

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**João Pedro Lopes Campos  
Marcus Vinícius Pereira de Souza**

**QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E CORREÇÃO DO FATOR  
DE POTÊNCIA.**

**VOLTA REDONDA  
2020**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E CORREÇÃO DO  
FATOR DE POTÊNCIA.**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica.

Discente:

João Pedro Lopes Campos

Marcus Vinícius Pereira de Souza

Orientador:

Prof.M.Sc. Cláudio Márcio de  
Freitas da Silva

**VOLTA REDONDA  
2020**

## FOLHA DE APROVAÇÃO

Discente:

João Pedro Lopes Campos  
Marcus Vinícius Pereira de Souza

Título da monografia:

QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E CORREÇÃO DO FATOR DE  
POTÊNCIA.

Orientador:

Prof.M.Sc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva

Banca Examinadora:

---

Prof.M.Sc. Cláudio Márcio de Freitas da Silva

---

Prof.Esp. Bruno Moreira da Silva

---

Prof.M.SC. Maurício Ferreira Haddad

## **DEDICATORIA**

Este trabalho é todo dedicado aos meus pais, pois é graças ao seu esforço que hoje posso concluir o meu curso.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela minha vida, e por me ajudar a ultrapassar todos os obstáculos encontrados ao longo do curso.

Aos meus pais, que me incentivaram nos momentos difíceis e compreenderam a minha ausência enquanto eu me dedicava à realização deste trabalho.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional.

## RESUMO

O fator de potência é um índice que indica a eficiência na utilização da energia elétrica. Este índice é monitorado pelas concessionárias de energia elétrica e os consumidores industriais que apresentam um baixo fator de potência estão sujeitos a multas incidentes mensalmente nas faturas. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo de viabilidade técnica e financeira da correção de fator de potência utilizando filtros ativos de harmônicos. Para o desenvolvimento do estudo de caso, escolheu-se uma indústria do setor nuclear, onde foi projetado um sistema de correção do fator de potência fundamentado na caracterização da empresa, nos registros de consumo proveniente de faturas e relatórios de memória de massa, e em medições in loco e de forma pontual. Foram coletados dados de consumo anteriores, no período de 12 meses. Também foram realizadas medições das grandezas elétricas com carga, visando a análise das variáveis elétricas. Com a instalação do sistema, visa-se elevar o fator de potência durante todo o ciclo diário de operação da indústria, elevando o fator de potência para 0,99. Portanto, a utilização de sistemas de correção de fator de potência por meio de filtros ativos, conforme metodologia de projeto exposta, é considerada tecnicamente e financeiramente viável.

**Palavras-chave:** Fator de potência. Filtro ativo. Filtro compensador de harmônicos.

## ABSTRACT

The Power factor is a rate that indicates the efficiency in the use of electric energy. This rate is monitored by the electricity concessionaire and the industrial consumers that pose a low power factor are subject to monthly fines on invoices. The aim of this paper is to present a technical and financial feasibility study of power factor correction using active harmonic filters. To the development of the case study, it was therefore chosen an industry of the nuclear sector, where a system of power factor correction was design grounded on the description of the company, in consumption records stemming of invoices and reports of mass storage, through in loco and isolated measurements. Past consumption data were collected, in 12-month period. Measurements electrical values with cargo were also conducted, seeking electrical variables analysis. With the system installation, the aim is to raise the power factor to 0,99. Therefore, the use of power factor correction systems through active filters, according to the project methodology it is deemed technically and financially viable.

**Keywords:** Power factor, Power factor correction, active harmonic filter.

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>26</b>
1.1. Problema Abordado e Justificativa.....	27
1.2. Objetivos.....	27
1.2.1. Objetivo Geral .....	27
1.2.2. Objetivo Específico .....	28
1.3. Metodologia.....	28
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>29</b>
2.1. Qualidade de Energia.....	29
2.1.1. Importância da Qualidade de Energia .....	29
2.1.2. Energia Reativa na Rede.....	30
2.1.3. Fator de Potência .....	32
2.1.4. Sistema Elétrico de Potência do Consumidor.....	39
2.1.5. PRODIST .....	40
2.1.5.1. Tensão em Regime Permanente (DRP e DRC).....	40
2.1.5.2. Fator de Potência (FP – Indicador PRODIST) .....	41
2.1.5.3. Distorções Harmônicas (DTT) .....	41
2.1.5.4. Desequilíbrio de Tensão (FD) .....	41
2.1.5.5. Flutuação de Tensão (PST e PLT).....	42
2.1.5.6. Variação de Frequência .....	42
2.1.5.7. Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD).....	42
2.2. Conceito de Cargas Não-Lineares .....	43
2.3. Problemas Típicos de Qualidade de Energia Elétrica .....	45
2.4. Harmônicos.....	48
2.4.1. Taxa de Distorção Harmônica (THD) .....	49
2.4.2. Efeitos dos Índices Harmônicos em Instalações Elétricas .....	50
2.4.1. Filtros Harmônicos .....	51
2.5. Correção de Fator de Potência.....	53
<b>3. FILTRO ATIVO ACTIVAR.....</b>	<b>54</b>
3.1. Benefícios do Sistema .....	54
3.2. Controlador.....	54
3.3. Controle .....	55
3.4. Medições.....	55
<b>4. ESTUDO DE CASO .....</b>	<b>56</b>

4.1. Sistema e Tecnologia de Monitoramento .....	57
4.2. Monitoramento de Indicies Harmônicos .....	61
4.2.1. Monitoramento do Traf#01 .....	62
4.2.2. Monitoramento do Traf#02 .....	63
4.2.3. Monitoramento do Traf#03 .....	64
4.2.4. Monitoramento do Traf#04 .....	65
4.2.5. Monitoramento do Traf#05 .....	66
4.2.6. Monitoramento do Traf#06 .....	67
4.2.7. Monitoramento do Traf#07 .....	68
4.3. Análise dos Dados Obtidos .....	69
4.4. Resultados Esperados .....	82
<b>5. CONCLUSÃO.....</b>	<b>84</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>87</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Tensão, corrente e potência instantânea (COTRIM, 2008). .....	34
Figura 2: Triângulo das Potências (ISONI, 2004). .....	35
Figura 3: Tetraedro das potências (ISONI, 2004). .....	37
Figura 4: Onda distorcida "T" e suas componentes de 1ª a 5ª ordem (MORENO, 20001)...	49
Figura 5: Controlador ACTIVAR.....	55
Figura 6: Diagrama unifilar do controlador.....	56
Figura 7: Diagrama unifilar .....	58
Figura 8: Instrumento modelo PURE de fabricação ELSPEC .....	59
Figura 9: Instrumento modelo G4500 de fabricação ELSPEC .....	60
Figura 10: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#01 .....	62
Figura 11: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#02 .....	63
Figura 12: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#03 .....	64
Figura 13: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#04 .....	65
Figura 14: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#05 .....	66
Figura 15: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#06 .....	67
Figura 16: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#07 .....	68
Figura 17: Traf#01 .....	71
Figura 18: Traf#02.....	72
Figura 19: Traf#03.....	73
Figura 20: Traf#04.....	74
Figura 21: Traf#05.....	75
Figura 22: Traf#06.....	76
Figura 23: Traf#07.....	77
Figura 24: Gráfico de consumo faturado em horário de ponta e fora de ponta. ....	78
Figura 25: Gráfico de consumo reativo excedente em horário de ponta e fora de ponta. ...	79
Figura 26: Gráfico financeiro de consumo faturado em horário de ponta e fora de ponta..	80
Figura 27: Gráfico financeiro do consumo reativo excedente em horário de ponta e fora de ponta .....	81
Figura 28: Diagrama unifilar do compensador estático livre de transientes .....	86

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1: Indicadores de fator de potência.....	69
Tabela 2: Indicadores de THDV ou DTT.....	69
Tabela 3: Indicadores de THDI ou DTI.....	69
Tabela 4: Indicadores de Frequência.....	69
Tabela 5: Indicadores de Fator Desequilíbrio.....	69
Tabela 6: Indicadores de Regulação de Tensão.....	70
Tabela 7: Indicadores de Carregamento.....	70
Tabela 8: Definição dos conceitos.....	70
Tabela 9: Indicadores do Traf#01.....	71
Tabela 10: Indicadores do Traf#02.....	72
Tabela 11: Indicadores do Traf#03.....	73
Tabela 12: Indicadores do Traf#04.....	74
Tabela 13: Indicadores do Traf#05.....	75
Tabela 14: Indicadores do Traf#06.....	76
Tabela 15: Indicadores do Traf#07.....	77
Tabela 16: Tabela de consumo faturado em horário de ponta e fora de ponta.....	78
Tabela 17: Tabela de consumo reativo excedente em horário de ponta e fora de ponta.....	79
Tabela 18: Tabela financeira de consumo faturado em horário de ponta e fora de ponta...	80
Tabela 19: Tabela financeira de consumo reativo excedente em horário de ponta e fora de ponta.....	81
Tabela 20: Solução – Compensação em baixa tensão.....	85

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

A - Ampere

BT – Baixa Tensão

C - Capacitivo

CA – Corrente Alternada

DRP – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Precária

DRC – Duração Relativa da Transgressão de Tensão Crítica

*DIT*<sub>h</sub>% - Distorção harmônica individual de tensão de ordem h

*DTT*% - Distorção harmônica total de tensão

*DTT*<sub>p</sub>% - Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3

*DTT*<sub>i</sub>% - Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3

*DTT*<sub>3</sub>% - Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3

*FDesl* - Fator de deslocamento

*FDist* - Fator de distorção

*FDisti* - Fator de distorção de corrente

*FDistv* - Fator de distorção de tensão

*FP* - Fator de potência

F – Faraday

FD - Desequilíbrio de Tensão

FI – Fator de Impacto

h - Ordem harmônica

Hz - Hertz

h<sub>máx</sub> - Ordem harmônica máxima

h<sub>mín</sub> - Ordem harmônica mínima

*IBT*,*n* - Corrente nominal no enrolamento de baixa tensão do transformador

I – Indutivo

J – Joules

kA - Quiloampere

kV - Quilovolt

kVA - Quilovoltampere  
kVAr - Quilovoltampere reativo  
kW – Quilowatt  
MME - Ministério de Minas e Energia  
PRODIST - Procedimentos de Distribuição  
PROCEL - Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica  
PU - Por unidade  
PAC – Prestação Anual de Contas  
PST – Nível de Severidade de Cintilação de Curta Duração  
PLT – Nível de Severidade de Cintilação de Longa Duração  
QEE - Qualidade de energia elétrica  
SE - Subestação  
SEP - Sistema Elétrico de Potência  
SDMT – Sistema de Distribuição de Média Tensão  
SDAT – Sistema de Distribuição de Alta Tensão  
SDBT - Sistema de Distribuição de Baixa Tensão  
TCC - Trabalho de Conclusão de Curso  
TDD - Distorção Total da Demanda  
THD - Total Harmonic Distortion (Distorção Harmônica Total)  
*THDi* - Distorção Harmônica Total da Corrente  
*THDv* - Distorção Harmônica Total da Tensão  
UPS - No-Breaks  
*VF* - Tensão de fase  
*VL* - Tensão de linha  
VTCD - Variação de Tensão de Curta Duração  
 $\mu f$  - Micro Farad  
 $\Delta$  - Delta

## 1. INTRODUÇÃO

No Brasil existem várias instituições que trabalham regularmente com o tema eficiência energética. Na área de energia elétrica, pode-se citar o Ministério de Minas e Energia (MME), a ELETROBRÁS, responsável pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), responsável pelo Programa de Eficiência Energética das Concessionárias Distribuidoras de Energia Elétrica, entre outras (VIANA et al., 2012).

A indústria brasileira em geral tem como um expressivo custo operacional a energia elétrica, podendo representar mais de 40% de seus custos de produção (FIRJAN, 2017). No entanto, a fatura de energia elétrica é composta por diversas parcelas, como o consumo de energia ativa, contratação de demanda, dentre outros. Uma destas parcelas diz respeito ao consumo de energia reativa excedente.

De acordo com Amorim (2008), devido à falta de instrução dos responsáveis pela análise financeira destas faturas e devido à ausência de clareza nos demonstrativos mensais por parte das concessionárias de energia elétrica, empresas que não contam com pessoal especializado em seu quadro ou com uma assessoria técnica estão sujeitas a pagar multas mensais decorrentes deste consumo, resultante de um baixo fator de potência da instalação.

O fator de potência é um valor que expressa a relação entre a energia útil, que realiza trabalho, e a energia total consumida; quanto mais próximo da unidade, mais eficientemente se dá o consumo de energia. Além de acarretar um custo extra desnecessário, o baixo fator de potência tem consequências técnicas negativas, como a subutilização dos equipamentos e componentes elétricos da instalação, perdas na distribuição e queda no nível de tensão (SILVA, 2009).

Entretanto, há diversos métodos possíveis para a correção do fator de potência de uma instalação, dentre eles a correção por meio da implementação de bancos de capacitores. Estes bancos suprem a energia reativa demandada pelas cargas, fazendo com que esta energia não seja mais fornecida e cobrada pela concessionária de energia elétrica. Além do benefício financeiro obtido, os problemas no rol técnico também são mitigados.

Dentre as técnicas disponíveis no mercado, a utilização de bancos de capacitores para a correção de fator de potência é a mais disseminada dentre os consumidores industriais e comerciais (MAMEDE FILHO, 2002).

Assim sendo, é de grande importância para os gestores da indústria e para profissionais que desejam atuar na área de consultoria e assessoria no campo de instalações elétricas industriais o estudo e compreensão dos aspectos relacionados ao fator de potência e sua correção em instalações industriais.

Diante dos dados, apresenta-se relevante o estudo dos métodos de projeto e dos resultados esperados com a correção de fator de potência na devida planta industrial utilizando filtros harmônicos, tanto no âmbito técnico quanto no financeiro.

### **1.1. Problema Abordado e Justificativa**

Com os encargos pagos devido ao consumo de energia reativa e a busca por soluções para mitigar ou zerar esses custos, o uso de filtros compensadores de harmônicos se tornam essenciais para a resolução deste problema.

Devido a necessidade de corrigir o fator de potência e melhorar a qualidade de energia, esse estudo de caso se justifica através da aplicação do filtro ativo para compensação de energia reativa em contribuição para a empresa-alvo o benefício de zerar o consumo de potência reativa, zerar os encargos pagos devido a mesma e, por consequência, ter melhor qualidade de energia.

### **1.2. Objetivos**

#### **1.2.1. Objetivo Geral**

O presente trabalho tem como objetivo geral validar como a aplicação do filtro ativo para compensação de energia reativa, apresentando como solução a correção do fator de potência e melhora da qualidade de energia como forma de verificar a teoria envolvida e aplicar a solução de um projeto específico, com a finalidade de apresentar o benefício de evitar consumo de potência reativa.

### **1.2.2. Objetivo Específico**

O objetivo específico deste trabalho é a avaliação do fator de potência de um circuito com entrada em alta tensão e distribuição em baixa tensão e aplicação da devida correção.

### **1.3. Metodologia**

Esse estudo tem por finalidade realizar uma pesquisa aplicada, uma vez que utilizará conhecimento da pesquisa fundamental para resolver problemas. Para um melhor tratamento dos objetivos e melhor apreciação desta pesquisa, observou-se que ela é classificada como pesquisa exploratória. Detectou-se também a necessidade da pesquisa bibliográfica no momento em que se fez uso de materiais já elaborados: livros, artigos científicos, revistas, relatórios, documentos eletrônicos e enciclopédias na busca e alocação de conhecimento sobre os assuntos tratados neste trabalho como forma de verificar a teoria envolvida e aplicar a solução de uma aplicação específica, correlacionando tal conhecimento com abordagens já trabalhadas por outros autores.

A pesquisa assume como pesquisa documental, sendo exploratória, por sua vez, proporcionar maior familiaridade com o problema, tornando-o explícito ou construindo hipóteses sobre ele através de principalmente do levantamento bibliográfico. Por ser um tipo de pesquisa muito específica, quase sempre ela assume a forma de um estudo de caso (GIL, 2008).

Como procedimentos, podemos citar a necessidade de pesquisa bibliográfica, isso porque faremos uso de material já publicado, constituído principalmente de livros, também entendemos como um procedimento importante a pesquisa documental como procedimento técnico.

A abordagem do tratamento da coleta de dados da pesquisa documental será quantitativa, pois requer o uso de recursos e técnicas de estatística, procurando traduzir em números os conhecimentos gerados pelo pesquisador.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. Qualidade de Energia**

A qualidade de energia elétrica (QEE) é a medida que expressa o quão bem a energia elétrica pode ser usada pelos consumidores, e leva em consideração parâmetros considerados desejáveis para uma operação segura. A qualidade de energia elétrica tem várias definições que descrevem o mesmo conjunto de fenômenos que afetam a amplitude e a forma de onda da tensão e corrente. Uma definição é a frequência e severidade dos desvios na amplitude e forma de onda e da corrente. Outra definição diz que é qualquer problema na tensão, na corrente ou desvio de frequência que resulte em falha ou prejudique a operação dos equipamentos. Uma terceira definição afirma que um sistema elétrico com excelente qualidade da energia elétrica é caracterizado pelo fornecimento de energia em tensão com forma de onda senoidal pura, sem alterações em amplitude e frequência.

Quando se afirmar que uma instalação elétrica tem qualidade de energia ruim, significa que a onda da tensão e/ou a onda da corrente elétrica tem suficientes desvios das normas a ponto de prejudicar o funcionamento ou levar à falha de equipamentos. Quando uma instalação elétrica tem qualidade de energia boa, significa que o nível dos desvios das normas é baixo e, portanto, os equipamentos funcionam sem problemas.

#### **2.1.1. Importância da Qualidade de Energia**

Outro ponto que é de extrema importância na qualidade de energia é a eficiência energética. Por exemplo, permitir que um sistema tenha um conteúdo harmônico que não é desejável, o torna de baixa qualidade e pode provocar em perdas adicionais na distribuição de energia. A presença de harmônicos pode provocar perdas por efeito Joules nos condutores, transformadores e outros equipamentos.

Pode ser um pouco controverso, mas o aumento da eficiência energética levou ao uso intensivo da eletrônica de potência, o que aumentou a quantidade de harmônicos na rede. Por exemplo, o uso das fontes chaveadas substituindo as antigas fontes lineares melhorou o rendimento dos equipamentos, mas também injetou harmônicos no sistema.

