

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA INDUSTRIAL ELÉTRICA/AUTOMAÇÃO**

**EDUARDO COLOMBO TENÓRIO LEÃO CAVALCANTI
WILLIAM MUZYKA OYARZABAL NUNES**

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS REFERENTES A UMA
PLANTA INDUSTRIAL DE DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**CURITIBA
2019**

EDUARDO COLOMBO TENÓRIO LEÃO CAVALCANTI

WILLIAM MUZYKA OYARZABAL NUNES

**ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS REFERENTES A UMA
PLANTA INDUSTRIAL DE DISTRIBUIÇÃO DE COMBUSTÍVEL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha.

CURITIBA

2019

EDUARDO COLOMBO TENÓRIO LEÃO CAVALCANTI

WILLIAM MUZYKA OYARZABAL NUNES

Análise de distorções harmônicas referentes a uma planta industrial de distribuição de combustível

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 19 de março de 2019.

Prof. Antonio Carlos Pinho, Doutor
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarlen Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Joaquim Eloir Rocha, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Clider Adriane de Souza Silva, Me.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Luiz Erley Schafranski, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

RESUMO

CAVALCANTI, Eduardo; NUNES, William. **Análise de distorções harmônicas referentes a uma planta industrial de distribuição de combustível**. 2019. 119 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

Será apresentada uma análise referente a coleta de dados obtidos em uma planta industrial do ramo de distribuição de combustível na região metropolitana de Curitiba-PR. O principal intuito desse trabalho é analisar e caracterizar as distorções harmônicas presentes na planta industrial, através de medições realizadas por equipamentos e métodos apropriados, para que assim possa ser possível observar a qualidade da energia elétrica presente no local em questão. Foram adotadas as normalizações impostas pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica, através do manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST, que padroniza procedimentos relacionados a atividades técnicas relacionadas ao desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. Além de caracterizar o sinal presente na planta de distribuição de combustível, esse trabalho também apresenta possíveis métodos para mitigar o problema associado a distorções harmônicas, em que também serão apresentados tópicos e sugestões para trabalhos futuros referentes a esse trabalho.

Palavras-chave: ANEEL. PRODIST. Qualidade da energia elétrica. QEE. Distorções harmônicas.

ABSTRACT

CAVALCANTI, Eduardo; NUNES, William. **Harmonic distortion analysis of an industrial fuel distribution plant**. 2019. 119 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação – Curso de Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

An analysis will be presented regarding the collection of data obtained from a industrial plant of fuel distribution in the metropolitan region of Curitiba-PR. The main purpose of this work is to analyze and characterize the harmonic distortions present in this industrial plant, through measurements made by appropriate equipment and methods, so that it may be possible to observe the electric power quality (EPQ) present in the place. The standardization imposed by ANEEL – Brazilian Electricity Regulatory Agency was adopted through the Manual of Procedures for the Distribution of Electric Power - PRODIST, which standardizes procedures related to technical activities related to the performance of electric power distribution systems. In addition to characterizing the present signal in the fuel distribution plant, this work also intends to present possible methods to mitigate the problem associated with harmonic distortions, wherein topics and suggestions for future work related to this subject will also be presented.

Keywords: ANEEL. PRODIST. Electric Power Quality. EPQ. Harmonic distortion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Onda distorcida "T" e suas componentes de 1ª e 5ª ordem.....	14
Figura 2 - Gráfico de tensão e corrente de carga linear.....	15
Figura 3- Gráfico de tensão e corrente de carga não-linear.....	16
Figura 4 - Representação das componentes harmônicas em um circuito	17
Figura 5 - Sinais de tensão e de corrente senoidais puras.	18
Figura 6 - Sinal fundamental, segundo e terceiro harmônicos.....	19
Figura 7 - Espectro harmônico de um sinal de alimentação de um retificador de 6 pulsos ...	21
Figura 8 - Tetraedro de potência	25
Figura 9 - Efeitos harmônicos em motores.....	27
Figura 10 - Expectativa de vida de um transformador sujeito a distorções harmônicas de tensão.....	27
Figura 11 - Expectativa de vida de um transformador sujeito a distorções harmônicas de corrente	28
Figura 12 - Efeito pelicular em condutores.....	28
Figura 13 - Topologia de filtros passivos para harmônicos de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem.....	33
Figura 14 - Exemplo de funcionamento de um filtro ativo paralelo com a carga não linear...	34
Figura 15 - Esquema de aterramento do tipo TN-S.....	35
Figura 16 - Esquema de conexão de uma malha de aterramento.	36
Figura 17 - Analizador RE6000	37
Figura 18 - Esquema de ligação do analisador em circuito trifásico.....	44
Figura 19 - Resposta em frequência de um filtro passivo do tipo shunt conectado ao sistema.	51
Figura 20 - Ocorrência de correntes de quinta ordem no dia 20/10/2018.....	51
Figura 21 - Detalhes de um indutor composto por núcleo ferromagnético.	53
Figura 22 - Ocorrência de correntes de quinta ordem no dia 17/10/2018.....	59
Figura 23 - Esquema de conexão do filtro harmônico passivo do tipo Shunt trifásico.....	63
Figura 24 - Espectro harmônico de tensão - Fase A.	66
Figura 25 - Espectro harmônico de tensão - Fase B.....	67
Figura 26 - Espectro harmônico de tensão - Fase C.....	68
Figura 27 - Espectro harmônico de corrente - Fase A.....	69
Figura 28 - Espectro harmônico de corrente - Fase B.	70
Figura 29 - Espectro harmônico de corrente - Fase C.	71
Figura 30 - Dados pontuais referentes à distorção harmônica - Fase A.	72
Figura 31 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase A.....	73
Figura 32 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase B.....	74
Figura 33 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase C.	75
Figura 34 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase A.	76
Figura 35 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase B.....	77
Figura 36 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase C.....	78
Figura 37 - Distorção total de tensão para as três fases.	79
Figura 38 - Distorções totais de corrente para as três fases.....	80
Figura 39 - Potência aparente demandada pela planta industrial.	81
Figura 40 - Formas de ondas distorcidas presentes no circuito elétrico analisado.	83

Figura 41 - Espectro harmônico encontrado para as formas de ondas obtidas na figura 39.	84
Figura 42 - Formas de onda referente as correntes das três fases do sistema no dia 20/10/2018.....	85
Figura 43 - Espectro harmônico referente aos sinais obtidos de acordo com a figura 41.	86
Figura 44 - Espectro harmônico de tensão - Fase A – trafo PDVT	88
Figura 45 - Espectro harmônico de tensão - Fase B – trafo PDVT	89
Figura 46 - Espectro harmônico de tensão - Fase C – trafo PDVT.....	90
Figura 47 - Espectro harmônico de corrente - Fase A – trafo PDVT.....	91
Figura 48 - Espectro harmônico de corrente - Fase B – trafo PDVT	92
Figura 49 - Espectro harmônico de corrente - Fase C.....	93
Figura 50 - Dados pontuais referentes à distorção harmônica - Fase A – trafo PDVT	94
Figura 51 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase A – trafo PDVT	95
Figura 52 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase B – trafo PDVT	96
Figura 53 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase C – trafo PDVT	97
Figura 54 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase A – trafo PDVT	98
Figura 55 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase B – trafo PDVT	99
Figura 56 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase C – trafo PDVT.....	100
Figura 57 - Distorção total de tensão para as três fases referente ao trafo PDVT	101
Figura 58 - Distorções totais de corrente para as três fases referente ao trafo PDVT	102
Figura 59 - Potência aparente demandada pela planta industrial.....	103
Figura 60 - Formas de ondas distorcidas presentes no circuito elétrico analisado	104
Figura 61 - Espectro harmônico para as formas de ondas obtidas na figura 59.....	105
Figura 62 - Formas de onda das correntes das três fases do sistema PDVT - dia 17/10/2018	106
Figura 63 - Espectro harmônico dos sinais obtidos de acordo com a figura 61.....	107
Figura 64 - Harmônicas de corrente - Fase A – Terminal principal (dia 28/10/2018 às 13:41:26).....	108
Figura 65 - Espectro harmônico corrigido - Corrente Fase A.....	110
Figura 66 - Harmônicas de corrente - Fase A – Terminal PDVT (dia 16/10/2018 às 14:07:32).	111
Figura 67 - Espectro harmônico corrigido para o transformador PDVT.....	112

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limite de distorção de corrente em relação à corrente fundamental do sistema de até 69kV	31
Tabela 2 - Limites de distorção harmônica de tensão em baixa e média tensão.....	32
Tabela 3 - Especificações Técnicas do RE6000	38
Tabela 4 - Terminologia adotada pelo PRODIST.....	40
Tabela 5 - Limites das distorções harmônicas.....	41
Tabela 6 - Valores médios referentes planta industrial encontrados no dia 20/10/2018.....	46
Tabela 7 - Características do indutor que será utilizado no filtro.	53
Tabela 8 - Variáveis a serem utilizadas no projeto do indutor do filtro harmônico.	54
Tabela 9 - Valores médios referentes planta industrial encontrados no dia 17/10/2018 para o transformador PDVT.	56
Tabela 10 - Características do indutor que será utilizado no filtro.	60
Tabela 11 - Terminais de motores e suas potências.	64
Tabela 12 - Grandezas médias encontradas no dia 19/10/2018.	65
Tabela 13 - Grandezas médias encontradas no dia 20/10/2018.	65
Tabela 14 - Grandezas médias encontradas no dia 21/10/2018.	65
Tabela 15 - Harmônicas de tensão - Fase A.....	66
Tabela 16 - Harmônicos de tensão - Fase B.....	67
Tabela 17 – Harmônicos de tensão – Fase C.....	68
Tabela 18 - Harmônicos de corrente - Fase A.....	69
Tabela 19 – Harmônicos de corrente – Fase B.....	70
Tabela 20 - Harmônicos de corrente - Fase C.....	71
Tabela 21 - Relatório parcial das grandezas elétricas referentes a fase A.....	82
Tabela 22 - Grandezas médias do trafo PDVT.....	87
Tabela 23 - Harmônicas de tensão - Fase A – trafo PDVT	88
Tabela 24 - Harmônicos de tensão - Fase B – trafo PDVT.....	89
Tabela 25 – Harmônicos de tensão – Fase C – trafo PDVT.....	90
Tabela 26 - Harmônicos de corrente - Fase A – trafo PDVT	91
Tabela 27 – Harmônicos de corrente – Fase B – trafo PDVT	92
Tabela 28 - Harmônicos de corrente - Fase C.....	93
Tabela 29 - Características físicas dos indutores propostos	114

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
AST	Análise de Segurança da Tarefa
B100	Biodiesel
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
DTT	Distorção Total de Tensão
DTT _i	Distorção Total de Tensão de Ordem Ímpar
DTT _p	Distorção Total de Tensão de Ordem Par
DTT ₃	Distorção Total de Tensão de Ordens Múltiplas de Três
FP	Fator de Potência
LGE	Líquido Gerador de Espuma
OC	Óleo Combustível
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
PDAT	Plataforma de Descarga de Auto-Tanque
PDVT	Plataforma de Descarga de Vagão-Tanque
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica
QAV	Querosene de Aviação
QEE	Qualidade da Energia Elétrica
RMS	Root MeanSquared
S10	Diesel S-10
S500	Diesel S-500
THD	<i>Total HarmonicDistorcion</i>
TQ###	Tanque n°###
TS	Técnico de Segurança
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	TEMA	9
1.1.1	DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	10
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	10
1.3	OBJETIVOS	11
1.3.1	OBJETIVOS GERAIS	11
1.3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
1.4	JUSTIFICATIVA.....	11
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	12
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	12
2	REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1	HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS	14
2.1.1	DEFINIÇÃO DE CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES	15
2.1.2	DEFINIÇÃO MATEMÁTICA DE HARMÔNICOS	16
2.1.3	ANÁLISE DO VALOR EFICAZ E VALOR RMS DE UM SINAL DISTORCIDO	22
2.1.4	INFLUÊNCIA DOS HARMÔNICOS NA POTÊNCIA APARENTE E FATOR DE POTÊNCIA DE UM SISTEMA ELÉTRICO	23
2.1.5	EFEITOS HARMÔNICOS NAS INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS	25
2.2	ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA E NORMALIZAÇÕES	30
2.2.1	NORMA IEEE STD519	30
2.2.2	NORMA EN50160	31
2.3	FILTROS E MÉTODOS DE ATERRAMENTO PARA MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS.....	32
2.3.1	FILTROS PASSIVOS	32
2.3.2	FILTROS ATIVOS	33
2.3.3	ATERRAMENTO DO TIPO TN-S.....	34
2.3.4	MALHA DE ATERRAMENTO DE REFERÊNCIA	35
3	MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1	INSTRUMENTO	37
3.2	SOFTWARE	38
3.3	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	39
3.3.1	TERMINOLOGIA	39
3.3.2	VALORES DE REFERÊNCIA	41
3.4	ESTUDO DE CASO	42
3.4.1	INSTALAÇÃO DO EQUIPAMENTO ANALISADOR DA QEE	42
3.4.2	LOCAL DA MEDIÇÃO.....	44

3.5	PROPOSTA DE PROJETO PARA APLICAÇÃO DE UM FILTRO PASSIVO DO TIPO SHUNT.	45
3.5.1	DIMENSIONAMENTO DE FILTRO HARMÔNICO PASSIVO TIPO SHUNT PARA O TRANSFORMADOR PRINCIPAL.	45
3.5.2	PROJETO DE INDUTOR PARA APLICAÇÃO NO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO TIPO SHUNT PARA O TRANSFORMADOR PRINCIPAL.	53
3.5.3	DIMENSIONAMENTO DE FILTRO HARMÔNICO PASSIVO TIPO SHUNT PARA O TRANSFORMADOR PDVT.	55
3.5.4	PROJETO DE INDUTOR PARA APLICAÇÃO NO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO TIPO SHUNT PARA O TRANSFORMADOR PDVT.	60
3.6	ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO FILTRO PASSIVO SHUNT NA PLANTA INDUSTRIAL	61
4	RESULTADO E DISCUSSÕES	64
4.1	DADOS OBTIDOS REFERENTES AOS TERMINAIS EM ANÁLISE	64
4.2	RESPOSTA ESPERADA DO SISTEMA APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO DE FILTRO HARMÔNICO PASSIVO DO TIPO SHUNT.	108
5	CONCLUSÃO	113
	REFERÊNCIAS	116

1 INTRODUÇÃO

1.1 TEMA

Até algum tempo atrás, conceitos de qualidade de energia elétrica estavam relacionados diretamente com a continuidade de seu fornecimento. Com isso, a principal preocupação do operador era, basicamente, manter o nível de tensão e de frequência em patamares toleráveis e evitar interrupções no sistema elétrico (AFONSO & MARTINS, 2003).

