deseja filtrar.

**Palavras – chave:** Qualidade de energia. Eficiência energética. Harmônicos.

## **ABSTRACT**

*The present work extends the theoretical knowledge and the practical about the energy quality of electric charges through the analysis of cause and effect that can affect equipment and machines of an industrial installation. Initially, the survey was of the current situation of the sector through an energy quality analyzer and later the data collected with current standards will be confronted, presenting next a proposal for the improvement of energy efficiency. The paper addresses a case study in a productive sector of refining of the lubricating oil of an industrial plant in the region of Minas Gerais on the phenomenon electrical and parameters known as, steady state voltage levels, voltage unbalance, harmonic, frequency variation and power factor, covering the full range that involves their behavior. The analysis of the situation of the studied plant made clear the influence of nonlinear loads in the system, because it produced current harmonic levels above the maximum allowed by the standard. Concerning the application of the tuning technique of the filters for harmonic correction, it has been observed through the calculations that the tuned filters are suitable for the filtering of the identified harmonic components, due to the low impedance and small frequency range in the harmonic frequencies in which it is desired to filter.*

**Keywords:** Power quality. Energy efficiency. Harmonics.,



## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (01) .....	33
Equação (02) .....	33
Equação (03) .....	34
Equação (04) .....	34
Equação (05) .....	35
Equação (06) .....	45
Equação (07) .....	45
Equação (08) .....	45
Equação (09) .....	48
Equação (10) .....	49
Equação (11) .....	49
Equação (12) .....	50
Equação (13) .....	50
Equação (14) .....	51
Equação (15) .....	52
Equação (16) .....	53
Equação (16) .....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Transitório impulsive de corrente causado por descarga .....	18
Figura 02 - Transitório provocado por chaveamento de capacitor .....	19
Figura 03 - Transitório provocado por ferorrresonância causado pela energização de transformadores a vazio .....	20
Figura 04 - Interrupção de tensão decorrente de falha em sistema trifásico.....	21
Figura 05 - Afundamento de tensão para 65% do valor nominal. (a) Forma de onda modular da tensão eficaz. (b) Forma de onda real .....	23
Figura 06 - Elevação de tensão para 120% do valor nominal.....	24
Figura 07 - Desequilíbrio de tensão em consumidor .....	27
Figura 08 - Exemplo de corrente comportando harmônicos.....	29
Figura 09 - Exemplo de recortes de tensão em conversor trifásico .....	30
Figura 10 - Ruído em onda de tensão .....	31
Figura 11 - Flutuação da tensão característica do flickers .....	32
Figura 12 - Variação de frequência em subestação .....	32
Figura 13 - Defasagem do ângulo entre tensão e corrente .....	33
Figura 14 - Triângulo de potências .....	34
Figura 15 - Tipos de carga x fator de potência .....	25
Figura 16 - Conexão e circuito típico de um filtro série .....	37
Figura 17 - Conexão e circuito típico de um filtro shunt.....	38

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Categorias e características dos fenômenos eletromagnéticos .....	16
Tabela 02 - Classificação dos transitórios oscilatórios .....	18
Tabela 03 - Sequência dos componentes harmônicos.....	29
Tabela 04 - Limites de distorção harmônica para Sistema de distribuição de 120V a 69KV	39
Tabela 05 - Limites de distorção harmônica para Sistema de distribuição de 69,1V a 161KV.....	39
Tabela 06 - Limites de distorção harmônica para Sistema de distribuição acima de 161KV	39
Tabela 07 - Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1KV (220/127).....	40
Tabela 08 - Limites para os desequilíbrio de tensão.....	40
Tabela 09 - Valores de distorções harmônicas totais em porcentual .....	41
Tabela 10 - Variação de tensão de leitura 127V .....	43
Tabela 11 - Desequilíbrio de tensão.....	44
Tabela 12 - Taxa distorção harmônica total de tensão em porcentagem da fundamental 380V.....	44
Tabela 13 - Taxa de distorção harmônica individual de corrente.....	46
Tabela 14 - Variação de frequência .....	46
Tabela 15 - Valor de fator de potência.....	47
Tabela 16 - Resultado consolidado da análise dos fenômenos eletromagnéticos.....	47
Tabela 17 - Valores de potência, fator de potência e reativo fornecido pelos capacitores.....	50
Tabela 18 - Valores de capacitância, indutância e resistência .....	52
Tabela 19 - Valores de impedância.....	53
Tabela 20 - Valores de faixa de frequência .....	54

## LISTA DE ABREVIACOES E UNIDADES

A - ampère

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

F - farad, unidade de capacitância

Hz - hertz

n,  $\mu$ , m, k, M, - nano, micro, mili, kilo, mega e giga respectivamente

pu - *per unit*, “por unidade”

QEE - qualidade de energia elétrica

Rad - radianos

RMS - *root mean square*, “raiz media quadrada”

V - volt

VA - volt-ampère

VAr - volt-ampère reativo

W - wa

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	10
<b>2 CONCEITO DE ENERGIA</b> .....	13
<b>2.1 Energia elétrica ativa e reativa</b> .....	13
<b>2.2 Porque monitorar a qualidade de energia elétrica</b> .....	14
<b>2.3 Como monitorar a qualidade de energia elétrica</b> .....	14
<b>2.4 Eficiência energética</b> .....	15
<b>3 REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	16
<b>3.1 Transitórios ou transientes</b> .....	17
3.1.1 Impulsivos .....	17
3.1.2 Oscilatórios .....	18
<b>3.2 Variações de tensão de curta duração</b> .....	20
3.2.1 Interrupção .....	20
3.2.2 Afundamento de tensão .....	22
3.2.3 Elevação de tensão .....	23
<b>3.3 Variações de tensão de longa duração</b> .....	24
3.3.1 Interrupções sustentadas .....	24
3.3.2 Subtensão .....	25
3.3.3 Sobretensão .....	25
<b>3.4 Desequilíbrio de tensão</b> .....	26
<b>3.5 Distorção na forma de onda</b> .....	27
3.5.1 Offiset CC .....	28
3.5.2 Harmônicos .....	28
3.5.3 Interharmônicos .....	30
3.5.4 Recortes .....	30
3.5.5 Ruídos .....	31
<b>3.6 Flutuação de tensão</b> .....	31
<b>3.7 Variações de frequência</b> .....	32
<b>3.8 Fator de potência</b> .....	33
<b>3.9 Tipos de filtros</b> .....	36
3.9.1 Filtro passivo RLC em série .....	37
3.9.2 Filtro shunt .....	37
<b>3.10 Normatização</b> .....	38
3.10.1 IEEE .....	38
3.10.2 Prodist módulo 8 .....	40
3.10.2.1 Tensões em regime permanente .....	40
3.10.2.2 Desequilíbrio de tensão .....	40
3.10.2.3 Distorções harmônicas .....	41
3.10.2.4 Variação de frequência .....	41
3.10.2.5 Fator de potência .....	41
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	42
<b>4.1 Metodologias de medição</b> .....	42
<b>4.2 Metodologias de análise</b> .....	42
<b>4.3 Metodologias para solução</b> .....	42
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	43
<b>5.1 Resultados das medições</b> .....	43

5.1.1 Tensões em regime permanente .....	43
5.1.2 Desequilíbrio de tensão .....	43
5.1.3 Distorções harmônicas.....	44
5.1.4 Variação de frequência .....	46
5.1.5 Fator de potência .....	46
<b>5.2 Resultados das análises .....</b>	<b>47</b>
5.2.1 Dimensionamento do filtro shunt sintonizado.....	48
5.2.2 Cálculo da correção do fator de potência .....	48
5.2.3 Cálculo do capacitor .....	50
5.2.4 Cálculo do indutor .....	51
5.2.5 Cálculo do resistor .....	52
<b>5.3 Resultados da simulação do sistema com o filtro .....</b>	<b>52</b>
<b>5.4 Discussão .....</b>	<b>54</b>
<b>6 CONCLUSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>56</b>
<b>ANEXO A – Gráficos das distorções harmônicas de tensão .....</b>	<b>58</b>
<b>ANEXO B – Gráfico das distorções harmônicas de corrente.....</b>	<b>62</b>
<b>ANEXO C – Gráfico de potência ativa, reativa, aparente e frequência.....</b>	<b>66</b>
<b>ANEXO D – Gráfico de tensão em regime permanente .....</b>	<b>68</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com Ferreira (2010), para que se consiga um sistema trifásico ideal é necessário que ele atenda a algumas condições de operação em regime permanente tais como: tensões e correntes alternadas com forma senoidal pura, amplitudes constantes nos valores nominais, frequência constante no valor síncrono tensões trifásicas equilibradas, fator de potência unitário nas cargas, perdas nulas na distribuição e transmissão, entre outros.

Com o desenvolvimento da tecnologia, a preocupação com a qualidade da energia só vem aumentando, pois é cada vez mais comum encontrarmos aparelhos residenciais com cargas comandadas eletronicamente como, por exemplo, fornos de micro-ondas, computadores e periféricos. O que era antigamente uma preocupação apenas das empresas de energia elétrica, mais especificamente nos aspectos de continuidade, vem se tornando cada vez mais alvo de grandes estudos para o melhoramento da qualidade da energia.

Em situações reais é impossível que se atenda totalmente todas essas condições ideais, uma vez que, os equipamentos elétricos estão sempre sujeitos a falhas ou perturbações que fazem com que estes equipamentos sofram danos, causando condições indesejáveis para a operação. Os sistemas de monitoração e controle disponíveis são de grande importância, pois são eles que determinam a confiabilidade com que as condições de operação são atendidas.

A QEE está relacionada a qualquer desvio que possa ocorrer na forma de onda. Dentre os fenômenos podemos citar: afundamentos, elevações e interrupções de tensões, distorções harmônicas, flutuação de tensão (*flicker*), desequilíbrio de tensão, variações na frequência, sobretensões e sobtensões (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

O estudo será baseado na análise de qualidade de energia no setor de produtivo de rerrefino do óleo lubrificante de uma planta industrial na região de Minas Gerais e a comparação dos valores aferidos com os indicadores de qualidade determinados pelas regulamentações, sendo possível realizar estudos e propor soluções para os problemas encontrados.

Para se adotar um critério para análise da qualidade da energia elétrica é necessário inicialmente preocupar-se com a continuidade do serviço, já que é evidente que qualquer interrupção do fornecimento causará vários impactos ao cliente. A questão da qualidade da energia elétrica pode ser avaliada observando os limites e parâmetros em que o sistema real possui em relação as condições ideais de funcionamento. Esses parâmetros normalmente são percebidas através de falhas de funcionamento em alguns equipamentos ou mesmo a deterioração das condições de operação.

Dentre os vários motivos da preocupação com a qualidade da energia elétrica podemos citar o grande interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica, a conscientização dos consumidores em relação aos fenômenos referente a qualidade da energia é, por consequência, a importância da qualidade da energia elétrica sobre a vida útil dos equipamentos elétricos.

Por conta de tantos motivos já citados, é de fundamental importância uma análise e diagnóstico da qualidade da energia elétrica nas empresas e também nos clientes, para que assim possam ser identificados quaisquer tipos de distúrbios e assim apresentar medidas técnicas que são economicamente viáveis, com o intuito de minimizar os prejuízos que por ventura possam ocorrer. Dentre os vários motivos que causam a necessidade da análise da qualidade de energia podemos citar que podem ocorrer perda de produção, com a geração de sucata e refugo de materiais, altos custos para reiniciar operações e por ventura, podem ocorrer necessidade de reparos ou substituição de componentes danificados.

Portanto, o objetivo geral do trabalho é analisar o comportamento dos parâmetros referente a qualidade de energia tais como tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, harmônicas, variação de frequência e fator de potência no setor produtivo do óleo lubrificante em uma planta industrial na região de Minas Gerais a fim de determinar os pontos afetados com estudo das cargas especiais, realizarem medições com a presença de um técnico especializado. Avaliar os parâmetros e propor solução para melhoria da qualidade de energia e consequentemente reduzirem o custo de manutenção com equipamentos que possuem um desgaste maior devido às harmônicas.

A importância da análise da qualidade de energia, e propor melhorias no sistema elétrico interno da empresa, para redução dos sinais que afetam o desempenho da qualidade de energia, e relatar os resultados dos trabalhos bibliográficos analisados e propor soluções.

O trabalho tem como objetivo específico apresentar um diagnóstico de uma indústria, portanto se resume em:

- a) Apropriar-se dos conhecimentos de qualidade de energia através de pesquisas e livros;
- b) Identificar e analisar os problemas de qualidade de energia que causam na instalação de uma indústria;
- c) Realizar medições no painel do setor produtivo de rerrefino para que se possa aferir e analisar o fluxo da qualidade de energia e comparar os resultados com normas regulamentadoras;
- d) Reduzir custos com manutenção e melhoria na qualidade de energia;
- e) Diminuir perdas no sistema através da melhoria dos índices de qualidade de energia;



- f) Sugerir soluções que levem os índices de qualidade de energia para os valores recomendados pela norma brasileira Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST, 2018).

Em paralelo com o desenvolvimento do referencial teórico, será feita medições no setor produtivo de rerrefino de uma planta industrial na região de Minas Gerais com um analisador de energia para analisar o comportamento dos parâmetros de qualidade de energia, além de coletar dados como tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, fator de potência e componentes harmônicos para comparar com normas que regulamentam os índices de qualidade de energia.

## 2 CONCEITO DE ENERGIA

Fisicamente, energia é a quantidade de trabalho que um sistema é capaz de fornecer. Ela não pode ser criada, mas apenas transformada. Por exemplo, quando abastecemos o carro com combustível, a energia química contida no tanque transforma-se em movimento (energia cinética), em calor (energia térmica) e em barulho (energia sonora).

Quando se trata de energia elétrica, e medida mais comum encontrada é o quilowatt-hora (KW/h) ou megawatt-hora (MW/h).

A energia chega às indústrias e residências por meio de um complexo que é denominado de Sistemas Elétrico de Potência (SEP), composto de usinas geradoras e subestações, linhas de transmissão, linhas de distribuição e alimentadores. O sistema de energia começa nas usinas geradoras, onde a energia elétrica é gerada, em seguida é transportada por uma complexa rede de linhas de transmissão aéreas ou de cabos subterrâneos até alcançar seus centros consumidores.

Para manter o nível de tensão dentro de certos limites operacionais aceitáveis, tanto em nível de transmissão como de distribuição, são necessárias medidas de controle pois os sistemas de distribuição/transmissão estão constantemente sujeitos a ocasionais variações de tensão, que mesmo dentro de limites pré-estabelecidos, podem causar operações incorretas de sensíveis equipamentos elétricos nos diversos setores (OLESKOVICZ, 2006).

Para avaliar o quanto um sistema está operando fora de suas condições normais de acordo com a norma (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018), duas grandezas elétricas básicas podem ser empregadas. São elas: a tensão e a frequência. A frequência em um sistema interligado situa-se na faixa de  $60 \text{ Hz} \pm 0,5\text{Hz}$ . Por outro lado, em relação à tensão, três aspectos principais devem ser observados, que são a Forma de onda, que deve ser o mais próximo possível de uma senóide, a simetria do sistema elétrico e a magnitudes das tensões dentro de limites aceitáveis.

### 2.1 Energia elétrica ativa e reativa

Como sabemos para o funcionamento de quaisquer equipamentos eletrônicos se faz necessário o uso de energia elétrica, máquinas e equipamentos que possuem circuitos magnéticos e operam em corrente alternada absorvem dois tipos de energia elétrica, a energia elétrica ativa e a energia elétrica reativa.

A energia elétrica ativa é aquela que efetivamente produz trabalho, sua medição é feita em kWh, ela é a principal responsável pelo movimento de rotação dos motores elétricos. Já a energia elétrica reativa não produz trabalho, mas é de fundamental importância para criar o fluxo magnético nas bobinas de motores, transformadores, geradores e vários outros tipos de equipamentos. Sua medição é feita em kVAr/h, no caso de motores ela é importante pois cria um campo magnético que ajuda no funcionamento do mesmo (BORDIM, 2011).

Apesar de sua grande importância para o funcionamento de vários equipamentos elétricos, a energia elétrica reativa deve ser a menor possível pois ela traz consigo alguns fatores que causam prejuízos como cabos de condutores de maior seção e transformadores com uma maior capacidade, além disso também ocorrem perdas por aquecimentos nos equipamentos e quedas de tensão (DUAILIBE, 2000).

Dentre algumas formas de obter energia reativa necessária para o funcionamento dos equipamentos é a instalação de bancos de capacitores próximos a esses equipamentos, fazendo assim com que o sistema em questão opere sem causar danos aos usuários.

## **2.2 Porque monitorar a qualidade de energia elétrica**

Os problemas relacionados a qualidade de energia elétrica (QEE) são identificados quando um equipamento alimentado através da rede elétrica que deixam de funcionar como deveria, uma lâmpada que apresentam variações luminosas, um motor que sofre vibrações mecânicas, equipamentos operando através de sobreaquecimento, proteção atuando intempestivamente e capacitores com sobretensões ou sobrecorrentes.

Se tais problemas não forem devidamente tratados podem haver prejuízos materiais como redução da vida útil de transformadores, motores, capacitores e equipamentos eletrônicos sensíveis, podendo também ocorrerem perturbações físicas em pessoas (incômodo visual devido ao efeito de cintilação ou incômodo auditivo devido a ressonâncias eletromagnéticas), levando ao comprometimento da capacidade produtiva tanto das máquinas como das pessoas (DECKMANN, 2010).

## **2.3 Como monitorar a qualidade de energia elétrica**

Através da identificação de uma falha ou mau funcionamento de uma instalação ou equipamento, se inicia um estudo (pesquisa) para poder diagnosticar a causa que levou a ocorrer o problema relativo à qualidade da energia elétrica. Como se trata de diagnosticar um problema

de compatibilidade eletromagnética, esse estudo pode envolver questões que vão além de um simples problema tecnológico. Uma abordagem recomendável inclui os seguintes passos (DECKMANN, 2010):

- a) Deve-se conhecer os problemas que se poderá encontrar;
- b) Deve-se estudar as condições locais onde o problema se manifesta;
- c) Se possível, medir e registrar as grandezas contendo os sintomas do problema;
- d) Analisar os dados e confrontar os resultados obtidos com estudos ou simulações;
- e) Finalmente, diagnosticar o problema, sua possível causa e propor soluções;
- f) Cada um desses passos requer um conhecimento ou estudo específico.

## **2.4 Eficiência energética**

Eficiência energética é uma filosofia de trabalho que visa otimizar a utilização de energia elétrica por meio de orientações, direcionamentos, ações e controle dos recursos humanos, materiais e econômicos, reduzindo os índices globais e específicos da quantidade de energia necessária para a obtenção do mesmo resultado ou produto.

Os projetos de eficiência energética são aqueles que resultam em economia e benefícios diretos para os consumidores, com ações de combate ao desperdício de energia elétrica, modernização de instalações e processos.

Para agir e elaborar projetos afim de maximizar a eficiência energética, é necessário conhecer muito bem alguns conceitos fundamentais, entre eles consumo, demanda, intervalo de integração e fator de carga.

A QEE designa uma área de estudos pertinente aos SEP. Este tema vem sendo, em anos recentes, objeto de preocupação e de esforços coordenados de diagnósticos e de análise para que se atinja o maior entendimento possível sobre o mesmo. Estes conceitos têm sido nas últimas três décadas, objetos de estudos e pesquisas (BRONZEADO, 1997).

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo são apresentados conceitos referentes à qualidade de energia no qual se refere aos parâmetros que devem ser medidos ao realizar as análises de qualidade de energia em um determinado local, os tipos de filtros para correção de distorções harmônicas e as normatizações.

Tabela 1 – Categorias e Características dos Fenômenos Eletromagnéticos.

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

Fonte: Adaptado de (DUGAN, 2002).

A Tabela 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.