Um sistema elétrico que não entrega uma amplitude de tensão adequada pode causar a falha ou mau funcionamento de um equipamento. Esse sistema que entrega um nível de

tensão inadequado também é caracterizado como de baixa qualidade, além da possibilidade de provocar maiores perdas no sistema elétrico.

As agências reguladoras de energia elétrica são as responsáveis pela definição dos indicadores que determinam se o sistema elétrico funciona dentro do que é considerado razoável em termos de qualidade de energia. Os órgãos reguladores se atentam à qualidade do produto, forma de onda, amplitude e distorção e com a qualidade do serviço, como por exemplo interrupções de energia e sua duração. No Brasil, estes indicadores e seus limites são padronizados pelo PRODIST.

Essa responsabilidade não é somente da concessionária, pois o usuário também pode poluir o sistema elétrico com a injeção de harmônicos. Os usuários podem poluir o sistema com cargas não lineares, como conversores/inversores de frequência, retificadores, no-breaks (UPS) entre outras cargas que geram correntes distorcidas que podem levar o problema da qualidade para toda a instalação.

O baixo fator de potência também caracteriza uma qualidade de energia ruim, pois a circulação de potência reativa causa perdas por efeito Joule nos condutores e transformadores.

### **2.1.2. Energia Reativa na Rede**

As demandas de potência de um sistema são dependentes das características das cargas presentes. Afirmar que a potência reativa é demandada por aparelhos (cargas) normalmente providas de bobinas ou enrolamentos ou, então, que tenham como princípio de funcionamento a formação de arcos elétricos (Mamede Filho (2002).

Os autores CODI (2004), Cotrim (2008), Creder (2007), Isoni (2004), Mamede Filho (2002) e Monteiro (2009) discorrem sobre as possíveis causas de um baixo fator de potência em uma instalação:

Motores de indução operando a vazio ou superdimensionados: os motores de indução demandam uma potência reativa praticamente constante, independente da carga mecânica aplicada ao eixo, já a demanda de potência ativa é proporcional a esta carga; assim, quão menor é a carga mecânica, menor é a demanda de potência ativa e menor é o fator de potência.

Motores de indução superdimensionados: similarmente ao caso anterior, um motor com potência nominal muito superior à carga mecânica acoplada demandará uma potência ativa pequena perante a demanda reativa, resultando em um baixo fator de potência.

Grande quantidade de motores de indução de pequeno porte: tais equipamentos podem apresentar dificuldades para seu correto dimensionamento em função da carga acoplada; são, às vezes, superdimensionados para atender ao torque de partida elevado de determinadas cargas. Ainda, em alguns casos, devido as suas características de construção, estes não apresentam fator de potências satisfatório mesmo em condições de plena carga.

Transformadores operando a vazio ou com pequena carga: do mesmo modo que os motores de indução, os transformadores demandam uma potência reativa relativamente constante para manutenção dos seus campos magnéticos; em situações de pequeno carregamento, nas quais a potência ativa no secundário é pequena, a potência reativa torna-se relativamente grande, ocasionando um fator de potência baixo.

Lâmpadas de descarga com reatores de baixo FP: lâmpadas de descarga, como vapor de sódio, vapor mercúrio e fluorescentes, necessitam de reatores para seu funcionamento. Estes reatores (eletromagnéticos) são dotados de bobinas que demandam energia reativa, acarretando um baixo fator de potência. Há reatores considerados de alto fator de potência, que contam com capacitores associados internamente para fornecimento local da energia reativa necessária.

Nível de tensão acima do normal: a potência reativa é proporcional ao quadrado da tensão aplicada à carga, já, como citado anteriormente, a potência ativa depende da carga mecânica solicitada. Assim, um aumento no nível de tensão acarreta o aumento da potência reativa, ocasionando um baixo fator de potência.

Máquinas de solda a arco: tais máquinas são geradoras de distorções harmônicas, uma vez que a tensão e correntes dos arcos elétricos (que são o princípio de funcionamento destas máquinas) possuem características não lineares. Estas distorções harmônicas implicam em um baixo fator de potência real.

Fornos a arco e fornos de indução eletromagnética: os fornos a arco apresentam as mesmas características das máquinas de solda a arco; já fornos de indução, evidentemente, possuem características indutivas e demandam tal energia reativa indutiva.

Equipamentos eletrônicos (eletrônica de potência): equipamentos como retificadores, inversores e fontes chaveadas, devido aos seus princípios de operação são fonte de distorção harmônica, estas, causadores de um baixo fator de potência real.

Ainda, o baixo fator de potência pode ser causado pelo incorreto dimensionamento ou mal funcionamento de sistemas previamente instalados visando a elevação do fator de potência (SILVA, 2009).

No tocante às consequências técnicas advindas do baixo fator de potência, Monteiro (2009) explica que a elevação na potência reativa acarreta na elevação da potência aparente que, por consequência, resulta na elevação da corrente total que circula na instalação elétrica; está elevada corrente circulando pode levar a sobrecargas, prejudicar a estabilidade do sistema e trazer outros inconvenientes, conforme expõem CODI (2004), Monteiro (2009) e WEG (2009).

Perdas na rede: As perdas de energia elétrica nos condutores na forma de calor são regidas pela Lei de Joule, sendo iguais ao quadrado da corrente circulante multiplicado pela resistência do condutor. Assim, um baixo fator de potência resulta em uma maior corrente aparente, esta corrente gera perdas elevadas na rede e, conseqüentemente, provoca o aquecimento de condutores e equipamentos (MARCHI, 2019).

### **2.1.3. Fator de Potência**

Um dos componentes dos sistemas elétricos são as cargas, juntamente com as fontes, linhas de transmissão, dentre outros; as cargas se caracterizam por demandar potência e absorver energia elétrica do sistema. Segundo Creder (2007), a energia elétrica absorvida por cargas alimentadas em corrente alternada pode ser decomposta em energia ativa e energia reativa (MARCHI, 2019).

De acordo com Creder (2007) e Monteiro (2009), a energia ativa, medida em kWh, é aquela convertida em energia útil, por exemplo energia térmica, luminosa ou cinética, e que realiza trabalho. Já a energia reativa, em kVAr, é empregada como energia magnetizante na manutenção de campos eletromagnéticos de equipamentos e não realiza trabalho, sendo intermediária na utilização de energia ativa.

A razão entre a energia ativa consumida (kWh) em um intervalo de tempo e este próprio intervalo resulta na demanda ativa média ou potência ativa, expressa em kW e representada pela letra P. Paralelamente, a razão entre a energia reativa (kVArh) absorvida em um intervalo e este próprio, resulta na demanda reativa média ou potência reativa, expressa em kVAr e representada pela letra Q (COTRIM, 2008).

A composição da potência aparente pelas potências ativas e reativas pode ser entendida com base na abordagem senoidal das ondas de tensão e corrente de um circuito elétrico, conforme apresentado por Cotrim (2008). Segundo Marchi (2019) em um circuito elétrico monofásico em corrente alternada a potência instantânea  $p$ , em Watts se dá por:

$$p = u \times i \quad (1)$$

onde  $u$  é a tensão senoidal instantânea, em Volts, e  $i$  é a corrente senoidal instantânea, em Amperes. Estes valores instantâneos podem ser expressos pelas equações:

$$u = \sqrt{2} \times U \times \text{sen}(\omega t) \quad (2)$$

$$i = \sqrt{2} \times I \times \text{sen}(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

onde,  $U$  e  $I$  são valores eficazes de tensão e corrente, respectivamente,  $\omega$  é a frequência da rede em radianos por segundo e  $\varphi$  é o ângulo de defasagem entre as ondas  $u$  e  $i$ , em radianos. Substituindo as Eq. (2) e (3) na Eq. (1) e aplicando algumas identidades trigonométricas tem-se:

$$p = U \times I \times \cos(\varphi) (1 - \cos(2\omega t)) + U \times I \times \text{sen}(\varphi)(\text{sen}(2\omega t)) \quad (4)$$

Ou ainda, pode-se representar os termos fixos da Eq. (4) por:

$$P = U \times I \times \cos(\varphi) \quad (5)$$

$$Q = U \times I \times \text{sen}(\varphi) \quad (6)$$

onde  $P$  é o valor eficaz da potência ativa (W), e  $Q$  é o valor eficaz da potência reativa (var).

Substituindo (5) e (6) na Eq. (4), tem-se:

$$p = P \times (1 - \cos(2\omega t)) + Q \times (\text{sen}(2\omega t)) \quad (7)$$

A Figura 1 apresenta dois gráficos distintos, porém, relacionados. O primeiro, (a), ilustra a relação entre a curva de potência aparente, dada pela Eq. (4), e as curvas de tensão

e corrente, dadas pelas Eqs. (2) e (3), no eixo do tempo  $\omega t$ . Já o gráfico (b) representa a decomposição da potência aparente – ou total – em seus componentes ativos e reativos, de acordo com a Eq. (7).

Nota-se na Figura 1, gráfico (a), que  $\varphi$  representa o ângulo de defasagem entre as ondas de tensão e corrente, no caso, a corrente está atrasada em relação à tensão. Também, nota-se que o valor médio da potência aparente é igual a  $U \times I \times \cos(\varphi)$ .

Nota-se na Figura 1, gráfico (b), que  $\varphi$  representa, também, o ângulo de defasagem entre a onda de potência aparente e a de potência ativa, já as componentes ativas e reativas da potência são defasadas em  $90^\circ$ . A potência ativa tem um valor médio igual ao valor médio da potência aparente, já a potência reativa tem o valor médio nulo.

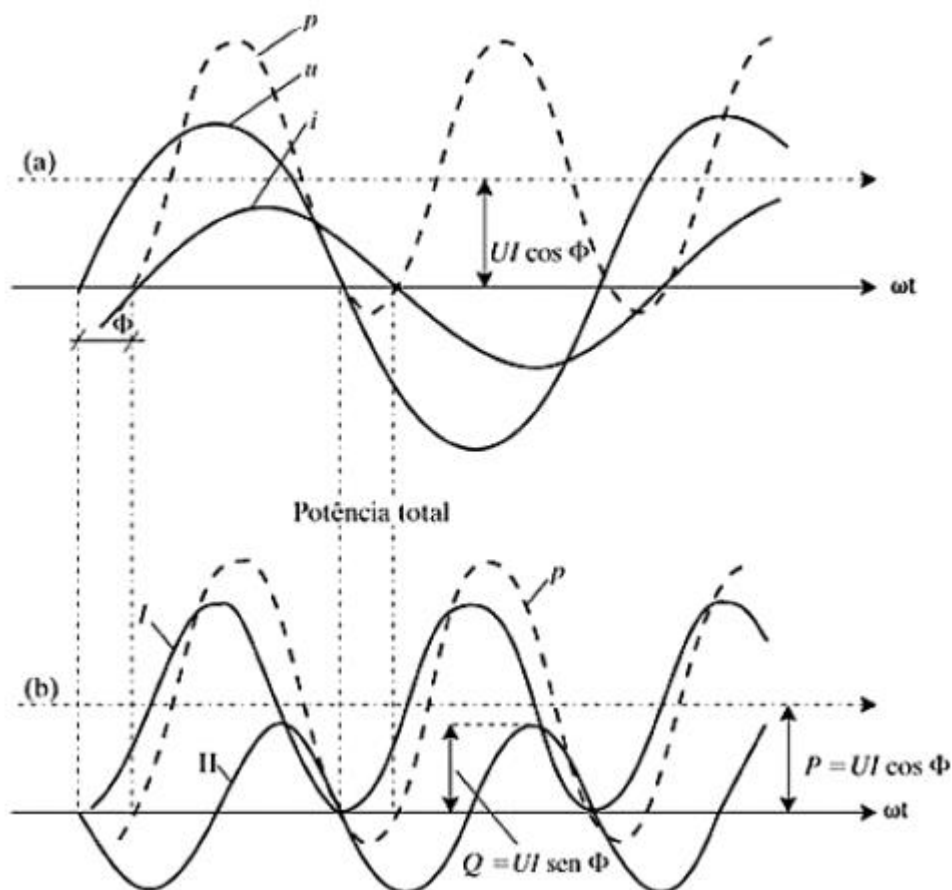


Figura 1: Tensão, corrente e potência instantânea (COTRIM, 2008).

Assim, ainda segundo Cotrim (2008), a parcela de potência ativa é sempre fornecida da fonte para a carga, e absorvida por esta. Já a parcela de potência reativa é trocada entre a fonte e a carga, e circula no sistema elétrico, sem ser absorvida, apesar de ser comumente

denominada potência reativa absorvida pela carga. Monteiro (2009, p. 3) complementa, enquanto a potência ativa é sempre consumida na execução de trabalho, a potência reativa, além de não produzir trabalho, circula entre a carga e a fonte de alimentação, “ocupando um espaço” no sistema elétrico, o qual poderia ser utilizado para fornecer mais energia ativa.

A relação entre as potências ativa, reativa e aparente em um sistema pode ser ilustrada pelo triângulo das potências, apresentado na Figura 2, o qual utiliza a representação vetorial. A soma vetorial das potências ativa ( $P$ ) e reativa ( $Q$ ) resulta na potência total ou aparente ( $S$ ) (CREDER, 2007).

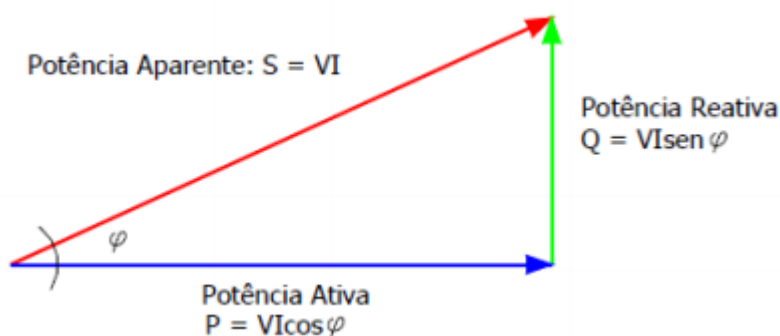


Figura 2: Triângulo das Potências (ISONI, 2004).

De acordo com Cotrim (2008), a potência aparente, expressa em (kVA), é a potência utilizada na caracterização de equipamentos elétricos. Em sistemas trifásicos equilibrados, esta potência é definida de acordo com a Eq. (8) e são válidas as relações abaixo, sendo  $\varphi$  o ângulo formado entre os vetores  $P$  e  $S$ , potência ativa e aparente, respectivamente:

$$S = \sqrt{3} \times U_L \times I_L \quad (8)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

$$P = S \times \cos(\varphi) \quad (10)$$

$$Q = S \times \sin(\varphi) \quad (11)$$

onde  $S$  é a potência aparente (VA),  $P$  é a potência ativa (W),  $Q$  é a potência reativa (var),  $U_L$  e  $I_L$  são a tensão (V) e corrente de linha (A).

Com base nestas definições, é possível então caracterizar o fator de potência. Segundo Mamede Filho (2002), o fator de potência, FP, é calculado pela equação:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{S \times \cos(\varphi)}{S} = \cos(\varphi) \quad (12)$$

Assim, fisicamente, o fator de potência é definido como o cosseno do ângulo de defasagem entre as ondas senoidais de tensão e de corrente,  $\cos(\varphi)$ . Cotrim (2008) ressalta que o fator de potência deve ser acompanhado das palavras “indutivo”, no caso da corrente atrasada em relação a tensão ou “capacitivo”, caso a corrente esteja adiantada em relação a tensão, isto devido a  $\cos(\varphi)$  resultar sempre positivo, independente do ângulo  $\varphi$ .

Ou ainda, em termos de potência ativa e reativa, a Eq. (13) também é válida:

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \quad (13)$$

Analogamente, segundo ANEEL (2012) o fator de potência em um determinado intervalo de tempo pode ser calculado com base nas energias consumidas neste período, portanto:

$$FP = \frac{E_{ativa}}{\sqrt{E_{ativa}^2 + E_{reativa}^2}} \quad (14)$$

onde  $E_{ativa}$  e  $E_{reativa}$  são as energias ativa (Wh) e reativa (VArh) consumidas em um determinado intervalo.

Monteiro (2009) explica que o fator de potência representa a fração da potência total fornecida que é convertida em potência útil. Desta maneira, o fator de potência é um índice de eficiência do uso do sistema ou instalação elétrica. Valores próximos a unidade simbolizam uso eficiente do sistema, enquanto valores próximos a zero demonstram mau aproveitamento deste.

As definições apresentadas previamente neste capítulo são válidas para um sistema puramente senoidal, no qual as ondas de tensão e corrente existem somente na frequência fundamental, 60 Hz, no caso do sistema elétrico brasileiro (MARCHI, 2019). No entanto, de acordo com Cotrim (2008), atualmente as instalações elétricas contam amplamente com cargas não lineares. As correntes drenadas por estas cargas possuem, além da componente

fundamental, outras componentes em frequências múltiplas da fundamental, as denominadas harmônicas.

A corrente eficaz demandada neste caso, integrada pelas componentes fundamental e harmônicas, é definida pela Eq. (15) (COTRIM, 2008). Devido às contribuições das harmônicas, tanto a corrente como a potência aparente se tornam superiores aos valores calculados considerando-se somente a frequência fundamental.

$$I_{rms} = \sqrt{\sum_{i=1}^n I_{hi}^2} \quad (15)$$

onde  $I_{rms}$  é a corrente eficaz e  $I_{hi}$  é a componente de corrente harmônica de ordem  $i$ .

Portanto, na presença de cargas não lineares e da consequente distorção harmônica, as grandezas elétricas são acrescidas de um componente correspondente a esta distorção. Assim, segundo Isoni (2004), adiciona-se uma terceira dimensão ao triângulo das potências, resultando no tetraedro das potências, conforme ilustrado na Figura 3.