Atualmente, além dos critérios citados, o Sistema Elétrico de Potência deve atender também requisitos como valor eficaz estável, frequência, distorções na forma de onda, entre outros (AFONSO & MARTINS, 2003).

Com o aumento no uso de equipamentos que utilizam em seu funcionamento o chaveamento eletrônico, como por exemplos inversores de frequência para acionamentos de motores, houve também o aumento nos distúrbios gerados em sistemas elétricos pois estes não apresentam linearidade em suas características de funcionamento. Tais equipamentos são denominados por cargas não lineares (CARVALHO, 2004).

Dentre esses distúrbios, as distorções harmônicas de corrente e tensão têm uma importante relevância, já que sua presença em circuitos industriais pode prejudicar o funcionamento e operação de dispositivos elétricos. Nesses locais, esses efeitos são mais intensificados pelas características das cargas elétricas, como no caso de motores de potência elevada (CARVALHO, 2004; ORTMANN, 2008).

Esse trabalho foi feito com base em uma análise referente a uma planta industrial de distribuição de combustível, localizada na região metropolitana de Curitiba – PR. Nele, será abordado o estudo referente às harmônicas presentes no sinal de tensão e no sinal de corrente no lado de baixa tensão do transformador principal e do transformador secundário de alimentação da indústria, através de medições realizadas a fim de realizar um dimensionamento de demanda e de qualidade de energia disponibilizada no circuito em questão.

No caso, foi tomado como referência para a caracterização das informações o manual de Procedimentos e Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), elaborado pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL),

que é responsável por normalizar e padronizar características referentes aos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Também será citado os efeitos dos harmônicos em equipamentos e na instalação elétrica em questão, mostrando como esses fenômenos podem interferir na queda de rendimento no funcionamento de certo ciclo produtivo e serão abordadas algumas formas de atenuação desses fenômenos por meio de filtros ou por métodos de aterramento pertinentes ao caso estudado.

1.1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

O tema abordado será as distorções harmônicas de tensão e de corrente presentes em uma planta industrial. A delimitação será tratar das consequências geradas por esse fenômeno e também mostrar técnicas de atenuação de seus efeitos que já são utilizadas na planta e que ainda podem ser implementadas para realizar a correção desse problema.

1.2 PROBLEMAS E PREMISAS

Estudos relacionados a presença de distorções harmônicas geradas por cargas não lineares que são amplamente utilizadas no sistema elétrico tiveram um impulsionamento nas últimas décadas, tendo em vista que esse tipo de carga se tornou mais comum em indústrias e também em residências ao longo de todo o mundo.

Atualmente diversos tipos de cargas presentes em indústrias e no setor comercial necessitam de alimentação de um sinal de qualidade mais próximo do sinal fundamental possível para seu correto funcionamento, caso contrário pode ocorrer a perda da eficiência de uma cadeia produtiva, se tornando mais caro e menos acessível ao consumidor final.

Com esse fenômeno presente nos sistemas, houve a necessidade de um estudo mais aprofundado referente a esse assunto, tendo em vista que consumidores se tornaram mais sensíveis e mais exigentes quanto a qualidade da energia elétrica disponibilizada pela concessionária.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho visa o estudo da intensidade e efeitos harmônicos em uma planta industrial de distribuição de combustíveis, apresentando um amplo diagnóstico da injeção de harmônicos na planta industrial e propondo soluções para mitigar as distorções geradas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Catalogar conceitos científicos e critérios desenvolvidos por diversos profissionais da área de engenharia elétrica, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e entidades internacionais (por exemplo, IEEE) para a avaliação da qualidade de energia elétrica (QEE);
- Coletar dados elétricos da planta industrial utilizando o analisador de QEE no terminal secundário dos transformadores de entrada e em cada entrada do inversor que comanda os motores e bombas;
- Analisar os dados elétricos obtidos, com enfoque nas distorções harmônicas;
- Propor um projeto de melhoria da planta, através do estudo dos resultados obtidos para melhoria da QEE, mantendo-a em condições operacionais.

1.4 JUSTIFICATIVA

Com o constante crescimento da produção industrial e a maior utilização de equipamentos elétricos não lineares, como motores de indução controlados por inversores de frequência, há também o aumento de distúrbios nas formas de onda de tensão e de corrente disponibilizados pelo sistema, ocasionando assim um prejuízo na qualidade da energia elétrica.

No caso desse trabalho, será feita uma análise dos sinais elétricos presentes em uma instalação industrial de grande porte, onde estão presentes cargas que dependem de uma alimentação com boa qualidade de energia para seu funcionamento com alto rendimento e menor custo de produção.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Esse trabalho foi realizado em três principais etapas, facilitando sua elaboração e, posteriormente, a compreensão do tema. A primeira etapa delimitou e elucidou os temas que serão abordados ao longo do trabalho e foi realizada por meio de um capítulo de introdução do assunto que é estudado. Em sequência foi realizado o levantamento teórico do tema apresentado, apresentandoos termos técnicos, fenômenos elétricos, fórmulas e gráficos. Esta etapa é a fundamentação com que este trabalho e os resultados obtidos serão avaliados e, com base nela, serão propostas as conclusões. Vale ressaltar que foram utilizados como referências teses e artigos disponibilizados por meios eletrônicos. Na terceira etapa foi realizado todo o levantamento de dados associados a este estudo, mostrando a validade do referencial teórico exposto e fazendo uma conclusão sobre todo o trabalho que foi desenvolvido, apontado também possíveis técnicas de melhoria para o processo produtivo que foi estudado.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é composto de 5 capítulos dispostos da seguinte maneira:

O capítulo 1 apresenta o tema deste estudo, dando enfoque para motivação e objetivos deste trabalho, que apresenta um estudo de uma planta de distribuição de combustíveis.

O capítulo 2 trata do referencial teórico, apresentando de forma abrangente a qualidade de energia elétrica (QEE) e os aspectos elétricos que definem a mesma, enfatizando as distorções harmônicas e os efeitos que elas causam em outros equipamentos e no sistema elétrico. Também foi exposto a normalização e órgãos que regulamentam os indicadores qualitativos.

O capítulo 3 expõe o desenvolvimento do estudo da planta de distribuição de combustíveis, o equipamento utilizado para analisar os parâmetros elétricos, métodos utilizados para aquisição destes dados e possíveis características de filtros a serem aplicados a essa indústria.

O capítulo 4 apresenta a análise e uma discussão da conformidade do referencial teórico e do levantamento em campo, além dos resultados obtidos neste estudo.

O capítulo 5 expõe as conclusões e considerações finais, as propostas de melhorias da QEE que apresentam possibilidade de instalação na planta e sugestões para estudos futuros em áreas convergentes.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

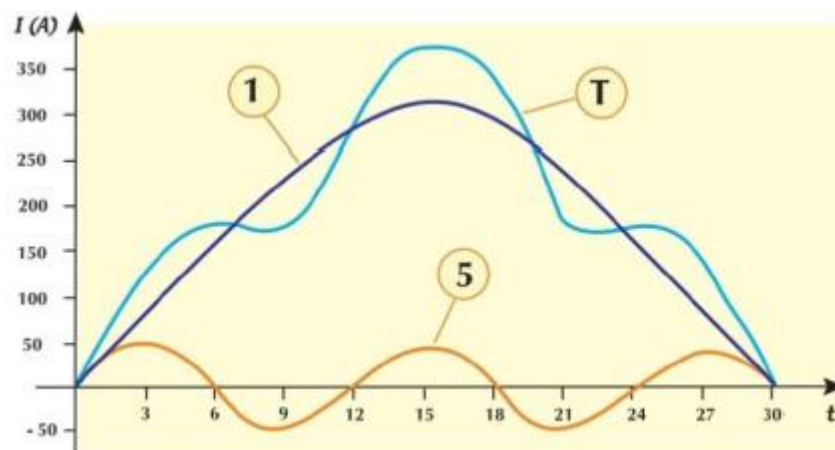
2.1 HARMÔNICOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS

A primeira definição de harmônicos tem origem associada a fenômenos acústicos, onde seu significado é a vibração de um fio ou coluna de ar, produzindo uma composição sonora com a presença de frequências múltiplas em relação a uma frequência característica, que usualmente é denominada de frequência fundamental (SOUZA, 2008).

Em sistemas elétricos, os harmônicos são componentes senoidais de um sinal periódico, onde a frequência desse sinal é um múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal fundamental. A composição da fundamental com os harmônicos denomina-se distorção harmônica.

Geralmente as distorções harmônicas presentes em um sistema elétrico são causadas por dispositivos com características não lineares como por exemplo pontes retificadoras, compensadores que são controlados por tiristores, entre outros. A seguir, segue uma figura mostrando a composição de um sinal fundamental e suas componentes harmônicas.

Figura 1 - Onda distorcida "T" e suas componentes de 1ª e 5ª ordem



Fonte: (MORENO, 2001)

Entre os distúrbios já mencionados, os harmônicos têm grande representatividade e são causados por cargas elétricas não lineares, onde estas fazem com que a corrente drenada pelo dispositivo não seja proporcional em relação

à forma da onda de tensão aplicada, ocasionando a distorção de seu formato senoidal de origem (ORTMANN, 2008).

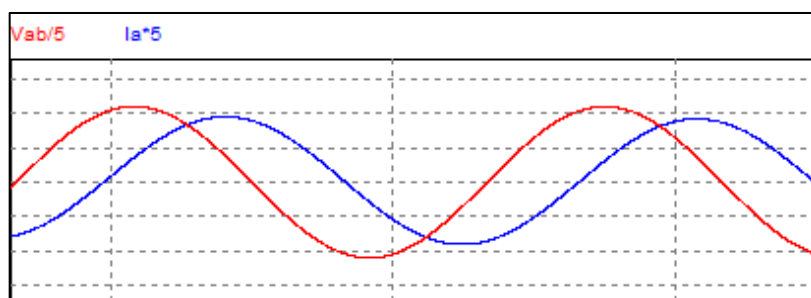
Essas fontes geradoras de harmônicos podem ter origem variadas. Elas podem surgir nas redes elétricas antes do ponto de acoplamento comum (PAC), fato que seria de responsabilidade da concessionária, ou ainda podem ser produzidas pelas cargas elétricas (parte do consumidor).

Entre os consumidores, as indústrias têm uma participação importante na geração de harmônicos, devido a que representam grande parcela na demanda do sistema elétrico de potência e as peculiaridades de seus equipamentos elétricos (TEIXEIRA, 2009).

2.1.1 DEFINIÇÃO DE CARGAS LINEARES E NÃO LINEARES

Os elementos primitivos de um circuito elétrico ou eletrônico são os resistores, indutores e capacitores. Sistemas baseados nestes três elementos são classificados como cargas lineares, pois apresentam uma relação entre tensão e corrente de maneira linear para cargas puramente resistivas ou através de integrais e derivadas, caso haja acoplamento de indutores ou capacitores (CARVALHO, 2004; ORTMANN, 2008). Na figura 2, observa-se uma defasagem entre as ondas de tensão e corrente, mas ambas são senoidais puras.

Figura 2 - Gráfico de tensão e corrente de carga linear

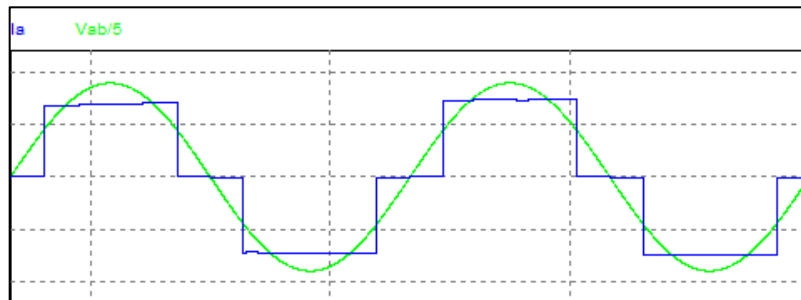


Fonte: (AUTOR, 2018)

Com o progresso da eletrônica de potência, houve uma ampliação da utilização de circuitos eletrônicos no sistema de potência. Entre os principais dispositivos implementados na indústria, destacam-se: inversores de frequência, ciclo-conversores, retificadores, fornos de indução e arco elétrico, máquinas de solda a ponto ou a arco e *no-breaks*. Considerados os principais responsáveis pela geração

de distúrbios harmônicos no sistema, estes circuitos são classificados como cargas não lineares (CARVALHO, 2004). Na figura 3, observa-se que a onda de corrente é retangular e não acompanha a forma de onda senoidal da tensão.