Todos os fenômenos listados são analisados individualmente, ocorrendo ao mesmo tempo em sistemas reais, sendo assim necessário a análise dos sinais medidos e identificação clara de cada uma das situações descritas. No estudo de caso desse trabalho serão analisados desequilíbrio de tensão, distorções harmônicas, variação de frequência e fator de potência. No entanto para que fique claro a influência de cada fenômeno sobre a performance do sistema e seus elementos, a seguir serão descritos cada um dos fenômenos relacionados a qualidade de energia.

### **3.1 Transitórios ou transientes**

O termo transiente tem sido muito utilizado na análise das variações do sistema de potência para indicar um evento indesejável, ou a parte da mudança de uma variável que desaparece durante a transição de uma condição de estado estacionário para outro. Este fenômeno é chamado transitório (DUGAN, 2002. p.15).

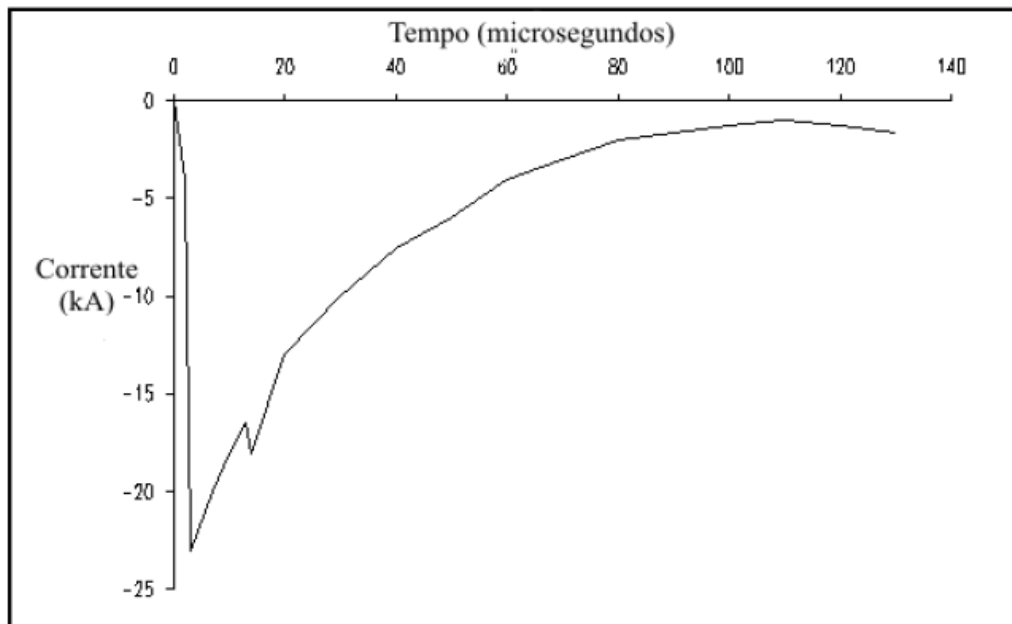
Os transitórios podem ser classificados em impulsivos e oscilatórios e podem ser gerados tanto pelas empresas de energia elétrica quanto nas cargas das instalações dos consumidores.

#### **3.1.1 Impulsivos**

Um transiente impulsivo é uma mudança repentina, com frequência diferente daquela do sistema, unidirecional na polaridade (positiva ou negativa) na condição de regime permanente de tensão, corrente ou ambos. Eles são caracterizados por seus tempos de subida e descida, e também podem ser expressos pelo seu conteúdo espectral (frequência predominante) e são causados geralmente por descargas atmosféricas e conduzidas para os circuitos de aterramento através de supressores (para-raios).

As descargas atmosféricas podem atingir diretamente a rede elétrica em vários locais, conforme ilustrado na Figura 1 ou provocar distúrbios por indução magnética de descargas a quilômetros de distância.

Figura 1 – Transitório impulsivo de corrente causado por descarga atmosférica



Fonte: (DUGAN, 2002, p. 16).

Transientes impulsivos podem excitar a frequência natural dos circuitos do sistema de potência e produzir transitórios oscilatórios.

### 3.1.2 Oscilatórios

Segundo Dugan (2002), um transiente oscilatório é uma mudança repentina, com frequência diferente daquela do sistema, bidirecional na polaridade (positiva e negativa) na condição de regime permanente de tensão, corrente, ou ambos e são definidos, em função do conteúdo espectral (frequência predominante), duração e magnitude da tensão, como baixa, média ou alta frequência, conforme classificação descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação dos transitórios oscilatórios

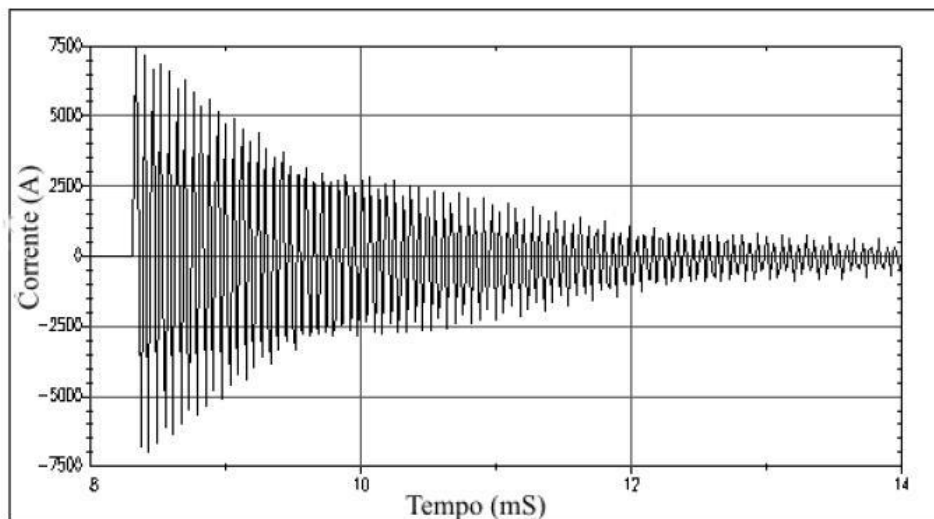
<b>Categorias</b>	<b>Espectro típico</b>	<b>Duração típica</b>	<b>Tensão típica</b>
<b>1. Transitórios Oscilatórios</b>			
1.2.1 Baixa Frequência	< 5 kHz	0,3 – 50ms	0 – 4 p.u.
1.2.2 Média Frequência	5 – 500 kHz	20 $\mu$ s	0 – 8 p.u.
1.2.3 Alta Frequência	0,5 – 5 MHz	5 $\mu$ s	0 – 4 p.u.

Fonte: Adaptado (DUGAN, 2002).

Transientes de alta frequência (acima de 500KHz) são geralmente o resultado de uma resposta do sistema local a um transiente impulsivo. Isto é, podem ser causados por descargas atmosféricas ou por chaveamento de circuitos indutivos.

Transientes oscilatórios de média frequência (entre 5 e 500KHz) podem ser causados por chaveamento de capacitor “*back-to-back*” resultando em correntes transitórias de dezenas de kHz, chaveamento de disjuntores para eliminação de faltas ou resposta à transiente impulsivo. A Figura 2 é um exemplo chaveamento de capacitor “*back-to-back*”. Os transientes oscilatórios de baixa frequência podem ser causados por vários tipos de eventos (DUGAN, 2002).

Figura 2 – Transitório provocado por chaveamento de capacitor



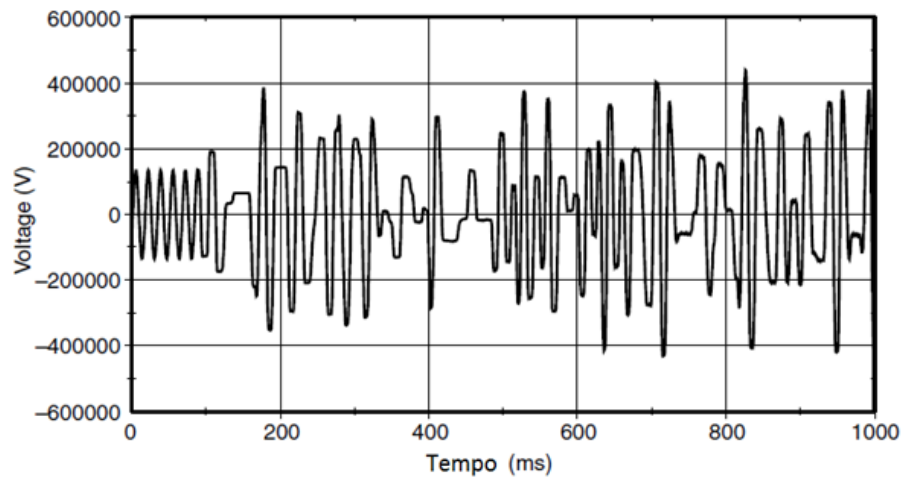
Fonte: (DUGAN, 2002).

Os problemas comuns gerados pelos transientes oscilatórios são disparos de controladores de ajuste de velocidade e mau funcionamento de outros equipamentos controlados eletronicamente.

Transientes devido a chaveamento de capacitores no sistema elétrico são, em geral, na ordem de 1,3 a 1,5 *pu*, porém capacitores no lado da carga podem ampliar a sobretensão transiente na carga. Transientes oscilatórios com frequências menores do que 300 Hz podem também ser encontrados nos sistemas de distribuição. Estes estão, geralmente, associados aos fenômenos de ferorressonância e energização de transformadores sem carga, como ilustrado na Figura 3 (DUGAN, 2002).



Figura 3 – Transitório provocado por ferorrresonância causado pela energização de transformadore a vazio



Fonte: (DUGAN, 2002).

Os problemas gerados pelos transitórios são a quebra da rigidez dielétrica dos materiais isolante provocando *flashover* e redução na vida útil dos equipamentos.

### 3.2 Variações de tensão de curta duração

De acordo com Dugan (2002), as variações de tensão de curta duração (VTCD) são alterações no valor RMS de uma tensão e podem ser caracterizadas 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 normalmente são provocadas por má conexão intermitente dos cabos contato e energização de grandes cargas. Nas indústrias estes fenômenos podem provocar desligamento de cargas mais sensíveis paralisando a produção com perda de materiais, geração de refugos, reparos nos equipamentos e perda de tempo no restabelecimento da produção.

No caso de falta por curto circuito pode ser observado afundamento na fase envolvida, salto nas demais fases, seguida de interrupção do circuito.

#### 3.2.1 Interrupção

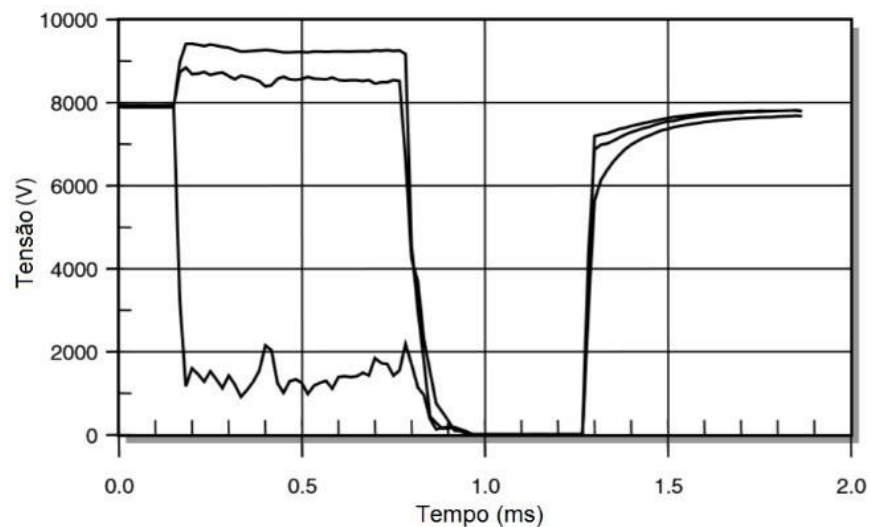
Isso ocorre quando a fonte de tensão ou a corrente na carga reduzem a 10% ou menos, dos valores nominais parametrizados. Segundo Dugan (2002, p. 20), podem ter origem em falhas no sistema, falha de equipamentos, ou defeitos em dispositivos de

controle.

Martinho (2009, p. 53) complementa que, segundo estatísticas colhidas em 2003, aproximadamente 15% de prejuízos envolvendo a perda de matéria prima em uma indústria que sofre uma interrupção, ocorrem nos primeiros instantes imediatamente após a falha, chegando a 60% dos custos se a interrupção se mantiver por mais tempo. O autor utiliza como um segundo exemplo a interrupção de processos industriais relacionados à pintura e acabamento. Mesmo que seja uma interrupção pontual e que dure poucos ciclos, a partir do momento em que o equipamento industrial interrompe seu funcionamento, a religação e retomada do processo produtivo pode levar tempo, o que provocaria o ressecamento de tinta na estrutura do maquinário, demandando um prolongamento do período de parada para as limpezas e manutenções que se fizerem necessárias.

A Figura 04 ilustra um momento de interrupção, provocado após um evento de afundamento de tensão.

Figura 04 - Interrupção de tensão decorrente de falha em sistema trifásico



Fonte: (DUGAN, 2002, p. 21).

Neste caso ilustrado, um evento ocorrido em uma única fase de um sistema trifásico provocou o afundamento de aproximadamente 80% da tensão nominal da fase exposta ao evento, criando uma instabilidade que se estendeu por aproximadamente 7 ms, provocando o acionamento de dispositivos de proteção, representados na leitura pela interrupção. Decorridos 4 ms, religadores são acionados para restabelecer a conexão, e a tensão nas três fases volta aos valores nominais de operação, indicando que a falha foi solucionada após algum dispositivo (provavelmente o que provocou o evento inicial) ter sido desenergizado e religado.

### 3.2.2 Afundamento de tensão

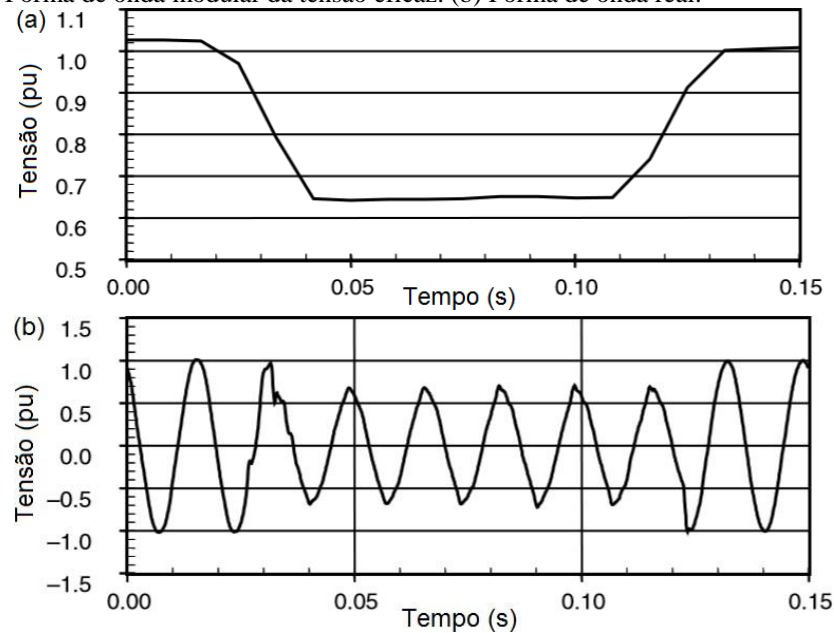
De acordo com Dugan (2002), afundamento de tensão (*sag* ou *dip*) caracteriza-se pela sua amplitude, tempo de duração e frequência de ocorrência. As características e o número de afundamentos diante de uma determinada falta dependem de vários fatores como:

- a) tipo da falta: trifásica, fase-terra;
- b) sua posição relativa a outros consumidores ligados na rede: dependendo da localização da falta, o afundamento de tensão pode afetar um grande número ou um número restrito de consumidores;
- c) impedância da falta: influencia a amplitude do afundamento de tensão;
- d) tipo de conexão dos transformadores: influencia a tensão numa determinada carga no caso de afundamentos desequilibrados;
- e) filosofia de proteção adotada no sistema.

Martinho (2009. p. 41) diz que este tipo de distúrbio pode afetar e comprometer o funcionamento, ou até mesmo a vida útil de equipamentos, principalmente aqueles microcontrolados ou que dispõem de circuitos eletrônicos para seu funcionamento. Considerando ainda que dispositivos eletrônicos e computacionais fazem uso de memórias de acesso volátil, que se referem a memórias eletrônicas que são apagadas após serem desligadas (VELLOSO, 2011), qualquer comprometimento na energia que possa provocar o travamento ou o desligamento deste tipo de memória, levará à perda dos dados, o que pode comprometer o controle de processos, além da perda de segurança e produtividade.

A Figura 05 ilustra graficamente o comportamento típico de um afundamento de tensão, apresentando as formas de onda do módulo da tensão eficaz, e a forma real da onda no sistema.

Figura 05 - Afundamento de tensão para 65% do valor nominal. (a) Forma de onda modular da tensão eficaz. (b) Forma de onda real.



Fonte: (DUGAN, 2002. p. 22).

Este nível de afundamento é comum quando ocorrem faltas em alimentadores distintos dentro de um mesmo sistema de distribuição. Assim, no circuito diretamente ligado ao alimentador onde ocorreu a falta ocorre uma interrupção, e nos circuitos adjacentes ou indiretamente conectados ao ponto de falha pode ocorrer um afundamento de tensão.

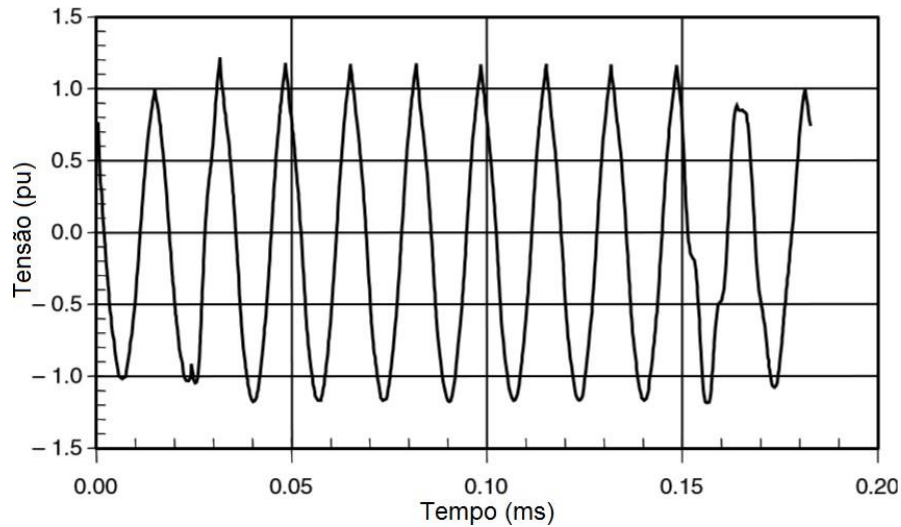
Com relação aos impactos provocados por afundamentos de tensão, Martinho (2009, p.41) comenta que dispositivos associados a Controladores Lógicos Programáveis – PLC's, dispositivos eletromecânicos, computadores, acionadores de corrente contínua, entre outros, quando expostos a afundamentos de tensão, podem operar erroneamente, perdendo informações ou mesmo levando ao comprometimento dos processos a eles associados.

### 3.2.3 Elevação de tensão

Refere-se também na variação na tensão de fonte ou corrente de carga, mas para valores entre 110 e 180% do nominal, e podem ocorrer durante uma falta de uma única fase em um sistema trifásico, como visto na Figura 5. Uma das fases sofreu um afundamento de tensão, enquanto as outras duas sofreram elevação.

A Figura 06 mostra o comportamento da tensão diante de uma falha monofásica em um sistema trifásico, visto em uma segunda fase ligada a este sistema.

Figura 06 - Elevação de tensão para 120% do valor nominal.



Fonte: (DUGAN, 2002. p. 24).