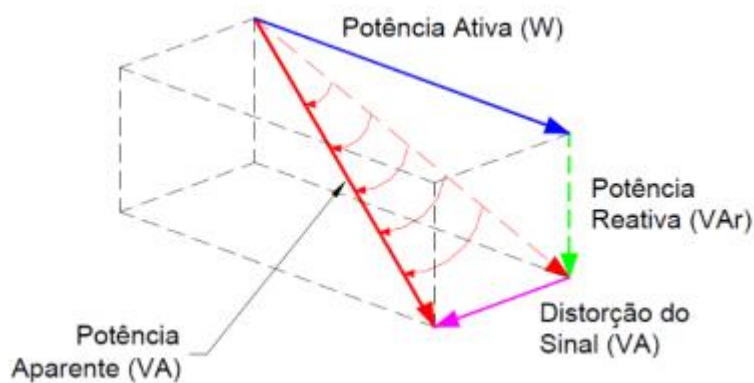


Figura 3: Tetraedro das potências (ISONI, 2004).

Nestas condições, de acordo com Cotrim (2008), a relação entre as variáveis passa a ser conforme apresentado a seguir:

$$S' = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (16)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (17)$$

onde o componente  $D$  representa a potência de distorção demandada pela instalação. Sendo a relação  $FP = \frac{P}{S}$  ainda válida, tem-se:

$$P = S' \times \cos(\varphi) \quad (18)$$

$$S = \frac{S'}{\cos(\lambda)} \quad (19)$$

$$FP = \frac{S' \times \cos(\varphi)}{\frac{S'}{\cos(\lambda)}} \quad (20)$$

Portanto, sendo o fator  $\cos(\lambda)$  invariavelmente inferior a 1, o fator de potência calculado levando em consideração a potência de distorção é inferior ao fator de potência calculado para sistemas considerados puramente senoidais (MARCHI, 2019).

Para Isoni (2004), na presença de potência de distorção, o fator de potência pode ser expresso por duas grandezas distintas: fator de potência real e fator de potência de deslocamento. O fator de potência real é a razão entre a potência ativa correspondente a todas as harmônicas presentes e a potência aparente total da instalação, conforme Eq. (20). Já o fator de potência de deslocamento considera apenas a defasagem das ondas de tensão e corrente na frequência fundamental, conforme Eq. (12). Não havendo distorção harmônica em determinado sistema, o fator de potência real e o fator de potência de deslocamento são equivalentes.

Ainda, segundo WEG (2009) a relação entre o fator de potência real e o fator de potência de deslocamento pode ser expressa Eq. (21), onde THD é a distorção harmônica total de corrente, calculada conforme a Eq. (22).

$$FP = \frac{1}{\sqrt{1+TDH^2}} \times \cos(\varphi) \quad (21)$$

$$TDH = \frac{\sqrt{\sum(I_{h,ef}^2)}}{I_{1,ef}} \quad (22)$$

onde  $I_{h,ef}$  é o valor eficaz da corrente harmônica de ordem “h” e  $I_{1,ef}$  é o valor eficaz da corrente na frequência fundamental.

Conclui-se que, em função do conteúdo harmônico de uma carga, a obtenção do fator de potência próximo da unidade requer um tratamento especial, não somente injetando energia reativa, mas também filtrando algumas harmônicas presentes (COTRIM, 2008, p. 424).

#### **2.1.4. Sistema Elétrico de Potência do Consumidor**

No Brasil, a conexão e atendimento ao consumidor, independentemente de qual seja o seu porte, são realizados pelas concessionárias distribuidoras de energia elétrica. Atualmente, 63 concessionárias são responsáveis por atender mais de 61 milhões de unidades consumidoras (CORMANE; REIS, [s.d.]).

As concessionárias distribuidoras são responsáveis pela compra da energia, junto aos agentes geradores e comercializadores de energia, sendo responsável pelos riscos associados a esta compra e devendo garantir a entrega de energia aos consumidores com qualidade e segurança (CASSEL, 2012).

O cumprimento dos contratos de concessão e as atividades desenvolvidas pelas concessionárias são regulados e fiscalizados pela ANEEL, agência responsável por reger um conjunto de regras dispostas em resoluções e no documento intitulado Procedimentos de Distribuição – PRODIST, que orienta as atividades técnicas e de desempenho para consumidores e produtores de energia, concessionárias e distribuidoras de energia e agentes do setor estabelecendo critérios e indicadores de qualidade (ANEEL, 2012a).

A ANEEL tem como objetivo também assegurar ao consumidor o pagamento de um valor justo e o acesso a um serviço contínuo e de qualidade e garantir à distribuidora o equilíbrio econômico-financeiro para cumprir o contrato de concessão (ANEEL, 2012a).

Entre essas variáveis reguladas pela ANEEL estão as tarifas e a qualidade do serviço prestado pelas concessionárias distribuidoras desde o ponto de vista técnico até o atendimento ao consumidor. As distribuidoras também desenvolvem programas especiais com foco no consumidor visando a inclusão social ao acesso da rede de energia elétrica além da implementação de projetos de eficiência energética e de pesquisa e desenvolvimento. Neste caso as distribuidoras são obrigadas a destinar um percentual mínimo de sua receita operacionais a essas atividades e precisam ser aprovadas pela ANEEL para ser implementadas (ANEEL, 2012a).

### 2.1.5. PRODIST

De acordo com a ANEEL, Os *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional* (PRODIST) são documentos elaborados com a participação dos agentes de distribuição e de outras entidades e associações do Setor Elétrico Nacional, que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Os principais objetivos do PRODIST são:

- Garantir que os sistemas de distribuição operem com segurança, eficiência, qualidade e confiabilidade;
- Propiciar o acesso aos sistemas de distribuição, assegurando tratamento não discriminatório entre agentes;
- Disciplinar os procedimentos técnicos para as atividades relacionadas ao planejamento da expansão, à operação dos sistemas de distribuição, à medição e à qualidade da energia elétrica;
- Estabelecer requisitos para os intercâmbios de informações entre os agentes setoriais;
- Assegurar o fluxo de informações adequadas à ANEEL;
- Disciplinar os requisitos técnicos na interface com a Rede Básica, complementando de forma harmônica os Procedimentos de Rede.
- O módulo 8 do PRODIST, que trata sobre qualidade de energia, define a terminologia e os indicadores, caracteriza os fenômenos, estabelece os limites ou valores de referência, a metodologia de medição, a gestão das reclamações relativas à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão e os estudos específicos de qualidade de energia elétrica para fins de acesso aos sistemas de distribuição (ANEEL, 2016).  
Abaixo, os indicadores, como descritos no PRODIST, para melhor entendimento:

#### Tensão em Regime Permanente (DRP e DRC)

Este indicador é definido pela variação percentual da amplitude senoidal da tensão por um tempo maior que três minutos (ANEEL, 2018).

São estabelecidos os limites adequados, precários e críticos para os níveis de tensão em regime permanente, os indicadores individuais e coletivos de conformidade de tensão

elétrica, os critérios de medição e de registro e os prazos para compensação ao consumidor, caso as medições de tensão excedam os limites dos indicadores (ANEEL, 2018).

A tensão em regime permanente deve ser acompanhada em todo o sistema de distribuição, devendo a distribuidora dotar-se de recursos e técnicas modernas para tal acompanhamento, atuando de forma preventiva para que a tensão em regime permanente se mantenha dentro dos padrões adequados (ANEEL, 2016).

#### **2.1.5.1 Fator de Potência (FP – Indicador PRODIST)**

O controle do fator de potência deve ser efetuado por medição permanente e obrigatória no caso de unidades consumidoras atendidas pelo SDMT e SDAT e nas conexões entre distribuidoras, ou por medição individual permanente e facultativa nos casos de unidades consumidoras do Grupo B com instalações conectadas pelo SDBT, observando do disposto em regulamentação (ANEEL, 2016).

#### **2.1.5.2 Distorções Harmônicas (DTT)**

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Os indicadores levados em conta para a regulamentação são os percentis 95% das Distorções Harmônicas Totais para os harmônicos de ordem par não múltiplos de 3, ímpar não múltiplos de 3 e harmônicos múltiplos de 3, respectivamente DTTP 95%, DTTi 95% e DTT3 95%. Seus limites dependem da faixa de tensão nominal referente (ANEEL, 2018).

#### **2.1.5.3 Desequilíbrio de Tensão (FD)**

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema (ANEEL, 2018).

O indicador levado em conta para a regulamentação é o percentil 95% do Fator de Desequilíbrio de Tensão, FD95%, que tem como limites 3%, para tensão nominal menor ou igual a 1kV e 2% para tensões nominais entre 1kV e 230kV (ANEEL, 2018).

#### **2.1.5.4 Flutuação de Tensão (PST e PLT)**

A flutuação de tensão é um fenômeno caracterizado pela variação aleatória, repetitiva ou esporádica do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea.

A determinação da qualidade da tensão do sistema de distribuição quanto à flutuação de tensão tem por objetivo avaliar o incômodo provocado pelo efeito da cintilação luminosa no consumidor, que tenha em sua unidade consumidora pontos de iluminação alimentados em baixa tensão (ANEEL, 2018).

#### **2.1.5.5 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.

Quando da ocorrência de distúrbios no sistema de distribuição, as instalações de geração devem garantir que a frequência retorne, no intervalo de tempo de 30 (trinta) segundos após a transgressão, para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz, para permitir a recuperação do equilíbrio carga-geração (ANEEL, 2018).

#### **2.1.5.6 Variação de Tensão de Curta Duração (VTCD)**

Variações de tensão de curta duração (VTCD) são desvios significativos na amplitude do valor eficaz da tensão durante um intervalo de tempo inferior a três minutos. Para se obter o indicador FI – Fator de Impacto, levado em conta para a regulamentação, estes eventos de VTCD são segregados por tempo e magnitude, sendo que cada segregação tem seu fator de ponderação de sensibilidade (multiplicador), depois é feita uma média ponderada destes dados, que dá como resultado o indicador FI, que tem como limite o valor 1pu (ANEEL, 2018).

## 2.2. Conceito de Cargas Não-Lineares

Segundo Mamede (2012), analisando as grandezas elementares de potência elétrica em circuitos de corrente alternada (CA), potências (ativa (P), aparente (S) e reativa (Q)), surgem algumas relações comportamentais quando visto suas respectivas formas de ondas senoidais em suprimento de cargas linearmente distintas.

Os circuitos compostos por cargas puramente resistivas são caracterizados por possuírem linearidade senoidal. Constituídas normalmente por dispositivos tais como, chuveiros e lâmpadas incandescentes, possuem ondas de tensão e corrente em fase, ou seja, sua polaridade se altera instantaneamente a cada ciclo senoidal. Para este tipo de carga, toda a energia transportada pelo sistema elétrico é transformada em trabalho (desprezando as perdas de transporte), sendo representada neste caso a potência ativa, (MAMEDE, 2012).

Problemas na qualidade de energia em função da operação de cargas não-lineares não são novos no contexto do sistema elétrico. Como exemplo pode-se citar os fornos a arco ou até mesmo os próprios transformadores do sistema. Entretanto, devido à proliferação de cargas não-lineares, motivada pela flexibilidade dos sistemas controlados por conversores de potência, ocorreu o aumento significativo na potência controlada, com consequente aumento dos níveis de distorções. Por este motivo, existe preocupação permanente quanto ao impacto dos harmônicos, os quais afetam a operação dos componentes e equipamentos, podendo causar sobreaquecimentos e redução da vida útil de transformadores e máquinas elétricas, ressonâncias com capacitores, erros em medidores, atuação intempestiva de sistemas de proteção etc (DE JESUS; CASTOLDI; NONENMACHER, [s.d.]).

A Schneider Electric conceitua da seguinte forma: Efeitos de Harmônicos em Equipamentos Elétricos: A escala em que os índices de harmônicos são admitidos em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga em questão (ou fonte de potência). Equipamentos não tão frágeis, normalmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para estes as cargas não é algo de extrema importância. Os que se tornam mais frágeis em um projeto usufruem de uma alimentação senoidal presente como, equipamentos de comunicação e comutação de dados. Mesmo para cargas de baixa susceptibilidade, a existência de perturbações harmônicas, sejam elas, pela tensão e/ou corrente elétrica, podem vir a ocasionar diversos danos físicos e até mesmo na performance, gerando um esforço excessivo de operação dos componentes e isolantes dos mesmos.

Motores e Geradores: Em máquinas rotativas (indução e síncrona), tem como maior reação gerada pela presença de harmônicos é o grande aumento no aquecimento ocasionado pela elevação das perdas no cobre e no ferro. Prejudica sua eficácia e torque aparente. Também conta com um auto significativo dos ruídos auditivos, quando comparados com uma alimentação totalmente senoidal o que seria um caso “ideal”.

A presença de perturbações harmônicas no fluxo é outro fenômeno que produz possíveis anomalias no período de acionamento, exemplo são os componentes de torque que atuam ao sentido contrário a fundamental.

A elevação excessiva da temperatura admitida dependerá do modelo de rotor a ser utilizado. Rotores do tipo bobinado são os que mais sofrem, comparados aos de rotores do tipo gaiola. Os de gaiola profunda devido ao efeito pelicular, faz com que a condução da corrente elétrica caminhe sentido a superfície do condutor em altas frequências, gerando uma maior elevação da temperatura comparado aos rotores de gaiola convencional.

Tal efeito produzido nas perdas das máquinas, vem a gerar uma diminuição significativa na eficiência de sua vida útil. Esta redução é apontada nas literaturas entre 5% a 10% dos valores gerados a partir de uma fonte de alimentação senoidal. Fator não aplicável em equipamentos projetados para serem alimentados a partir de inversores, mas sim as máquinas projetadas para serem alimentadas diretamente a rede.

De acordo com a Schneider Electric, inúmeros integrantes harmônicos, ou pares de componentes, estipulam perturbações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-gerador, por conta de uma elevada excitação de ressonância mecânicas.

Transformadores: Neste caso contamos também com uma elevação nas perdas. A presença de harmônicos na tensão aumenta as perdas no ferro, enquanto a elevação de harmônicos na corrente leva a perdas no cobre. O efeito pelicular é o principal causador do aumento das perdas no cobre, que vem a interferir na redução da secção transversal de melhor condutibilidade a medida em que se aumenta a frequência da corrente.

Componentes harmônicos geralmente tendem a possuir magnitude reduzida, o que ajuda a não possibilitar essas elevações de perdas excessivas. No entanto, podem aparecer situações específicas como por exemplo ressonâncias, em que emergem de componentes de frequência elevada e alta magnitude na amplitude.

A dispersão do efeito da reatância se torna amplo, uma vez que seu valor se altera de forma proporcional ao aumento da frequência.

Com a dissipação, vem acompanhando outro fator de perdas que se refere as correntes induzidas pelo fluxo disperso. Esta corrente aparece nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos. Estas perdas têm como tendência seu aumento de forma proporcional ao quadrado da frequência e da corrente elétrica.

A Schneider Electric diz que uma maior influência das capacitâncias parasitas entre espiras e enrolamentos, que possivelmente venha a realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente ressonâncias no próprio componente.

**Cabos de Alimentação:** Devido ao efeito pelicular que restringe a secção transversal condutora dos componentes de frequência de magnitude elevada, os cabos de alimentação também contam com aumento das perdas ocasionadas pela presença de harmônicos na corrente. Com isso temos o denominado “Efeito de Proximidade”, que correlaciona a elevação da resistência do condutor em função do efeito dos campos magnéticos gerados pelos demais condutores posicionados de forma adjacente.

Caso os cabos possuam um longo seguimento, de acordo com a Schneider Electric, e os sistemas integrados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmônicas, elevadas sobretensões podem vir a aparecer ao decorrer da linha, com isso tendo possibilidade de danificar o condutor.

**Capacitores:** A possibilidade de ocorrência de ressonância excitadas pela presença de harmônicos se torna um enorme empecilho, podendo gerar índices elevados de tensão e/ou corrente. Com a diminuição da reatância capacitiva com a frequência, obtém-se um aumento nas correntes relativas aos harmônicos presentes na tensão.

A alta frequência nas correntes elétricas, que encontram um sentido de impedância reduzida pelos capacitores, terão um aumento em suas perdas ôhmicas. O aumento decorrente do aquecimento do dispositivo diminui de forma drástica a vida útil de um capacitor.

A correção do fator de potência de uma carga tende a ocasionar a aparição de ressonâncias no sistema, relativas à tensão e às correntes da fonte nos diferentes circuitos.

### **2.3. Problemas Típicos de Qualidade de Energia Elétrica**

Com o crescimento eminente da geração distribuída, é necessária a realização de estudos analíticos para verificar o fornecimento confiável e a qualidade de energia gerada e injetada no sistema, além de problemas desinentes de sua interligação. O local de conexão

da fonte distribuída deve ser bem planejado, pois pode diminuir as perdas, por outro lado, se não for realizada corretamente, pode aumentá-las. Para este planejamento é necessário um estudo prévio do sistema de distribuição, porém, na maioria das vezes não é possível, uma vez que a geração muitas vezes é de pequeno porte e se encontra em residências particulares (YAMAUTI; AL., 2014) (PALUDO, 2014).

As perdas técnicas na rede de distribuição variam de acordo com o carregamento, ou seja, dependendo da quantidade de potência do sistema fotovoltaico instalado as perdas podem ser maiores. A introdução desse sistema na rede pode auxiliar os geradores no suprimento da demanda, diminuindo a corrente que flui pelo alimentador, ocorrendo uma redução das perdas totais do sistema. Caso os geradores fotovoltaicos sejam utilizados como compensadores de potência reativa da rede, a redução de perdas também pode ocorrer (PALUDO, 2014).

Outro problema que pode ser ocasionado devido a presença de geração distribuída na rede de distribuição é quando a potência gerada pelo sistema excede a demanda total da rede, ocorrendo um fluxo de potência reverso, passando das cargas para a subestação. Este fenômeno ocasiona um aumento na magnitude da tensão, podendo ultrapassar os limites estabelecidos, além de interferir no sistema de proteção da rede (BASTOS, 2015). Outro aspecto relacionado ao fluxo de potência reverso gerado pelo sistema de geração distribuída é a atuação que este pode ter na coordenação e operação do sistema de proteção e na regulação de tensão (PALUDO, 2014).

A definição do sentido do fluxo de potência é importante para verificar se o fator de potência está capacitivo ou indutivo na rede de distribuição. Para isso, analisa-se a defasagem da fase da corrente em relação à tensão. Se a corrente estiver adiantada o fator de potência é considerado capacitivo, se estiver atrasada o fator de potência é considerado indutivo (BASTOS, 2015).