Figura 3- Gráfico de tensão e corrente de carga não-linear



Fonte: (AUTOR; 2018)

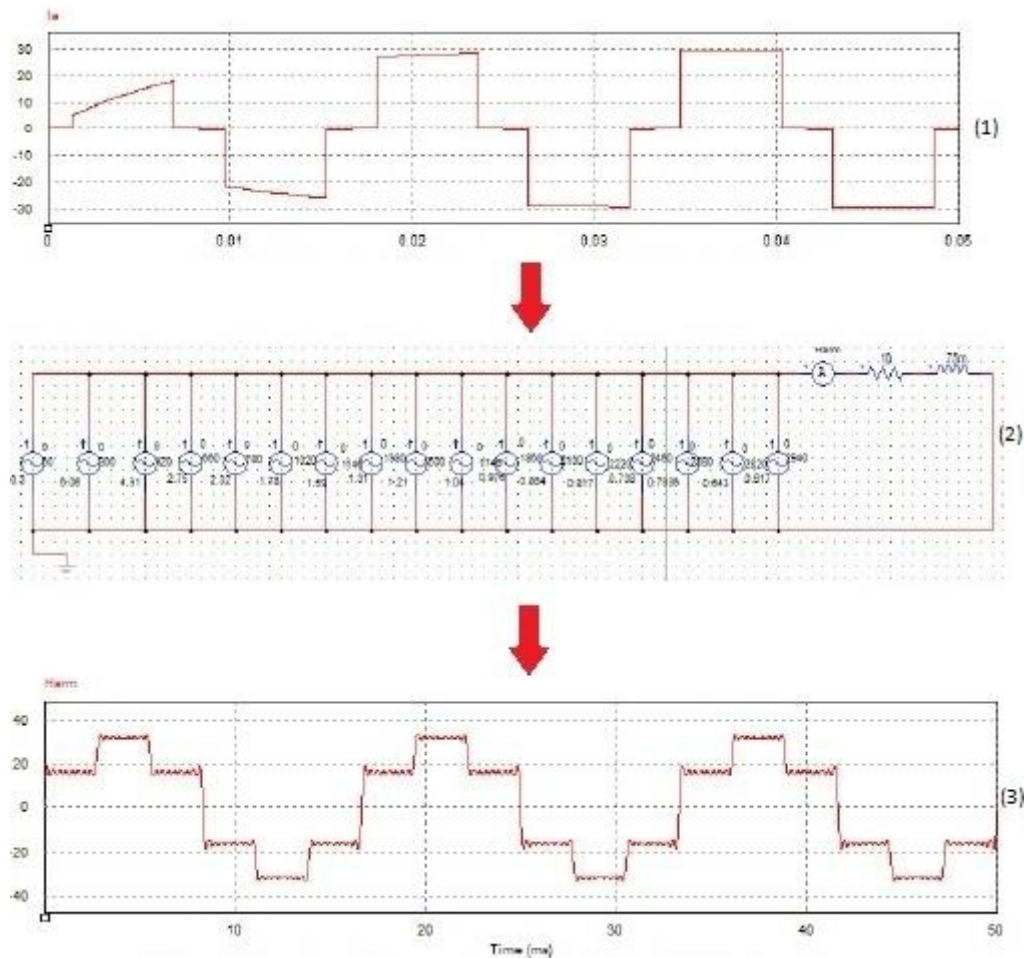
2.1.2 DEFINIÇÃO MATEMÁTICA DE HARMÔNICOS

Referente ao estudo da composição de sinais de diferentes frequências, o matemático e físico francês Joseph Fourier elaborou o conceito de que um sinal periódico pode ser decomposto pela soma de diversos sinais senoidais, cujas frequências são múltiplas inteiras da frequência fundamental do sinal de origem (SANKARAN, 2002).

De acordo com Leão (2014), uma onda periódica sem características de uma onda senoidal pura é o resultado de uma série de ondas senoidais formadas por uma componente fundamental, por ondas harmônicas e por uma componente contínua denominada de sinal CC. Nesse caso, a componente fundamental é de maior importância e é ela quem determina a frequência de oscilação do sinal distorcido.

Na figura 4, a imagem (1) representa a forma do sinal distorcido de corrente de entrada de um retificador eletrônico de seis pulsos. Na imagem (2), mostra-se a simulação da uma composição de várias fontes de correntes senoidais de valor de pico e frequências conhecidas (no caso, foi utilizado até a 49ª ordem) e a imagem (3) mostra o sinal de saída disponibilizado por essa composição. Observa-se que na imagem (3) há a aproximação do sinal mostrado na figura (1), esta ficando cada vez mais semelhante quando adicionado mais sinais de mais ordem harmônicas.

Figura 4 - Representação das componentes harmônicas em um circuito



Fonte: (AUTOR; 2018)

Esses componentes harmônicos têm um efeito característico sobre as instalações elétricas, e para melhor compreender sua influência neste é melhor conhecê-los de forma separada, fazendo com que assim seja possível realizar um trabalho com maior eficiência na solução dos problemas relacionados a esse fenômeno.

Essa separação pode ser feita através da série de *Fourier*, que é uma ferramenta de grande utilidade na análise de harmônicos em sistemas elétricos (SOARES, 2015). Para isso, devem-se abordar conceitos referentes às funções periódicas da tensão e da corrente e suas derivações (potência ativa, reativa, aparente, etc.). As funções da tensão e de corrente senoidais dependentes do tempo podem ser representadas pelas equações:

$$V = V_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (2.1)$$

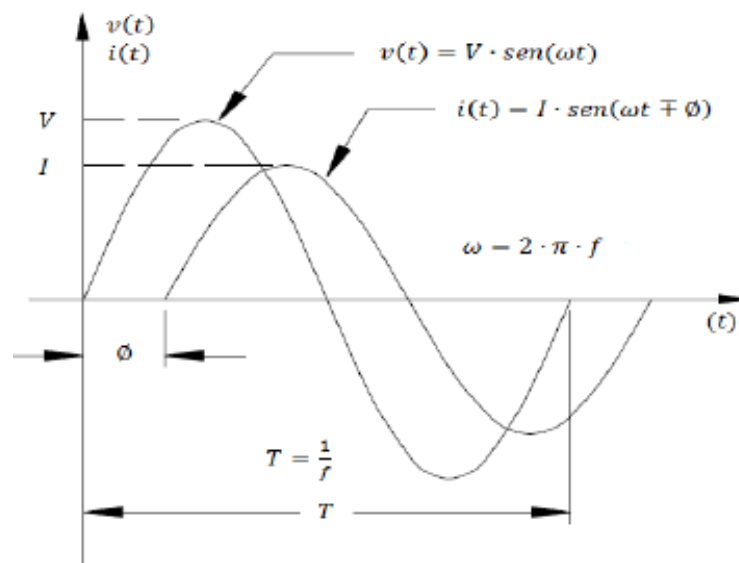
$$I = I_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \Phi) \quad (2.2)$$

Sendo que " ω " é a velocidade angular do sinal periódico e " Φ " é a defasagem angular entre a onda da tensão e a onda da corrente, referenciadas no mesmo gráfico.

Nesse caso, considerou que o sinal de tensão representado na equação (2.1) está referenciado na origem do plano cartesiano, ou seja, o ângulo de fase adotado é 0° . Ainda, a indicação positiva ou negativa de " Φ " indica no fato da tensão estar atrasada ou adiantada em relação à corrente elétrica (SANKARAN, 2002).

A imagem a seguir contém as formas de onda de tensão e de corrente, expressas pelas equações (2.1) e (2.2) e que são senoidais puras.

Figura 5 - Sinais de tensão e de corrente senoidais puras.



Fonte: (SANKARAN, 2006)

A equação a seguir representa a velocidade angular (ω) do sinal em função da frequência fundamental f_0 (60 Hz).

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (2.3)$$

A teoria da série de Fourier afirma que toda função periódica não senoidal pode ser representada por uma soma de infinitas parcelas, composta de uma componente

contínua, uma expressão senoidal na frequência fundamental e outras expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (SILVA, 2008).

Portanto, o sinal da tensão e da corrente pode ser expresso pelas equações matemáticas a seguir:

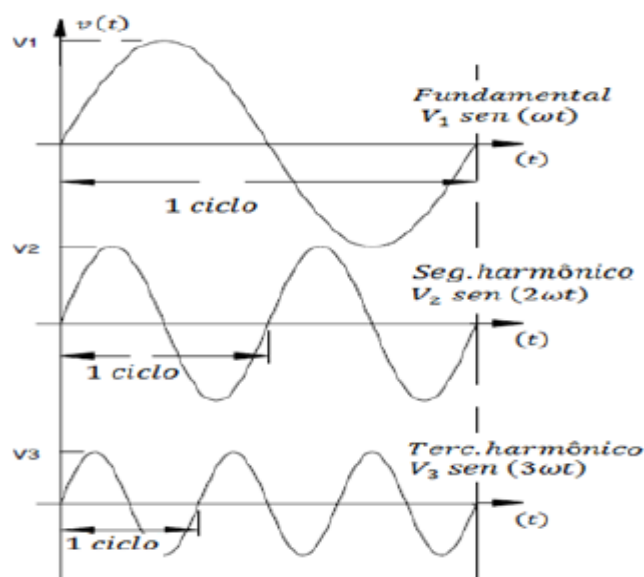
$$V(t) = V_0 + V_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta_1) + V_2 \cdot \text{sen}(2\omega \cdot t + \theta_2) + V_3 \cdot \text{sen}(3\omega \cdot t + \theta_3) + \dots + V_n \cdot \text{sen}(n\omega \cdot t + \theta_n) \quad (2.4)$$

$$I(t) = I_0 + I_1 \cdot \text{sen}(\omega \cdot t + \theta_1) + I_2 \cdot \text{sen}(2\omega \cdot t + \theta_2) + I_3 \cdot \text{sen}(3\omega \cdot t + \theta_3) + \dots + I_n \cdot \text{sen}(n\omega \cdot t + \theta_n) \quad (2.5)$$

Sendo que $V(t)$ e $I(t)$ são os valores instantâneos de tensão e de corrente e V_0 e I_0 os valores de tensão e de corrente constantes, usualmente denominados de valores CC. Os valores V_1, V_2, V_3, \dots e I_1, I_2, I_3, \dots são os valores de pico dos sinais de tensão e de corrente, respectivamente, de cada componente senoidal que formam a série, a fundamental e os harmônicos.

Os harmônicos de segunda ordem apresentam dois ciclos para cada ciclo da componente fundamental, o de terceira ordem tem três ciclos para cada ciclo da fundamental e assim por diante. A figura abaixo mostra tal fato:

Figura 6 - Sinal fundamental, segundo e terceiro harmônicos



Fonte: (SANKARAN, 2006).

Para determinar os efeitos de uma tensão ou de uma corrente não senoidal em um sistema elétrico, pode-se analisar o efeito individual de cada uma das componentes do sinal nesse sistema e em seguida, fazer a raiz quadrada da soma dos quadrados para verificar o efeito na sua totalidade.

Cada equipamento ou componentes reagem de uma forma diferenciada para as diversas ordens harmônicas que o sistema pode apresentar (SANKARAN, 2002).

A equação a seguir é denominada de série trigonométrica de Fourier e nela pode ser verificado a decomposição de um sinal que é variável no tempo, representado por uma componente denominada nível CC e por um somatório infinito de funções senoidais.

$$f(t) = \frac{1}{2} \cdot a_0 \sum_{h=1}^{\infty} [a_h \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot t) + b_h \cdot \text{sen}(h \cdot \omega \cdot t)] \quad (2.6)$$

Os termos a_0 , a_h e b_h são obtidos respectivamente a partir das seguintes expressões:

$$a_0 = \frac{2}{T_0} \cdot \int_{T_0} f(t) \cdot dt \quad (2.7)$$

$$a_h = \frac{2}{T_0} \cdot \int_{T_0} f(t) \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot t) \cdot dt, \quad h = 1, 2, \dots \quad (2.8)$$

$$b_h = \frac{2}{T_0} \cdot \int_{T_0} f(t) \cdot \text{sen}(h \cdot \omega \cdot t) \cdot dt, \quad h = 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

Sendo que:

$f(t)$ é a função matemática do sinal periódico que está sendo analisada;

a_0 é a componente CC do sinal, podendo ser chamada também de “DC offset”;

a_h e b_h representam o valor de pico dos componentes harmônicos de cada ordem;

ω é o valor da frequência angular da fundamental do sinal $f(t)$;

H é um valor inteiro que determina a ordem do harmônico.

Além da representação detalhada da série apresentada pela equação (2.6), a série de Fourier ainda pode ser representada na forma trigonométrica compacta, ilustrada por:

$$f(t) = C_0 + \sum_{h=1}^{\infty} [C_h \cdot \cos(h \cdot \omega \cdot t + \theta_h)] \quad (2.10)$$

Onde os termos C_h e θ_h contêm as informações completas que descrevem a função periódica $f(t)$, sendo que:

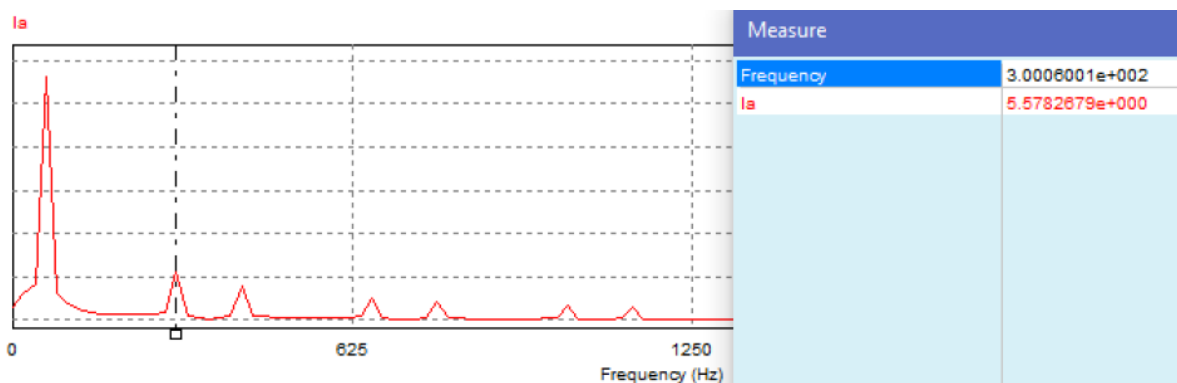
$$C_0 = a_0;$$

$$C_h = \sqrt{(a_h)^2 + (b_h)^2} \text{ que é o valor de pico da componente de ordem } h \text{ da série;}$$

$$\theta_h = \tan^{-1}\left(\frac{-b_h}{a_h}\right) \text{ que é o ângulo de fase da componente de ordem } h \text{ da série.}$$

Para a análise de um sinal distorcido, usualmente se utilizam mecanismos denominados “espectros harmônicos de uma onda”, por meio de um mecanismo chamado de *Fast Fourier Transform* (FFT), responsável por transformar as equações fundamentais de circuitos elétricos do domínio do tempo para o domínio da frequência, facilitando assim a análise dessas composições de sinais. Neste mecanismo, está presente a frequência de cada sinal, a amplitude e o ângulo de fase de cada componente, sendo essas informações essenciais para o estudo sobre a qualidade da energia elétrica para o desenvolvimento de projetos de filtros harmônicos (LEÃO, 2014).