A magnitude da elevação de tensão depende das condições de impedância do sistema, aterramento, e local da falta. Dugan (2002) refere que em um sistema não-aterrado, a tensão nominal das fases associadas a uma fase em curto-circuito chega a 1,73 pu. Em contrapartida, em uma situação de falta próxima a uma subestação de um sistema adequadamente aterrado, este efeito “resposta” de elevação de tensão chega a ser praticamente nulo, em que a tensão nominal das fases não afetadas pela falta não sofrem qualquer variação relevante.

### 3.3 Variações de tensão de longa duração

Todas as variações de tensão que ultrapassem 3 minutos, são tidas como variações de longa duração (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). Neste caso, os parâmetros de definição do tipo de variação consideram as mesmas características da falha para eventos de curta duração, no entanto os eventos recebem nomes distintos, para diferenciá-los daqueles que incidem nas categorias do item anterior.

Diferente do afundamento e elevação de tensão, os eventos de subtensão e sobretensão não são disparados por falhas pontuais no sistema. É mais comum que ocorram em decorrência de variações da própria carga ligada ao sistema, ou eventos de chaveamento de operação no sistema de distribuição.

Segundo Dugan (2002), são tipos de variação de tensão de longa duração:

#### 3.3.1 Interrupções sustentadas

São caracterizadas como interrupções sustentadas quando permanece por mais de 3 minutos, 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.

Nas interrupções que sejam frutos de falhas no sistema, os equipamentos como religadores ou disjuntores com religação automatizada, podem ser religados após ocorrer algum tipo de evento transitório como pássaros que fecharam curto circuito na rede, galhos de árvores encostando-se aos fios, etc. No 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.

### 3.3.2 Subtensão

A subtensão é caracterizada pela redução na tensão RMS inferior a  $0,9 pu$  com duração superior a 1 minuto.

Normalmente as sobtensões 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 da 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 maior as perdas reativas e por consequência maior a queda de tensão. 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.

### 3.3.3 Sobretensão

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 rotativa 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.

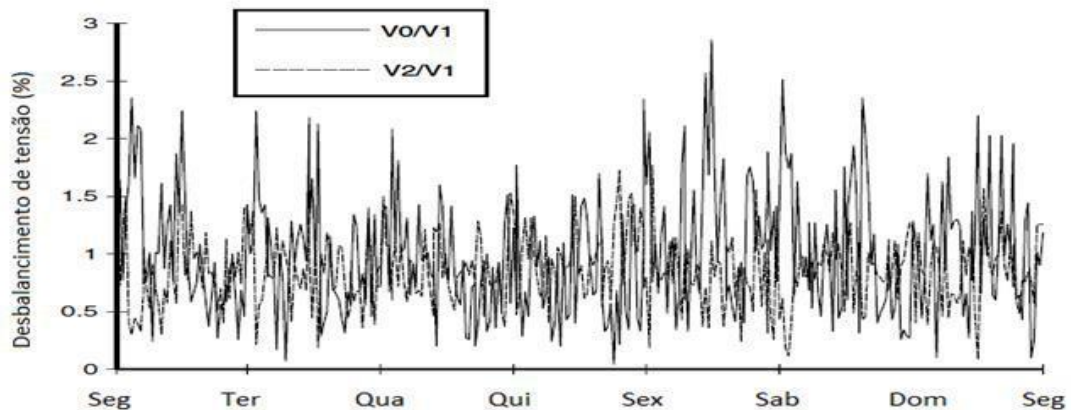
### **3.4 Desequilíbrio de tensão**

Segundo Dugan (2002), o desequilíbrio de tensão 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 diferente.

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.

A Figura 7 exemplifica o desequilíbrio das componentes em um alimentador.

Figura 7 - Desequilíbrio de tensão em consumidor residencial.



Fonte: (DUGAN, 2002. p. 25)

O gráfico diferencia os valores relativos de tensão de duas fases (V0 e V2) em função de uma terceira fase (V1), utilizado como referência para este estudo específico de desequilíbrio de tensão. Para este tipo de descrição gráfica, ambas as linhas deveriam tender a permanecer em zero a maior parte do tempo, para que o sistema pudesse ser considerado ideal. Observando com mais atenção, percebe-se que a fase V0 tende a apresentar os maiores valores percentuais de desequilíbrio, chegando a aproximadamente 2,8% em determinados momentos entre sexta- feira e sábado.

### 3.5 Distorção na forma de onda

Dugan (2002) afirma que a distorção da forma de onda está definida como um desvio de estado estacionário a partir de uma onda senoidal ideal de frequência de energia principalmente caracterizada pelo conteúdo espectral do desvio e existem cinco tipos básicos de distorção da forma de onda:

- a) offset CC;
- b) harmônicos;
- c) interharmônicos;
- d) recortes;
- e) ruídos.



### 3.5.1 Offiset CC

Se refere à presença de sinal de tensão ou corrente contínua (CC) em um sistema de tensão ou corrente alternada (AC). A existência deste sinal característico faz com que a forma de onda seja deslocada sobre o eixo da amplitude, de modo que o valor médio de pico-a-pico, onde em um sistema ideal seria zero, passe a ser um valor positivo ou negativo.

Pode resultar de distúrbios geomagnéticos, ou assimetria de conversores eletrônicos (DUGAN, 2002. p. 25). Um exemplo é a presença de diodos retificadores de meia-onda em circuitos prolongadores da vida útil de lâmpadas incandescentes, os quais reduzem a tensão eficaz que chega à lâmpada.

A existência de offset CC provoca o desgaste e redução da vida útil de transformadores, erosão eletrolítica em aterramentos e conectores.

### 3.5.2 Harmônicos

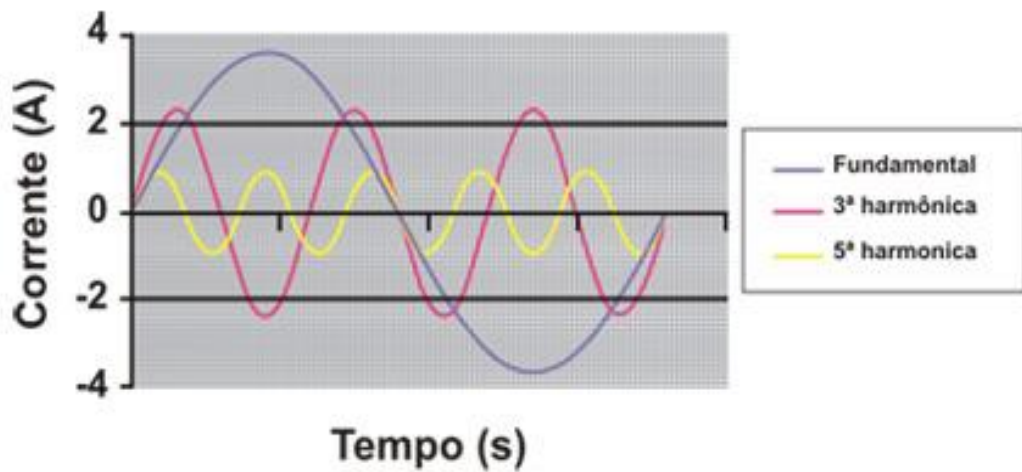
Um dos distúrbios mais comuns na rede elétrica atualmente é a distorção harmônica. Com o incremento de circuitos chaveados nas instalações, como reatores eletrônicos, fontes de computadores, inversores de frequência, entre outros, esse fenômeno aumentou nos últimos anos.

Segundo Capelli (2013), afirma que a presença de harmônicas é sinônimo de uma onda de tensão ou de corrente deformada. A deformação da onda de tensão ou de corrente significa que a distribuição de energia elétrica é perturbada e que a QEE não é ótima. As correntes harmônicas são geradas pelas cargas não-lineares conectadas a rede. As circulações das correntes harmônicas geram tensões harmônicas através das impedâncias da rede, e então uma deformação da tensão de alimentação.

O teorema de Fourier indica que qualquer forma de onda pode ser gerada a partir da soma de senoidais, combinando amplitudes e frequências apropriadas.

Uma senoide de 60hz contém uma harmônica de terceira ordem, chamamos a frequência principal do sinal de fundamental (no Brasil é 60hz) e as demais harmônicas, que seguem por ordem. Uma harmônica de segunda ordem, portanto, é 120hz (60hz vezes dois), a de terceira ordem 180hz (60hz vezes três) e assim por diante (CAPELLI, 2013).

Figura 8: Exemplo de corrente comportando harmônicos



Fonte: (CAPELLI, 2013).

A Tabela 3 apresenta exemplos de frequências ímpares múltiplas de um sistema de 60 Hz.

Tabela 3 – 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.

Antigamente predominavam cargas lineares com valores de impedância fixo (iluminação incandescente, cargas de aquecimento, motores sem controle de velocidade). Atualmente surgiram cargas não-lineares geradoras de poluição elétrica (harmônicas). Os dispositivos geradores de harmônicas são apresentados em todos os setores industriais, comerciais e domésticos. As harmônicas são resultadas de cargas não-lineares.

### 3.5.3 Interharmônicos

Inter-harmônicos são ondas periódicas com frequência diferentes das frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental, produzidos principalmente por motores e fornos de indução, forno ou equipamentos de formação de arco elétrico e conversores estáticos e podem excitar a frequência natural entrando em ressonância provocando problemas graves no sistema (CAPELLI, 2013).

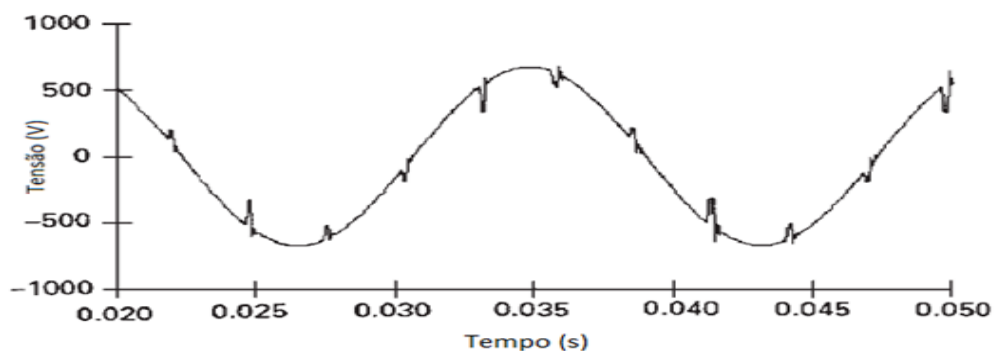
### 3.5.4 Recortes

Segundo Teixeira (2011), 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.

Os componentes de frequências associadas podem ser bastante elevados e não pode ser facilmente caracterizado em equipamentos de medição normalmente utilizada para a análise harmônica.

Martinho (2009. p. 63) também define o recorte como sendo microvariações percebidas no circuito ao longo de sua função senoidal. Estes podem ser percebidos graficamente na Figura 09.

Figura 9– Exemplo de recortes de tensão em conversor trifásico

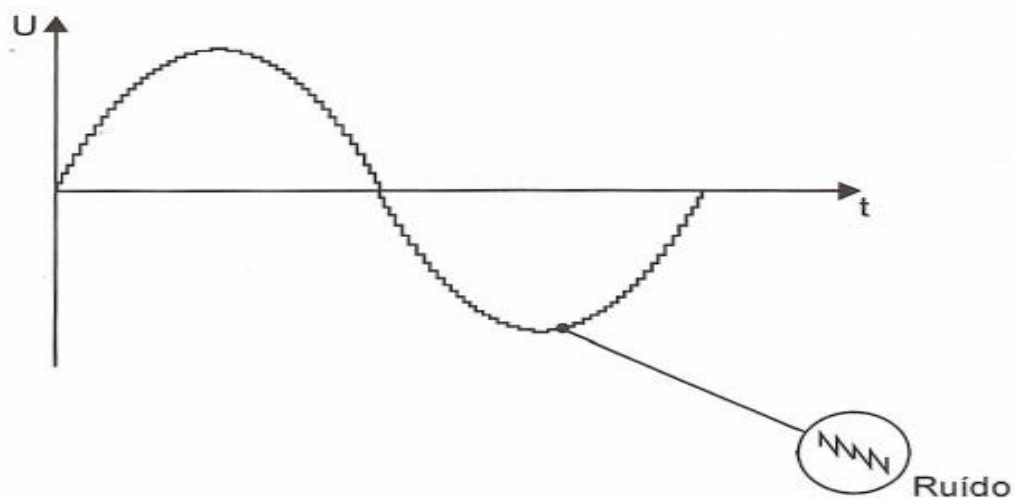


Fonte: (DUGAN, 2002. p.28)

### 3.5.5 Ruídos

Os ruídos são definidos como qualquer distorção indesejada nas ondas de tensão ou corrente de baixa amplitude sem frequência definida que se soma à forma da onda original. Geralmente são provocados dispositivos eletrônicos com retificadores e fornos a arco voltaicos, sendo amplificados em circuitos mal aterrados e atenuados com utilização de filtros DUGAN (2002. p. 28).

Figura 10 - Ruído em onda de tensão



Fonte: (CAPELLI, 2013).

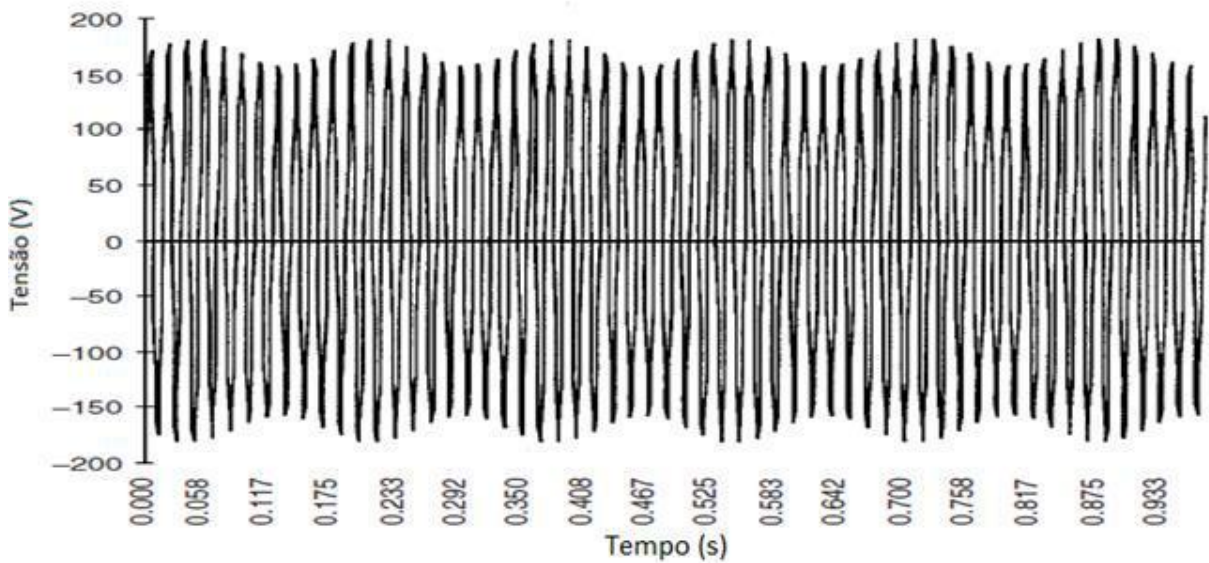
Basicamente, o ruído consiste em qualquer distorção indesejada de sinal que não pode seja classificada como distorção harmônica ou transiente e podem provocar perturbações em equipamentos eletrônicos microprocessadores. A Figura 10 ilustra um ruído numa onda de tensão alternada.

### 3.6 Flutuação de tensão

Flutuações de tensão são variações sistemáticas de tensão ou uma série de mudanças aleatórias de tensão, que não excedem a faixa de tensão de 0,9 a 1.1 *pu*. A cintilação percebida na iluminação, conhecida como a *flicker*, termo derivado do inglês e que representa o efeito de “piscar” que lâmpadas apresentam quando o sistema onde estão instalados recebe esse tipo de distúrbio (DUGAN. 2002. p. 28).

A Figura 11 mostra um exemplo típico de variação de tensão.

Figura 11– Flutuação da tensão característica do *flickers*.



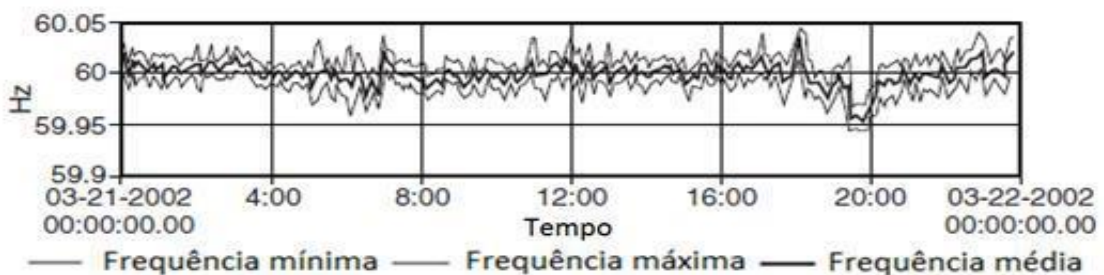
Fonte: (DUGAN, 2002).

### 3.7 Variações de frequência

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

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem, em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Figura 12– Variação de frequência em uma subestação.



Fonte: (DUGAN, 2002. p. 31).

A Figura 12 ilustra um exemplo típico de variação de frequência em uma subestação de 13Kv.

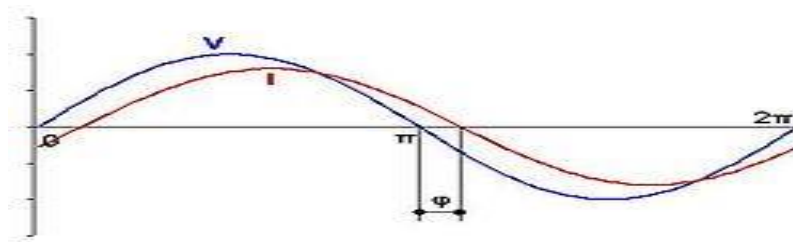
### 3.8 Fator de potência

A expressão fator de potência nada mais é do que um mecanismo de utilização de energia cujo o controle adequado nas instalações indústrias consumidoras se faz extremamente necessário e importante. Portanto é muito importante, que em instalações industriais se faça o controle e monitoramento do fator de potência, para que se mantenha dentro do limite mínimo permitido pela concessionária de energia elétrica.

De acordo com Capelli (2013), o capacitor também não é uma carga linear, entretanto, como ele se opõe às variações de tensão, ela está atrasada ( $\varphi = -90^\circ C$ ) em relação à corrente elétrica.

Também podemos observar na Figura 13, a defasagem do ângulo entre tensão e corrente.

Figura 13- Defasagem do ângulo entre tensão e corrente.



Fonte: (CAPELLI, 2013).

Quando nos referimos às cargas não lineares, em vez de atribuímos o termo "resistência", indicamos "impedância".

A resistência não se altera com a frequência, mas a impedância sim, no indutor é alterada conforme Fórmula 1:

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

Onde:  $XL$  é a reatância indutiva,  $L$  é a Indutância dada em Henrys,  $f$  é a frequência dada em Hertz,  $\pi$  é aproximadamente 3,14159.

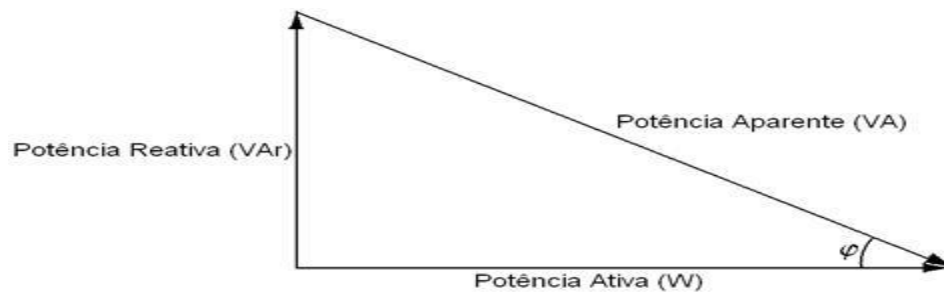
O capacitor tem sua impedância regida pela Fórmula (2):

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

Onde:  $XC$  é a reatância capacitiva,  $C$  é a Capacitância dada em Farads,  $f$  é a frequência dada em Hertz,  $\pi$  é aproximadamente 3,14159.