Comumente os sistemas fotovoltaicos operam com fator de potência igual a 1, suprindo, durante alguns instantes do dia, parcialmente ou totalmente a demanda da potência ativa da carga onde está instalado o sistema. Assim, a potência reativa que a carga demandar continuará sendo fornecida pela rede elétrica, ocasionando uma interpretação pelas concessionárias como um excedente de reativos, cobrando-se assim estes falsos excedentes das unidades consumidoras (PINTO; ZILLES; BET, 2012).

A variação do fator de potência além de provocar alterações nos medidores das concessionárias, também pode provocar alterações nos valores de tensão da rede. No estudo

de (PINTO; ZILLES; BET, 2012) verificou-se essas alterações com variação dos valores de fator de potência de um sistema fotovoltaico. Com o fator de potência unitário constataram-se no medidor da concessionária uma queda no valor do fator de potência assim como uma sobretensão em alguns períodos do dia. Alterando o fator de potência para 0,92 indutivo, observou-se a redução da sobretensão, porém, ainda apresentou uma queda do valor de fator de potência no ponto de conexão da distribuidora e aumento de perdas devido ao aumento do fluxo de potência reativa provindo do transformador da subestação. Para um fator de potência igual a 0,92 capacitivo, o sistema fotovoltaico forneceu potência reativa para a carga e diminuiu as perdas do sistema, pois diminuiu circulação de reativos na rede elétrica. Já o fator de potência no ponto de conexão da distribuidora permaneceu aproximadamente igual a 0,9 durante todo o dia, mas as sobretensões no local não tiveram seus valores reduzidos (LANGERHORST, 2013).

A geração distribuída também pode causar impactos relacionados à qualidade de energia, como o surgimento de flutuações de tensão, distorções harmônicas, variações de frequência além do aumento do desequilíbrio de tensão. Além disso, também pode gerar impactos no sistema de proteção, devido à mudança da característica radial da rede de distribuição. Quando ocorrem faltas no sistema, estas podem ser alteradas pela presença de geração distribuída, podendo causar o mau funcionamento ou até o não funcionamento dos dispositivos de proteção da rede elétrica. Isto ocorre porque o gerador distribuído altera o balanço de correntes do sistema, fazendo com que os dispositivos de proteção não sejam sensibilizados na presença de uma falta ou demorem mais tempo para atuar (YAMAUTI; AL., 2014).

Outro aspecto referente à contribuição de um sistema fotovoltaico em casos em que existe a presença de falta é o sistema de proteção do inversor. Este equipamento deve se desconectar automaticamente da rede elétrica quando a tensão e a frequência estão fora da faixa de operação determinada, podendo variar o tempo que o inversor leva para sair do sistema. Isto pode implicar que em sistemas com uma alta inserção de energia fotovoltaica, quando ocorrer algum curto na rede, cada sistema fotovoltaico está sujeito a um valor diferente de tensão e com isso cada inversor irá sair do sistema em um tempo diferente, fazendo com que ocorra uma corrente de falta variável na rede (YAMAUTI; AL., 2014).

## 2.4. Harmônicos

A palavra “harmônico” foi originalmente definida em acústica, significando a vibração de um fio ou uma coluna de ar, com frequência múltipla e diferente da fundamental, provocando uma distorção na qualidade do som resultante (GARCIA , [s.d.]).

Tais fenômenos também ocorrem com a eletricidade, onde a tensão e corrente elétrica também podem possuir deformidades. Partindo do mesmo evento físico, os fundamentos desta área podem ser aplicados àquela.

Atualmente o sistema elétrico vem experimentando um aumento da sua capacidade de geração, transmissão e distribuição. Aliado a isso, vem ocorrendo uma ampliação do número de cargas não lineares, em todos os níveis de fornecimento. A utilização dessas cargas constitui-se numa das maiores preocupações tanto das concessionárias quanto dos consumidores, como também é motivo de constantes problemas para o sistema elétrico como um todo e seus usuários (GARCIA , [s.d.]).

Geralmente as centrais geradoras de energia elétrica geram tensões com formas de onda senoidais, sempre buscando a forma de onda pura, sem distorções de onda ou com o mínimo possível que uma onda pode apresentar. De acordo com que o sistema vai se distanciando da central geradora e vai se encaminhando para as cargas elétricas, essa forma de onda de tensão apresenta distorções assim como as formas de onda das correntes elétricas (DUGAN; AL., 2003).

Estas distorções são os desvios de corrente ou tensão do sinal de onda com base na frequência fundamental (DUGAN; AL., 2003) (PENA, 2016) e são qualificadas como harmônicas e inter-harmônicas, as harmônicas tornaram-se mais relevantes nos últimos anos com o crescimento de cargas e equipamentos não-lineares. Para muitos profissionais estas distorções são os principais problemas voltados para a qualidade de energia elétrica (PUFAL, 2012).

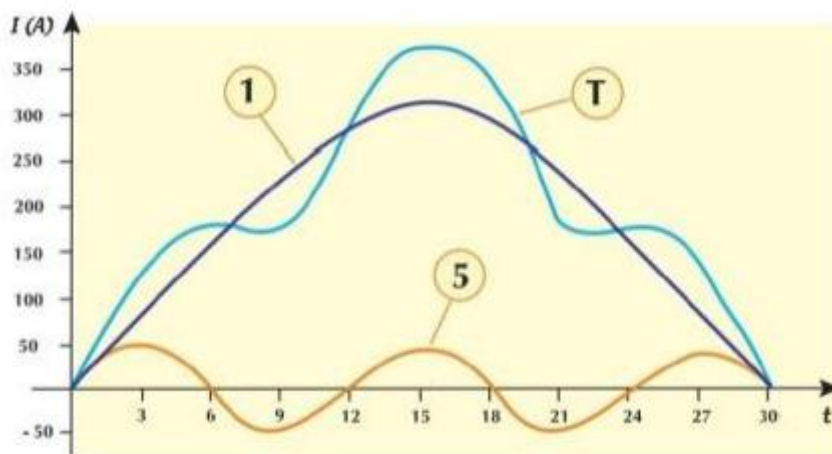


Figura 4: Onda distorcida "T" e suas componentes de 1ª a 5ª ordem (MORENO, 20001).

### 2.4.1. Taxa de Distorção Harmônica (THD)

Indicada a primeira aparição significativa de harmônicas em um sistema pode ser um fator de potência medido, diferente do  $\cos(\varphi)$ , havendo representação de um fator de potência menor ao calculado.

As fórmulas de quantificação das distorções harmônicas se dividem em dois blocos, que analisam de forma sistemática a tensão e a corrente elétrica.

“A taxa de distorção harmônica é uma notação muito utilizada para definir a importância do conteúdo harmônico de um sinal alternado”(SCHNEIDER, 2003 p. 8).

- Distorção Harmônica Total de Tensão (DHTV)

$$DHTV = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{hmax} v_h^2}{v_1^2}} \times 100\%$$

- Distorção Harmônica Total de Corrente (DHTI)

$$DHTI = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{hmax} I_h^2}{I_1^2}} \times 100\%$$

Onde:

V<sub>h</sub> - Valor eficaz da tensão de ordem "h";

$I_h$  - Valor eficaz da corrente de ordem "h";

$V_1$  - Valor eficaz da tensão fundamental;

$I_1$  - Valor eficaz da corrente fundamental;

H - Ordem da componente harmônica.

#### **2.4.2. Efeitos dos Índices Harmônicos em Instalações Elétricas**

Os dispositivos que geram harmônicas estão presentes em todos os setores industriais, comerciais e residenciais, e estas harmônicas são oriundas do efeito de cargas não lineares. Uma carga é caracterizada como não linear quando a corrente que esta absorve não apresenta a mesma forma da sua tensão de alimentação. Os dispositivos que utilizam eletrônica de potência são não lineares como computadores, iluminação fluorescente, televisores, variadores de velocidade entre outros (SCHNEIDER, 2015).

Estes dispositivos vêm crescendo de forma cada vez mais gradual principalmente nas indústrias que utilizam conversores eletrônicos, além dos inversores presentes em sistemas fotovoltaicos que vem crescendo cada vez mais a sua inserção na rede elétrica. E isto se relaciona diretamente com a qualidade da energia elétrica das redes de distribuição (GARCIA, 2019).

Com o aumento dessas cargas não lineares na rede elétrica, estas acabam poluindo a rede com harmônicos e a presença desses harmônicos na rede elétrica ocasiona vários problemas (RESENDE, EQUIPAMENTOS, 2000).

Isto pode ocasionar interrupções momentâneas no sistema por conta das falhas nos equipamentos de proteção da rede além de subtensão e sobretensão momentâneas também. Outros efeitos desses harmônicos são sobre os geradores síncronos do sistema, que podem ocasionar torques oscilatórios que podem causar vibrações e ruídos nesses geradores podendo causar a retirada desse equipamento da rede além de aquecimento reduzindo sua vida útil (AFONSO; MARTINS, 2009).

Com isto ainda constam-se os prejuízos econômicos resultantes destes e de demais problemas dos sistemas elétricos tornando a importância da qualidade da energia cada vez mais importante e um objeto de preocupação tanto para os órgãos do sistema elétrico quanto para os próprios consumidores (CORMANE; REIS, [s.d.]).

### 2.4.3. Filtros Harmônicos

Como já foi abordado, a distorção harmônica está sempre presente, em maior ou menor proporção, em todo o sistema elétrico. De uma forma geral, tanto os harmônicos de corrente como os de tensão devem ser mitigados somente quando ultrapassarem os limites normativos. Desta forma, existem várias soluções para a mitigação harmônica, porém nem todas são adequadas para uma determinada situação (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014). Cada rede elétrica é única e precisa de uma solução customizada.

As opções mais comuns para o controle dos harmônicos são (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014):

- Reduzir ou eliminar as correntes harmônicas de determinados equipamentos, como por exemplo: transformadores, conversores de potência, geradores e capacitores;
- Modificar a resposta em frequência do sistema;
- Adicionar filtros para drenar as correntes harmônicas, retirando-as do sistema de uma forma que bloqueia ou impede que elas entrem no sistema, ou suprindo as correntes harmônicas localmente.

Dentre as opções apresentadas, a principal estratégia é a utilização de filtros compensadores.

Eles podem ser classificados em filtros passivos, ativos e híbridos de acordo com a natureza de construção deles. Os passivos são filtros que utilizam apenas elementos passivos, como resistores, indutores e capacitores. Já os filtros ativos utilizam-se de elementos advindos da eletrônica de potência, e o filtro híbrido é composto pela junção dos dois filtros citados (NOGUEIRA, 2018).

**Filtros Passivos:** Os filtros passivos são os mais utilizados para a mitigação dos harmônicos, pela sua simples construção, baixo custo e fácil dimensionamento. Este tipo de filtro é composto apenas de resistor, capacitor e indutor, ou seja, elementos passivos (CUNHA, 2019).

Eles podem ser classificados quanto ao seu modo de conexão à rede série ou paralelo. O filtro série atua como um circuito de bloqueio para uma frequência específica ou uma faixa de frequências, ele é formado por uma indutância e capacitância em paralelo, ação que se assemelha a uma bobina de bloqueio. Esta solução é cara e raramente utilizada, tendo como principal fator negativo o fato de transportar toda a corrente do sistema (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Já o filtro paralelo, ou shunt, é a solução mais usual para evitar que as correntes harmônicas penetrem em determinadas partes do sistema, ele oferece um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas de interesse, evitando que elas penetrem em determinadas partes do sistema (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Os filtros de sintonia simples são os mais utilizados comercialmente. Eles têm como característica ser um filtro passa-faixa ou passa-banda, cuja impedância é mínima na frequência de ressonância, realizando dessa forma uma filtragem eficiente em uma pequena faixa de frequência, onde normalmente são utilizados na filtragem de harmônicos de maiores amplitudes, ou seja, de baixa ordem. Por isso que eles são os mais seletivos para a eliminação de uma harmônica específica (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Já os filtros amortecidos são os que apresentam baixa impedância sobre uma larga faixa de frequências, ou seja, têm características de passa-alta, passa-baixa, passa-banda e rejeita-banda. A sua tipologia varia com a ordem do filtro, cuja ordem é resultante do maior expoente de  $w$  (velocidade angular) em sua função transferência, que está diretamente ligado ao número dos seus componentes, em geral é igual ao número de capacitores e indutores no circuito, portanto também está ligado diretamente ao seu tamanho físico e complexidade do projeto (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Filtro Ativos: São equipamentos que podem compensar harmônicos de tensão e correntes, assim como os desequilíbrios na rede, aumento do fator de potência, além de ser autossintonizáveis e seletivos na filtragem (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Os filtros ativos se utilizam de chaves eletrônicas, para que através de técnicas de controle produzam correntes que sejam capazes de anularem a presença das harmônicas na rede de energia elétrica (CUNHA, 2019).

Eles são divididos em duas classes: série e paralelo. O filtro ativo série atua como uma fonte de tensão controlada, produzindo uma tensão de compensação o que acaba gerando uma tensão senoidal no ponto de conexão com a carga crítica. Já o filtro ativo paralelo atua como uma fonte de corrente controlada conectada em paralelo com a carga, produzindo dessa forma uma corrente de compensação  $I_c$ , que é somada com a corrente da carga não linear  $IL$ , o que acaba resultando em uma corrente senoidal na fonte (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

O custo desse tipo de filtro, no geral, é mais barato que o custo do filtro ativo série. Isso se dá pelo o motivo do filtro ser percorrido apenas pelas correntes harmônicas, o que acaba exigindo menos do filtro (LEÃO; SAMPAIO; ANTUNES, 2014).

Filtros Híbridos: Os filtros híbridos se apresentam como uma alternativa ao uso de filtros ativos e passivos, os quais são formados por elementos passivos e conversores de potência. Essa tipologia de filtro é mais eficiente quando comparados com os outros dois citados anteriormente, pois apresentam uma melhor resposta na mitigação de harmônicos sem um custo adicional elevado, além disso a junção do filtro passivo com o ativo faz com que o filtro ativo trabalhe com sua capacidade reduzida, melhorando seu custo e acaba se tornando mais atrativo (NOGUEIRA, 2018).

## **2.5. Correção de Fator de Potência**

Vários tipos de dispositivos eletromagnéticos possuem enrolamentos: motores, transformadores, lâmpadas de descargas, fornos de indução, entre outros (Capacitech, 2011). Para funcionar, estes equipamentos magnetizam os núcleos de ferro, armazenando energia reativa, energia que não produz trabalho e diminui o fator de potência da instalação. De uma forma prática, baixos fatores de potência são sempre resultado de cargas indutivas (O'MALLEY, 1993).

Para melhorar o fator de potência é preciso corrigi-lo. O processo de introduzir elementos reativos para levar o mesmo a um valor mais próximo da unidade é chamado de correção de fator de potência BOYLESTAD (2004, p. 591), o que exige estudo e preparo de técnicos, tecnólogos e engenheiros da área elétrica. Com isso são necessárias atividades práticas para melhor assimilação deste conteúdo, utilizando dispositivos de medida, equipamentos e bancadas de ensino (JUNIOR; PETRY, 2012).

Problemas encontrados com baixo fator de potência mais comuns encontrados com o baixo fator de potência são: uma maior corrente no circuito que resulta em condutores com seção maior, maior aquecimento nos condutores, necessidade de um transformador maior, acréscimo na conta de energia e equipamentos de proteção maiores (JUNIOR; PETRY, 2012).

Benefícios da correção do fator de potência ao se corrigir o fator de potência, tais como: desaparece o acréscimo cobrado nas contas de energia elétrica; melhora o aproveitamento da energia elétrica para a geração de trabalho útil; diminuem as variações de tensão (oscilações); melhora o aproveitamento dos equipamentos com um menor aquecimento; diminuem as perdas de energia elétrica na instalação devido à liberação de carga; e, a capacidade dos transformadores alcança melhor aproveitamento (Copel, 2011).

### **3. FILTRO ATIVO ACTIVAR**

O filtro ativo Activar, da empresa Elspec, foi escolhido pelo projeto para a função compensadora de harmônicos da rede. O Activar é uma alternativa rentável, superior aos bancos eletromecânicos de correção de fator de potência. Este filtro oferece compensação rápida, normalmente de 1 segundo, com um número ilimitado de operações sem transientes. O Activar tem um mecanismo de autotestagem exclusivo, equipado com um sistema de relatórios abrangente.

#### **3.1. Benefícios do Sistema**

O sistema Activar oferece os seguintes benefícios:

- Comutação de grupos de capacitores sem transientes, usando elementos de comutação eletrônicos;
- Evita danos a equipamentos eletrônicos sensíveis;
- Economiza energia;
- Filtração de harmônicos;
- Controle exato do fator de potência, mesmo na presença de harmônicos;
- Aumento significativo na expectativa de vida dos elementos de comutação e capacitores;
- Analisador de rede trifásico integrado que mede todos os parâmetros da rede, incluindo harmônicos;
- Funcionalidades exclusivas de auto-teste e entrega de relatórios completos.

#### **3.2. Controlador**

O controlador (figura 5) é o cérebro do sistema. Baseado em um avançado dispositivo VLSI e em um processador digital de sinal (DSP), ele tem até 9 canais (4 de tensão, 3 de corrente de rede e 2 de corrente de sistema). O controlador também possui um display LCD e 5 teclas de função. A operação é realizada por meio de menus intuitivos e suporte online.

O controlador executa duas funções principais: Controle e medição.



Figura 5: Controlador ACTIVAR

### 3.3. Controle

A função de controle do controlador constantemente coleta amostras de tensão e corrente, e analisa o número adequado de grupos de capacitores necessários para se ter um fator de potência ou kVAr exatos. O controlador também ajusta o nível de tensão. Esta função usa um sistema único de análise em tempo real de variações de carga para uma análise precisa, em aproximadamente 1 milissegundo.

Além disso, a função de controle executa testes no sistema para analisar a condição da unidade, proporciona indicadores de mal funcionamento e efetua ajustes na unidade operacional conforme se mostra necessário. O controlador também gera pulsos de disparo precisos para o módulo de chave, conforme necessário para conectar ou desconectar os grupos de capacitores.

### 3.4. Medições

O controlador possui recursos avançados de medição, incluindo harmônicos e análise de forma de onda.