Figura 7 - Espectro harmônico de um sinal de alimentação de um retificador de 6 pulsos



Fonte: (AUTOR, 2018)

No caso da figura 7, percebe-se que o sinal apresenta distorção para harmônicos ímpares a partir da 5ª ordem, na frequência de 300 Hz para um sinal

fundamental de 60 Hz. A amplitude de cada harmônico presente na topologia descrita decai conforme ocorre o aumento de sua frequência.

2.1.3 ANÁLISE DO VALOR EFICAZ E VALOR RMS DE UM SINAL DISTORCIDO

O valor eficaz de um sinal periódico é chamado de “root-mean-square”, ou simplesmente valor RMS, e definido como a raiz do valor médio quadrático (SADIKU, 2013).

Para uma função $x(t)$, periódica e com período igual a T , seu valor RMS é dado pela seguinte equação (2.11).

$$X_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x(t)]^2 dt} \quad (2.11)$$

Tratando-se de sinais senoidais sem distorção, os valores RMS são equivalentes ao quociente do valor de pico e a raiz quadrática de 2. Os valores RMS de tensão e corrente sem distorções são apresentados nas equações (2.12) e (2.13). Estas equações definem também o valor eficaz de um sinal, independentemente de haver a presença de sinais harmônicos, porém no valor de pico deve-se utilizar o valor máximo do sinal fundamental.

$$V_{RMS} = \frac{V_{pk}}{\sqrt{2}} \quad (2.12)$$

$$I_{RMS} = \frac{I_{pk}}{\sqrt{2}} \quad (2.13)$$

Sendo:

V_{pk} o valor de tensão de pico;

I_{pk} o valor de corrente de pico;

Para valores de tensão e corrente de sinais com a presença de distorções, as equações podem ser descritas através do somatório de todas os sinais harmônicos com suas respectivas amplitudes, além do sinal fundamental. Estas equações estão expressas nas equações (2.14) e (2.15) (DUGAN et al., 2002).

$$V_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{V_h}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots + V_{h_{max}}^2} \quad (2.14)$$

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} \left(\frac{I_h}{\sqrt{2}}\right)^2} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_{h_{max}}^2} \quad (2.15)$$

Sendo:

V_h o valor de tensão de pico da componente harmônica de ordem n ;

I_h o valor de corrente de pico da componente harmônica de ordem n ;

2.1.4 INFLUÊNCIA DOS HARMÔNICOS NA POTÊNCIA APARENTE E FATOR DE POTÊNCIA DE UM SISTEMA ELÉTRICO

A potência aparente é o produto de tensão e corrente de maneira análoga a circuitos puramente resistivos CC. Vale ressaltar que os valores utilizados devem ser os valores RMS de ambas características elétricas e esta potência é usualmente representada como S . A potência aparente é dada pela equação (2.16) (SADIKU, 2013).

$$S = V_{RMS} * I_{RMS} \quad (2.16)$$

Como foi representado pelas equações (2.14) e (2.15), a potência aparente para sinais com distorção harmônica é representada pela equação (2.17). Esta equação abrange distorções harmônicas na corrente, que usualmente são de maior intensidade, e distorções de tensão (GALHARDO; PINHO 2003).

$$S = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{max}} (V_{h_{RMS}} * I_{h_{RMS}})^2} \quad (2.17)$$

Pela equação (2.17) conclui-se que há a interferência dos harmônicos na potência aparente e, conseqüentemente, nas potências ativas e reativas: ambas derivam da potência aparente e o FP da componente fundamental do sistema de acordo com as equações (2.18) e (2.19) (SADIKU, 2013).

$$P = S * \cos \varphi_1 \quad (2.18)$$

$$Q = S * \sin \varphi_1 \quad (2.19)$$

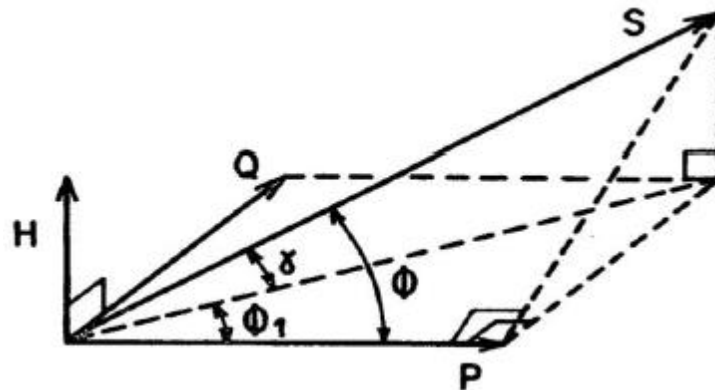
Além dos componentes ativos e reativos, há também a potência de distorção harmônica que compõem a potência aparente. A relação dos vetores pode ser observada no tetraedro de potência a seguir (figura 8). A equação (2.20) define a relação da potência H e a equação (2.21) define a relação entre a potência aparente (S) e os valores de P, Q e H (WATANABE; STEPHAN, 1992).

$$H = \sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} (V_{h_{RMS}} * I_{h_{RMS}})^2} \quad (2.20)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + H^2} \quad (2.21)$$

A equação (2.21), caso seja substituídas as equações (2.18), (2.19) e (2.20) irá resultar na equação (2.17), que engloba todas as frequências harmônicas do sinal analisado.

Figura 8 - Tetraedro de potência



Fonte: (WATANABE; STEPHAN, 1992)

O fator de potência da componente fundamental (FP_1) é dada pela equação (2.22). Essa relação é normalmente utilizada em cenários em que a distorção harmônica é inexistente ou pode ser desprezada. A equação do fator de potência em que estão presentes as cargas não lineares é descrita pela equação (2.23).

$$FP_1 = \cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} \quad (2.22)$$

$$FP = \cos \theta = \frac{P}{S} \quad (2.23)$$

2.1.5 EFEITOS HARMÔNICOS NAS INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS E EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS

Nesta seção, serão abordados os efeitos ocasionados pela presença de harmônicos nos sistemas elétricos e nos principais dispositivos que estão presentes em circuitos industriais e de potência.

Cada tipo de carga disponibilizado em uma planta industrial tem uma susceptibilidade diferente em relação aos harmônicos presentes no circuito elétrico. Para equipamentos com caráter resistivo, por exemplo, a forma do sinal de alimentação não influi tanto em seu comportamento como no caso de cargas que necessitam de sinais mais puros, como por exemplo, dispositivos de comunicação, processamento de dados, entre outros. Assim, um circuito com a presença mais

considerável de harmônicos influi num prejuízo maior no rendimento, na vida útil e qualidade de processo de certos dispositivos.

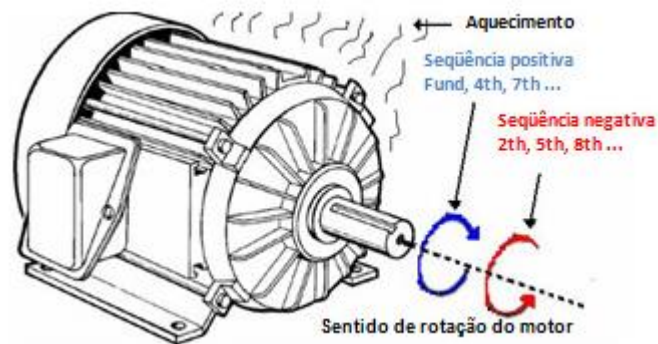
Para certos sistemas elétricos, pode-se afirmar que um baixo fator de potência ou uma alta taxa de distorção harmônica total podem inferir em uma série de desvantagens, como por exemplo (SCHNEIDER, 2003; SILVA, 2008):

- Perda na capacidade de transmissão de potência ativa;
- Sobredimensionamento das instalações elétricas e de transformadores;
- Aumento das perdas Joule;
- Funcionamento inadequado de dispositivos de proteção;
- Sobrecarga de condutores de neutro em função de harmônicos de 3ª ordem;
- Sobrecarga de condutores de fase devido ao efeito pelicular;
- Ruídos em transformadores;
- Sobrecarga e diminuição da vida útil de banco de capacitores;
- Sobrecarga, vibrações e diminuição da vida útil de alternadores, transformadores e de motores.

Motores, que são cargas muito comuns em plantas industriais de grande e médio porte, podem ser influenciados de forma significativa por distorções de tensão. Essas distorções de tensão nos terminais da máquina geram fluxos harmônicos que induzem correntes harmônicas no rotor. Esse efeito pode gerar, além da diminuição do rendimento da máquina, o sobreaquecimento, o aumento da vibração e do barulho audível.

Entretanto, o maior efeito desses harmônicos é o aumento das perdas no cobre e no ferro dos motores, gerando elevações de temperatura nas barras do rotor e nos enrolamentos do estator. Além desse aumento de temperatura, as correntes harmônicas podem ser responsáveis por conjugados (torque) pulsantes causados pela interação entre correntes harmônicas e o campo magnético na sua frequência fundamental.

Figura 9 - Efeitos harmônicos em motores

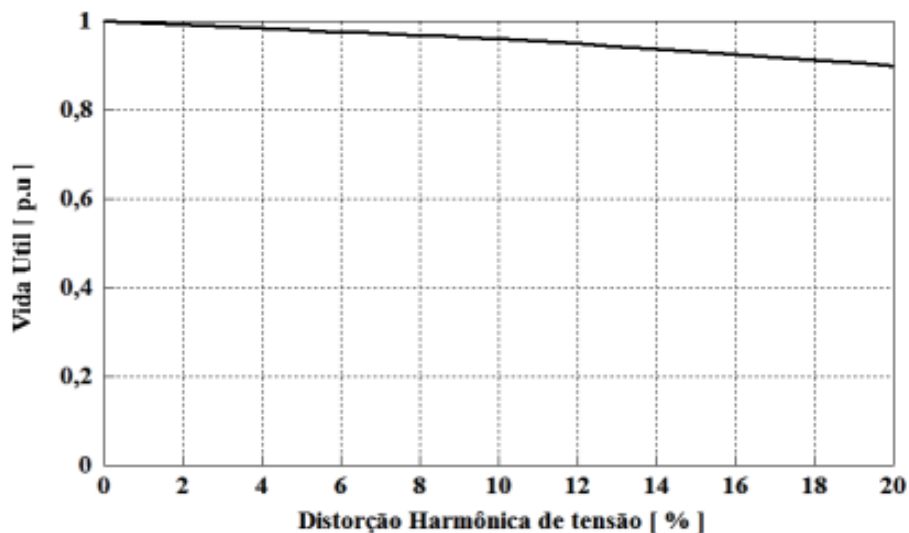


Fonte: (POUPALUZRS, 2016)

No caso de transformadores, que são equipamentos projetados para regime permanente e que é levado em consideração uma forma de onda de tensão e de corrente senoidais e de caráter puro em sua alimentação, uma distorção nessas formas de onda pode acarretar em um mau funcionamento do equipamento.

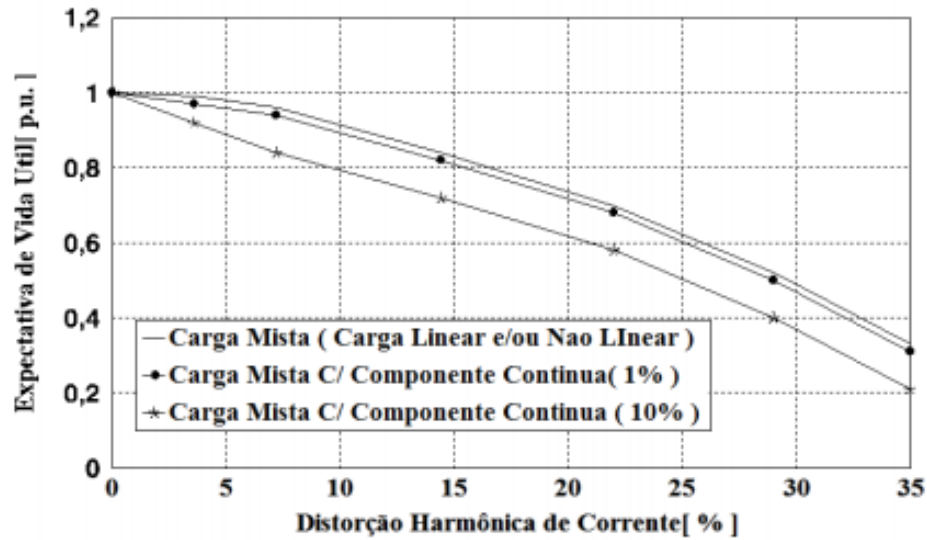
Isso pode gerar consequências que vão desde aumento do ruído audível até elevadas perdas nos enrolamentos do transformador, gerando aquecimento e queda da vida útil do mesmo.