O fator de potência é um índice adimensional que indica a representação da energia ativa perante a energia total absorvida por um sistema elétrico industrial. Ele varia entre zero e um indutivo ou capacitivo, ou seja, entre zero e 100%. Ele pode ser definido observando o "triângulo das potências", apresentado na Figura 14.

Figura 14- Triângulo de potências



Fonte: (CAPELLI, 2013).

A potência aparente é a maior delas, e corresponde à hipotenusa do triângulo-retângulo. Esta é a energia total drenada pela carga, porém a parte que realiza o trabalho denomina-se ativa ou potência útil. A potência reativa é o desperdício do sistema, e quanto menor ela for, melhor é o sistema. Com o teorema de Pitágoras, tem-se:

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

Onde:  $P$  é a potência ativa,  $Q$  a potência reativa e  $S$  a potência aparente.

Pela relação trigonométrica calcula-se a potência útil através do cosseno do ângulo de defasagem entre as potências aparente e ativa.

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

Onde: O  $\cos \varphi$  é o que se chama fator de potência ( $FP$ ) e também pode ser calculado a partir dos valores registrados de potência ativa ( $P$ ) e potência reativa ( $Q$ ) ou pelas respectivas energias ativa ( $EA$ ) e energia reativa ( $ER$ ) ou pela razão entre a potência ativa ( $P$ ) potência aparente ( $S$ ), de acordo com a Fórmula 5.

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

As distorções harmônicas interferem na forma da onda e por consequência no fator de potência.

Em um motor, a potência útil é aquela que se transforma em torque mecânico no motor. A reativa gera o magnetismo e calor nos enrolamentos (perdas), e a potência aparente é a soma da potência útil e o desperdício.

Assim, quanto menor a potência reativa, menor o desperdício, ou seja, quanto maior o fator de potência, mais eficaz é o sistema. A Figura 15 mostra alguns exemplos do tipo de carga segundo seu fator de potência (CAPELLI, 2013).

Figura 15 - 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).

As concessionárias de energia elétrica possuem medidores que são responsáveis por captar a quantidade de cargas que possuem características reativas, com isso as indústrias são forçadas a fazer com que a energia reativa não ultrapasse os limites estabelecidos pela concessionária de energia elétrica.

A cobrança por baixo fator de potência nas indústrias ocorre pelo sistema tarifário horosazonal, ou seja, baseia-se na totalização dos consumos de energia ativa e reativa acumuladas por hora de operação. Por conta desse sistema é necessário que se faça a correção do fator de potência praticamente em tempo real.



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 penalizados, ou seja, serão 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 no dispositivo 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.

### **3.9 Tipos de filtros**

Segundo Kimbark (1971), o aumento das distorções harmônicas no sistema ocorre em função das cargas não lineares compromete a qualidade de energia na instalação, porém o uso dos filtros tem por finalidade aliviar os efeitos das harmônicas em uma determinada faixa de frequência desejável e quando se trata de problemas de perturbação, o uso de filtros é a solução mais sensível e viável.

Os filtros passivos são constituídos por indutores, capacitores e resistores dispostos conectados em série ou em paralelo de acordo com a finalidade. O filtro fornece uma parcela de potência reativa para a rede, na qual foi conectado, devido ao seu componente capacitivo. A potência reativa fornecida pelo filtro, na frequência fundamental, define o tamanho do mesmo (ARRILLAGA; WATSON, 2003).

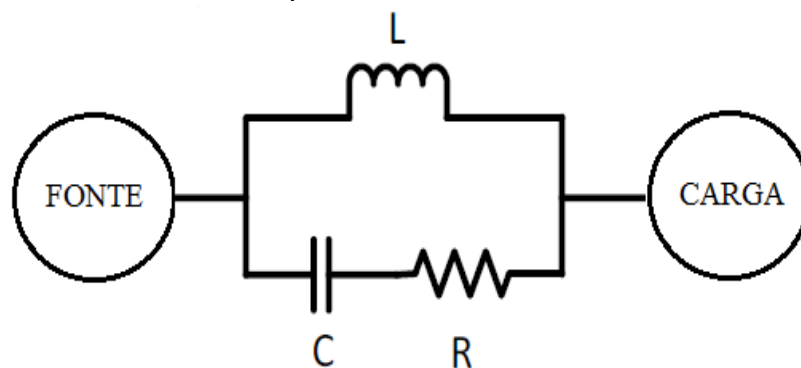
Os tipos de filtros em relação ao seu modo de conexão no sistema elétrico serão discutidos nas próximas seções.

### 3.9.1 Filtro passivo RLC em série

Os filtros passivos conectados em série com a rede são constituídos por uma indutância e uma capacitância em paralelo e representa uma grande impedância para a frequência que se deseja evitar. Geralmente um resistor é conectado ao ramo do capacitor para limitar a corrente, como ilustrado na Figura 16.

Por ser conectado em série com o sistema, ele representa uma desvantagem de ser dimensionado para suportar a corrente de plena carga do circuito e, portanto, é mais caro. Além do mais, a solução para eliminar conteúdo harmônico com filtros série não pode ser usada, pois a produção de harmônicos através de componentes não lineares do sistema como transformadores e conversores estáticos ocorre pela necessidade da circulação desses harmônicos para sua operação normal (TEIXEIRA, 2009).

Figura 16 - Conexão e circuito típico de filtro série



Fonte: o autor.

### 3.9.2 Filtro shunt

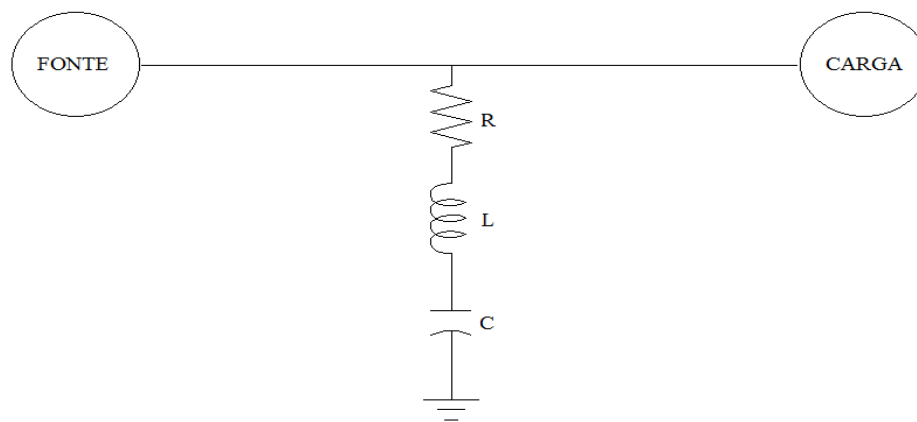
O filtro shunt é conectado em paralelo com a rede e são constituídos por um indutor, capacitor e resistor em série onde é dimensionado para suportar somente a corrente harmônica no qual está sintonizado, e somado a uma corrente fundamental muito menor que aquela do circuito principal conforme a Figura 17. Contudo, o filtro *shunt* é mais barato que um filtro série da mesma eficácia.

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

Os filtros podem ser definidos pelo fator de qualidade  $Q$ , o qual determina a largura de faixa de sintonia, os filtros podem ser divididos em dois tipos:

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

Figura 17 - Conexão e circuito típico de um filtro shunt



Fonte: o autor.

### 3.10 Normatização

As normas relacionadas a qualidade de energia recomendam-se práticas e requisitos para controle de harmônicos em sistemas elétricos. Porém as normas regulamentares que devem ser seguidas em uma análise advêm das normas Institute of Electrical and Eletronics Engineers (IEEE) e a Prodist módulo 8.

#### 3.10.1 IEEE

De acordo com a IEEE (1995), os procedimentos são desenvolvidos dentro das comissões técnicas das sociedades IEEE. É uma sociedade sem fins lucrativos na qual seus membros são voluntários.

Os padrões que são desenvolvidos no âmbito IEEE representam um consenso do conhecimento amplo sobre o assunto dentro do Instituto bem como as atividades fora do IEEE que manifestaram interesse em participar no desenvolvimento das normas.

Sobre as normas IEEE (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS, 1995), apenas a IEEE 519 - 2014 que orienta na concepção de sistemas de energia com cargas não-lineares. Os limites estabelecidos são para uma operação de estado estacionário e recomendado para as condições de "pior cenário", condições transitórias que ultrapassem estes limites.

A norma dispõe de três tabelas de ordem ímpar que limitam a relação da corrente de curto circuito  $I_{cc}$  pela corrente da carga  $I_L$  e regulamenta os níveis de harmônico em percentual, sendo a Tabela 4 para níveis de tensão de 120 V à 69 KV, a Tabela 5 de 69,1 KV à 161 KV e a Tabela 6 acima de 161 KV (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS, 2014).

Tabela 4 – Limites de distorção harmônica para sistema de distribuição de 120 V a 69 KV

$I_{cc}/I_L$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n \leq 50$	TDD
< 20	4,0%	2,0%	1,5%	0,6%	0,3%	5,0%
20 – 50	7,0%	3,5%	2,5%	1,0%	0,5%	8,0%
50 – 100	10,0%	4,5%	4,0%	1,5%	0,7%	12,0%
100 – 1000	12,0%	5,5%	5,0%	2,0%	1,0%	15,0%
> 1000	15,0%	7,0%	6,0%	2,5%	1,4%	20,0%

Fonte: (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS, 2014).

Tabela 5 – Limites de distorção harmônica para sistemas de distribuição de 69,1 KV a 161 KV

$I_{cc}/I_L$	$3 \leq n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n \leq 50$	TDD
< 20	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
20 – 50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4,0%
50 – 100	5,0%	2,25%	2,0%	0,75%	0,35%	6,0%
100 – 1000	6,0%	2,75%	2,5%	1,0%	0,5%	7,5%
> 1000	7,5%	3,5%	3,0%	1,25%	0,7%	10,0%

Fonte: (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS, 2014).

Tabela 6 – Limites de distorção harmônica para sistemas de distribuição acima de 161 KV

$I_{cc}/I_L$	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 \leq n \leq 50$	TDD
< 25	1,0%	0,5%	0,38%	0,15%	0,1%	1,5%
< 50	2,0%	1,0%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
> 50	3,0%	1,5%	1,15%	0,45%	0,22%	3,75%

Fonte: (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELETRONICS ENGINEERS, 2014).

### 3.10.2 Prodlist módulo 8

A Prodlist Módulo 8 é uma norma da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que regulamenta a qualidade de energia. A norma dispõe de limites e parâmetros para medição da QEE que serão demonstrados nas seções a seguir.

#### 3.10.2.1 Tensões em regime permanente

Os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensões em regime permanente (ANEEL, 2018). Os valores de referência para faixa de variação de tensão estão indicados na Tabela 7.

Tabela 7 – Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1KV (220/127)

<b>Tensão de Atendimento (TA)</b>	<b>Faixa de variação de Tensão de Leitura (volts)</b>
Adequada	$(202 \leq TL \leq 231) / (117 \leq TL \leq 133)$
Precária	$(191 \leq TL < 202 \text{ ou } 231 < TL \leq 233)$ $(110 \leq TL < 117 \text{ ou } 133 < TL \leq 135)$
Crítica	$(TL < 191 \text{ ou } TL > 233) / (TL < 110 \text{ ou } TL > 135)$

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

#### 3.10.2.2 Desequilíbrio de tensão

De acordo com a Prodlist os limites para os desequilíbrios de tensão correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). Os limites para os desequilíbrios de tensão estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Limites para os desequilíbrios de tensão

<b>Tensão nominal</b>	
<b><math>V_N \leq 1,0 \text{ KV}</math></b>	<b><math>1\text{KV} &lt; V_N &lt; 230 \text{ KV}</math></b>
3,0%	2,0%

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

### 3.10.2.3 Distorções harmônicas

A norma Prodist descreve sobre as distorções harmônicas e os valores de referência para distorções totais de tensão (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). Os valores de referência das distorções harmônicas totais estão indicadas no Tabela 9.

Tabela 9 – Valores de distorções harmônicas totais em percentual

Tensão nominal do barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1KV$	10
$1KV < V_N \leq 69 KV$	8
$69 KV < V_N \leq 230 KV$	5

Fonte: (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

### 3.10.2.4 Variação de frequência

O sistema de distribuição e as instalações de geração conectadas ao mesmo devem em condições normais de operação e em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

### 3.10.2.5 Fator de potência

Para unidade consumidora ou conexão entre distribuidoras com tensão inferior a 230KV, o fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, de acordo com a regulamentação vigente (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

Para realização dos trabalhos foi necessário analisar os conceitos e critérios de qualidade da energia na rede elétrica, levando em conta todos os objetivos específicos, conceitos básicos, indicadores e normatizações relacionadas.

Dessa maneira, foi possível ter um panorama sobre a envolvida e uma melhor visualização do sistema. Foi realizada a indicadores de qualidade de energia e feita uma análise dos parâmetros de energia. A descrição dos métodos será detalhada nas próximas seções.

### **4.1 Metodologias de medição**

A medição será realizada por um analisador de energia Sultech® ST 9600 – R seguindo as recomendações de medição da norma Prodist Módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018), onde os sinais monitorados devem utilizar sistemas de medição cuja as informações coletadas devem ser processadas por meio computacional.

### **4.2 Metodologias de análise**

A norma da Prodist Módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018) recomenda medir um espectro de qualidade de energia elétrica que compreende desde a tensão em regime permanente, harmônicos na qual a análise será realizada até a 15º ordem harmônica, uma vez que a partir dela as amplitudes são desprezíveis, desequilíbrio de tensão, variação de frequência, variação de tensão de curta duração e fator de potência,

Os dados colhidos serão confrontados com os níveis de distorções harmônicas de tensão recomendados pela norma que está disposto na Tabela 9.

### **4.3 Metodologias para solução**

Para garantir a qualidade de energia elétrica faz-se necessário reduzir os limites ou parâmetros extrapolados pela Prodist Módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018) caso necessite de intervenção. No entanto, foram identificados problemas nos níveis de harmônicos, precisa-se de filtrar as frequências harmônicas acima dos níveis normatizados. Portanto será proposto um projeto de filtros capaz de reduzir as frequências harmônicas e melhorar a QEE.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Resultados das medições

Com todos os dados coletados nas medições (ANEXO A, B, C e D), foi possível analisar as variações de tensões em regime permanente, desequilíbrio de tensão, amplitudes das distorções harmônicas, variação da frequência e fator de potência (FP).

#### 5.1.1 Tensões em regime permanente

Comparando os valores obtidos aos valores admissíveis, segundo a Prodist módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018), observa-se que os valores de níveis de tensão em regime permanente estão de acordo com os valores admissíveis.

Os valores analisados de variação de tensão em regime permanente (ANEXO D) serão indicados respectivamente na Tabela 10.

Tabela 10 – Variação de tensão de leitura 127V

<b>Fase</b>	<b>Tensão mínima</b>	<b>Tensão média</b>	<b>Tensão Máxima</b>	<b>Enquadramento (ver Tabela 7)</b>
<b>R</b>	123	124	124,4	Adequada
<b>S</b>	127,6	127,6	128	Adequada
<b>T</b>	130,2	130,6	131,1	Adequada

Fonte: o autor.

Pela comparação com a norma, observam-se que os valores analisados de tensão em regime permanente estão de acordo com os valores adequados que está disposto na Tabela 7.

#### 5.1.2 Desequilíbrio de tensão

Comparando os valores obtidos aos valores admissíveis, segundo a Prodist módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018), observa-se que os limites referentes a desequilíbrio de tensão estão de acordo com os valores admissíveis.

Os valores analisados de desequilíbrio de tensão (ANEXO D) serão indicados respectivamente na Tabela 11.



Tabela 11 – Desequilíbrio de tensão

	<b>% Valor medido</b>	<b>% Prodist</b>
<b>Sequência +</b>	0	3
<b>Sequência -</b>	1	3

Fonte: o autor.

Pela comparação da norma Prodist módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018), observa-se que os valores analisados de desequilíbrio de tensão estão de acordo com os limites que correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição que está disposto na Tabela 8.

### 5.1.3 Distorções harmônicas

Foi possível analisar as amplitudes das distorções harmônicas variando na ordem 3°, 5°, 7°, 9°, 11°, 13° e 15°.

Comparando os valores obtidos aos valores admissíveis, segundo a Prodist módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018), observa-se que as distorções estão abaixo dos limites de distorção de tensão admissível. A resolução da norma não cita limites de corrente, portanto só são comparados com a resolução os valores de tensão.

Os valores analisados das taxas de distorção harmônica (ANEXO A) individual de tensão ( $DHI_V$ ) serão indicados respectivamente na Tabela 12.

Tabela 12 - Taxa distorção harmônica total de tensão em porcentagem da fundamental 380V

<b>DHT<sub>V</sub> % Fase R</b>	<b>DHT<sub>V</sub> % Fase S</b>	<b>DHT<sub>V</sub> % Fase T</b>	<b>DHT<sub>V</sub> % Prodist</b>
0.3	0.3	0.26	10

Fonte: o autor.

Os valores analisados das taxas de distorção harmônica (ANEXO B) individual de corrente ( $DHI_I$ ) e taxa de distorção harmônica total de corrente ( $THD_I$ ) serão indicados na Tabela 13, mas para isso é necessário utilizar a norma IEEE 519 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2014), porque a Prodist dispõe somente de distorções harmônicas de tensão.

Portanto como a tensão de entrada é de 13,8KV, a distorção máxima admissível pela norma IEEE 519 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2014)

é seguindo a Tabela 4. No entanto é necessário ter o valor da relação de corrente de curto circuito pela corrente máxima consumida pela carga  $I_{CC}/I_L$ .

$$I_{NOM} = \frac{P_{TRAFO}}{220\sqrt{3}} \quad (6)$$

$$I_{NOM} = \frac{300KVA}{220\sqrt{3}}$$

$$I_{NOM} = 787,29A$$

Onde  $P_{TRAFO}$  é a potência do transformador e  $V$  é a tensão nominal.

$$I_{CC} = \frac{I_{NOM}}{Z\%} \quad (7)$$

$$I_{CC} = \frac{787,29}{0,05}$$

$$I_{CC} = 15,74KVA$$

$$I_L = \frac{P_{ATIVA}}{220\sqrt{3}} \quad (8)$$

$$I_L = 698A$$

$$\frac{I_{CC}}{I_L} = \frac{15,74KA}{698} = 22.5$$

Onde:  $I_C$  é a corrente de curto circuito,  $I_L$  é a corrente na carga e  $Z\%$  é a impedância do transformador.

Tabela 13 - Taxa de distorção harmônica individual de corrente

Ordem Harmônica	DHI % Fase R	DHI % Fase S	DHI % Fase T	DHI % IEEE 519 – 2014
3	4,5	2,77	4,85	7,0
5	12,42	13,3	12,7	7,0
7	8,35	8,6	7,8	7,0
9	1,6	1,9	1,17	7,0
11	2,2	2,77	2,57	3,5
13	1,27	1,6	1,35	3,5
15	0,42	0,6	0,45	3,5

Fonte: o autor.

Pela comparação com a norma IEEE 519 – 2014 observam-se que as harmônicas de ordem 5° e 7° estão acima dos valores recomendados, sendo considerados valores normais para as harmônicas de ordem 3°, 9°, 11°, 13° e 15°.

#### 5.1.4 Variação de frequência

Comparando o valor obtido aos valores admissíveis, segundo a Prodist módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018), observa-se que a variação de frequência está de acordo com os valores admissíveis.