As leituras são fornecidas para três seções (figura 6):

- Leituras principais da rede, indicadas por um símbolo M (principal), que mostram o total de medições da Rede, incluindo o sistema de compensação;

- Leituras do centro de carga, indicadas por um símbolo L (carga), que mostram as medições de carga sem o sistema compensador;
- Leituras do sistema de capacitores, indicadas por um símbolo C (capacitores), que mostram somente as medições do sistema.

As três seções são medidas por apenas um par de conjuntos de TC: um montado no sistema de capacitores e outro montado na rede ou na carga. O controlador calcula a corrente do terceiro capacitor usando os valores medidos nos outros dois.

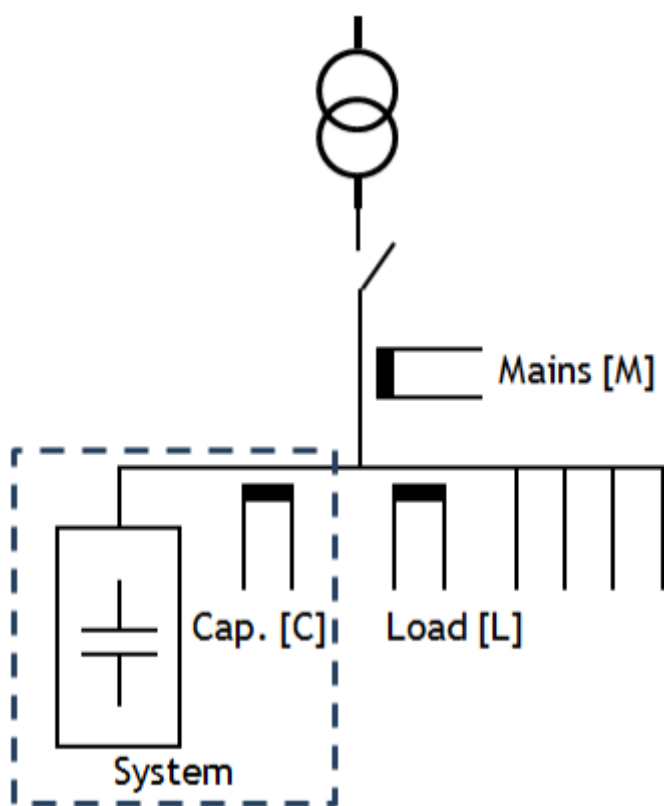


Figura 6: Diagrama unifilar do controlador

#### 4. ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso será elaborado com base em uma indústria do setor nuclear, a qual, em 2019, procurou reduzir os encargos pagos devido a demanda reativa e energia reativa excedentes na rede. Como é estabelecido na resolução nº 414/2010 para as unidades do grupo A, o valor de fator de potência mínimo, indutivo ou capacitivo, é de 0,92. Através

da medição apropriada, quando há ultrapassagem do valor permitido é gerado multas ao consumidor.

O projeto, alvo do estudo, nos apresenta um sistema de correção de fator de potência em baixa tensão visando adequação à legislação vigente. Desta forma, o projeto elaborado no referido estudo será embasado no cenário existente prévio à implementação do referido sistema e nos resultados esperados do mesmo. O autor teve acesso a contas e relatórios do projeto.

Visando a aplicação do conteúdo apresentado em teoria, foram realizadas medições das grandezas elétricas para verificação das consequências técnicas da implementação de bancos de capacitores, com base no sistema existente.

O sistema, objeto deste estudo de caso, está em processo de implementação, onde está situada a distribuição de média tensão de 6,9kV no qual será realizado o atual projeto do compensador harmônico. Na referida distribuição, verificou-se a existência de índices de energia reativa nos transformadores.

Tendo conhecimento dos valores que estão sendo consumidos mensalmente de energia reativa devido aos níveis de perturbações harmônicas que se encontram presentes no sistema, fez-se necessária a análise.

Portanto, foram medidas e analisadas as últimas 12 contas de energia, como na tabela 8, tabela 9, tabela 10 e tabela 11, tendo assim acesso ao consumo e energia reativa no período inspecionado. Partindo desses valores e análise, percebeu-se a necessidade da instalação do filtro ativo para compensação dos índices harmônicos na rede.

Dito isso, o estudo de viabilidade financeira levará em consideração os valores analisados e os resultados esperados do projeto após implementação, considerando a adequação ideal do fator de potência, em vista disso, terá como premissa anular ou mitigar ao máximo qualquer cobrança relativa ao baixo fator de potência.

#### **4.1. Sistema e Tecnologia de Monitoramento**

Em função da topologia de distribuição de energia do site e de informações disponíveis no diagrama unifilar foram definidos os pontos para instalação dos instrumentos de medição, elencados de 1 a 12, conforme diagrama ilustrativo abaixo.

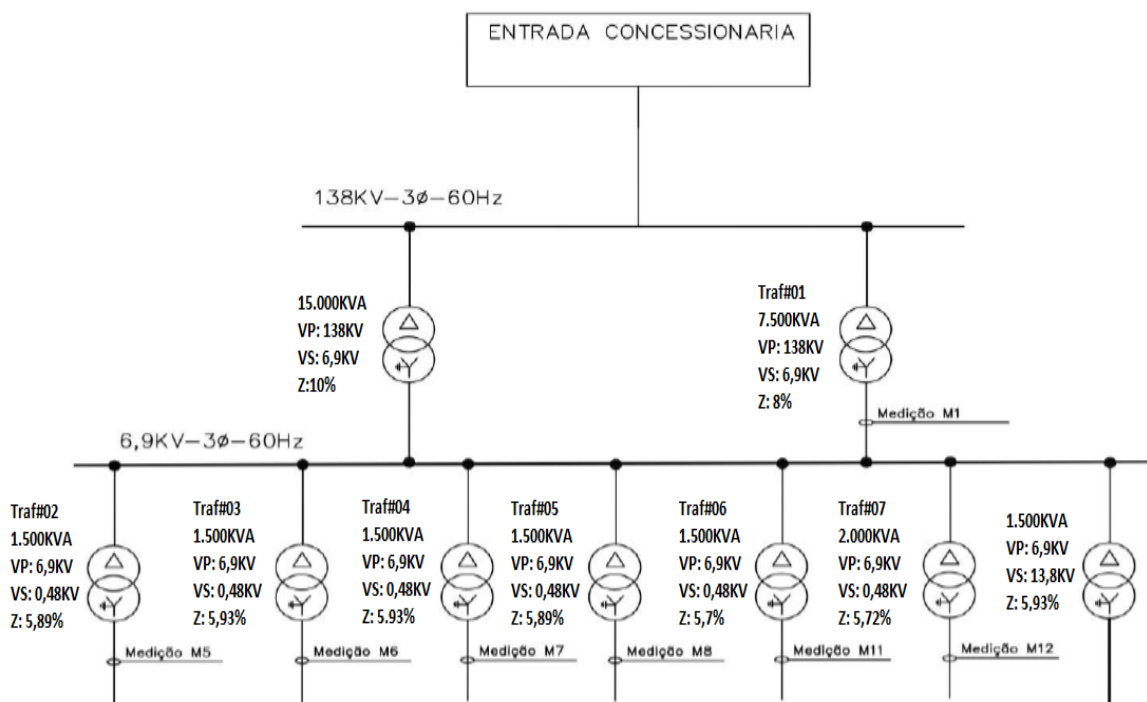


Figura 7: Diagrama unifilar

Desse modo, foram definidas as próximas etapas que consistem nas fases apresentadas abaixo:

Realização da coleta de dados referente às grandezas elétricas dos circuitos alimentadores através de Instrumentos modelo PURE e G4500 de fabricação ELSPEC, medidor classe A com taxa de amostragem mínima de 256 amostras por ciclo elétrico.

### 3-Phase



### Single Phase



Figura 8: Instrumento modelo PURE de fabricação ELSPEC



Figura 9: Instrumento modelo G4500 de fabricação ELSPEC

Conversão via software PQS Sapphire das grandezas elétricas registradas para cada equipamento de modo a permitir a interpretação dos dados através de ilustrações gráficas e tabelas.

Definição dos indicadores de qualidade de energia elétrica, com base técnica nas normas vigentes, de modo a classificar as cargas por intermédio de análises crítica referente aos seus comportamentos típicos.

Nota: Para o auxílio na análise crítica do comportamento das cargas, foi adotado como base técnica as normas IEC 61.000, IEE-519 e ANEEL Prodist – Módulo 8. Porém, os limites ou valores de referência das grandezas elétricas para qualidade de energia são definidos pelas normas para análise no ponto de acoplamento comum (PAC). Além de que, na ocorrência de eventos (VTCD) em sistemas de baixa tensão a norma não estabelece valores de referência. E por fim, a frequência de ocorrência dos eventos de VTCD necessita ser apurados em um período de 30 dias consecutivos. Como cada barramento é parte integrante do sistema estabelecemos indicadores aplicáveis aos demais pontos da instalação, e expressos pelas tabelas a seguir com a finalidade de classificar as grandezas elétricas registradas.

## 4.2. Monitoramento de Índices Harmônicos

Como premissa para os comentários apresentados a seguir referente às respectivas medições, foi adotado o conceito de que: Por definição, qualidade de energia está relacionada à ausência de desvios no suprimento da energia elétrica, verificados por bons níveis de tensão e frequência, resultando em uma boa operacionalidade da carga/equipamento alimentado.

O monitoramento foi feito de forma pontual, em locais específicos, são esses: Traf#01, Traf#02, Traf#03, Traf#04, Traf#05, Traf#06, Traf#07, Traf#08, Traf#09, Traf#10, Traf#11, Traf#12;

Destes locais, os que serão expostos e analisados serão estes: Traf#01, Traf#02, Traf#03, Traf#04, Traf#05, Traf#06 e Traf#07.

Os gráficos apresentados a seguir retratam o presente cenário de monitoramento de um sistema de potência (SEP), cujo está sendo penalizado constantemente com tributos devido a excedência de níveis de THD de tensão e corrente elétrica.

Os níveis de distorções harmônicas registrados nos laudos dos transformadores mostram que estão dentro dos limites de aceitação que são estabelecidos no PRODIST.

#### 4.2.1. Monitoramento do Traf#01

A Figura 2, mostra o gráfico das distorções harmônicas, no THDV, encontramos uma distorção de tensão na ordem de 1,2%, valor este dentro dos limites estabelecido pelas principais normas nacionais e internacionais.

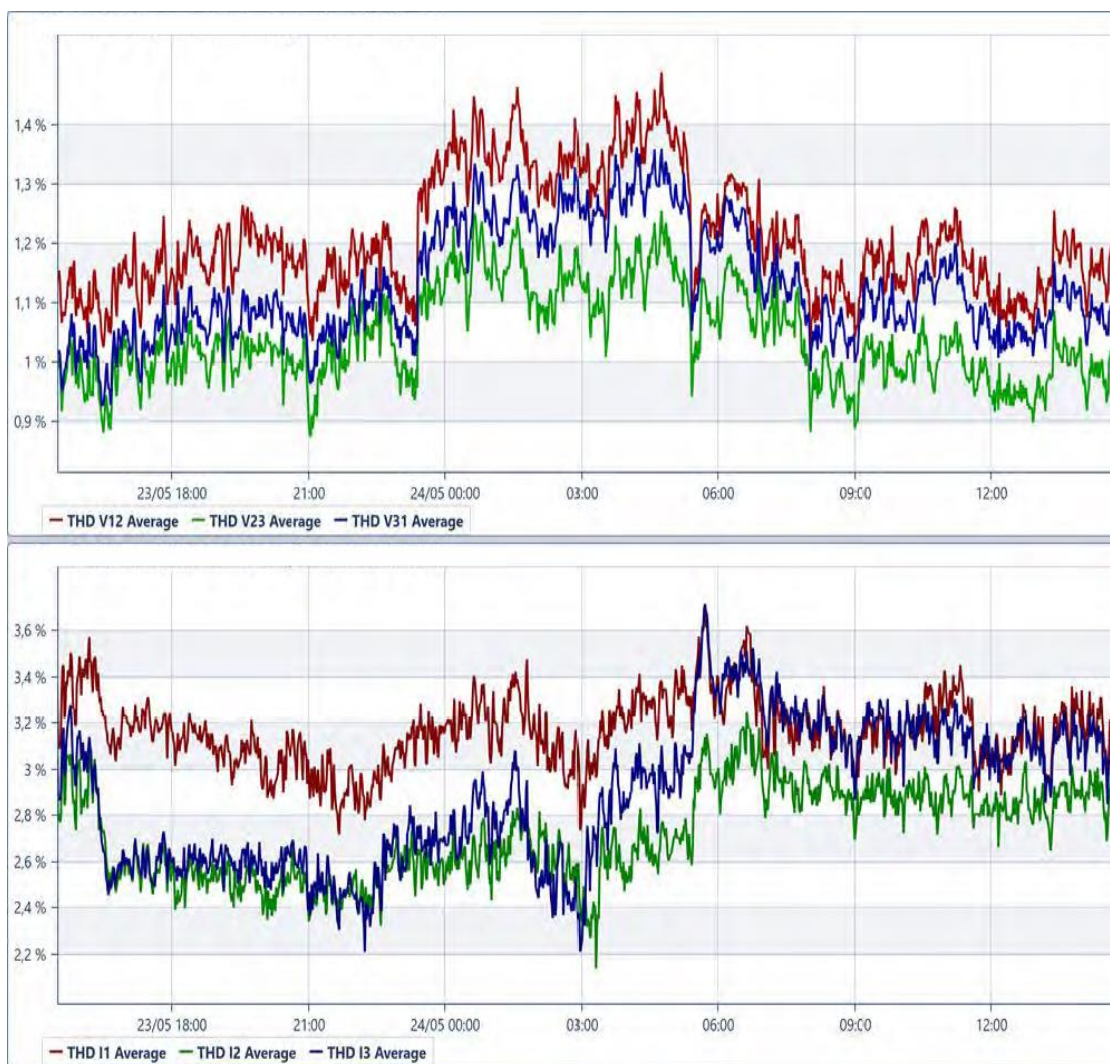


Figura 10: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#01

#### 4.2.2. Monitoramento do Traf#02

A Figura 3, indica os valores de distorções harmônicas. A distorção de tensão (THDV) medida é inferior a 2,0% e a distorção de corrente (THDI) causada pela operação da carga é na ordem de 5%.

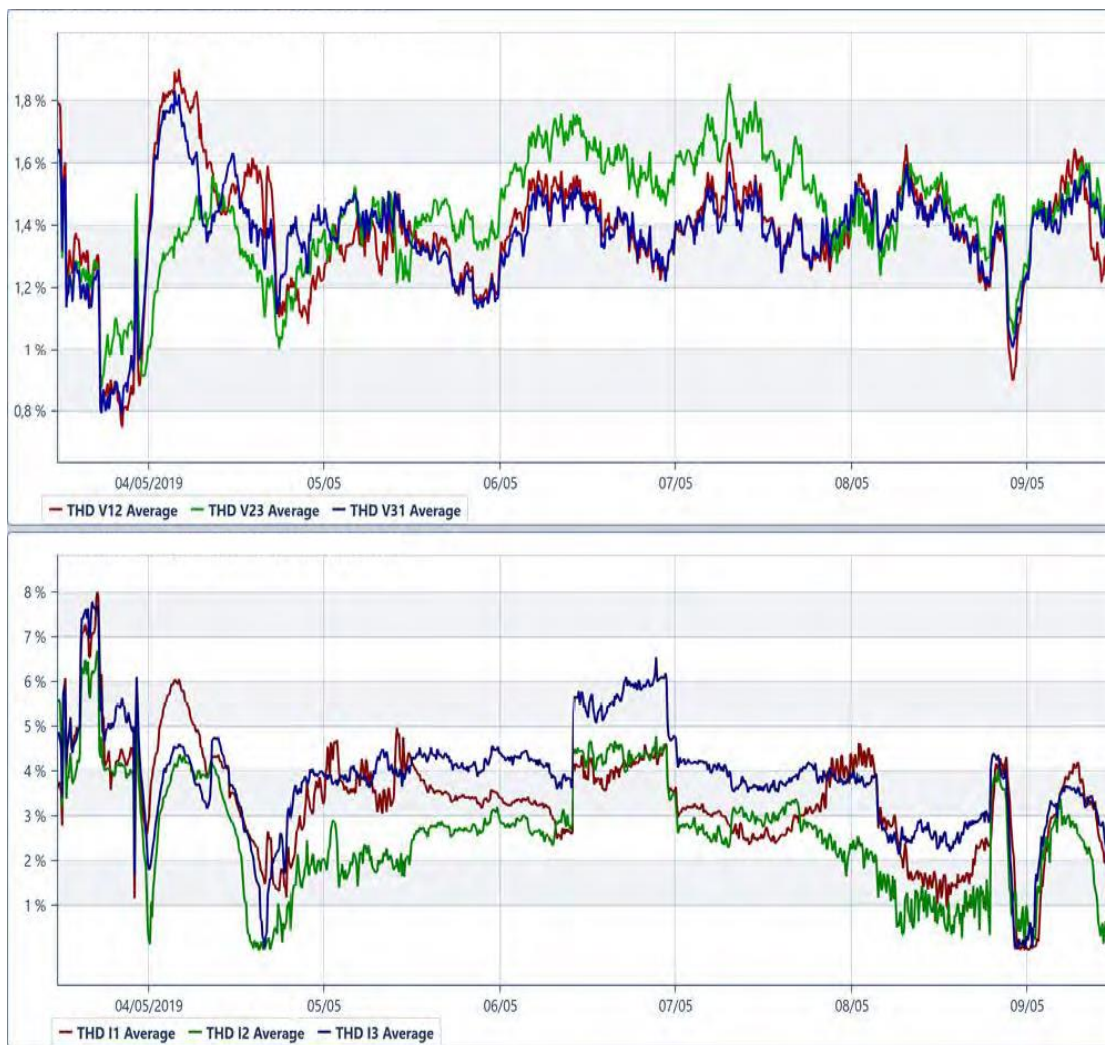


Figura 11: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#02

### 4.2.3. Monitoramento do Traf#03

A Figura 4, indica os valores de distorções harmônicas. A distorção de tensão (THDV) medida é inferior a 2,0% e a distorção de corrente (THDI) causada pela operação da carga é na ordem de 1-5%.



Figura 12: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#03

#### 4.2.4. Monitoramento do Traf#04

A Figura 5, indica os valores de distorções harmônicas. A distorção de tensão (THDV) medida é inferior a 1,5% e a distorção de corrente (THDI) causada pela operação da carga é na ordem de 4-1%.