Figura 10 - Expectativa de vida de um transformador sujeito a distorções harmônicas de tensão



Fonte: (ANEEL, 2014)

Figura 11 - Expectativa de vida de um transformador sujeito a distorções harmônicas de corrente

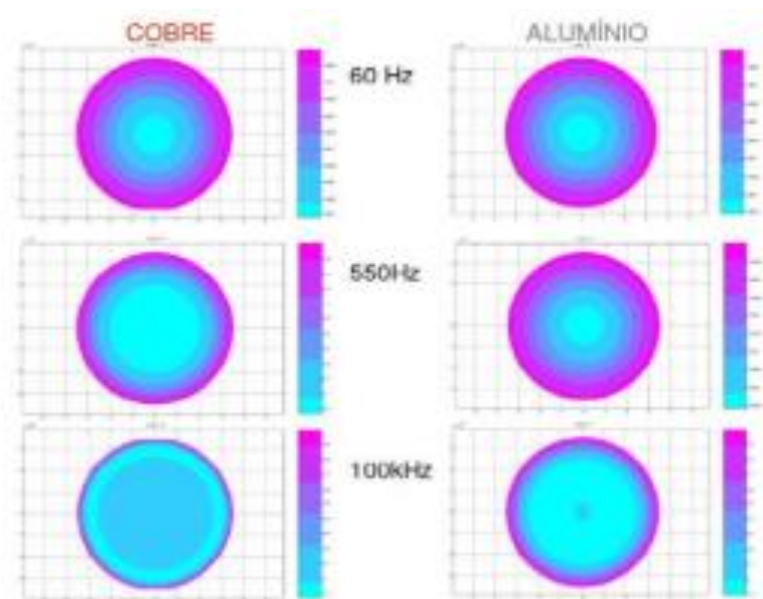


Fonte:(ANEEL, 2014)

Harmônicos de tensão geram perdas no núcleo do transformador, enquanto os harmônicos de corrente geram perdas nos enrolamentos desse equipamento. Quanto maior a frequência do sinal de distorção presente nos enrolamentos do transformador, maior será a perda joule presente no mesmo, fenômeno ocasionado pelo efeito pelicular presente em sinais de caráter alternados (ORAE, 2000).

O efeito pelicular é o fenômeno onde sinais de maiores frequências tendem a se deslocar para as periferias do condutor em questão, fazendo com que a seção de condução diminua, ocasionando um aumento na resistência presente nesse condutor.

Figura 12 - Efeito pelicular em condutores



Fonte: (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, 2012)

Na figura 12, pode-se observar a diferente distribuição de cargas ao longo de condutores de cobre e de alumínio, de acordo com a frequência do sinal presente nos mesmos.

Os bancos de capacitores, que são comumente utilizados em indústrias para realizar a correção do fator de deslocamento, são extremamente sensíveis a presença de harmônicos. Tendo em vista que a impedância dos capacitores diminui com o aumento da frequência, estes naturalmente podem atuar como filtros harmônicos, absorvendo parte das correntes harmônicas para si.

Essa passagem de corrente não prevista pode ocasionar problemas de aquecimento, perda de vida útil e até explosões devido à ressonância paralela. Essa ressonância ocorre quando as reatâncias dos bancos de capacitores e as reatâncias do sistema se equivalem em uma certa frequência.

Sistemas de proteção que são utilizados em plantas elétricas industriais também podem ser influenciados pela presença de harmônicos, podendo ocasionar uma atuação indevida. Além disso, fatores como tempo de atuação, corrente de partida e conjugado do relé também podem ser influenciados pela presença de distorções (ANDREAS, J 1982).

Relés de estado sólido, que já apresentam uma geração de calor superior aos relés eletromecânicos, podem sofrer um aquecimento acentuado na presença de correntes harmônicas. Estes relés também podem atuar erroneamente no caso de transientes na tensão, efeito que pode ser intensificado com distorções da tensão (SOLID STATE OPTRONICS, 2014).

Certos tipos de relés dependem da passagem por zero ou pelo valor de pico da onda de tensão ou corrente em seu funcionamento. Distorções harmônicas podem causar mais passagens por zero ou um ciclo variando o valor de pico dessa forma de onda.

Na maioria dos casos, as atuações indevidas da proteção devido a harmônicos só ocorrem para sistemas com distorções harmônicas de tensão extremamente elevadas, com uma distorção harmônica total de tensão de aproximadamente 15% (DIAS, G 1998).

2.2 ESTUDO DE QUALIDADE DE ENERGIA E NORMALIZAÇÕES

A agência nacional de energia elétrica (ANEEL) determina como fundamental 3 (três) grandes aspectos da energia elétrica: a qualidade da energia, do serviço e do atendimento. Todos estes itens estão detalhados pela ANEEL na resolução normativa de número 414 de 09 de setembro de 2010, que estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica.

Dentro dos parâmetros de qualidade, as que recebem maior destaque são níveis de tensão, frequência e fator de potência. Porém, como citado anteriormente, com o acréscimo no número de aparelhos eletrônicos e o aumento da distorção harmônica no sistema, torna-se necessário estabelecer normas e regulamentações para mensurar e avaliar a influência harmônica devido a estes equipamentos.

Os procedimentos de distribuição (PRODIST) são documentos elaborados pela ANEEL e servem como base das atividades técnicas, de maneira a normatizar e padronizar estas atividades relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas nacionais e regionais de distribuição de energia elétrica. O módulo 8, que se encontra na sua décima revisão, abrange o tópico de QEE, sendo o item 4 da seção 4.1, em particular, referente às distorções harmônicas.

2.2.1 NORMA IEEE STD519

Esta norma determina quais são os valores máximos toleráveis de distorção harmônica individual de tensão e total de corrente numa barra do sistema elétrico. Com uma abordagem que envolve o consumidor e a concessionária, esta norma tem como foco limitar os impactos de cargas não lineares, definindo os níveis máximos de distorção no ponto de entrega de energia pela concessionária (LEÃO, 2014).

Para realizar essa verificação dos limites de distorção, a tensão de operação do sistema é tomado como base. Com isso, compara-se a tensão individual e a tensão base para determinar as distorções harmônicas. Além deste fator, utiliza-se a razão da corrente de curto circuito e a corrente máxima solicitada pela carga, I_{sc} e I_L , respectivamente. O valor limite para as distorções é proporcional a esta relação (TEIXEIRA, 2009). A tabela 1 apresenta os valores limites de harmônicas de corrente de acordo com sua ordem e o valor total admissível, segundo IEE std 519. Vale

ressaltar que, independente da relação de corrente, os limites de distorção estão restritos a 20%, podendo chegar a 5%.

Tabela 1 - Limite de distorção de corrente em relação à corrente fundamental do sistema de até 69kV

Máxima Distorção Harmônica de Corrente em percentual de IL						
Ordem Harmônica Individual (harmônicos ímpares) ^(a,b)						
I_L/I_{SC}	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
$< 20^c$	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20<50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50<100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.4	12.0
100<1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

^a Harmônicos pares são limitados a 25% dos limites dos harmônicos ímpares acima

^b Distorções de corrente que resultam em um offset CC, e.g., conversores de meia onda, não são permitidos

^c Todo equipamento de geração de energia está limitado a estes valores de distorção de corrente, independente do I_{sc}/I_L atual

onde:

I_{SC} = máxima corrente de curto-circuito no PCC

I_L = máxima corrente de carga demandada (componente de frequência fundamental) no PCC sobre condições de operação nominal

Fonte: Adaptado (IEEE std 519, 2014)

2.2.2 NORMA EN50160

A norma EN50160 determina que, caso o consumidor não esteja sendo atendido com uma QEE satisfatória, deve-se realizar alterações e melhorias para que a energia distribuída se enquadre nos parâmetros determinados.

Esta norma europeia fomenta os valores limites para distribuição pública de baixa e média tensão, detalhando as principais características de tensão da concessionária. A tabela 2 apresenta os valores limites para os harmônicos individuais de tensão elétrica, segundo a norma EN50160. .

Tabela 2 - Limites de distorção harmônica de tensão em baixa e média tensão

Harmônicos Ímpares				Harmônicos Pares	
Não-múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem h	Tensão Relativa	Ordem h	Tensão Relativa	Ordem h	Tensão Relativa
5	6%	3*	5%	2	2%
7	5%	9	1.5%	4	1%
11	4%	15	0.5%	6...24	0.5%
13	3%	21	0.5%		-
17	2%		-		-
19	1.5%		-		-
23	1.5%		-		-
25	1.5%		-		-
THD < 8%					

Fonte: Adaptado (EN50160, 1994)

2.3 FILTROS E MÉTODOS DE ATERRAMENTO PARA MITIGAÇÃO DE HARMÔNICOS

Para realizar a correção do problema da distorção harmônica, cada instalação elétrica dispõe de métodos distintos para a mitigação de tais problemas. Entre as soluções possíveis, são citadas as mais comumente utilizadas nos tópicos a seguir.

2.3.1 FILTROS PASSIVOS

Os filtros harmônicos são os mais utilizados entre os métodos, embora possam apresentar custo elevado e complexidade em sua montagem dependendo da topologia que será utilizada na instalação elétrica.

Em sua topologia série, o filtro é ligado em série com o sistema de forma a impedir a circulação de determinado harmônico entre a carga e o sistema elétrico em que está conectado.

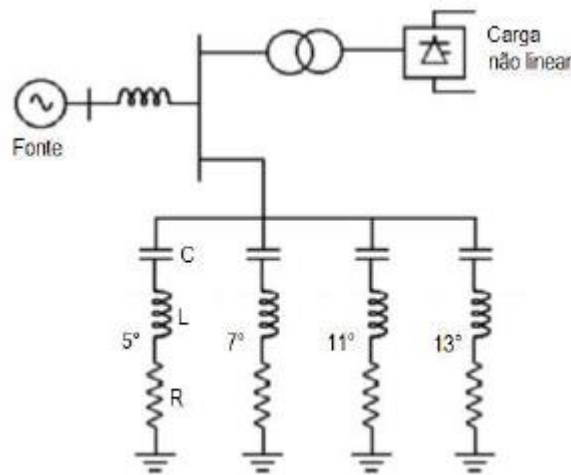
Esse filtro pode ser formado por uma indutância e uma capacitância ligados em paralelo, mas em série com o sistema, e representa uma grande impedância para a frequência da harmônica projetada a se evitar.

Filtros harmônicos passivos também podem apresentar topologias do tipo “shunt”, onde esse filtro é ligado em paralelo com o sistema, de forma a proporcionar

um caminho de baixa impedância para as frequências harmônicas projetadas, evitando sua penetração no sistema.

Estes são dimensionados para suportar somente correntes harmônicas para as quais estão sintonizados, somadas a uma corrente fundamental inferior à do circuito principal. Na figura 13 está apresentado uma topologia de filtro shunt para harmônicas de 5ª à 13ª ordem. Na figura pode-se observar os filtros em paralelo com a carga e a adição de uma resistência em decorrência das perdas do indutor e das resistências dos cabos e terminais de ligação.

Figura 13 - Topologia de filtros passivos para harmônicos de 5ª, 7ª, 11ª e 13ª ordem.



Fonte: (ROLIM, 2015)

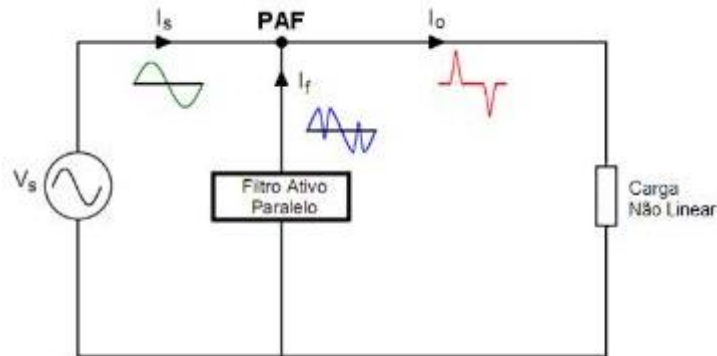
Devido a tal fato, tem um custo menor quando comparado a um filtro série de mesma eficácia. Outra vantagem dessa topologia é que na frequência fundamental esses filtros fornecem potência reativa necessária para corrigir o fator de potência do sistema.

2.3.2 FILTROS ATIVOS

Os filtros ativos consistem na instalação de dispositivos de eletrônica mais sofisticados, colocados em série ou em paralelo com a carga geradora de distorções harmônicas na rede. O objetivo de sua implantação é compensar essa distorção através de injeções de correntes em fase contrária em relação às presentes no sistema, resultando assim em uma corrente de linha não distorcida. Na figura 14 há um exemplo do funcionamento de um filtro ativo paralelo com uma carga não linear. A

a injeção de corrente de modo a tornar a corrente com a presença apenas da frequência fundamental.

Figura 14 - Exemplo de funcionamento de um filtro ativo paralelo com a carga não linear.



Fonte: (Lucival Guerreiro e Paulo Kanasiro, 2011.)

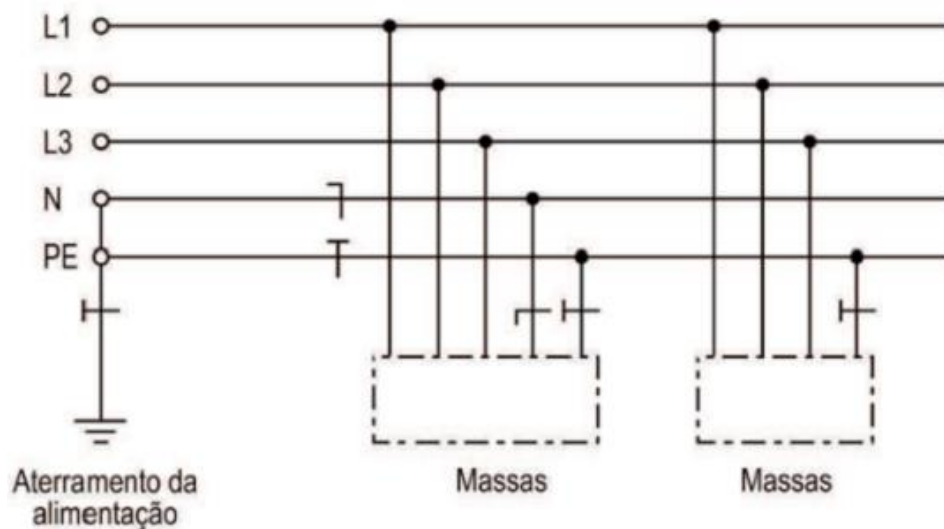
Por possuírem circuitos mais complexos de eletrônica de potência, tem um custo mais elevado em relação aos filtros passivos vistos anteriormente. No entanto, apresentam uma maior eficiência na redução de conteúdo harmônico de uma instalação elétrica, além do fato de este tipo de filtro poder funcionar uma faixa maior de frequências harmônicas, diferentemente dos filtros passivos, que são projetados para atuar em apenas uma frequência fixa.