O valor analisado referente a variação de frequência (ANEXO C) será indicado respectivamente na Tabela 13.

Tabela 14 – Variação de frequência

Frequência medido	Frequência mínimo	Frequência máximo
60	59,9	60,1

Fonte: o autor.

Pela comparação da norma, observam-se que o valor analisado referente a variação da frequência está de acordo com os limites de frequência situados que estão dispostos na norma.

#### 5.1.5 Fator de potência

Comparando o valor obtido aos valores admissíveis, segundo a Prodist módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018) observa-se que o valor de fator de potência (FP) medido está de acordo com os valores admissíveis.

O valor analisado do fator de potência (FP) será indicado respectivamente na Tabela 15.

Tabela 15 – Valor de fator de potência

FP medido	FP mínimo	FP máximo
0,97	0,92	1

Fonte: o autor.

Pela comparação da norma, observam-se que o valor analisado de fator de potência está de acordo com os valores de referência mínimo e máximo estabelecidos pela norma. Aqui cabe ressaltar que, de acordo com responsável técnico da empresa, existe um banco de capacitores instalado à jusante do quadro de medição da concessionária, o que corrobora o enquadramento dos valores de FP medidos dentro dos limites estabelecidos em norma. Uma vez que o valor em momento algum infringiu os limites da norma, fez-se desnecessária a avaliação mais detalhada das características do banco de capacitores instalado.

## 5.2 Resultados das análises

As análises de qualidade de energia demonstradas na seção anterior mostram que os parâmetros de tensão em regime permanente, desequilíbrio de tensão, variação de frequência e fator de potência estão de acordo com os limites ou valores de referência segundo a Prodist módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). Os resultados apresentados nas análises das amplitudes das distorções harmônicas mostram que as harmônicas de ordem 5<sup>o</sup> e 7<sup>o</sup> estão acima dos valores recomendados pela norma IEEE 519 – 2014. O resultado consolidado da análise será demonstrado na Tabela 16.

Tabela 16 – Resultado consolidado da análise dos fenômenos eletromagnéticos

Fenômeno Eletromagnético	Status
Tensão em Regime Permanente	Conforme
Desequilíbrio de Tensão	Conforme
Distorção Harmônica de Corrente	<b>Não-Conforme</b>
Variação de Frequência	Conforme
Fator de Potência	Conforme

Fonte: O autor.

Para corrigir os problemas referente as harmônicas de ordem 5<sup>o</sup> e 7<sup>o</sup> será projetado um filtro, que serão demonstrados nas seções a seguir.

### 5.2.1 Dimensionamento do filtro shunt sintonizado

Para diminuir as distorções harmônicas no sistema, é necessário mitigar as harmônicas de maior relevância da planta. E uma das formas é realizar o projeto de filtro shunt sintonizado em série, ou seja, RLC.

Segundo Teixeira, D., (2009), os harmônicos de ordem mais baixa possuem, em geral, maiores amplitudes, e em consequência é mais barato utilizar filtros para cada um desses harmônicos do que utilizar um único filtro capaz de filtrar todos harmônicos, portanto as harmônicas a serem filtradas serão a de 5ª e 7ª ordem.

O primeiro passo é dimensionar o capacitor para corrigir o fator de potência para menor frequência da rede, a fundamental, e distribuí-los entre os filtros projetados. Em seguida calcular o valor do capacitor, indutor e resistor.

O memorial de cálculo da correção do fator de potência e dos componentes dos filtros será descrito nas seções abaixo.

### 5.2.2 Cálculo da correção do fator de potência

O cálculo dos capacitores será baseado nos valores medidos da potência ativa e potência reativa (ANEXO C).

$$P_{ativa} = 266.10KW$$

$$Q_{inicial} = 66,38KVar$$

Sendo  $P_{ativa}$  a potência ativa e  $Q_{inicial}$  a potência reativa inicial

Onde a potência aparente do sistema é dada pela raiz quadrada da soma da  $P_{ativa}$  e  $Q_{inicial}$  ao quadrado.

$$S = \sqrt{P_{ativa}^2 + Q_{inicial}^2} \quad (9)$$

$$S = \sqrt{266.10^2 + 66,38^2} = 274,25KVA$$

Onde  $S$  é a potência aparente.

Portanto o fator de potência inicial é resultante da razão da  $P_{ativa}$  pela  $S$  conforme Fórmula 5.

$$Fp_{inicial} = \frac{P_{ativa}}{S}$$

$$Fp_{inicial} = \frac{266,10}{274,25} = 0,97$$

Nota-se que o fator de potência está acima do limite mínimo exigido pela norma Prodist módulo 8 que é de 0,97 para unidade consumidora com tensão inferior a 230KV (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

No entanto o projeto compreende a correção do fator de potência para 0,99, onde os cálculos da potência reativa final e o valor do capacitor serão descritos a seguir.

Para isso é necessário determinar o ângulo do fator de potência novo.

$$\phi_{novo} = \cos^{-1} \cdot Fp_{final} \quad (10)$$

$$\phi_{novo} = \cos^{-1} \cdot 0,99$$

$$\phi_{novo} = 8,10^\circ$$

Sendo  $Fp_{final}$  igual ao fator de potência corrigido de 0,99.

Assim a potência reativa final é resultante da multiplicação da tangente do ângulo novo pela potência ativa do sistema.

$$Q_{final} = \operatorname{tg}\phi_{novo} \cdot P_{ativa} \quad (11)$$

$$Q_{final} = \operatorname{tg}8,10^\circ \cdot 266,38$$

$$Q_{final} = 37,91\text{KVar}$$

Onde  $Q_{final}$  é a potência reativa final.

Contudo o valor do capacitor em KVar que deve ser adicionado ao circuito para correção do fator de potência é dado pela diferença da potência reativa inicial pela potência reativa final.

$$Q_{AD} = Q_{inicial} - Q_{final} \quad (12)$$

$$Q_{AD} = 66,38 - 37,91$$

$$Q_{AD} = 28,47\text{KVar}$$

Onde o  $Q_{AD}$  é o valor da potência reativa fornecida pelo capacitor em  $KVar$

Vale ressaltar que a potência reativa calculada deve ser dividida pela quantidade de filtros que serão utilizados. Neste caso, será dividido entre dois filtros, um para o filtro de quinta harmônica e sétima harmônica.

Os valores calculados de potência reativa, potência aparente, fator de potência e capacitores seguem na Tabela 17.

Tabela 17 - Valores de potência, fator de potência e reativo fornecido pelos capacitores

Pot. Aparente (KVA)	F <sub>p</sub> INICIAL	F <sub>p</sub> FINAL	Q <sub>AD</sub> TOTAL (KVar)	Qtde de Filtros	Q <sub>AD</sub> INDIVIDUAL (KVar)
125,31	0,97	0,99	28,47	2	14,23

Fonte: o autor.

No entanto devem-se pegar valores comerciais de capacitores de acordo com o catálogo de um fabricante. Nota-se que o valor de  $14,23 KVar$  não é comercializado, portanto será utilizado o capacitor de  $15KVar$ .

### 5.2.3 Cálculo do capacitor

Para um tamanho de filtro total de  $30 KVar$ , e que a capacitância está igualmente dividida entre todos os ramos do filtro, tem se:

$$C = \frac{Q_{AD\ INDIVIDUAL}}{\omega \cdot v^2} \quad (13)$$

$$C = \frac{15\text{KVar}}{(2 \cdot \pi \cdot 60) \cdot (220^2)} = 822,08\mu\text{F}$$

Sendo:

C: capacitância.

Q<sub>AD</sub> INDIVIDUAL: potência reativa individual fornecida pela capacitância em  $KVar$ .

$\omega$ : é a frequência em *rad/s* dado por  $2\pi f$ .

V: é a tensão entre fase-fase.

Em que a frequência utilizada é a fundamental do sistema, já que o fator de potência foi corrigido para essa frequência.

#### 5.2.4 Cálculo do indutor

Para o dimensionamento do indutor, deve-se levar em conta o fator de dessintonia que é o grau de dessintonização do filtro, isto é, de quanto o filtro poderá operar fora da frequência nominal sintonizada.

Segundo Arrillaga e Watson (2003), este fator inclui três efeitos como:

- Variação na frequência fundamental da fonte.
- Variação na capacitância e indutância causada por envelhecimento e temperatura.
- Desvio de sintonia na montagem causada pela tolerância de fabricação dos reatores e capacitores.

No entanto a norma IEEE 1531 indica que a dessintonia deve ser feita 6% abaixo da frequência harmônica (IEEE std 1531, 2003 apud GLODZIENSKI, MASCARI e PAZINATO 2011).

Portanto para frequência de 282Hz da quinta harmônica e 402Hz da sétima harmônica tem-se:

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (14)$$

Onde  $f_o$  é a frequência de ressonância,  $L$  o indutor e  $C$  o capacitor.

$$282 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_5 822,08 \cdot 10^{-6}}}$$

$$L_5 = 0,387\text{mH}$$

$$402 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_7 822,08 \cdot 10^{-6}}}$$

$$L_7 = 0,190\text{mH}$$



### 5.2.5 Cálculo do resistor

Para dimensionar o resistor é necessário determinar o fator de qualidade  $Q$ , em geral um fator  $Q$  mais alto é selecionado, com o objetivo de redução de perdas, embora um fator de qualidade alto signifique em boa seletividade e perdas baixas, isto não poderia ser exageradamente elevado, já que isto implicaria em um sistema muito pouco amortecido. O fator de qualidade para o filtro passivo sintonizado está geralmente entre 20 e 60 (TEIXEIRA, 2009).

Portanto para o fator de qualidade admitido de 50 tem se:

$$R = \frac{1}{\omega_n \cdot C \cdot Q} \quad (15)$$

Onde  $\omega_n$  é a frequência harmônica,  $C$  é a capacitância e  $Q$  o fator de qualidade.

$$R_5 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 282.0,00082208 \cdot 50}$$

$$R_5 = 13,73 \text{ m}\Omega$$

$$R_7 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 402.0,00082208 \cdot 50}$$

$$R_7 = 9,63 \text{ m}\Omega$$

Os valores dos filtros sintonizados para a quinta harmônica e sétima harmônica seguem na Tabela 18.

Tabela 18 - Valores de capacitância, indutância e resistência

C (Faraday)	L (mH)	L (mH)	R (mΩ)	R (mΩ)
	5 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>
	Harmônica	Harmônica	Harmônica	Harmônica
0,00082208	0,387	0,190	13,73	9,63

Fonte: o autor.

### 5.3 Resultados da simulação do sistema com o filtro

O filtro passivo sintonizado é sensível a variações de seus componentes  $R$ ,  $L$  e  $C$ , contudo deve-se especificar o fator de qualidade no qual determina a largura de banda do filtro e a profundidade de corte na frequência desejável.

Com o objetivo de expressar a seletividade do filtro para 5ª e 7ª harmônica, serão demonstrados abaixo os cálculos de impedância para cada frequência no qual o filtro foi sintonizado.

Segundo Teixeira (2011), a equação da impedância do filtro é dada por:

$$|Z(j\omega)| = \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2} \quad (16)$$

Onde  $R$  é a resistência,  $\omega$  a frequência em rad/s e  $C$  a capacitância.

$$|Z(j\omega)|_{5^a} = \sqrt{0,01373^2 + (1771,85 \times 0,000387 - 1/1771,85 \times 0,00082208)^2}$$

$$|Z(j\omega)|_{5^a} = 0,0168\Omega$$

$$|Z(j\omega)|_{7^a} = \sqrt{0,00963^2 + (2525,84 \times 0,000190 - 1/2525,84 \times 0,00082208)^2}$$

$$|Z(j\omega)|_{7^a} = 0,00978\Omega$$

Os valores de impedância de cada filtro seguem na Tabela 19.

Tabela 19 - Valores de impedância

Z ( $\Omega$ ) 5ª (282 Hz)	Z ( $\Omega$ ) 7ª (402Hz)
0,0168	0,00978

Fonte: o autor.

A banda passante  $PB$  no filtro sintonizado é definida como sendo a faixa de frequência na qual a impedância do filtro é igual ou inferior a  $\sqrt{2}.R$  equivalente na frequência de ressonância no qual é relacionado pela expressão:

$$PB = \frac{\omega_h}{Q} \quad (17)$$

Onde  $\omega_h$  é a frequência de sintonia em rad/s e  $Q$  o fator de qualidade.

Os valores de  $PB$  seguem na Tabela 20

Tabela 20 - Valores de faixa de frequência

PB (5ª harmônica)	PB (7ª harmônica)
35rad/s	50rad/s

Fonte: o autor.

Nota-se pelos cálculos que o filtro é seletivo devido sua baixa impedância na frequência sintonizada e a pequena faixa de frequência, isso acontece devido ao alto fator de qualidade, que pode ser definido pela razão entre a reatância indutiva ou capacitiva  $X_h$  na frequência de ressonância, pela resistência  $R$ .

#### 5.4 Discussão

As análises dos parâmetros de qualidade de energia demonstradas nas seções anteriores mostram que tensões em regime permanente, fator de potência, desequilíbrio de tensão e variação de frequência estão de acordo com os limites ou valores recomendados pela Prodist Módulo 8 (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). No entanto nota-se que as harmônicas de corrente 5ª e 7ª ordem extrapolam os limites máximos permitidos pela norma IEEE 519 (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2014).

Os resultados obtidos para comprovar a seletividade dos filtros foram satisfatórios, pois a baixa impedância e pequena faixa de frequência demonstram que eles atuam nas frequências em que deseja filtrar.

## 6 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação da situação atual de um consumidor industrial com relação qualidade de energia elétrica. Foram apresentados os tipos de parâmetros e indicadores responsáveis pela qualidade de energia. A partir das recomendações das normas internacionais (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 2014) e nacionais (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018) foi possível avaliar a situação atual da empresa.

Observou-se que as tensões em regime permanente, desequilíbrio de tensão, variação de frequência e fator de potência estão de acordo com os limites ou valores recomendados pela norma.

Já a taxa de distorção harmônica total de tensão e individual estão abaixo dos níveis máximos recomendados pela norma. No entanto para as distorções harmônicas de corrente, observa-se um desequilíbrio das componentes harmônicas de 5ª e 7ª ordem, isso se deve ao fato da operação vários motores de indução com partida via inversor de frequência que possui carga não linear devido ao chaveamento que controla rapidamente grande quantidade de energia a altas frequências no qual caracteriza a onda como periódica e não senoidal, com conteúdo harmônico.

Com o propósito de solução foi à aplicação da técnica de sintonia do filtro harmônico que tem o objetivo de atenuar as distorções harmônicas. Analisando os cálculos da seção 5.3, conclui-se que o filtro sintonizado é adequado para filtragem das duas frequências harmônicas, devido à baixa impedância e pequena faixa de frequência.

Atualmente os engenheiros estão a cada dia voltando suas atenções e pesquisas para o tema que hoje é conhecido como qualidade de energia elétrica. Este trabalho de conclusão do curso é um primeiro passo para pesquisas que envolvem o controle de qualidade de energia em um ambiente industrial. Para dar continuidade a este estudo, sugere-se como trabalhos futuros a serem desenvolvidos a simulação de softwares de análise de circuitos e sua comparação com resultados medidos.

## REFERÊNCIAS

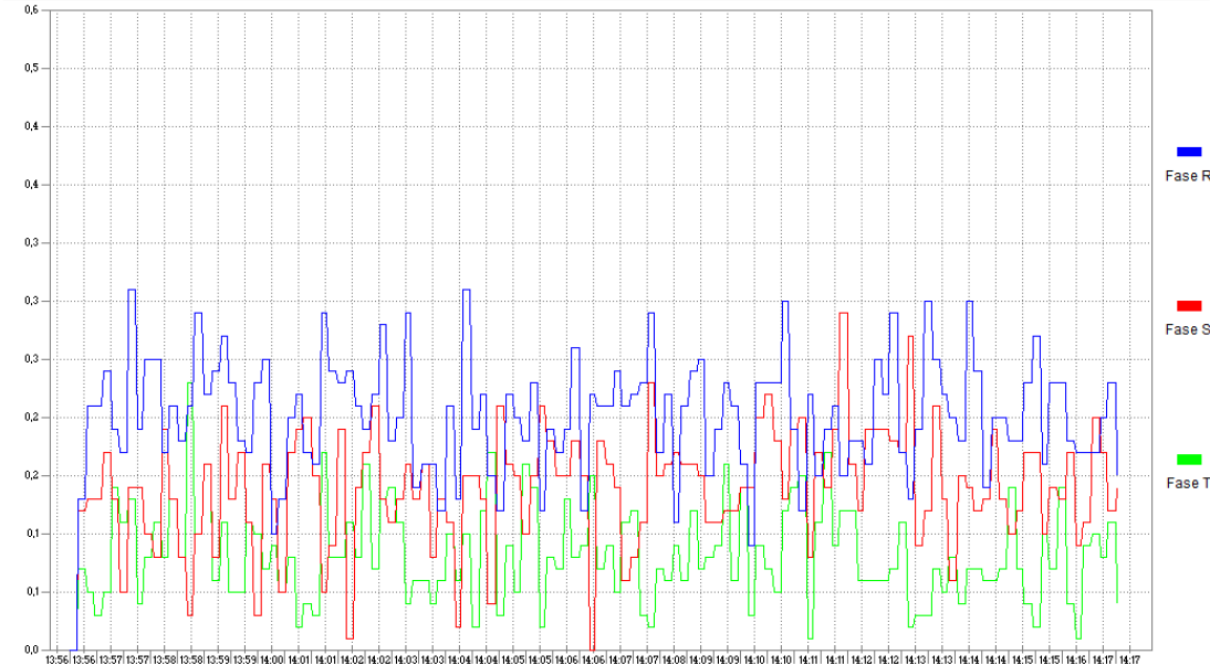
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Módulo 8 - Procedimentos de Distribuição de Energia no Sistema Elétrico Nacional de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Revisão 10 01/01/2018. Disponível em: <[http://www.anel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8\\_Revis%C3%A3o.pdf](http://www.anel.gov.br/arquivos/PDF/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o.pdf). Acesso em: 15 abr. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 414 de 9 de setembro de 2010**. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/brean2010414.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2019.
- ARRILLAGA, J.; WATSON, N. **Power system harmonics**. Chichester: Jhon Wiley & Sons, 2003.
- BORDIM, J. R. G. **Instalação de banco de capacitores em sistemas de distribuição de energia elétrica para correção de fator de potência e regulação de tensão: projeto e simulação computacional**. Monografia (Bacharelado em Engenharia elétrica) - Universidade de São Paulo- Escola de engenharia de São Carlos-Departamento de engenharia elétrica, 2011.
- BRONZEADO, H. et al. Uma proposta de nomenclatura nacional de termos e definições Associados à Qualidade de Energia Elétrica. In: SEMINÁRIO BRASILEIRO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 1997, Itajubá. **Anais...** Itajubá: EFEI, 1997.
- CAPELLI, A. **Energia elétrica: Qualidade E Eficiência Para Aplicações Industriais**. São Paulo: Erica, 2013.
- DECKMANN, Sigmar M; POMILIO José A. **Avaliação da qualidade da energia elétrica**. Universidade federal de Campinas, Campinas – SP, 2010.
- DUALALIBE, P. **Capacitores: instalações e correção de fator de potência**. Consultoria para uso de energia elétrica – Centro federal de educação tecnologia Celso Sucknow da Fonseca, 2000.
- DUGAN, R. C. et al. **Electrical power systems quality**. 2. ed. New York: McGrawHill, 2002. 521 p.
- GLODZIENSKI, Guilherme; MASCARI, Leandro; PAZINATO, Marlon S. **Fluxo harmônico em planta comercial na presença de grupo gerador**. Curitiba, PR: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011
- FERREIRA, D.D. **Análise de distúrbios elétricos em sistema de potência**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.
- IEEE Std. 446. **Recommended practice for emergency and standby power systems for industrial and commercial applications**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1995.
- IEEE Std. 519. **Recommended practice for emergency and standby power systems**. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014.