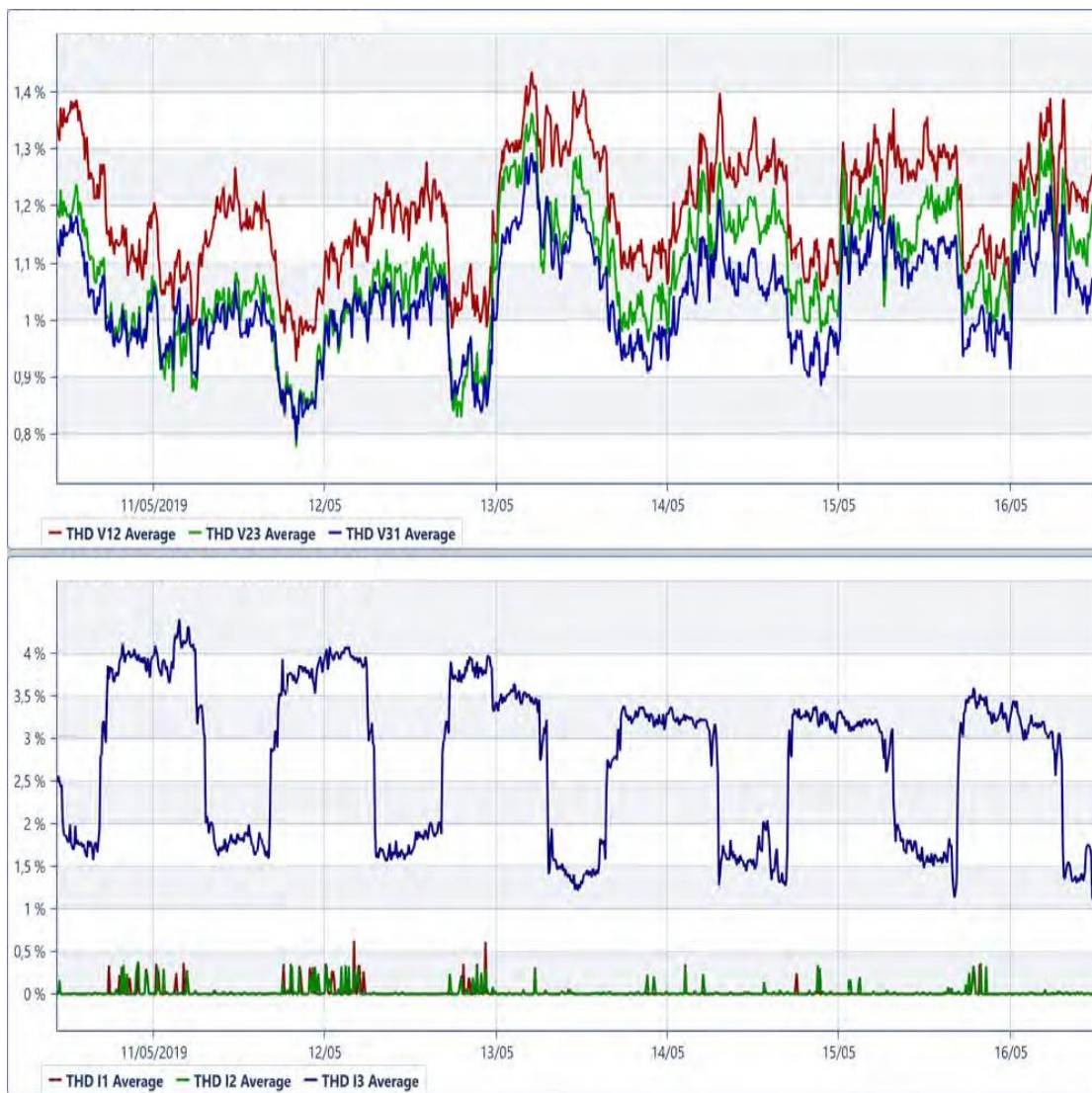


Figura 13: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#04

#### 4.2.5. Monitoramento do Traf#05

A Figura 6, indica os valores de distorções harmônicas. A distorção de tensão (THDV) medida é inferior a 1,5% e a distorção de corrente (THDI) causada pela operação da carga é na ordem de 2%.



Figura 14: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#05

#### 4.2.6. Monitoramento do Traf#06

A Figura 7, indica os valores de distorções harmônicas. A distorção de tensão (THDV) encontrada é operada na faixa de 2,5% e a distorção de corrente (THDI) de 14%.

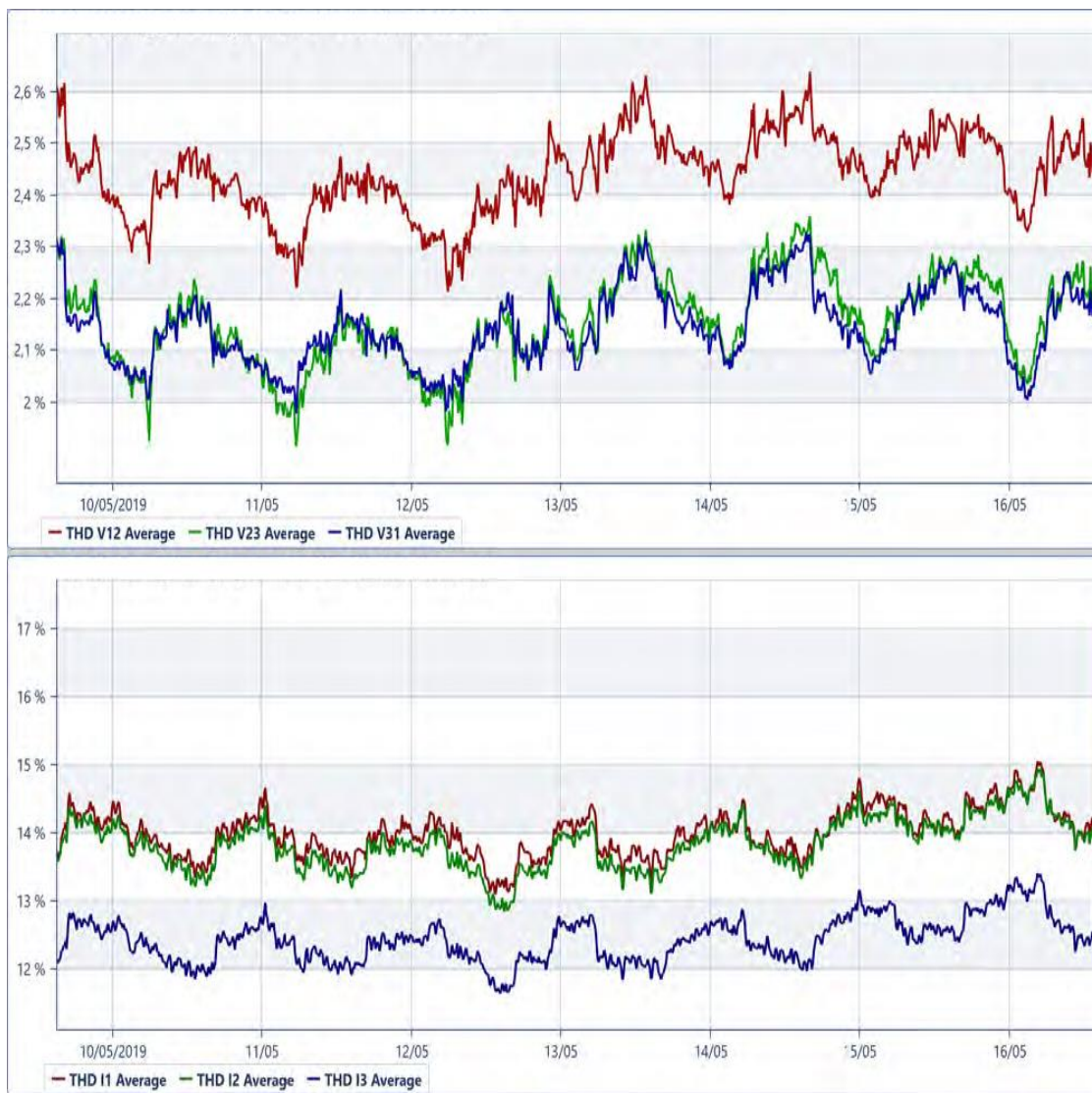


Figura 15: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#06

#### 4.2.7. Monitoramento do Traf#07

A Figura 8, indica os valores de distorções harmônicas. A distorção de tensão (THDV) medida é inferior a 1,3%. A distorção de corrente (THDI) causada pela operação da carga é na ordem de 1%.



Figura 16: Gráfico de distorções harmônicas do Traf#07

### 4.3. Análise dos Dados Obtidos

Para analisar de forma correta os dados obtidos, alguns indicadores foram propostos pela empresa a qual fez as medições. Os indicadores QE propostos são:

<b>Fator de potência</b>	<b>Ponderação</b>
100% > FP > 97%	10
97% > FP > 92%	7,5
92% > FP > 80%	5
FP < 80%	2,5

Tabela 1: Indicadores de fator de potência

<b>THDV ou DTT</b>	<b>Ponderação</b>
DTT < 3%	10
3% < DTT < 6%	7,5
6% < DTT < 10%	5
DTT > 10%	2,5

Tabela 2: Indicadores de THDV ou DTT

<b>THDI ou DTI</b>	<b>Ponderação</b>
DTI < 10%	10
10% < DTI < 20%	7,5
20% < DTI < 30%	5
DTI > 30%	2,5

Tabela 3: Indicadores de THDI ou DTI

<b>Frequência</b>	<b>Ponderação</b>
60,1 > f > 59,9	10
60,5 > f > 59,5	7,5
56,5 > f > 66	5
fora dos intervalos	2,5

Tabela 4: Indicadores de Frequência

<b>Fator Desequilíbrio</b>	<b>Ponderação</b>
FD < 1%	10
1% < FD < 2%	7,5
2% < FD < 3%	5
FD > 3%	2,5

Tabela 5: Indicadores de Fator Desequilíbrio

<b>Regulação de Tensão (RT%)</b>	<b>Ponderação</b>
0,97 Uref <= Umed <= 1,02 Uref	10
0,93 Uref <= Umed <= 1,05 Uref	7,5
0,90 Uref <= Umed <= 0,93 Uref	5
Umed < 0,9 ou Umed > 1,05	2,5

Tabela 6: Indicadores de Regulação de Tensão

<b>Carregamento (m%)</b>	<b>Ponderação</b>
40% > m > 50%	10
20% < m < 40% ou 50% < m < 65%	7,5
10% < m < 20% ou 65% < m < 80%	5
10% < m ou m > 80%	2,5

Tabela 7: Indicadores de Carregamento

Sendo os níveis colocados na coluna “Ponderação”, associados aos seguintes conceitos:

<b>Conceito</b>	<b>Ponderação</b>
Péssimo	nota 2,5
Regular	nota 5,0
Bom	nota 7,5
Ótimo	nota 10

Tabela 8: Definição dos conceitos

Apresentados os indicadores, segue o radar indicador de qualidade de energia:

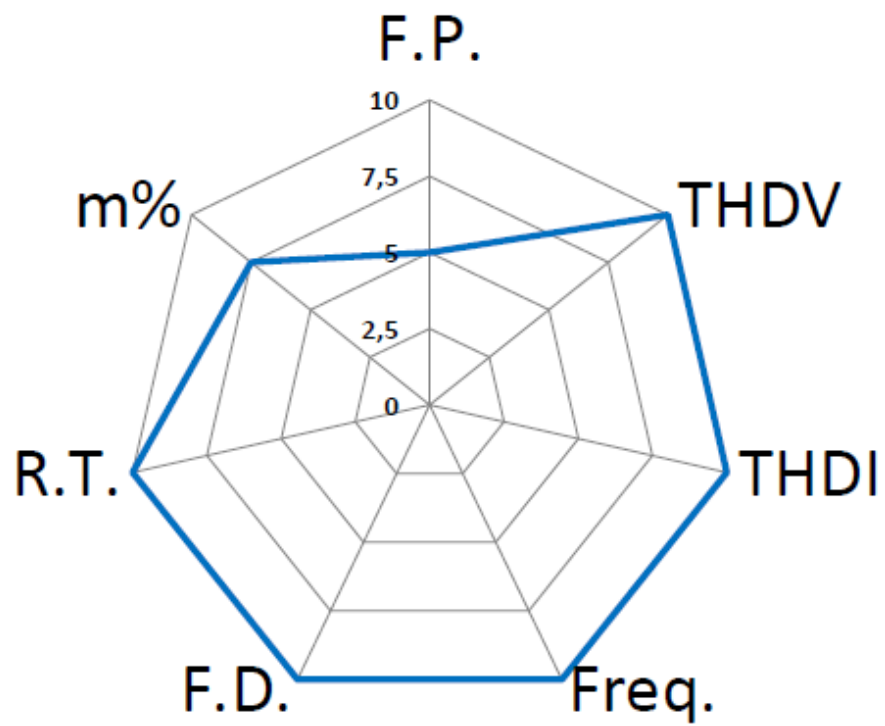


Figura 17: Traf#01

Indicador	Valor Típico	Ponderação
F.P.	0,896	5
THDV	1,21%	10
THDI	9%	10
Freq.	60	10
F.D.	0,22%	10
R.T.	97,10%	10
m%	35,40%	7,5

Tabela 9: Indicadores do Traf#01

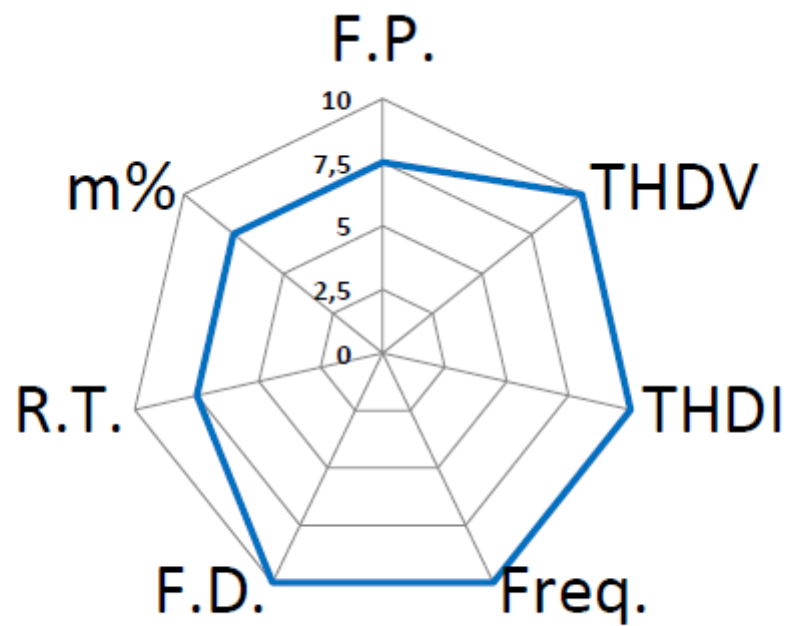


Figura 18: Traf#02

<b>Indicador</b>	<b>Valor Típico</b>	<b>Ponderação</b>
F.P.	0,886	7,5
THDV	1,44%	10
THDI	3,4%	10
Freq.	60	10
F.D.	0,32%	10
R.T.	93,90%	7,5
m%	30,90%	7,5

Tabela 10: Indicadores do Traf#02

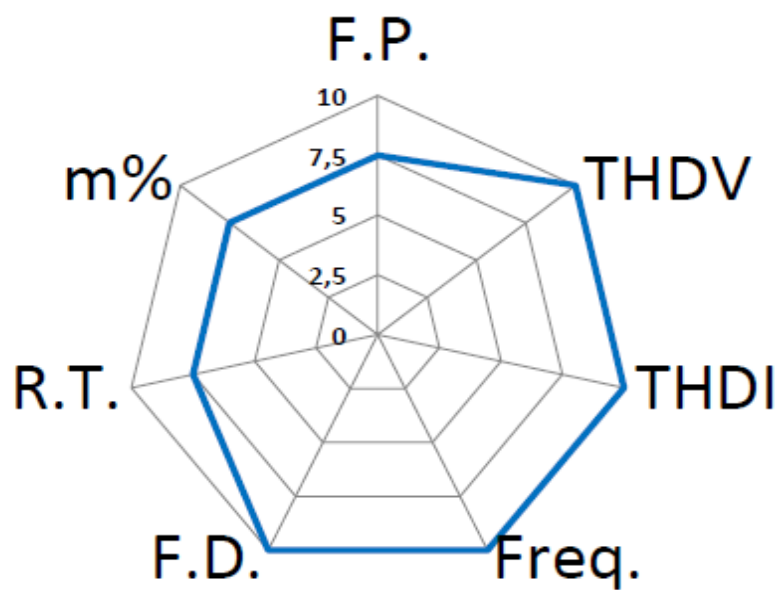


Figura 19: Traf#03

<b>Indicador</b>	<b>Valor Típico</b>	<b>Ponderação</b>
F.P.	0,838	7,5
THDV	1,21%	10
THDI	4,5%	10
Freq.	60	10
F.D.	0,22%	10
R.T.	95,40%	7,5
m%	20,10%	7,5

Tabela 11: Indicadores do Traf#03

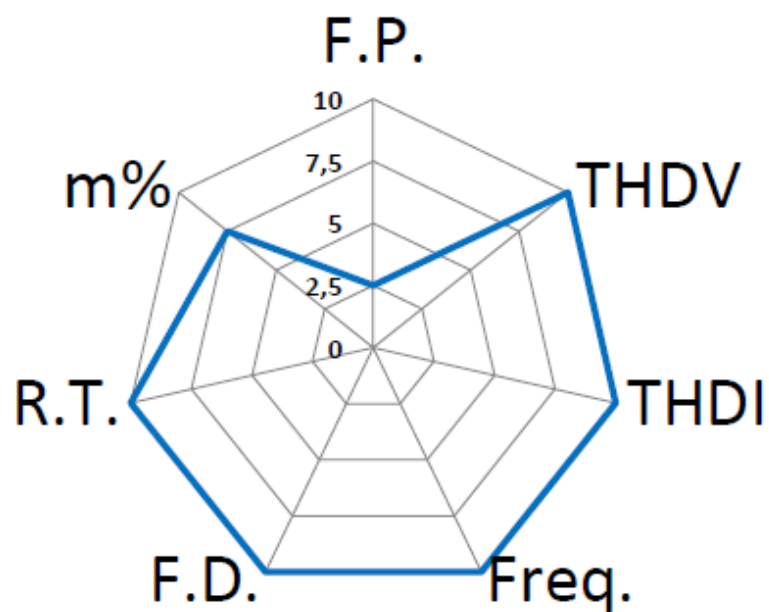


Figura 20: Traf#04

<b>Indicador</b>	<b>Valor Típico</b>	<b>Ponderação</b>
F.P.	0,748	2,5
THDV	1,20%	10
THDI	2,8%	10
Freq.	60	10
F.D.	0,21%	10
R.T.	100,10%	7,5
m%	14,60%	7,5