2.3.3 ATERRAMENTO DO TIPO TN-S

Além das topologias de filtros citados, a implantação de um sistema de aterramento pode, além de tornar a rede elétrica segura e com qualidade, também pode ser necessária para realizar a correção de harmônicos na rede.

Os aterramentos do tipo TN-S, onde o condutor neutro e o condutor de proteção (condutor terra) são separados é o mais adequado para eliminar distorções harmônicas, tendo em vista que nesse sistema o condutor de proteção será responsável apenas por escoar correntes de falta do sistema, enquanto o condutor de neutro irá conduzir resíduos e distorções harmônicas pelo circuito. Na figura 15 há um exemplo de ligação de aterramento do tipo TN-S, em que o neutro e o terra estão conectados apenas na entrada do sistema, evitando a circulação de harmônicos pelo condutor de proteção.

Figura 15 - Esquema de aterramento do tipo TN-S.



Fonte: (Mundo da elétrica, 2015.)

2.3.4 MALHA DE ATERRAMENTO DE REFERÊNCIA

Esse tipo de aterramento, também conhecida como malha de referência de sinal, vem sendo um componente fundamental na aplicação em estruturas de instalações que abrigam componentes e equipamentos sensíveis, como por exemplo os *Data Centers*.

A malha é projetada para as componentes de alta frequências de um sinal, que possam vir a ocasionar algum tipo de problema referente à compatibilidade eletromagnética.

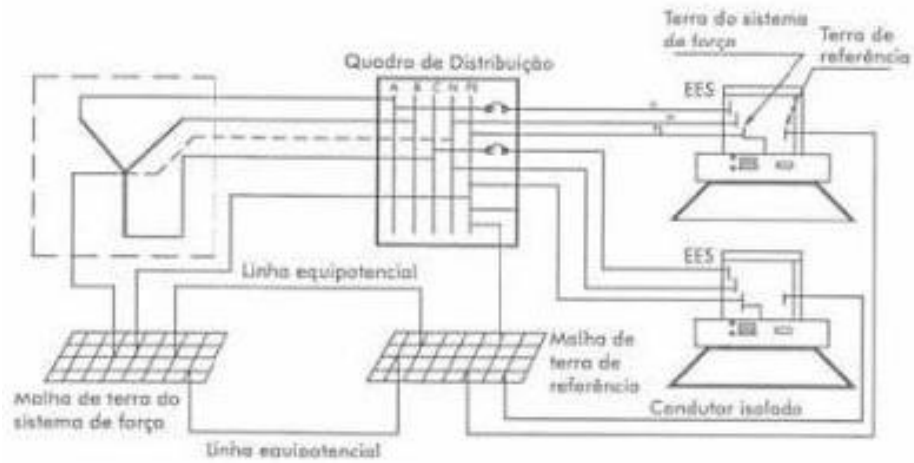
Sendo assim, apenas a extremidade desse condutor irá conduzir correntes (devido ao efeito pelicular). A característica dos condutores presentes nesse tipo de estrutura é de possuírem uma grande área externa, sendo mais eficientes em forma de uma fita, tendo uma seção compreendida entre 6 mm² e 25 mm² e sua largura em uma faixa de 20 mm, por exemplo.

Por tais características, o condutor apresentará um melhor desempenho, tendo em vista que para sinais de alta frequência sua impedância será menor que para sinais de menores frequências. Quanto maior a relação de largura/espessura da fita, melhor será o aproveitamento do sistema.

Recomenda-se sua utilização juntamente a uma malha de aterramento de força, interconectadas entre si por linhas equipotenciais, unificando assim a referência do sistema em que estão sendo aplicadas. A figura 16 representa o esquema de

ligação deste sistema com as malhas de aterramento e ligações para torná-las equipotenciais.

Figura 16 - Esquema de conexão de uma malha de aterramento.



Fonte: (Helton do Nascimento Alves, Sistemas de aterramento, pg 168.)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 INSTRUMENTO

Utilizou-se o analisador de energia RE6000/H, desenvolvido pela empresa EMBRASUL, que indica a medição de perturbações na rede. Este módulo H é recomendado para sistemas elétricos em que se pretende medir os níveis e as características das distorções harmônicas. Além disso, o RE6000 permite a análise de tensões, potências, desbalanceamentos, frequência, distorção total da demanda, consumos, demandas e interrupções.

Estes equipamentos de análise da QEE apresentam um design robusto e compacto, visando a facilidade da instalação por técnicos e engenheiros. Este equipamento, apesar de robusto, deve ser sempre operado por um profissional com experiência e conhecimento técnico sobre as configurações e parametrizações necessárias para o seu correto funcionamento.

A figura 17 ilustra o design do analisador de energia RE6000 utilizado neste trabalho. A tabela 3 apresenta as especificações técnicas deste equipamento. O RE6000 conta com 256Mb de capacidade de memória interna e a comunicação com o computador se dá através de uma porta Ethernet RJ45 a 100Mbps (TCP/IP). Caso a coleta de dados seja de longa duração, recomenda-se que a cada 4 dias seja feita uma coleta parcial dos dados (EMBRASUL, 2015). Os dados enviados para o computador são, posteriormente, analisados com auxílio do software ANL6000, podendo ser visualizado previamente algumas informações no próprio equipamento.

Figura 17 - Analizador RE6000



Fonte: (EMBRASUL, 2015)

Tabela 3 - Especificações Técnicas do RE6000

CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS	
Alimentação auxiliar ou pela medição de tensão	
Faixa Vac:	85 a 300Vac (Fase/Neutro)
Faixa Vdc:	100 a 300Vdc
Consumo:	5VA
Entradas de tensão	
Número de entradas:	3 (VA,VB,VC) ou 4 (VA,VB,VC,VN)*
Faixa de Medição:	50 a 500Vac (Fase-Neutro) 866V (F-F)
Resolução:	0,01V
Precisão:	0,2%
Sobrecarga de tensão:	+10% valor máximo durante 1 segundo.
Impedância de entrada:	2M Ω
Amplitude de banda:	1500Hz
* Para equipamento com módulo (N) de medição de Neutro.	Opcional
Faixa de Medição do canal de Neutro	0,5 a 100V
Entradas de corrente	
Número de entradas:	3 (IA,IB,IC) ou 4 (IA,IB,IC,IN)*
Tipo:	Sensor flexível** ou alicate rígido
Faixa de medição:	Com sensor flexível: 5A a 3000A
	Com Alicate rígido AL100: 0,2A a 100A
	Com Alicate rígido AL1000: 5A a 1000A
* Para equipamento com módulo (N) de medição de Neutro.	Opcional
**Deve-se optar pelo diâmetro do sensor flexível: 160mm ou 240mm	
Resolução:	0,01A
Precisão:	0,2% + imprecisão do acessório de corrente
Amplitude de banda:	1500Hz
Frequência nominal	
Frequência:	45 a 70Hz
Resolução:	0,01Hz
Precisão:	\pm 0,01Hz
Combinações de fiação	
Monofásicas:	2F
Bifásicas:	2F, 3F
Trifásicas:	3F, 4F e 5F

Fonte: (EMBRASUL, 2015)

3.2 SOFTWARE

O software utilizado, que tem sua licença disponibilizada com a compra do equipamento RE6000, permite a análise, geração de relatórios, tratamento de dados e a visualização dos resultados. Este software, ANL6000, permite a leitura dos arquivos .emb gerados pelo analisador durante a coleta de dados.

Utilizou-se um cabo de Ethernet para a exportação deste arquivo .emb do analisador para o software, que, após carregado, permite a manipulação dos dados de acordo com as exigências do usuário e limitações do programa. Entre as opções ofertadas estão: relatório de dados completo, relatório de dados resumido, gráficos das grandezas analisadas, planilhas de dados coletados, gráficos e relatórios de harmônicos e configuração dos parâmetros de visualização dos itens anteriores.

Todos os dados podem ser visualizados através de listas ou planilhas, podendo ser exportados para um arquivo .CSV ou .CVS.

3.3 METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Para a medição ter caráter válido, foi adotado como base o módulo 8 do PRODIST, que cita que para gerar indicadores individuais válidos, são necessárias no mínimo mil e oito leituras válidas obtidas em intervalos consecutivos de dez minutos cada (ANEEL, 2018).

Para a análise dos dados feitas nesse trabalho, foram realizadas dez medidas a cada segundo, por um período próximo de cinco dias, totalizando um valor próximo de quatro milhões de medições no total.

Além disso, foi utilizado um sistema de medição cujas informações foram coletadas e processadas por recursos computacionais. Para o caso de sistemas elétricos trifásicos, as medições de distorções harmônicas devem ser realizadas através das tensões de fase-neutro para sistemas conectados em estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações (BRASIL,2016).

Também foi adotado que o espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção harmônica total deve compreender uma faixa de que considere a componente fundamental até, no mínimo, a vigésima quinta ordem harmônica.

Na prática, o equipamento tinha capacidade de medição até a quadragésima nona ordem harmônica, porem só foram obtidos valores significativos até a trigésima sétima ordem harmônica.

3.3.1 TERMINOLOGIA

A seguir, será disponibilizada uma tabela que apresenta as terminologias utilizadas pelo PRODIST nas formulações matemáticas para determinar os valores das distorções harmônicas a serem analisada.

Tabela 4 - Terminologia adotada pelo PRODIST.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DIT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
Tensão harmônica de ordem h	V_h
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	h _{máx}
Ordem harmônica mínima	h _{min}
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{p95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{i95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{395\%}$

Fonte: (BRASIL, 2016)

Os símbolos $DTT_{95\%}$, $DTT_{p95\%}$, $DTT_{i95\%}$ e $DTT_{395\%}$ indicam se as distorções estão ou não dentro dos valores que são tolerados, conforme exposto na Tabela 6, que segue logo a seguir nesse capítulo.

Se os valores de $DTT\%$, $DTT_p\%$, $DTT_i\%$ e $DTT_3\%$, ultrapassarem os limites estabelecidos para a baixa tensão de 10%, 2,5%, 7,5% e 6,5%, respectivamente, em mais de 5% da quantidade total de leituras realizadas, diz-se que os harmônicos estão prejudicando a qualidade da energia elétrica do sistema.

3.3.2 VALORES DE REFERÊNCIA

Os valores que são utilizados de referência pela ANEEL para as distorções harmônicas totais estão representados na tabela 5. Tais dados servem de referência para o planejamento elétrico no que se diz a respeito à qualidade da energia elétrica.

Tabela 5 - Limites das distorções harmônicas.

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_p_{95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_i_{95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_3_{95\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: (BRASIL, 2016)

A equação a seguir expressa como é calculado a $DTT\%$:

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V h_{RMS}^2}}{V_{1RMS}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Sendo que “h” se refere a ordem das harmônicas, “ h_{max} ” é a ordem máxima das harmônicas e V_{1RMS} é o valor RMS da tensão da componente fundamental. Para o cálculo da $DTT_i\%$

$$DTT_i\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{h_i} V h_{RMS}^2}}{V_{1RMS}} \cdot 100 \quad (3.2)$$

Sendo que “h” se refere a ordem das harmônicas pares não múltiplas de três e “ h_i ” é a máxima ordem harmônica ímpar não múltiplas de três. Para o cálculo referente a $DTT_p\%$, é utilizado:

$$DTT_p \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_p} V h_{RMS}^2}}{V_{1RMS}} \cdot 100 \quad (3.3)$$

Sendo que “h” é a ordem das harmônicas pares não múltiplas de três e “ h_p ” é a máxima ordem harmônica par não múltiplas de três. Para o cálculo de $DTT_3\%$ é utilizada a seguinte equação:

$$DTT_3 \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h_3} V h_{RMS}^2}}{V_{1RMS}} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Onde “h” é a ordem das harmônicas múltiplas de três e “ h_3 ” é a máxima ordem harmônica múltipla de três.

3.4 ESTUDO DE CASO

As medições foram realizadas entre os dias 12/10 e 23/10 de 2018 em um terminal de combustíveis localizado na região metropolitana de Curitiba-PR. Os principais pontos analisados foram os inversores de comando dos motores de produtos principais (gasolina, álcool, diesel e querosene) e as subestações elétricas abaixadoras. Os procedimentos executados para a instalação do equipamento e as características técnicas dos circuitos analisados estão apresentados a seguir.

3.4.1 INSTALAÇÃO DO EQUIPAMENTO ANALISADOR DA QEE

O processo para instalação do instrumento analisador da QEE foi realizado com a supervisão do técnico de segurança (TS) da indústria e o TS da empresa prestadora do serviço. A instalação do equipamento foi realizada por um terceiro técnico capacitado e com conhecimentos sobre o equipamento. Todos os procedimentos foram seguidos de acordo com as ASTs (Análise de Segurança da Tarefa), que determinam todos os possíveis riscos, consequências e medidas mitigadoras do cenário de acidente ou quase acidente. Esse documento, AST, é disponibilizado pela empresa durante o cadastro e liberação de serviços dentro do terminal.

Durante a instalação do equipamento nas subestações, fez-se necessário interromper a alimentação da concessionária por um curto intervalo de tempo, garantindo assim a segurança de todos os elementos e indivíduos presentes. Realizou-se a interface com todos os setores do terminal, informando a interrupção no fornecimento de energia e a previsão de retorno.