- KIMBARK, E. W., **Direct current transmission**, New York: John wiley & sons, 1971.Vol I.
- MARTINHO, Edson. **Distúrbios da energia elétrica**. 2. ed. São Paulo: Editora Érica, 2009. 140 p.
- TEIXEIRA, A. G. C. **Estudo de distorções harmônicas no acionamento de máquinas elétricas**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.
- TEXEIRA, Douglas A. **Análise das distorções harmônicas – Estudo de caso de um sistema industrial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Programa de pós-graduação em engenharia elétrica. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- OLESKOVICZ, M. **Qualidade da energia elétrica**. Notas de Aula. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- VELLOSO, Fernando C. **Informática: conceitos básicos**. 8ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2011.

## ANEXO A – Gráficos das distorções harmônicas de tensão

Gráfico – 1 Distorção harmônica total de tensão

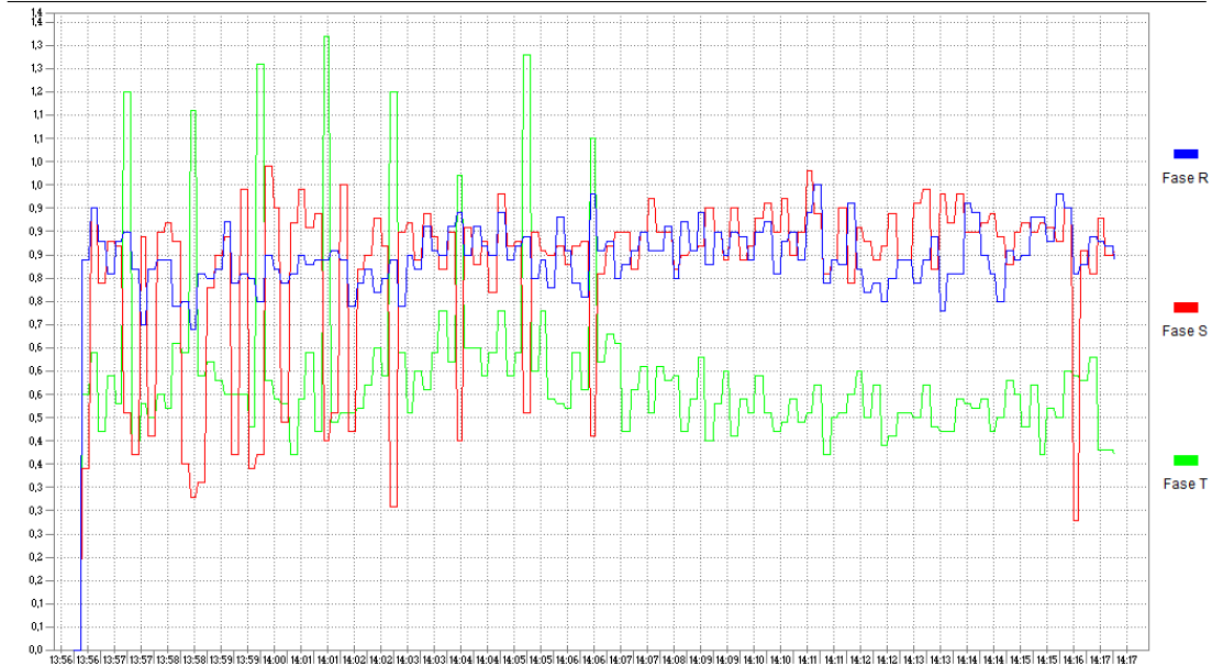
Equipamento:0042.A-ST9600R



Fonte: SULTEC® ST9600-R

Gráfico – 2 Distorção harmônica tensão de 3ª ordem

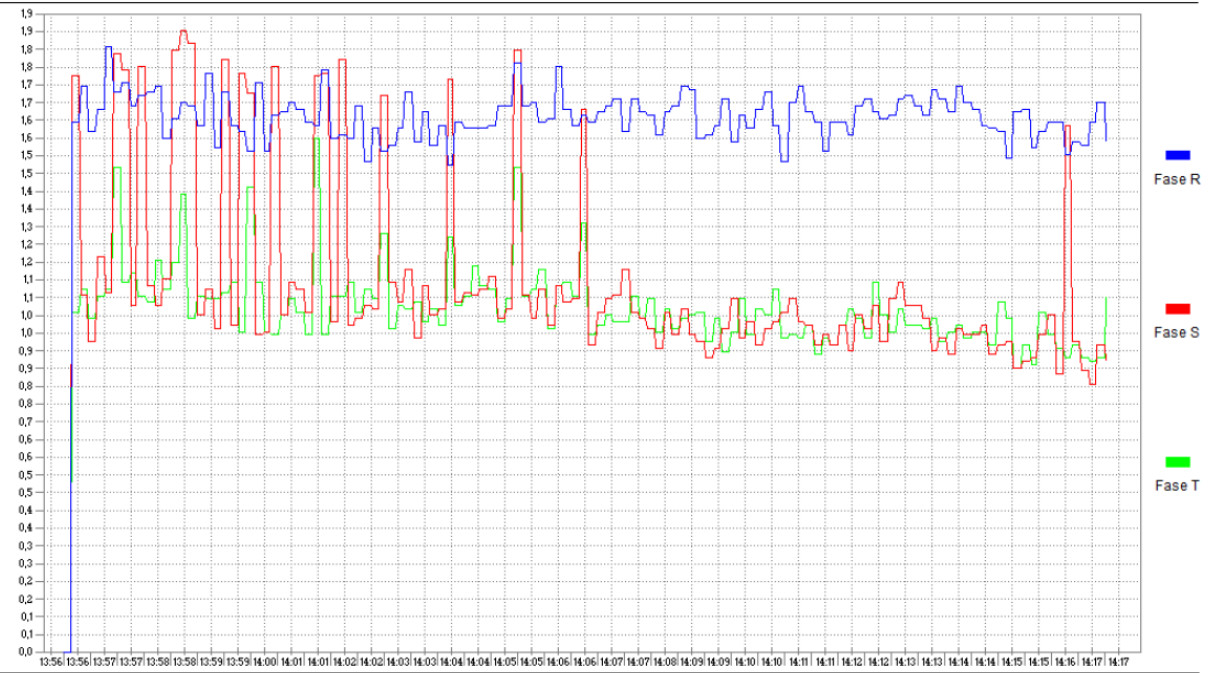
Equipamento:0042.A-ST9600R



Fonte: SULTEC® ST9600-R

Gráfico – 3 Distorção harmônica tensão de 5ª ordem

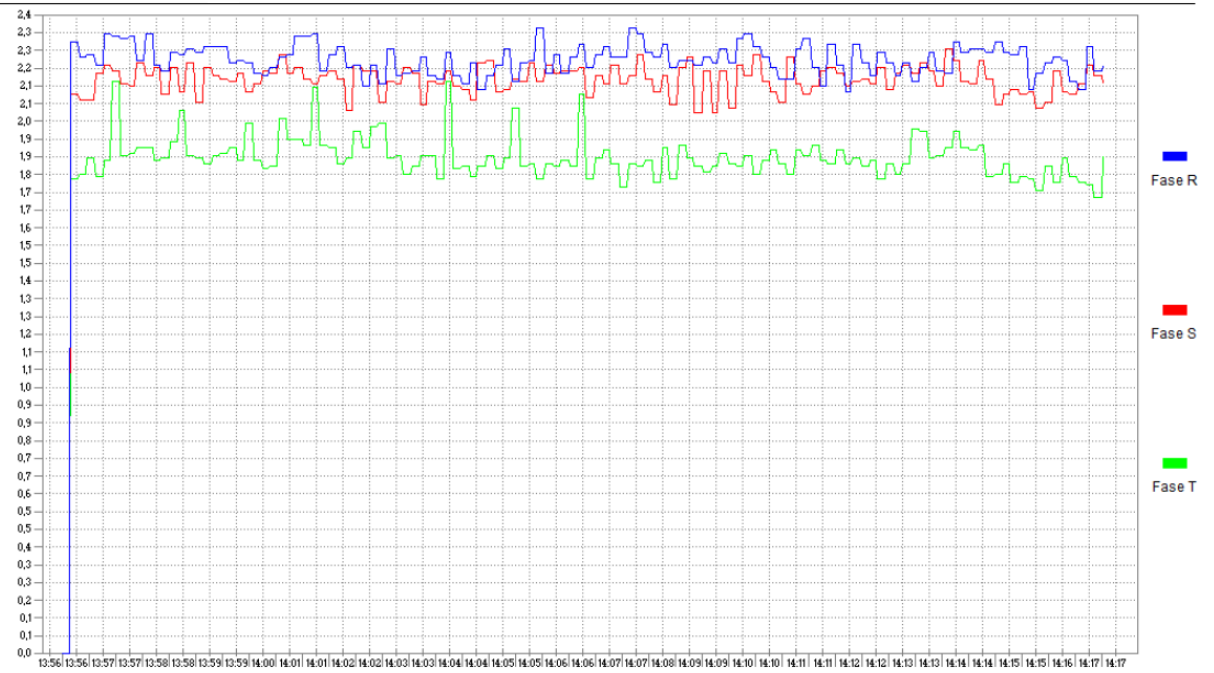
Equipamento:0042\_A-ST9600R



Fonte: SULTECH® ST9600-R

Gráfico – 4 Distorção harmônica tensão de 7ª ordem

Equipamento:0042\_A-ST9600R

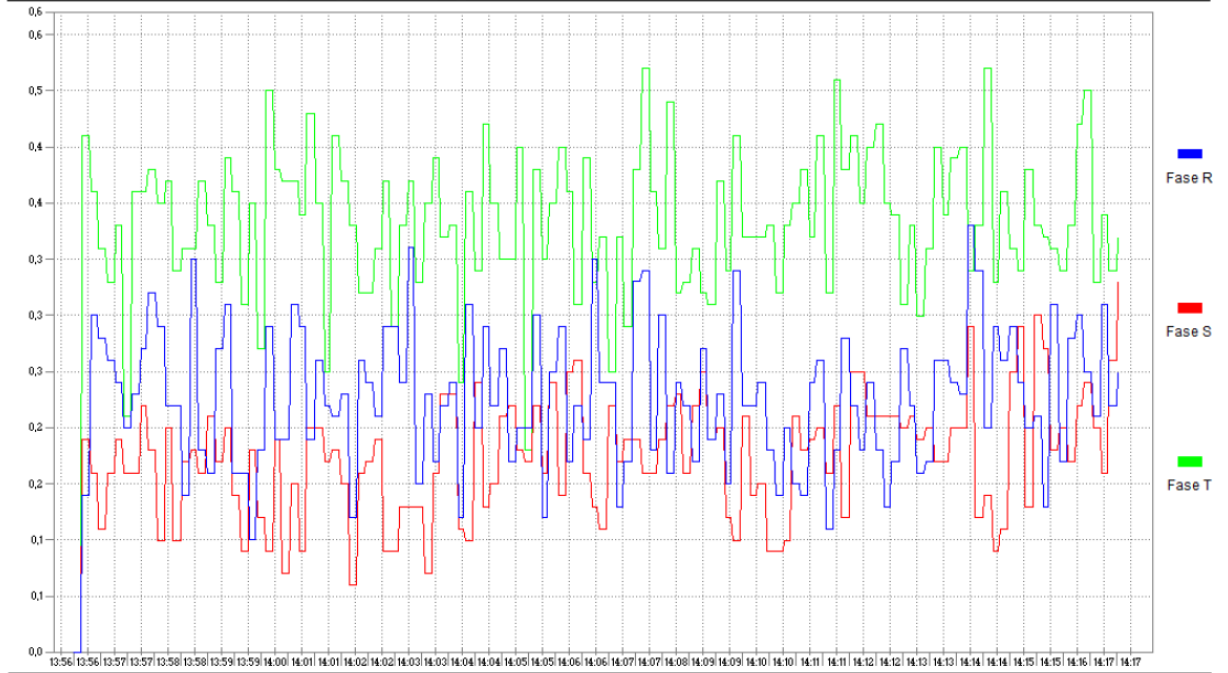