Tabela 12: Indicadores do Traf#04

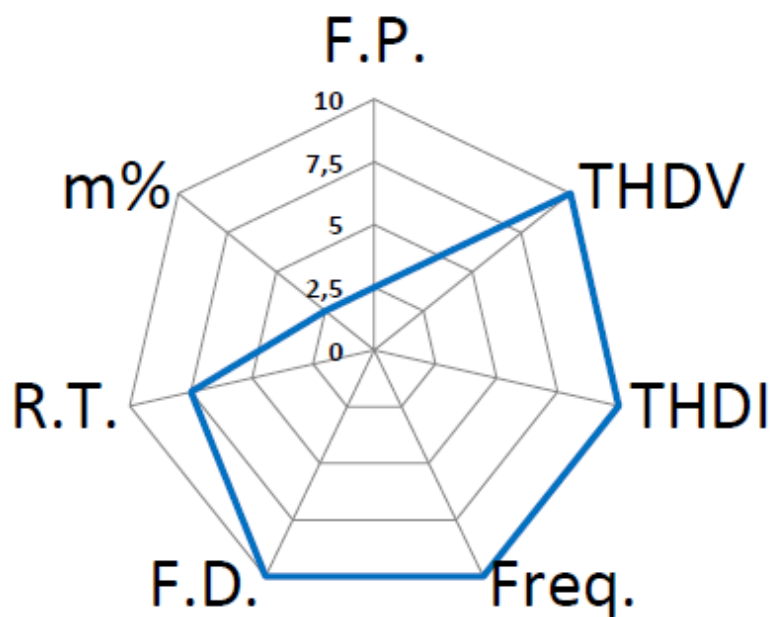


Figura 21: Traf#05

<b>Indicador</b>	<b>Valor Típico</b>	<b>Ponderação</b>
F.P.	0,896	2,5
THDV	1,21%	10
THDI	1,0%	10
Freq.	60	10
F.D.	0,27%	10
R.T.	96,70%	7,5
m%	7,30%	2,5

Tabela 13: Indicadores do Traf#05

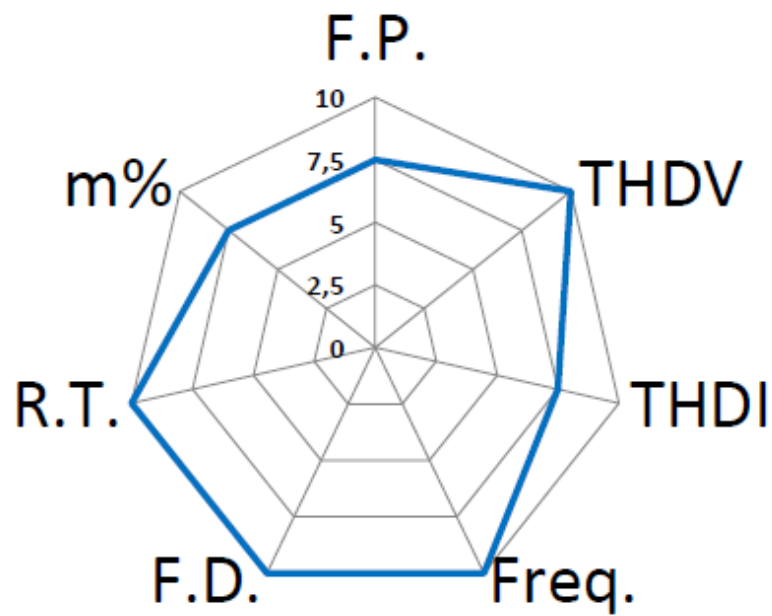


Figura 22: Traf#06

<b>Indicador</b>	<b>Valor Típico</b>	<b>Ponderação</b>
F.P.	0,956	7,5
THDV	2,44%	10
THDI	14,0%	7,5
Freq.	60	10
F.D.	0,32%	10
R.T.	99,10%	7,5
m%	36,40%	7,5

Tabela 14: Indicadores do Traf#06

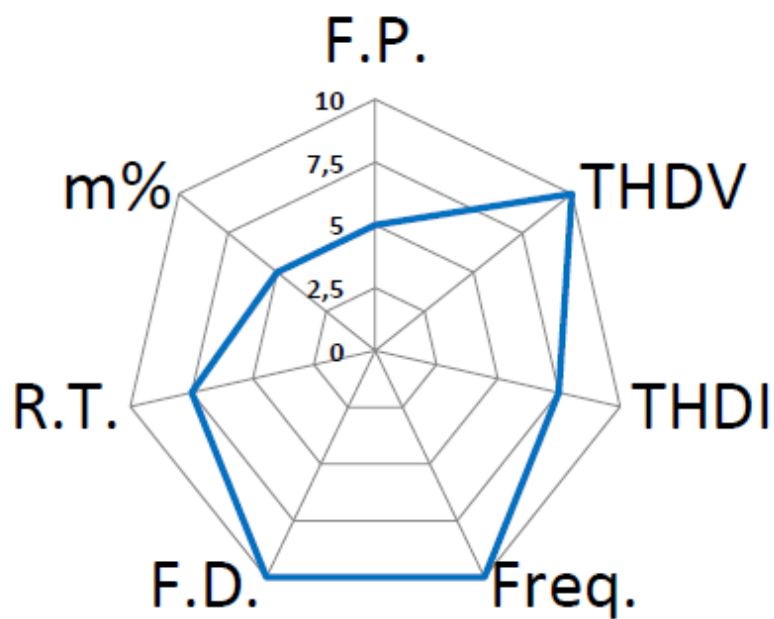


Figura 23: Traf#07

Indicador	Valor Típico	Ponderação
F.P.	0,899	2,5
THDV	2,04%	10
THDI	14,8%	7,5
Freq.	60	10
F.D.	0,47%	10
R.T.	102,40%	7,5
m%	14,90%	5

Tabela 15: Indicadores do Traf#07

Aliado aos indicadores, após aferição dos dados obtidos nas contas de energia elétrica do período de 12 meses, obtivemos os seguintes gráficos de consumo em kW/h e os índices de energia reativas que vem a ser os principais agentes indicadores de qualidade de energia.

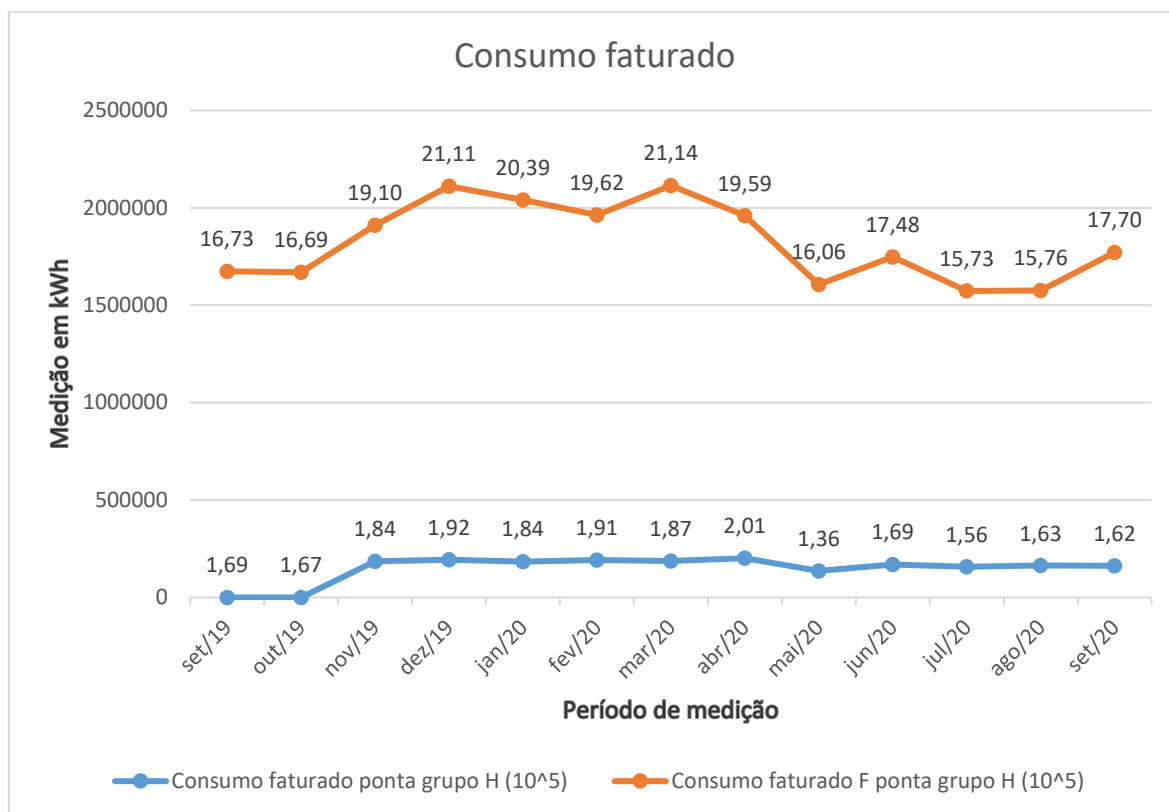


Figura 24: Gráfico de consumo faturado em horário de ponta e fora de ponta.

	Consumo faturado ponta grupo H (kW/h)	Consumo faturado F ponta grupo H (kW/h)
set/19	169.413	1.673.595
out/19	167.911	1.669.185
nov/19	184.990	1.910.790
dez/19	192.868	2.111.130
jan/20	184.404	2.039.940
fev/20	191.665	1.962.765
mar/20	187.327	2.114.280
abr/20	201.458	1.959.615
mai/20	136.908	1.606.500
jun/20	169.092	1.748.565
jul/20	156.845	1.573.425
ago/20	163.425	1.576.260
set/20	162.212	1.770.300

Tabela 16: Tabela de consumo faturado em horário de ponta e fora de ponta.

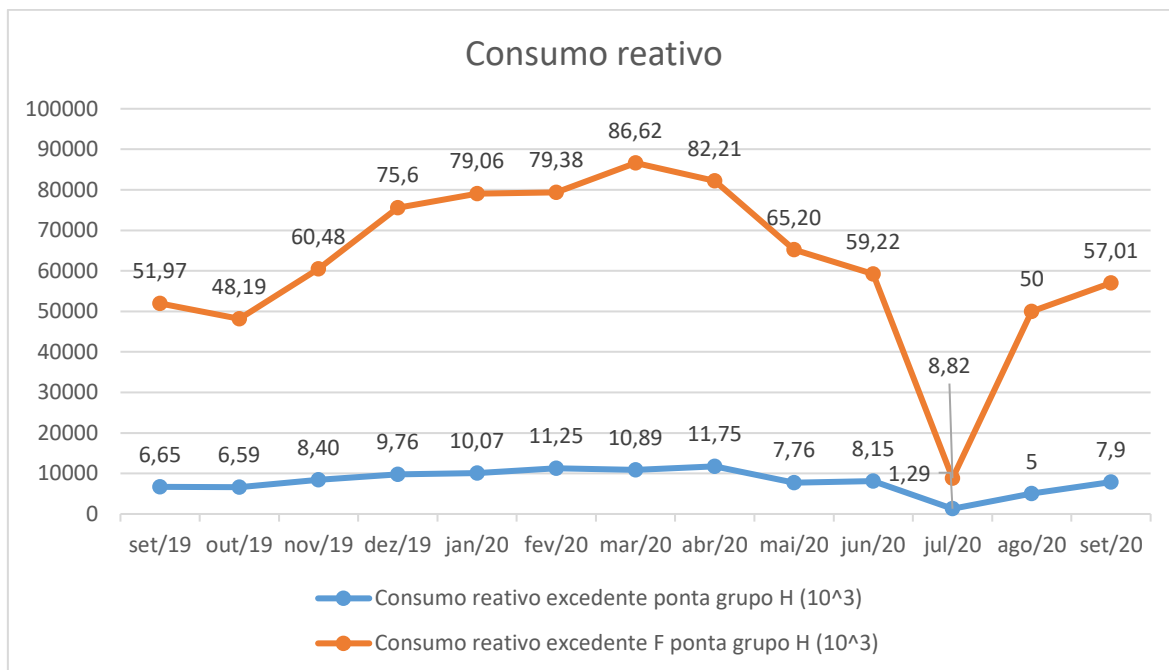


Figura 25: Gráfico de consumo reativo excedente em horário de ponta e fora de ponta.

	Consumo reativo excedente ponta grupo H (KVAR)	Consumo reativo excedente F ponta grupo H (KVAR)
set/19	6.659	51.975
out/19	6.593	48.195
nov/19	8.404	60.480
dez/19	9.765	75.600
jan/20	10.071	79.065
fev/20	11.258	79.380
mar/20	10.899	86.625
abr/20	11.752	82.215
mai/20	7.761	65.205
jun/20	8.152	59.220
jul/20	1.294	8.820
ago/20	5.000	50.000
set/20	7.900	57.015

Tabela 17: Tabela de consumo reativo excedente em horário de ponta e fora de ponta.

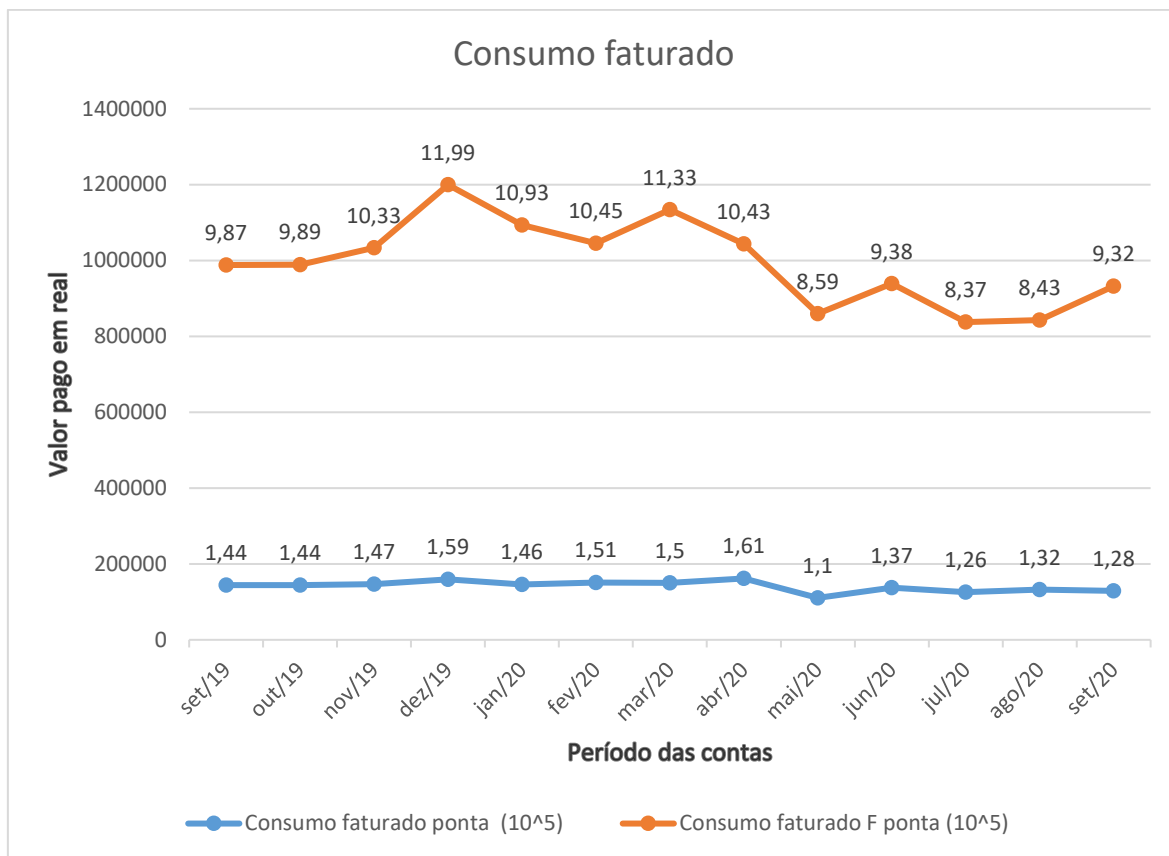


Figura 26: Gráfico financeiro de consumo faturado em horário de ponta e fora de ponta

	Consumo faturado ponta (R\$)	Consumo faturado F ponta (R\$)
set/19	144.400,86	987.755,86
out/19	144.102,89	989.058,87
nov/19	147.068,89	1.033.603,63
dez/19	159.079,45	1.199.628,51
jan/20	146.129,1	1.093.367,04
fev/20	151.288,85	1.045.152,73
mar/20	150.477,9	1.133.846,07
abr/20	161.766,74	1.043.514,58
mai/20	110.628,5	859.686,34
jun/20	137.099,79	938.891,97
jul/20	126.087,69	837.675,73
ago/20	132.013,08	843.236,04
set/20	128.953,67	932.009,84

Tabela 18: Tabela financeira de consumo faturado em horário de ponta e fora de ponta.