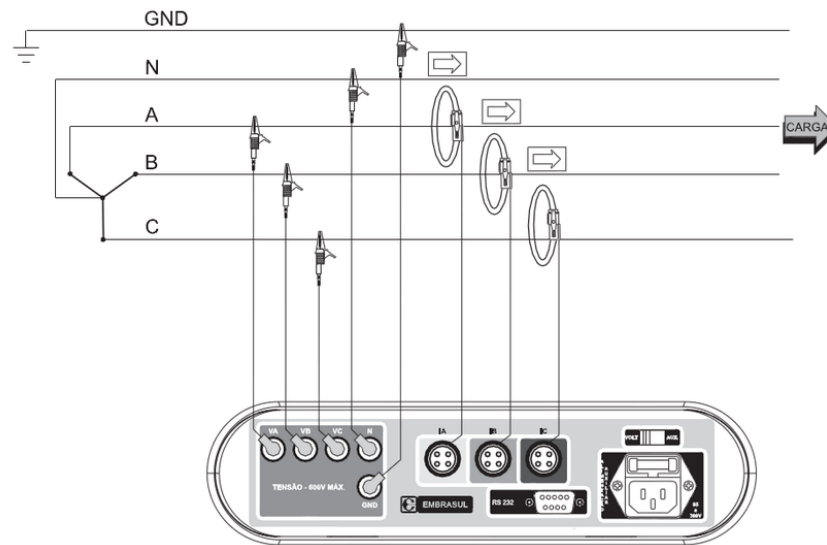
A instalação do equipamento nos inversores pode ser realizada de maneira mais simplificada, uma vez que a abertura de circuito era local, diminuindo os riscos de acidentes. A interface foi realizada diretamente com o setor responsável pelo carregamento e descarga de combustíveis: era o único setor afetado diretamente pelo desligamento das bombas de produtos.

Todos os inversores presentes no terminal apresentam um filtro série (reator) que tem como finalidade a mitigação das distorções causadas pelo inversor na rede. Tais reatores têm valores variados, de acordo com a potência do inversor em que está instalado. Durante a coleta dos dados, este reator não foi retirado, uma vez que aumentaria o número de operações necessárias para a coleta, o tempo de desligamento do equipamento e o risco de corpos estranhos entrarem no compartimento do reator, prejudicando o seu funcionamento, podendo levar até a sua inutilização (SCHNEIDER ELECTRIC, 2015).

Seguindo todos os procedimentos da NR10, realizou-se as conexões dos cabos elétricos do instrumento ao circuito a ser medido e, após religado os circuitos, iniciou-se as medições. Nas subestações o instrumento monitorou o período de aproximadamente 5 (cinco) dias e nos inversores, 1 (uma) hora.

A figura 18 ilustra o esquema de ligação do analisador na instalação.

Figura 18 - Esquema de ligação do analisador em circuito trifásico



Fonte: (EMBRASUL, 2015)

3.4.2 LOCAL DA MEDIÇÃO

Devido ao risco e a necessidade de se utilizar transformadores para instrumentos para realizar as medições nas entradas dos transformadores das subestações, em que a tensão é de 13,8kV, optou-se por instalar o analisador de QEE na saída da subestação, em baixa tensão (480/277V) e 60Hz.

No caso, foram medidos dois transformadores que estão em funcionamento na planta industrial: o transformador principal, que alimenta um conjunto de motores trifásicos comandados por inversores de frequência e um transformador PDVT, que alimenta as demais cargas da instalação.

Para medição dos inversores, instalou-se o analisador na saída dos equipamentos de proteção. Essa escolha de posicionamento foi devido à facilidade para interrupção do circuito (realizando a abertura do circuito de proteção todo o sistema a jusante permanece desenergizado).

As áreas ao redor e de acesso dos locais de instalação do equipamento foram isoladas devido ao risco de choque elétrico.

3.5 PROPOSTA DE PROJETO PARA APLICAÇÃO DE UM FILTRO PASSIVO DO TIPO SHUNT.

Como a carga dessa planta pode sofrer um acréscimo e os indicadores de distorções harmônicas e fator de potência podem vir a piorar, será realizado uma proposta de projeto de filtro passivo do tipo shunt, que além de corrigir parcialmente os harmônicos encontrados, também realizará a correção do fator de potência desta. Os valores que foram obtidos ao longo desse período de medição referentes a essas grandezas serão disponibilizados e discutidos logo em seguida.

Como foi mostrado nos resultados obtidos referentes a essa análise em tópicos anteriores, o sistema não mostra nenhuma violação grave referente aos limites dos harmônicos impostos pela ANEEL, então foi selecionado esse tipo de filtro devido ao seu baixo custo de implementação e ainda devido ao fato de este poder também realizar a correção do fator de potência de operação da planta industrial.

Esse tipo de filtro, como abordado em tópicos anteriores, realiza a correção de apenas uma ordem harmônica. De acordo com os valores obtidos nos relatórios mostrados anteriormente, a quinta ordem harmônica é a mais expressiva em todos os casos analisados na planta industrial, então foi escolhido essa faixa de sinais (300 Hz) a ser eliminada.

Para a realização desse projeto, foram recuperados alguns dados importantes obtidos nos relatórios obtidos e colocados em uma nova tabela para uma melhor visualização dos passos adotados para realizar os cálculos de banco de capacitores necessários para que, além da mitigação do problema, a planta não se torne uma carga com características capacitivas, o que seria prejudicial a seu bom funcionamento.

Como a planta possui cargas que variam de funcionamento ao longo do tempo, foram selecionados os valores referentes aos piores casos (planta operando a plena carga) observados ao longo do período de medição, para que assim o filtro possua a melhor condição de funcionamento possível.

3.5.1 DIMENSIONAMENTO DE FILTRO HARMÔNICO PASSIVO TIPO SHUNT PARA O TRANSFORMADOR PRINCIPAL.

A seguir, será mostrada uma tabela com os valores médios referentes ao transformador principal da planta industrial que está sendo analisada, referente ao dia

em que a planta apresentou a maior demanda de energia elétrica ao longo do período de medição.

Tabela 6 - Valores médios referentes planta industrial encontrados no dia 20/10/2018.

Grandezas médias encontradas no dia 20/10/2018			
	Fase A	Fase B	Fase C
Potência Ativa (kW)	83,699	85,781	82,351
Potência Reativa (kVAr)	30,606	32,394	33,781
Potência Aparente (KVA)	89,119	91,693	89,01
Fator de Potência	0,939	0,935	0,925

Fonte: (AUTOR; 2019)

Como pode ser observado na tabela 6, no dia 20/10/2018 a fase C do sistema apresenta o pior valor médio de fator de potência (0,925 indutivo) da planta. Tal acontecimento também se manteve presente nos demais dias de medição que foi realizada.

Com isso, o projeto de filtro harmônico junto a um banco de capacitores será realizado com base nesses valores, onde depois será verificado se as demais fases apresentam um comportamento aceitável quanto a adição desse filtro harmônico.

Para o cálculo referente ao banco de capacitores a ser implantado, foi adotado que a planta deverá apresentar um fator de potência corrigido de 0,95 indutivo para a fase que apresenta o menor fator de potência (fase C), que corresponde ao seguinte ângulo de deslocamento entre a corrente do sistema e a tensão:

$$\cos \Phi = 0,95$$

$$\Phi = 18,19^\circ$$

Para realizar o cálculo referente ao valor de potência reativa a ser injetada pelo banco de capacitores para realizar a correção do fator de potência, foi utilizada a seguinte expressão:

$$Q = P. (tg \theta_1 - tg \theta_2) \quad 3.1$$

Com os valores da potência ativa em mãos e considerando que θ_1 representa o valor do ângulo de deslocamento entre a corrente e a tensão quando não há a

correção do fator de potência ($\Phi = 22,33^\circ$) e θ_2 é o mesmo ângulo após a correção do fator de potência ($\Phi = 18,19^\circ$), tem-se que:

$$Q = 82,351 \text{ kW} \cdot (\text{tg } 22,33^\circ - \text{tg } 18,19^\circ)$$

$$Q = 6,765 \text{ kVAr}$$

Para esse valor de potência reativa a ser injetada no sistema, o valor do banco de capacitores necessários para realizar a correção desse fator de potência é de:

$$C = \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot Vn^2} \quad 3.2$$

Onde “ f ” representa a frequência fundamental do sinal presente no sistema elétrico e “ Vn ” a tensão nominal presente no circuito. Com isso, o valor calculado para a capacitância do banco de capacitores será de:

$$C = \frac{6,765 \text{ kVAr}}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (480^2)} = 0,07789 \text{ mF}$$

$$C = 77,89 \text{ uF}$$

Esse valor de capacitância representa uma reatância capacitiva na frequência fundamental de:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad 3.3$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (77,89 \text{ uF})}$$

$$X_C = 34,05 \Omega$$

Seguindo com o projeto do filtro passivo, agora será necessário utilizar a frequência ressonante desejada (300 Hz) para igualar a reatância capacitiva disponibilizada pelo banco de capacitores a ser instalado com a reatância indutiva necessária a ser disponibilizada pelo reator que será ligado em série ao banco de capacitores.

O cálculo referente ao valor de indutância que deverá ser disponibilizada pelo reator é representado por meio da seguinte expressão:

$$L = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot fr^2 \cdot C} \quad 3.4$$

Onde “ fr ” representa o valor da frequência ressonante do sistema e “ C ” é o valor da capacitância que será disponibilizado pelo banco de capacitores. De acordo com a expressão 3.4, o valor da indutância necessária para a confecção do filtro será de:

$$L = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (300)^2 \cdot (77,89 \mu F)}$$

$$L = 0,03613 H$$

$$L = 3,613 mH$$

O valor de reatância indutiva a ser disponibilizada pelo reator que será conectado ao banco de capacitores referente a frequência fundamental deverá ser de:

$$X_l = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad 3.5$$

$$X_l = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (3,613 mH)$$

$$X_l = 1,36 \Omega$$

A expressão 3.4, via de regra, nunca é projetada para a frequência ressonante exata que deverá ser filtrada, tendo em vista que pode ocorrer o desgaste devido ao tempo dos parâmetros referentes a capacitância do banco de capacitores e da indutância que será disponibilizada pelo reator. Normalmente se utiliza um valor um pouco inferior ao valor exato que foi calculado, para atenuar esse tipo de problema.

A norma IEEE diz que com base no espectro de harmônicos, em geral o filtro harmônico é sintonizado para a menor frequência entre as mais significativas do espectro. Na prática, a frequência de sintonia é selecionada como sendo de 3% a 15% abaixo da desejada, sendo esse percentual denominado “fator de dessintonia” (2003 apud LEÃO, R. et al., 2014, p313).

Além do cálculo referente a implementação de um filtro harmônico para a quinta ordem harmônica, deve-se realizar um estudo de como se comportarão as demais fases presentes no sistema quando ocorrer a inserção do banco de capacitores no circuito, pois este pode vir a se tornar de caráter capacitivo influenciando no valor do fator de potência do mesmo.

Como foi calculado para realizar a correção do fator de potência da planta para 0,95 indutivo para a fase C, o valor de potência reativa a ser adicionada ao circuito é de $Q = 6,765 \text{ kVAr}$ para cada fase.

Com esse valor de reativo e de acordo com a expressão 3.1, tem-se que após a inserção do banco de capacitores no circuito, as fases A e B assumirão um valor de fator de potência de:

$$\text{Fase A} \quad 6,765 \text{ kVAr} = 82,351 \text{ kW} \cdot (tg \theta_1 - tg \theta_2)$$

Onde θ_1 é o arco cosseno do fator de potência encontrado para a fase A (FP = 0,939), que equivale a $20,11^\circ$. Com isso, tem-se que:

$$\begin{aligned} \text{Fase A} \quad & tg \theta_2 = 0,2840 \\ & \theta_2 = 15,85^\circ \\ & \cos \theta_2 = FP = 0,9619 \end{aligned}$$

Como adotou-se o caso mais extremo para realizar o cálculo da potência reativa necessária a ser entregue pelo banco de capacitores, pode-se concluir que o valor obtido para o novo fator de potência calculado anteriormente é o maior que a fase A irá assumir.

Fazendo a mesma análise para a fase B, tem-se o seguinte fator de potência pós adição do filtro harmônico:

$$\begin{aligned} \text{Fase B} \quad & tg \theta_2 = 0,2971 \\ & \theta_2 = 16,54^\circ \\ & \cos \theta_2 = FP = 0,9586 \end{aligned}$$

O que está conforme com os valores médios obtidos para os fatores de potência antes de adicionado o filtro harmônico, onde a fase A apresentava o maior valor entre as demais fases.

Além dessas características básicas do filtro, o fator de qualidade é um importante parâmetro relacionado aos filtros harmônicos. Os filtros sintonizados são filtros passa-banda com alto fator de qualidade, em geral compreendido entre 20 e 80, aplicados para filtrar harmônicas de baixa ordem (Leão, R. et al. 2014, pg 310).

A equação 3.6 mostra o dimensionamento da resistência do circuito com base no valor de indutância, capacitância e fator de qualidade escolhido.

$$R = \frac{\sqrt{\frac{L}{C}}}{Q} \quad 3.6$$

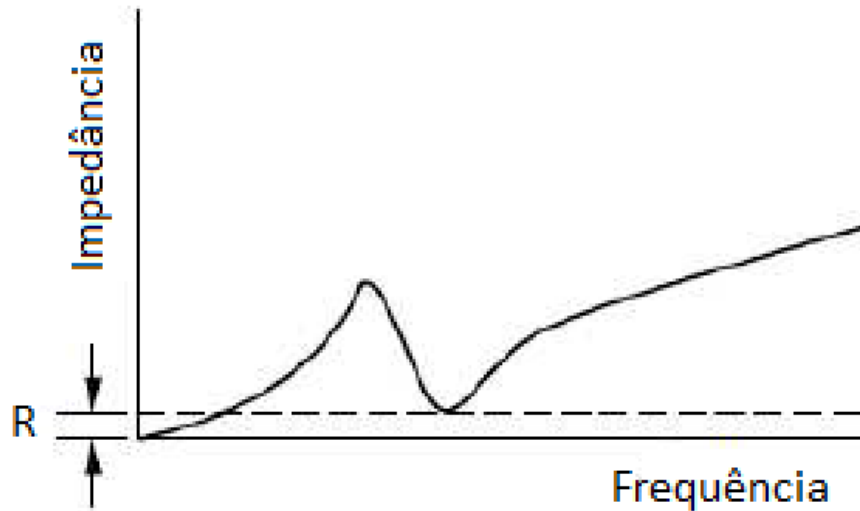
Onde “Q” representa o fator de qualidade aplicado ao filtro. No caso, foi adotado um fator de qualidade de valor 10, tendo em vista que o núcleo dos indutores a serem utilizados no filtro são a material ferromagnético com um pequeno GAP a ar, aumentando as perdas do material quando comparados a indutores de núcleo a ar. Com isso, temos que a resistência do filtro deve apresentar o valor de:

$$R = \frac{\sqrt{\frac{3,613 \text{ mH}}{77,89 \text{ uF}}}}{10}$$

$$R = 0,681 \Omega$$

Na baixa tensão, esse valor de resistência pode ser representado pela resistência intrínseca dos fios da bobina do indutor. Esse valor de resistência serve para definir a impedância mínima do sistema, limitando assim a corrente máxima a passar pelo filtro quando este estiver em operação.