Fonte: SULTECH® ST9600-R



Gráfico – 5 Distorção harmônica tensão de 9ª ordem

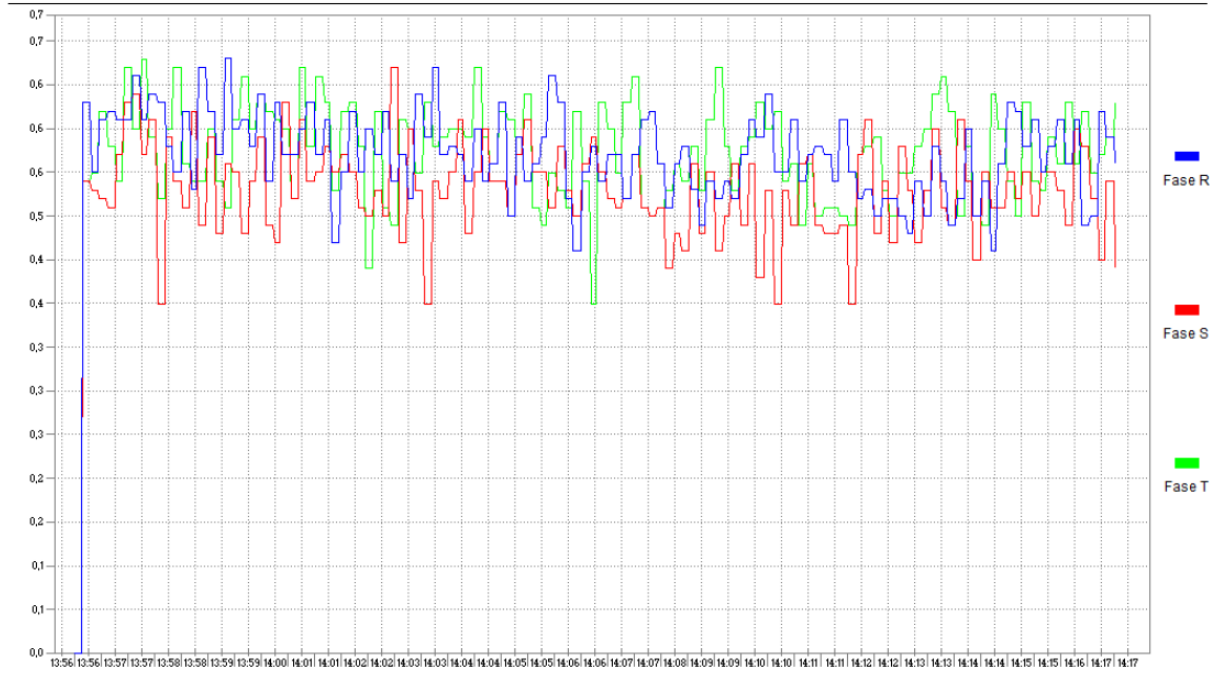
Equipamento:0042.A-ST9600R



Fonte: SULTECH® ST9600-R

Gráfico – 6 Distorção harmônica tensão de 11ª ordem

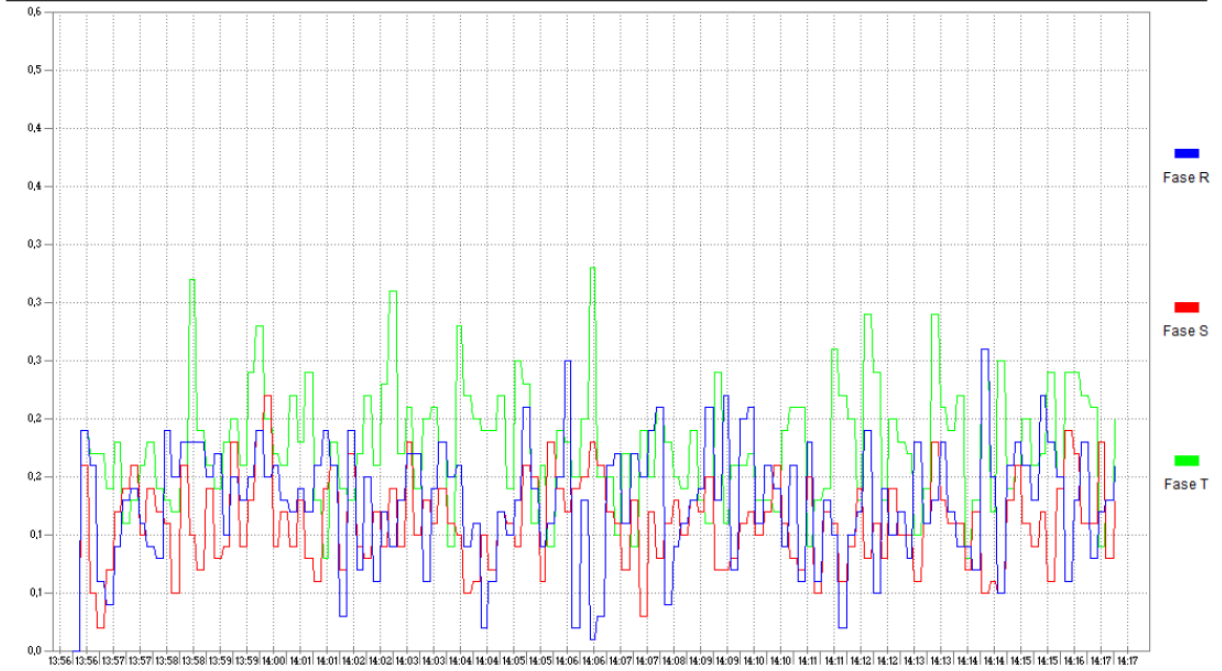
Equipamento:0042.A-ST9600R



Fonte: SULTECH® ST9600-R

Gráfico – 7 Distorção harmônica tensão de 13ª ordem

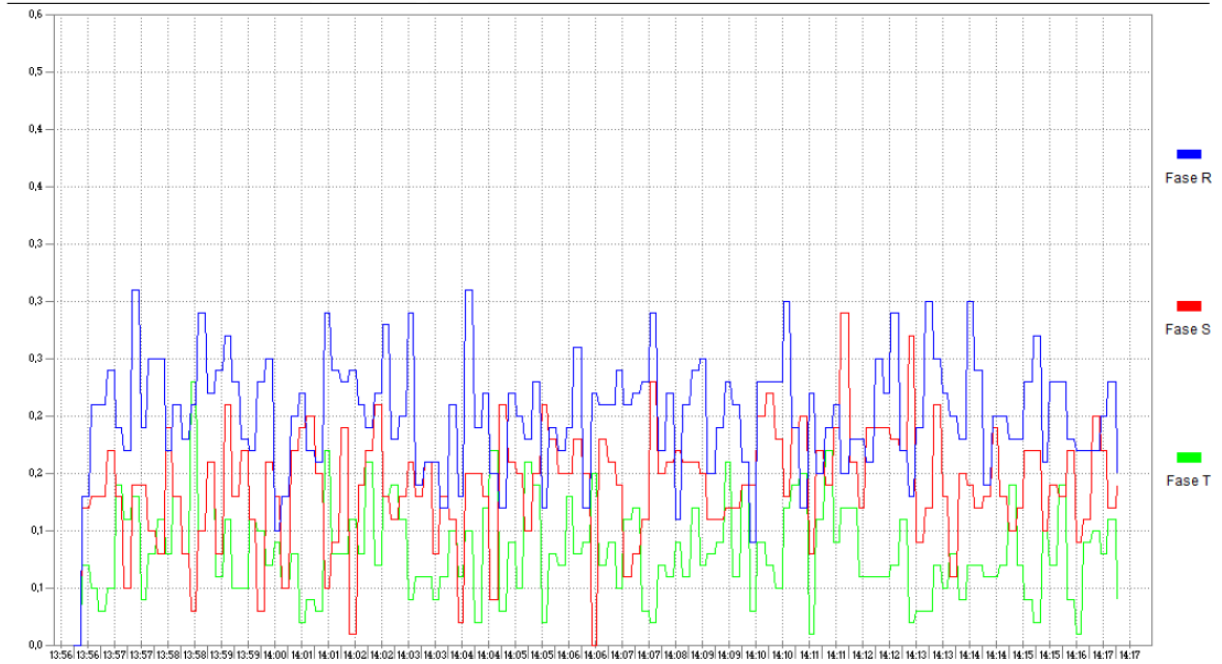
Equipamento:0042.A-ST9600R



Fonte: SULTEC® ST9600-R

Gráfico – 8 Distorção harmônica tensão de 15ª ordem

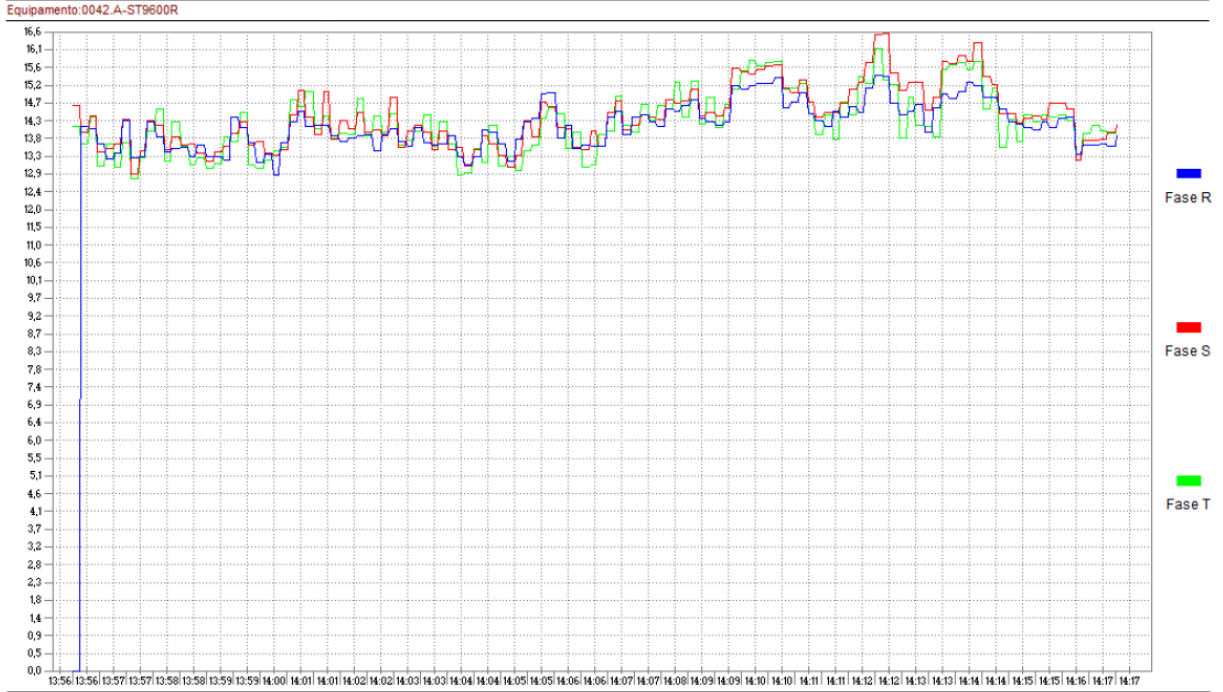
Equipamento:0042.A-ST9600R



Fonte: SULTEC® ST9600-R

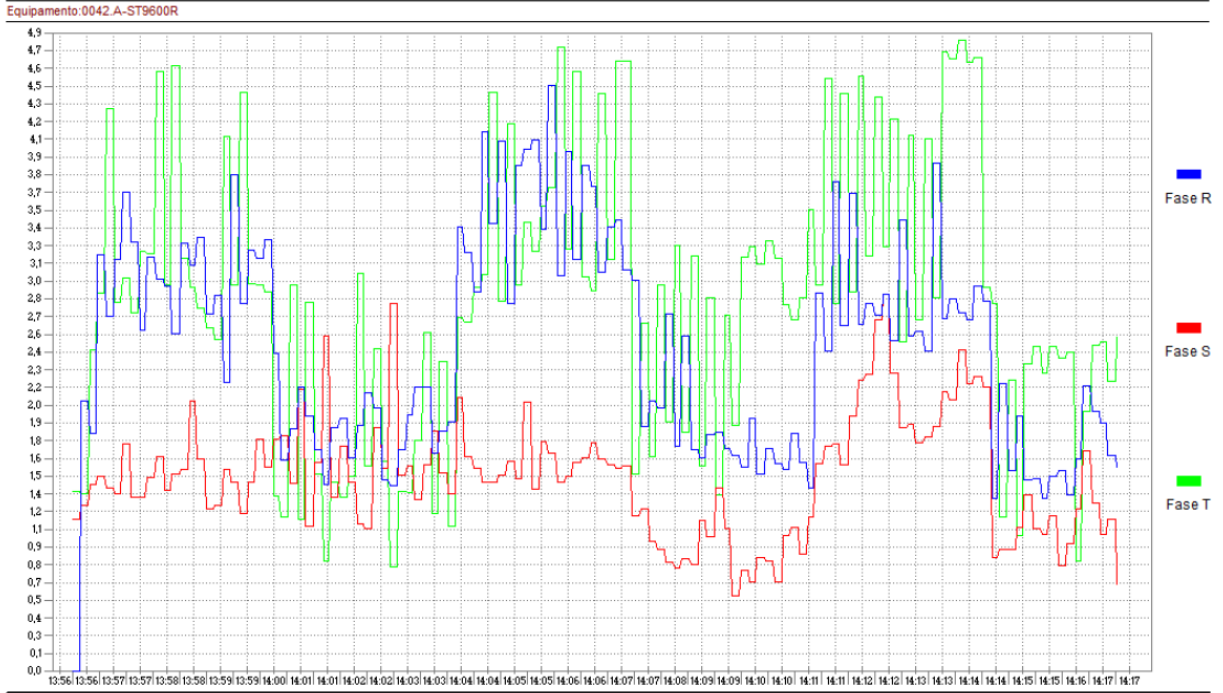
## ANEXO B – Gráfico das distorções harmônicas de corrente

Gráfico – 9 Distorção harmônica total de corrente



Fonte: SULTECH® ST9600-R

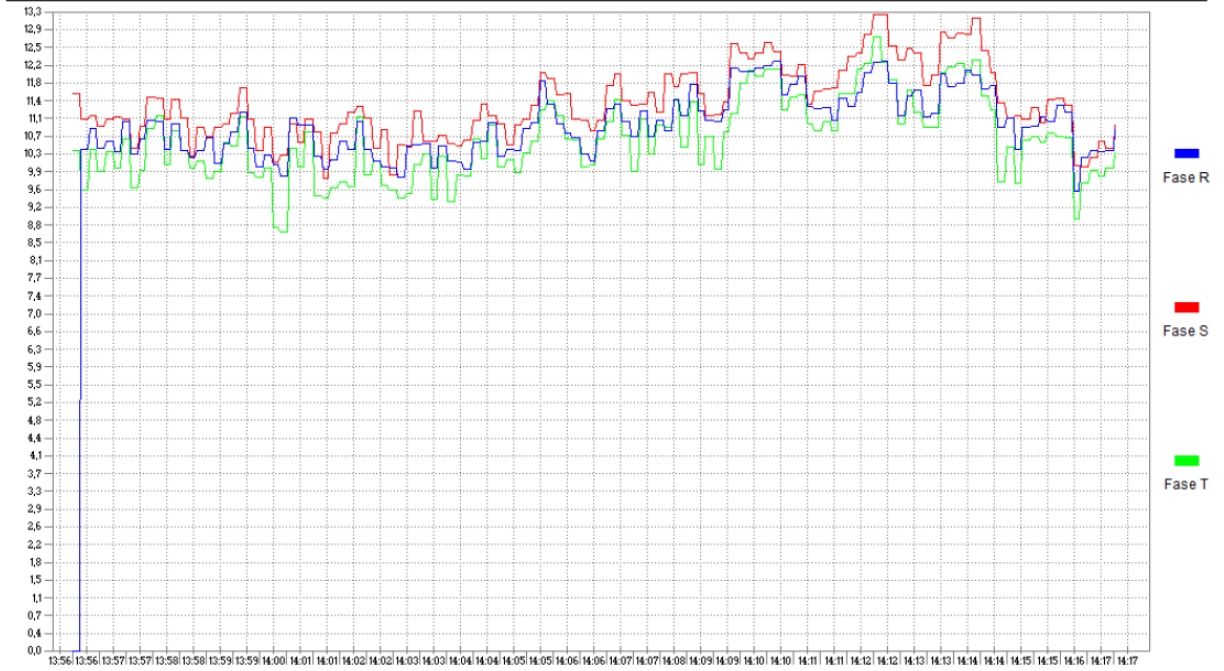
Gráfico – 10 Distorção harmônica corrente 3ª ordem



Fonte: SULTECH® ST9600-R

Gráfico – 11 Distorção harmônica corrente 5ª ordem

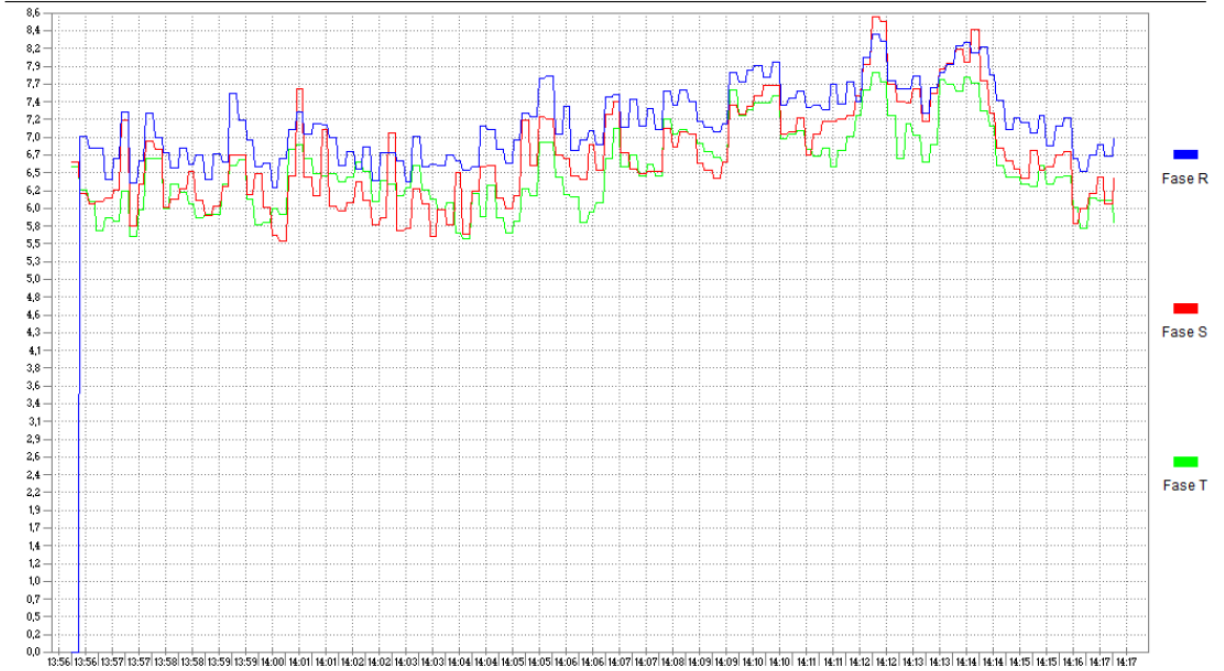
Equipamento:0042\_A-ST9600R



Fonte: SULTEC® ST9600-R

Gráfico – 12 Distorção harmônica corrente 7ª ordem

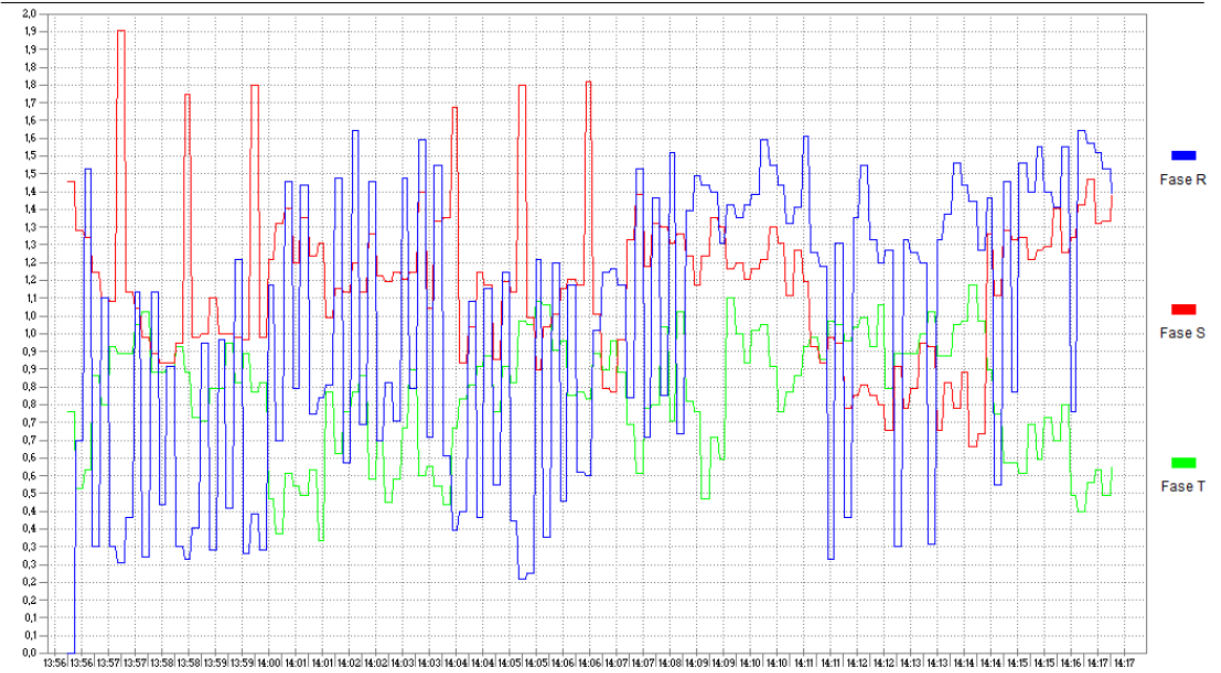
Equipamento:0042\_A-ST9600R



Fonte: SULTEC® ST9600-R

Gráfico – 13 Distorção harmônica corrente 9ª ordem

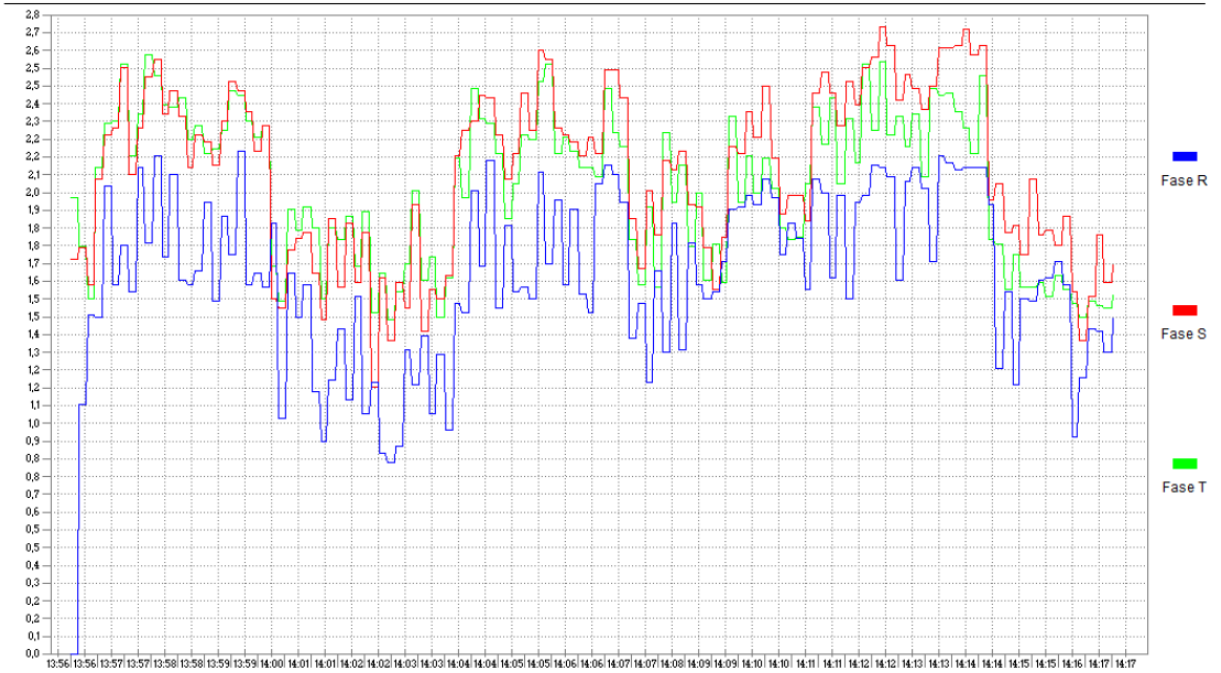
Equipamento:0042.A-ST9600R



Fonte: SULTEC® ST9600-R

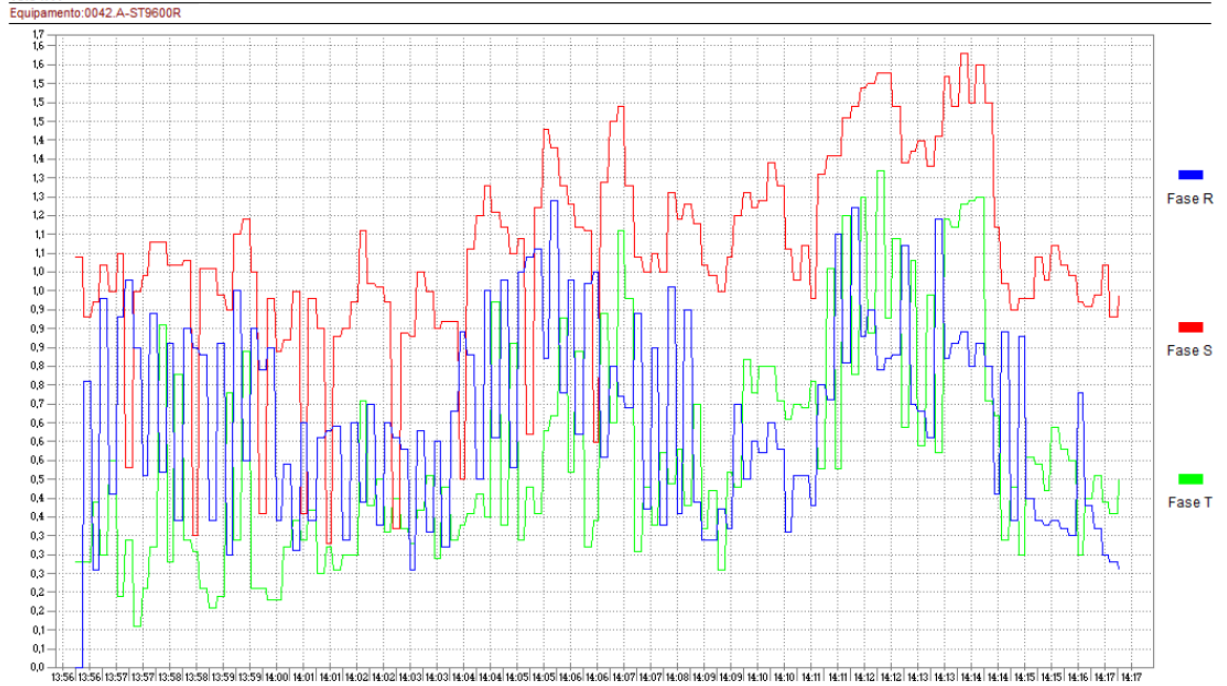
Gráfico – 14 Distorção harmônica corrente 11ª ordem