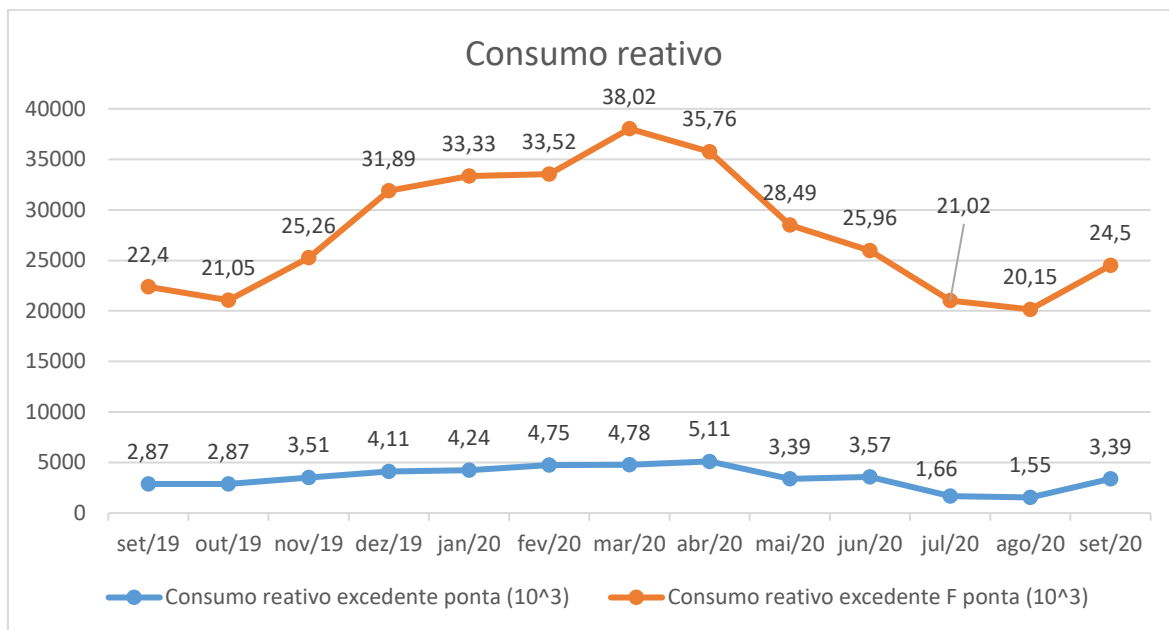


Figura 27: Gráfico financeiro do consumo reativo excedente em horário de ponta e fora de ponta

	Consumo reativo excedente ponta (R\$)	Consumo reativo excedente F ponta (R\$)
set/19	2.870,22	22.402,78
out/19	2.879,75	21.051,09
nov/19	3.510,6	25.264,31
dez/19	4.119,16	31.890,34
jan/20	4.246,23	33.336,17
fev/20	4.754,14	33.521,38
mar/20	4.784,55	38.027,5
abr/20	5.112	35.762,7
mai/20	3.391,09	28.490,67
jun/20	3.574,08	25.963,82
jul/20	562,5	3.834,05
ago/20	1.550,42	20.150,52
set/20	3.395,97	24.509,03

Tabela 19: Tabela financeira de consumo reativo excedente em horário de ponta e fora de ponta.

#### 4.4. Resultados Esperados

Após implementação do filtro ativo de compensação no sistema, espera-se por uma resposta positiva devido a atenuação dos índices harmônicos presentes na rede, e com isto cessar os ônus que vinham sendo tributados mensalmente à empresa.

Tais encargos, como são citados no tópico 3, tendo como referência a resolução nº 414/2010 para as combinações do grupo A, sabendo que o valor de fator de potência mínimo, indutivo ou capacitivo, é de 0,92, serão zerados. É importante lembrar que, com auxílio de uma medição apropriada, quando há ultrapassagem do valor permitido são gerados tributos financeiros ao contratante.

Conforme análise realizada anteriormente no presente estudo de caso, em todo sistema de potência obtivemos os dados necessários para vir a eliminar os índices de perturbações harmônicas, que geravam um impacto de forma direta e indireta em todo o sistema, não só de forma financeira, mas também de forma técnica, como a qualidade da energia a ser consumida em equipamentos eletrônicos e de medição, que vem a ser aparelhos de extrema sensibilidade e exatidão, e também a atenuação das perdas e impactos que vinham ocorrendo nos transformadores e geradores.

O baixo carregamento e os valores de distorções harmônicas de corrente elétrica aferidos nos transformadores não vem a ser de total preocupação conforme norma IEC 61.000. Consequentemente os números registrados de perturbação de tensão (TDHV), discriminativo na instalação encontra-se abaixo de 2%, mas ainda assim atende as recomendações estabelecidas no PRODIST.

Os índices apresentados durante as aferições e nos gráficos de radar de qualidade mostram que a instalação elétrica de todo o sistema de potência possui um excelente dimensionamento, sem exceção de nenhum dos transformadores operando acima de sua capacidade máxima e os níveis de condutibilidade de todos os componentes elétricos estão em perfeitas condições.

Contudo, há uma necessidade de um estudo mais detalhado do sistema de aterramento, pois observou-se níveis de corrente elétrica circulando pelo condutor terra.

Tradando-se da parte financeira, com a atenuação dos níveis harmônicos excedentes no sistema e todas outras considerações citadas acima, após a implantação do novo sistema de compensação, é esperada uma economia anual aproximada de R\$388.955,08.

Se possível, inserir o diagrama unifilar atualizado com os 3 compensadores estáticos livres de transientes de 262 kVAr e 2 de 187 kVAr

## 5. CONCLUSÃO

É importante lembrar que o cálculo do fator de potência pode ser realizado tanto por potência quanto por energia, através das seguintes fórmulas:

$$FP = \frac{P}{\sqrt{(P^2+Q^2)}} \quad \text{ou} \quad FP = \frac{Eativa}{\sqrt{(Eativa^2+Ereativa^2)}} ;$$

Como é estabelecido na resolução nº 414/2010 para as unidades do grupo A, o valor do fator de potência mínimo, indutivo ou capacitivo, é de 0,92. Através de medição apropriada, quando há ultrapassagem do valor permitido é gerado multa ao consumidor.

E que o cálculo da Energia reativa (Ere) excedente e da Demanda reativa excedente (Dre(p)) são calculados em função da potência\demanda ativa conforme as fórmulas abaixo:

$$E_{RE} = \sum_{T=1}^n \left[ EEAM_T \times \left( \frac{f_R}{f_T} - 1 \right) \right] \times VR_{ERE}$$

$$D_{RE}(p) = \left[ MAX_{T=1}^n \left( PAM_T \times \frac{f_R}{f_T} \right) - PAF(p) \right] \times VR_{DRE}$$

Com essas informações obtidas, é possível analisar o comportamento do sistema e levantar soluções para a mitigação da multa de excedente reativo.

Notas:

- O sistema foi validado através das somas das cargas em BT com a medição do circuito alimentar;
- Todos os fatores de potência típicos são indutivos;
- As perdas por transformação foram estimadas em 3% da potência nominal de cada transformador;
- O Valor na entrada de energia (PAC) foi calculado conforme as premissas acima;

Transformador	Tensão	kVA Trafo	kVAr (transformadores)	THDV	FP	kW (Cargas Medidas)	kVAr (Cargas Medidas)	kVAr (Cargas Medidas + Trafo)	Compensador Estático (kVAr)	FP final
<b>Cubículo#1</b>	380	1000	30	1,80%	0,96	200	67	97	0	0,90
<b>Cubículo#2</b>	380	1000	30	1,50%	0,83	144	90	120	0	0,768
<b>Cubículo#3</b>	380	1000	30	1,40%	0,93	80	22	52	0	0,838
<b>TRAF#02</b>	480	1500	45	1,40%	0,88	432	231	276	263	0,999
<b>TRAF#03</b>	480	1500	45	1,20%	0,85	280	180	225	262	0,991
<b>TRAF#04</b>	480	1500	45	1,20%	0,76	160	130	175	187	0,997
<b>TRAF#05</b>	480	1500	45	1,20%	0,9	102	50	95	0	0,732
<b>TRAF#06</b>	460	2000	60	2,40%	0,96	545	170	230	262	0,998
<b>TRAF#07</b>	460	2500	75	2%	0,9	270	125	200	187	0,999
<b>TRAF#01</b>	6900	7500	225	1,20%	0,89	2421	1230	1455	0	0,857
<b>PAC</b>	<b>13800</b>	<b>Valores Calculado →</b>				<b>2213</b>	<b>1065</b>	<b>1470</b>		<b>0,99</b>

Tabela 20: Solução – Compensação em baixa tensão

Recomenda-se a instalação de 3 compensadores estáticos livres de transientes de 262 kVAr e 2 de 187 kVAr, como consta a figura abaixo, com target de fator de potência no PAC de 0,99 indutivo. Essa solução anula o consumo de energia reativa dos respectivos transformadores, aliviando o carregamento e filtrando também a circulação de corrente harmônica nos barramentos.

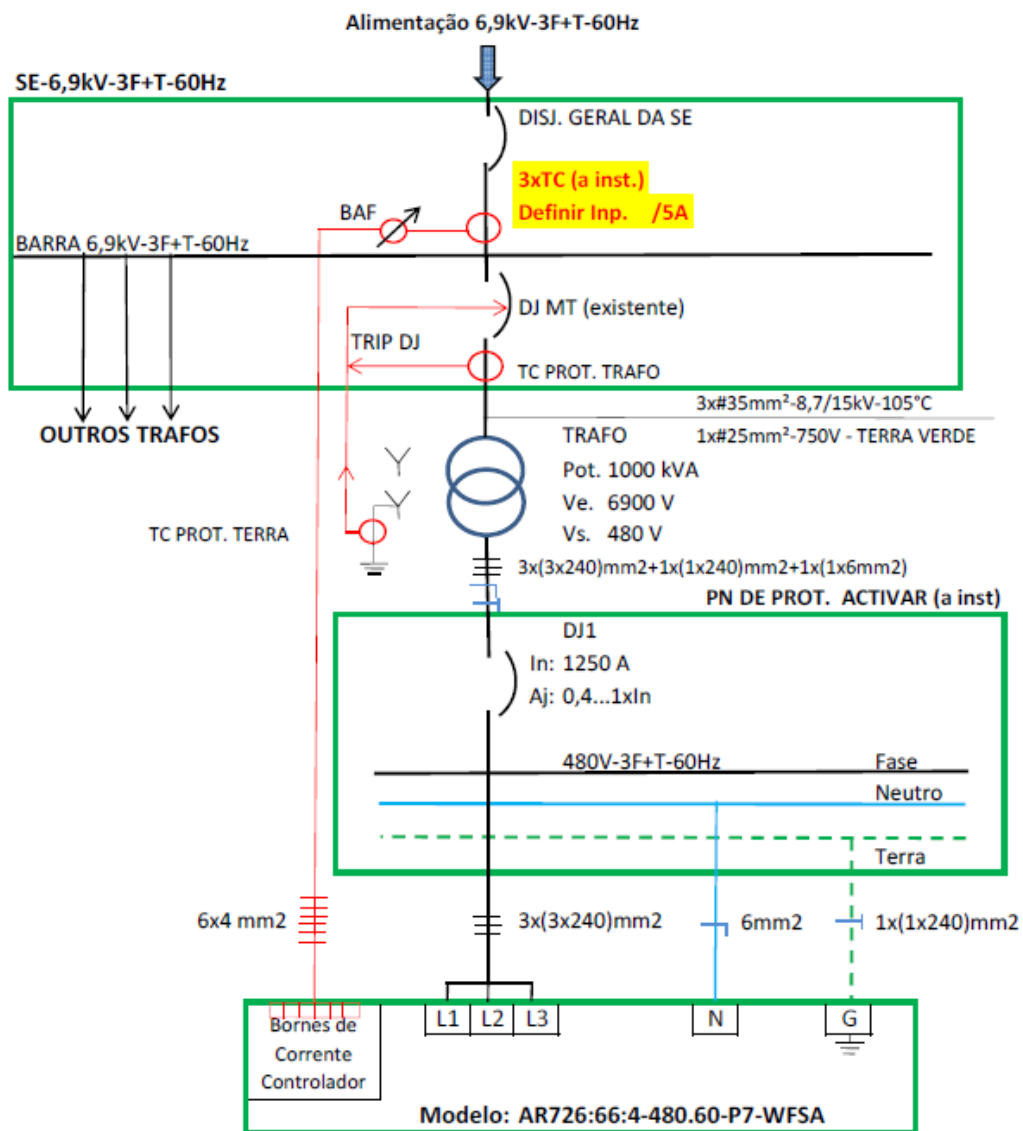


Figura 28: Diagrama unifilar do compensador estático livre de transientes

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 209 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR IEC 60831-1: Capacitores de potência auto-regenerativos para sistemas CA, com tensão máxima de 1.000 V Parte 1. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Manual de Fiscalização da Distribuição 2003 – ANEEL. Disponível em: Acesso em: 15 de outubro de 2016. Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Nota Técnica no0083/2012-SRD/ANEEL. Brasília, 2012. 19 p. Disponível em: Acesso em: 27 set, 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Nota Técnica no0154/2013-SRD/ANEEL. Brasília, 2013. 13 p. Disponível em: Acesso em: 27 set. 2020.

Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional: Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica– PRODIST. Brasília, 2016. 76 p. Disponível em: Acesso em: 02 out. 2020.

AZEVEDO, Eduardo Ribeiro; NUNES, Luiz Antônio de Oliveira. Lei da Indução de Faraday. Disponível em: Acesso em: 29 set. 2020.

ANSI / IEEE C37.60 – 2003 Standards Requirements for Overhead Pad-Mounted, Dry Vault, and Submersible Automatic Circuit Reclosers and Fault Interrupters for Alternating Current Systems Up to 38kV. Disponível em: < <https://www.ansi.org/> >. Acesso em: 29 de setembro de 2020.

BALTAZAR, Jamil de Almeida. Definição de fator de potência. Disponível em: Acesso em: 04 out. 2020.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. LEI No8.987, DE 13 DE FEVEREIRO DE 1995. Portal da Legislação, Brasília, 1995. Disponível em: Acesso em: 28 set, 2020.

BOYLESTAD, Robert L. Introdução à Análise de Circuitos. São Paulo. Pearson Hall. 10 ed. 2004.

CAPACITECH. Disponível em: < [http://www.capacitech.com.br/download/Fator\\_de\\_Potência\\_Capacitech.pdf](http://www.capacitech.com.br/download/Fator_de_Potência_Capacitech.pdf) >. Acesso em: 11 out. 2020.

CENA. Disponível em: Acesso em: 20 de abril 2012. CREDER, Hélio. Instalações Elétricas. Rio de Janeiro. LTC. 15 ed, p. 269-270, 2007.

COPEL. Disponível em: Acesso em: 28 out. 2020.

CORMANE, J. A.; REIS, A. AVALIAÇÃO DA PRESENÇA DE CARGAS NÃO LINEARES NA REDE ELÉTRICA UTILIZANDO O SOFTWARE OPENDSS. p. 59, [s.d.].

DE JESUS, N. C.; CASTOLDI, F. T.; NONENMACHER, C. F. B. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DE CARGAS NÃO-LINEARES: AVALIAÇÃO DOS EFEITOS E LIMITES DE CORTES DE TENSÃO (VOLTAGE NOTCHING). p. 6, [s.d.].

Eng. Flávio Resende Garcia, M.Sc. HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA. Disponível em: <[http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf\\_reativa/ap\\_harmonicosepccap.pdf](http://www.iesa.com.br/institucional/pdf/pdf_reativa/ap_harmonicosepccap.pdf)>. Acesso em: 05 out. 2020.

ÊNIO VALE DE OLIVEIRA CUNHA. PROJETO E ANÁLISE DE FILTROS HARMÔNICOS EM SUBESTAÇÕES DA UFRN. Disponível em: <[https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/28444/1/Projetoanalisefiltros\\_Cunha\\_2019.pdf](https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/28444/1/Projetoanalisefiltros_Cunha_2019.pdf)>. Acesso em: 07 out. 2020.

FIRJAN. Quanto custa a energia elétrica para a pequena e média indústria no Brasil?. [S. l.], fevereiro 2017. Disponível em: <https://www.firjan.com.br/publicacoes/publicacoes-deeconomia/quanto-custa-a-energia-eletrica.htm>. Acesso em: 04 out. 2020.

GUSSOW, Milton. Eletricidade Básica. São Paulo. Pearson Makron Books. 2 ed, 1997.

JUNIOR, E. L. S.; PETRY, J. R. BANCADA DIDÁTICA PARA ESTUDO DE FATOR DE POTÊNCIA. p. 47, 2012.

MARTINS, Alexandre Saccol; GABIATTI, Gerson; BONAN, Guilherme. ENTENDENDO O FATOR DE POTÊNCIA. Porto Alegre: Eletrônica S.a, 2017. 13 p. Disponível em: Acesso em: 01 out. 2020.

Diego Marchi. PROJETO E ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E FINANCEIRA DA CORREÇÃO DO FATOR DE POTÊNCIA EM INDÚSTRIA TÊXTIL UTILIZANDO BANCOS DE CAPACITORES. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/197847/TCC-DiegoMarchi.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 09 set. 2020.

MAMEDE FILHO, João. Instalações Elétricas Industriais. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.

MUSSOI, Fernando Luiz Rosa. Sinais Senoidais: Tensão e Corrente Alternada. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/36135435/78/POTENCIA-APARENTE-ETRIANGULO-DE-POTENCIAS>>. Acesso em: 16 out. 2020.

O'MALLEY, John R. Análise de circuitos. Rio de Janeiro, RJ: McGraw-Hill, 1983.

SILVA, Marcos César Isoni. Correção do fator de potência de cargas industriais com dinâmica rápida. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - UFMG, Belo Horizonte, 2009. Disponível em: <https://www.ppgee.ufmg.br/defesas/129M.PDF>. Acesso em: 4 out. 2020.

SILVA, José M. da; SILVEIRA, Emerson S. da. Apresentação de Trabalhos Acadêmicos: normas e técnicas. 1oEd. Juiz de Fora – MG: Editoração eletrônica, 2002, 176p.

TLA. MANUAL TLA Capacitores de potência. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/49621047/10/CONCEITOS-BASICOS>>. Acesso em: 16 out. 2020.

VIEIRA, Daniel. Comparação de técnicas de medição de potência reativa sob condições não-senoidais com ênfase na transformada Wavelet. 2012. xi, 99 f., il. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

VALLIM, Marcos Banheti Rabello. Relações de corrente alternada. Disponível em: < <http://www.das.ufsc.br/~mvallim/eletro-eletronica/circuitos-ac.pdf> >. Acesso em: 16 out. 2020.

VIANA, Augusto Nelson Carvalho et al. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA: FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES. Campinas: Pee - Aneel, 2012. 315 p. Disponível em: Acesso em: 24 set. 2020.