Equipamento:0042.A-ST9600R



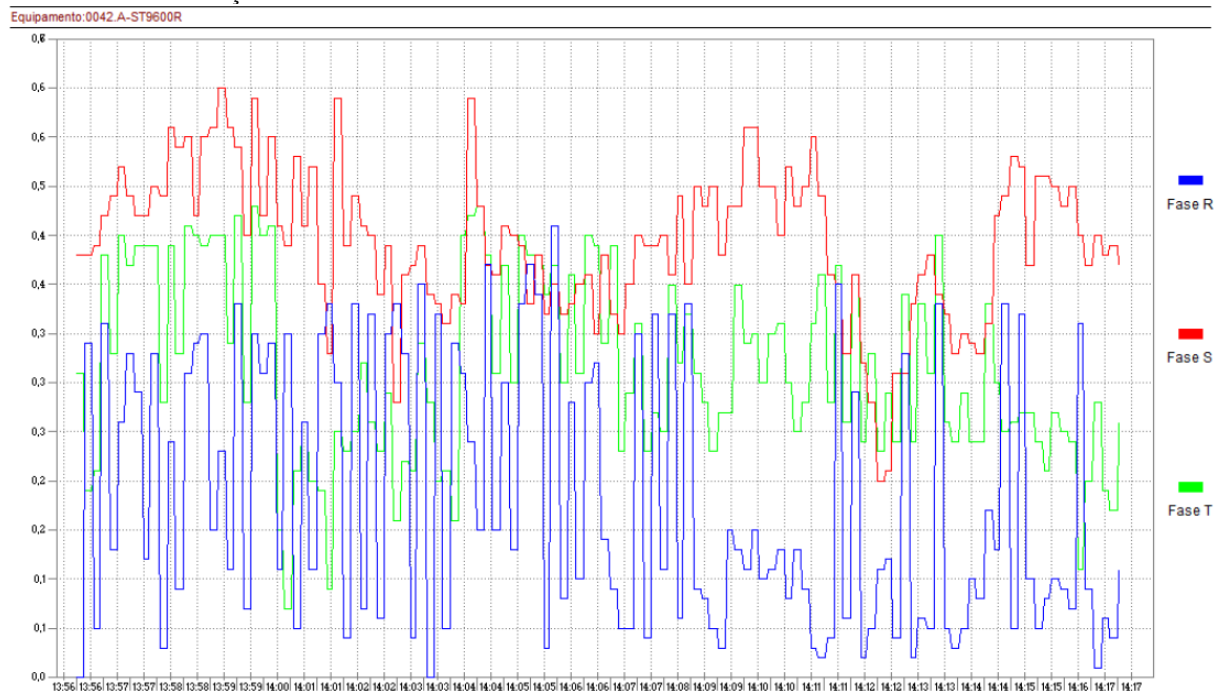
Fonte: SULTEC® ST9600-R

Gráfico – 15 Distorção harmônica corrente 13ª ordem



Fonte: SULTECH® ST9600-R

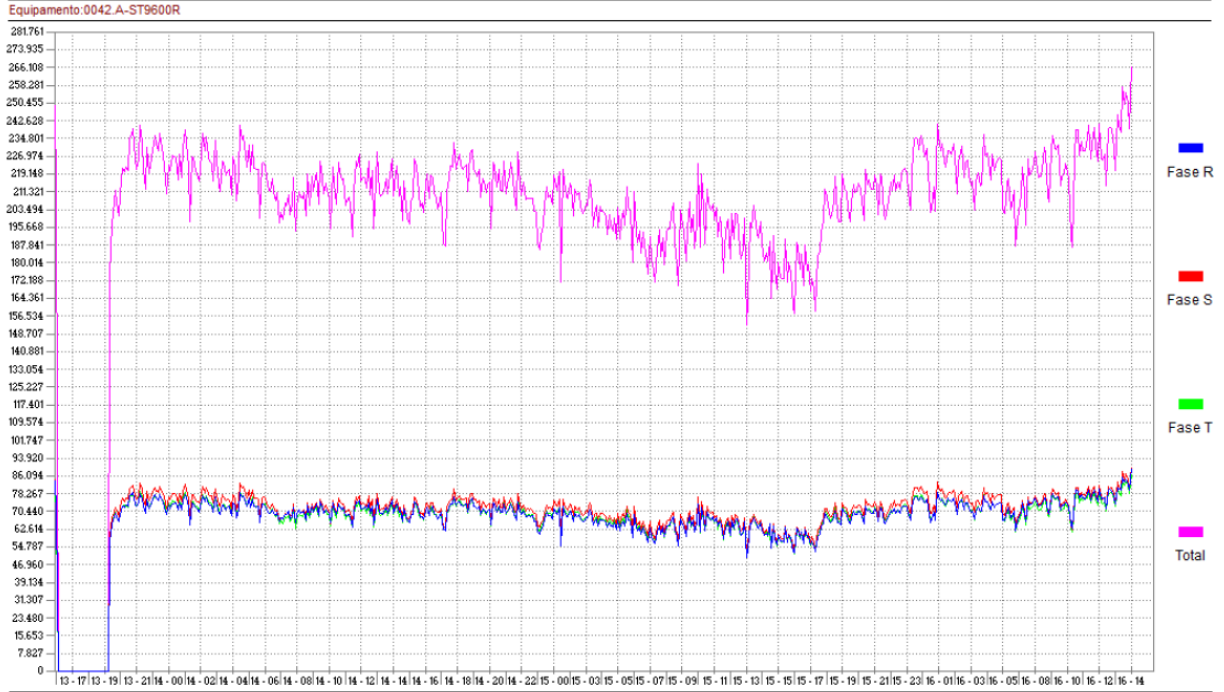
Gráfico – 16 Distorção harmônica corrente 15ª ordem



Fonte: SULTECH® ST9600-R

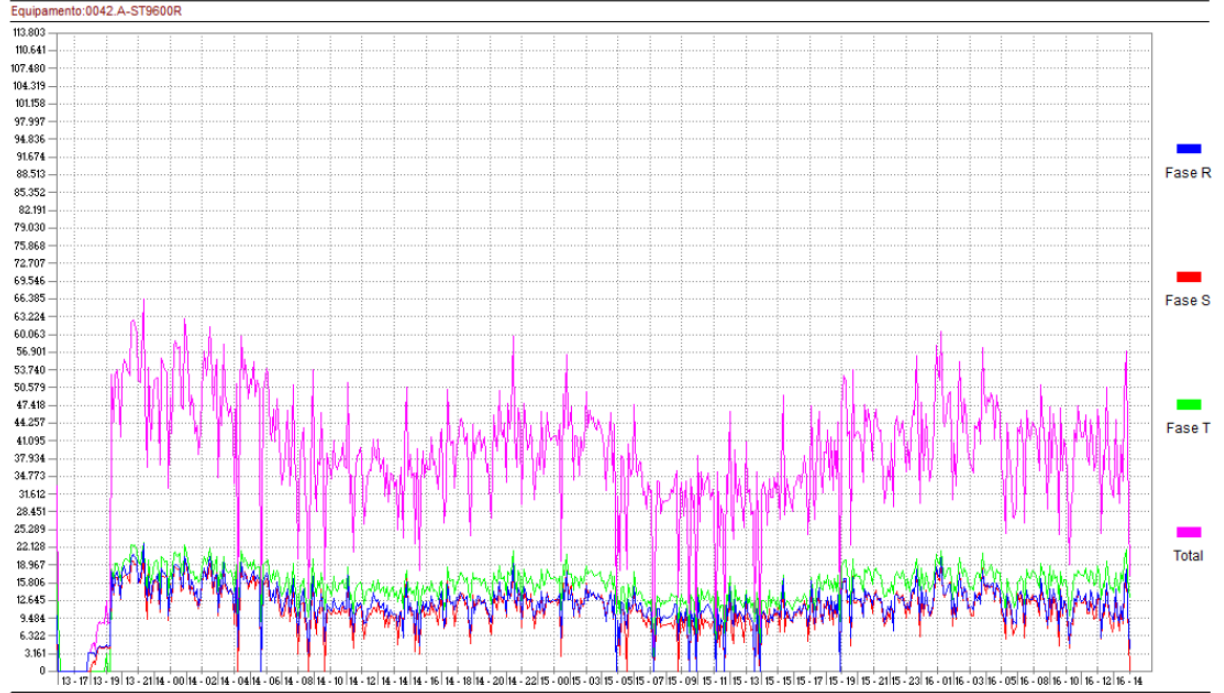
### ANEXO C – Gráfico de potência ativa, reativa, aparente e frequência

Gráfico – 17 Potência ativa em Watts



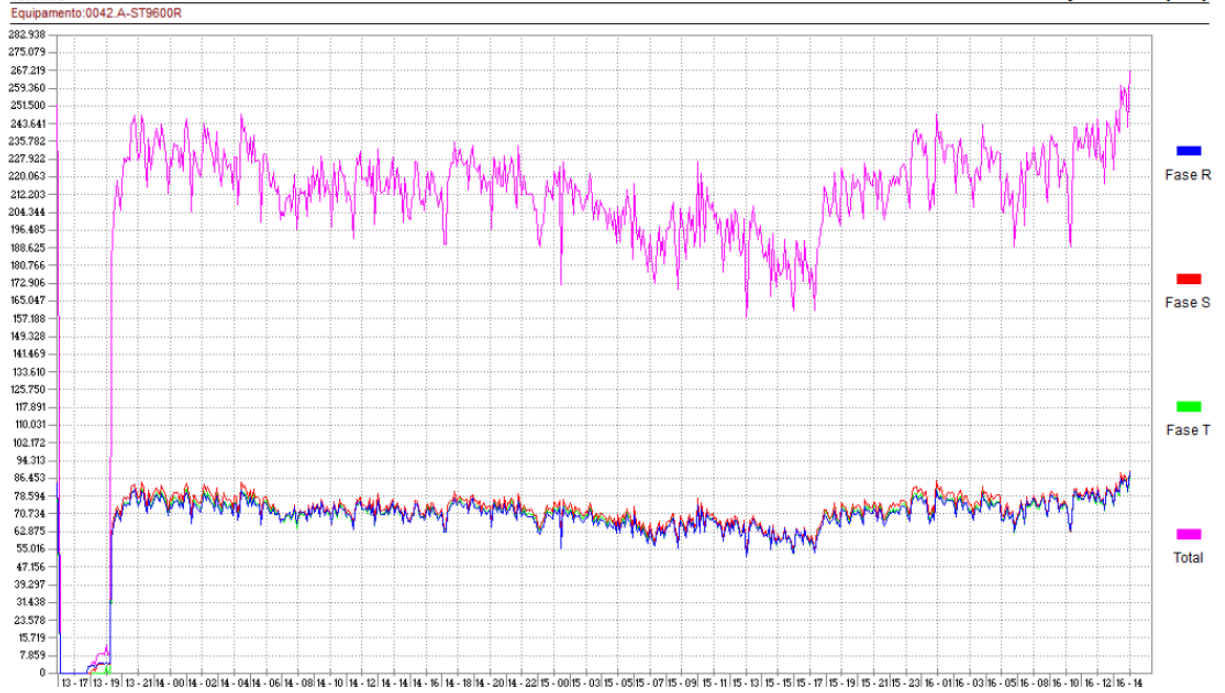
Fonte: SULTHEC® ST9600-R

Gráfico – 18 Potência reativa em VAR



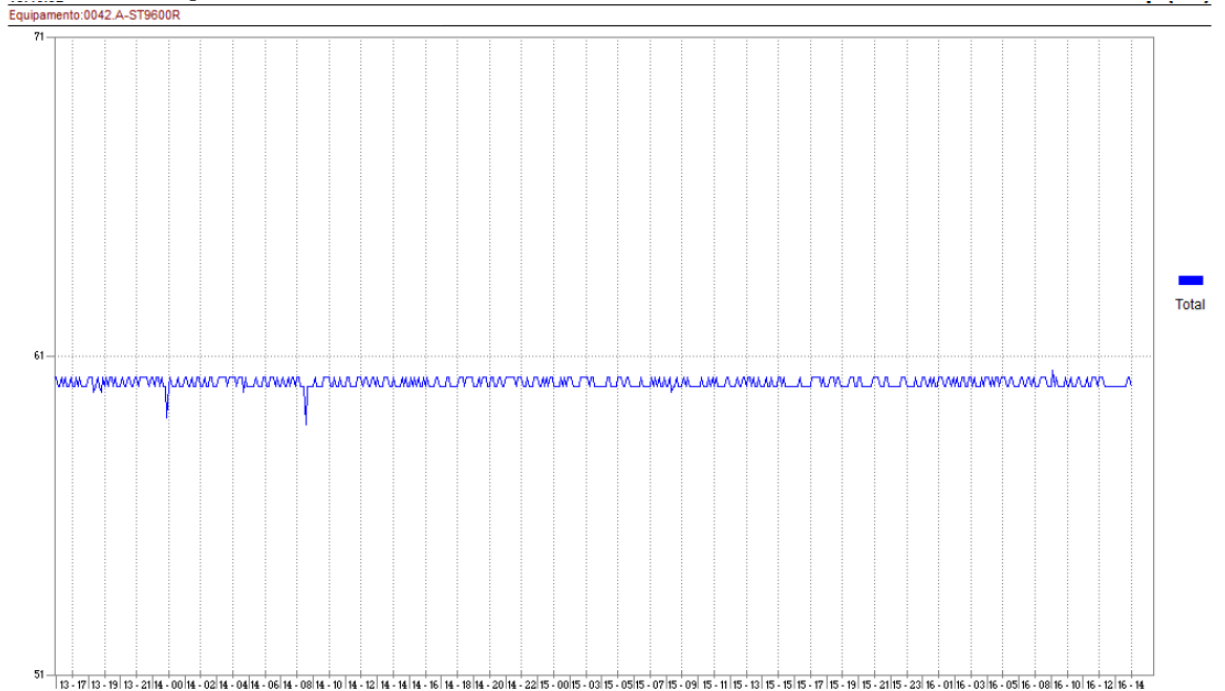
Fonte: SULTHEC® ST9600-R

Gráfico – 19 Potência aparente em VA



Fonte: SULTHEC® ST9600-R

Gráfico – 20 Frequência em Hz



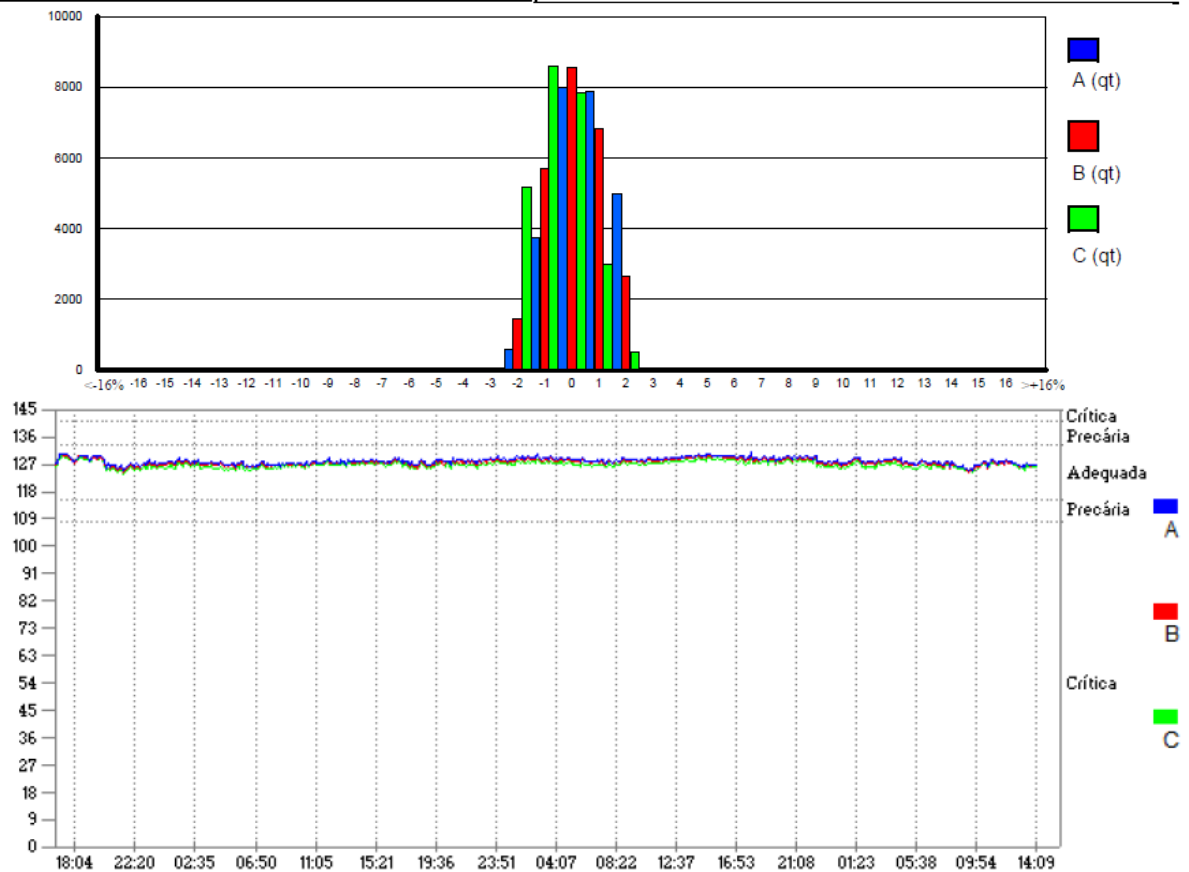
Fonte: SULTHEC® ST9600-R



## ANEXO D – Gráfico de tensão em regime permanente

Gráfico – 21 Desequilíbrio e variação de tensão

	Fase A	Fase B	Fase C	Faixa	Fase A	Fase B	Fase C	Faixa	Fase A	Fase B	Fase C
Medidas Total	25.189	25.189	25.189	<-16%	0	0	0	+1%	7.876	6.813	2.979
Medidas Zero	(0) 0,00%	(0) 0,00%	(0) 0,00%	--16%	0	0	0	+2%	4.987	2.661	525
Faltas de Energia	(0) 0,00%	(0) 0,00%	(0) 0,00%	--15%	0	0	0	+3%	1	0	0
Medidas Válidas	(25.189) 100,0%(25.189)	(25.189) 100,0%(25.189)	(25.189) 100,0%	--14%	0	0	0	+4%	0	0	0
				--13%	0	0	0	+5%	0	0	0
Adequadas	(25.189) 100,0%(25.189)	(25.189) 100,0%(25.189)	(25.189) 100,0%	--12%	0	0	0	+6%	0	0	0
Precária Inferior	(0) 0,00%	(0) 0,00%	(0) 0,00%	--11%	0	0	0	+7%	0	0	0
Precária Superior	(0) 0,00%	(0) 0,00%	(0) 0,00%	--10%	0	0	0	+8%	0	0	0
Total - DRP	(0) 0,00%	(0) 0,00%	(0) 0,00%	--9%	0	0	0	+9%	0	0	0
				--8%	0	0	0	+10%	0	0	0
Critica Inferior	(0) 0,00%	(0) 0,00%	(0) 0,00%	--7%	0	0	0	+11%	0	0	0
Critica Superior	(0) 0,00%	(0) 0,00%	(0) 0,00%	--6%	0	0	0	+12%	0	0	0
Total - DRC	(0) 0,00%	(0) 0,00%	(0) 0,00%	--5%	0	0	0	+13%	0	0	0
				--4%	0	0	0	+14%	0	0	0
Tensão Mínima	124,4	124,0	123,3	--3%	0	0	41	+15%	0	0	0
Tensão Média	128,0	127,6	127,6	--2%	593	1.439	5.181	+16%	0	0	0
Tensão Máxima	131,1	130,6	130,2	--1%	3.740	5.715	8.614	>+16%	0	0	0
				0%	7.992	8.561	7.849				



Fonte: SULTHEC® ST9600-R