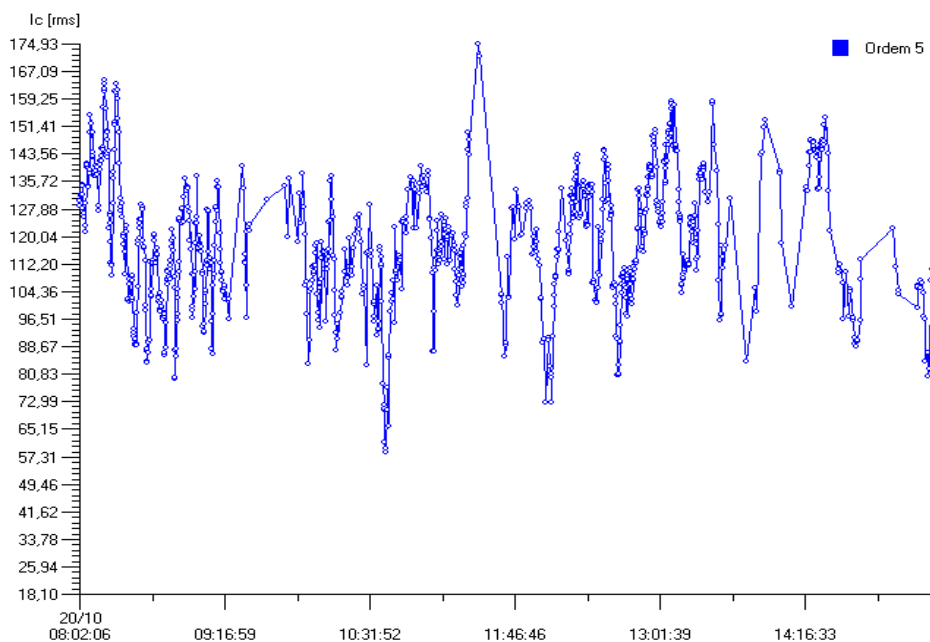
Figura 19 - Resposta em frequência de um filtro passivo do tipo shunt conectado ao sistema.



Fonte: (AUTOR, adaptado; 2019)

Sabendo a resistência necessária para realizar a confecção do filtro, foi realizada a análise referente a corrente máxima que o filtro será submetido quando este estiver em funcionamento. Ao longo do dia 20/10/2018, o maior valor de corrente RMS de quinta ordem para a fase C do sistema encontrado foi de:

Figura 20 - Ocorrência de correntes de quinta ordem no dia 20/10/2018.



Fonte: (AUTOR; 2019)

Pelo gráfico mostrado de acordo com a figura 20, pode-se observar que o máximo valor RMS de quinta ordem encontrado foi de 174,93 A. Para o projeto do filtro, deverá ser considerada o valor da corrente total que este estará submetido (parte da corrente fundamental mais corrente de quinta ordem). O valor da corrente fundamental que circulará por ele será dado por:

$$I_f = \frac{|V_f|}{|Z_{eq}|} \quad 3.7$$

Onde V_f representa a tensão de operação na planta no instante em que a corrente de quinta ordem apresenta seu valor máximo e Z_{eq} é o valor da impedância equivalente do filtro harmônico, que é dado por:

$$\begin{aligned} Z_{eq} &= -j.X_C + j.X_L + R \\ Z_{eq} &= -j.34,05 + j.1,36 + 0,136 = 32,690 \angle -89,76^\circ \Omega \end{aligned} \quad 3.8$$

Voltando para a expressão 3.7 e sabendo que a tensão de operação na fase C era de 271,86 V, temos que a corrente fundamental que passará pelo filtro será de:

$$I_f = \frac{271,86 \text{ V}}{32,690 \Omega} = 8,316 \text{ A}$$

A corrente total RMS que passará pelo filtro será de:

$$\begin{aligned} I_T &= \sqrt{(I_f^2 + I_5^2)} \\ I_T &= \sqrt{(8,316^2 + 174,93^2)} = 175,128 \text{ A} \end{aligned}$$

Portanto, o indutor que irá compor o filtro deverá apresentar as seguintes características:

Tabela 7 - Características do indutor que será utilizado no filtro.

Características do indutor (núcleo ferromagnético)	
Indutância (L)	3,613 mH
Corrente máxima suportada	175,128 A
Resistência do fio (R)	0,681 Ω

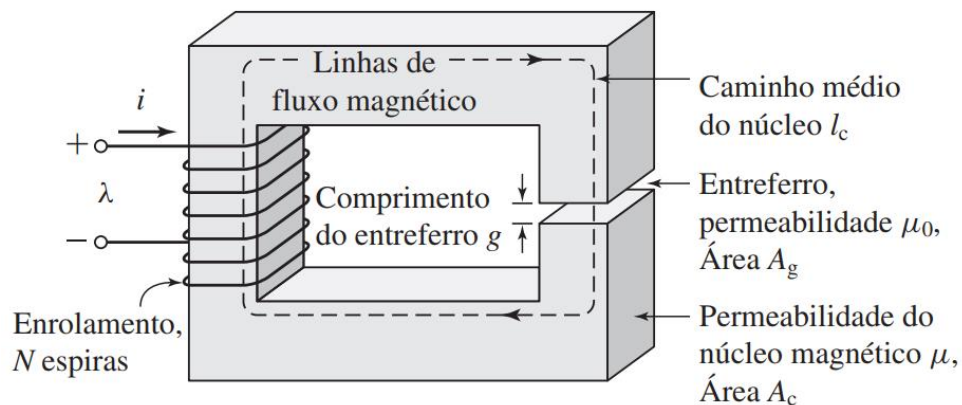
Fonte: (AUTOR; 2019)

3.5.2 PROJETO DE INDUTOR PARA APLICAÇÃO NO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO TIPO SHUNT PARA O TRANSFORMADOR PRINCIPAL.

Definindo as características básicas do indutor a ser utilizado no filtro harmônico projetado, podemos realizar cálculos necessários para realizar sua confecção, tendo em vista que seria muito difícil encontrar valores não usuais de indutância com as características necessárias para ser aplicado ao filtro.

A estrutura simplificada de um indutor com o núcleo a material ferromagnético tem a seguinte característica:

Figura 21 - Detalhes de um indutor composto por núcleo ferromagnético.



Fonte: (Eletric Machinery, ADAPTADO; 2006)

Sabendo da composição do indutor, e tendo os dados anteriores de corrente máxima a ser suportada (175,128 A), e a indutância necessária para sua confecção (3,613 mH), pode-se utilizar as seguintes equações para realizar a confecção do indutor:

$$N = \frac{L \cdot i_{m\acute{a}x}}{A_c \cdot B_{m\acute{a}x}} \quad 3.9$$

$$g = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i_{m\acute{a}x}}{B_{m\acute{a}x}} - \frac{\mu_0 \cdot l_c}{\mu} \quad 3.10$$

Onde A_c é dado em função da geometria do núcleo; $I_{m\acute{a}x}$, u_0 , L são especificações dadas ou quantias já definidas anteriormente; $B_{m\acute{a}x}$ é o valor de saturação do da densidade de fluxo magnético do material do núcleo do indutor; n , g , não são conhecidos. Essa simbologia adotada segue a seguinte regra para sua devida aplicação:

Tabela 8 - Variáveis a serem utilizadas no projeto do indutor do filtro harmônico.

Variável	Significado
n	n° de voltas da bobina
$I_{m\acute{a}x}$	Corrente máx. que passará pelo indutor
$B_{m\acute{a}x}$	Densidade máx. de fluxo mag.
g	comprimento do GAP
u_0	Perm. magnética do vácuo
u	Perm. magnético do material
L	Indutância
A_c	Área da secção transversal do núcleo
l_c	Caminho médio do núcleo
MLT	Comprimento médio por turno
A_w	Área de cobre nu

Fonte: (Autor; 2019)

Sabendo que é usual utilizar o valor da resistividade do cobre (ρ) de $1,724 \cdot 10^{-6}$ $\Omega \cdot \text{cm}$, que o valor da constante de permeabilidade magnética no vácuo é de $4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$ H/m, e adotando as equações 3.9 e 3.10 temos que o indutor deverá apresentar o seguinte número de espiras para um núcleo de área transversal igual a 100 cm^2 e comprimento médio de 100 cm:

$$N = \frac{L \cdot i_{m\acute{a}x}}{A_c \cdot B_{m\acute{a}x}}$$

$$N = \frac{3,613 \cdot 10^{-3} \cdot 175,13}{100 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5} = 42,18$$

$$N = 42 \text{ espiras}$$

O valor de $B_{m\acute{a}x}$ foi baseado em valores padrˆao de materiais ferromagnˆeticos usualmente utilizados na indˆustria (1,5 T). Os valores de ˆarea transversal e comprimento mˆedio foram arbitrados por meio de um rˆapido estudo de conformidade espacial entre o nˆucleo e o valor da quantidade de bobinas que foram obtidas acima.

O comprimento do GAP necessˆario para a confecˆcao desse indutor deverˆa ter o valor de:

$$g = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i_{m\acute{a}x}}{B_{m\acute{a}x}} - \frac{\mu_0 \cdot l_c}{\mu}$$

$$g = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 42 \cdot 175,13}{1,5} - \frac{\mu_0 \cdot 100 \cdot 10^{-2}}{4000 \cdot \mu_0} = 5,91 \cdot 10^{-3}$$

$$g = 5,91 \text{ mm}$$

Tem-se que o nˆumero de espiras necessˆarias serˆao 42, o entreferro serˆa de 5,91 mm, o indutor terˆa dimensˆoes de 25 cm x 25 cm x 10 cm.

Para verificar se a resistˆencia total do indutor, foi realizado o seguinte cˆalculo:

$$R = \frac{\rho \cdot n \cdot (MLT)}{A_w} = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 42 \cdot (4 \cdot 10 \cdot 10^{-2})}{70 \cdot 10^{-3}} = 4,13 \cdot 10^{-6} \Omega$$

Com os valores obtidos para a confecˆcao desse filtro, pode-se observar que o mesmo valores de resistˆencia abaixo do calculado para um fator de qualidade 10, logo deve-se instalar, em sˆerie com o filtro, um reostato para seguir os critˆerios de qualidade do filtro e tambˆem, se necessˆario, poderˆa realizar o controle da corrente que irˆa circular pelo filtro em seu funcionamento.

3.5.3 DIMENSIONAMENTO DE FILTRO HARMˆONICO PASSIVO TIPO SHUNT PARA O TRANSFORMADOR PDVT.

Como no caso do transformador principal, serˆa mostrada uma tabela com os valores mˆedios referente ao dia em que a planta apresentou a maior demanda de energia elˆetrica ao longo do perˆodo de mediˆcao.

Tabela 9 - Valores médios referentes planta industrial encontrados no dia 17/10/2018 para o transformador PDVT.

Grandezas médias encontradas no dia 17/10/2018			
	Fase A	Fase B	Fase C
Potência Ativa (kW)	6,453	6,421	7,165
Potência Reativa (kVAr)	2,760	2,469	2,554
Potência Aparente (KVA)	7,018	6,879	7,607
Fator de Potência	0,919	0,933	0,942

Fonte: (AUTOR; 2019)

Como pode ser observado na tabela 17, no dia 17/10/2018 a fase A do sistema apresenta o pior valor médio de fator de potência (0,919 indutivo). Esse valor de fator de potência é inferior quando comparado ao transformado principal da instalação.

Novamente, o cálculo referente ao banco de capacitores a ser implantado, foi adotado que a planta deverá apresentar um fator de potência corrigido de 0,95 indutivo para a fase que apresenta o menor fator de potência (fase A), que corresponde ao seguinte ângulo de deslocamento entre a corrente do sistema e a tensão de 18,19°, como foi calculado na seção anterior.

Utilizando a equação 3.1, calculou-se o valor de potência reativa necessária para realizar a correção do fator de potência da instalação, sabendo que o ângulo sem a correção tem o valor de $\Phi = 23,21^\circ$.

$$Q = 6,453 \text{ kW} \cdot (\text{tg } 23,21^\circ - \text{tg } 18,19^\circ)$$

$$Q = 0,646 \text{ kVAr}$$

Para esse valor de potência reativa a ser injetada no sistema, o valor do banco de capacitores necessários para realizar a correção desse fator de potência é de:

$$C = \frac{0,646 \text{ kVAr}}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (480^2)}$$

$$C = 7,437 \text{ uF}$$

Esse valor de capacitância representa uma reatância capacitiva na frequência fundamental de:

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

$$X_c = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (7,437 \text{ uF})}$$

$$X_c = 356,67 \Omega$$

Utilizando a equação 3.4 mostrada anteriormente, temos que a indutância dos reatores presentes no filtro harmônico passivo deverá ser de:

$$L = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot (300)^2 \cdot (7,437 \text{ uF})}$$

$$L = 37,844 \text{ mH}$$

De acordo com a equação 3.5, o valor de reatância indutiva a ser disponibilizada pelo reator que será conectado ao banco de capacitores referente a frequência fundamental deverá ser de:

$$X_l = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$$

$$X_l = 2 \cdot \pi \cdot 60 \cdot (37,844 \text{ mH})$$

$$X_l = 14,265 \Omega$$

Deverá ser realizada uma análise do comportamento das outras fases do sistema quando houver a inserção do filtro harmônico no sistema, como no caso do projeto anterior.

Como foi calculado para realizar a correção do fator de potência da planta para 0,95 indutivo para a fase A, o valor de potência reativa a ser adicionada ao circuito é de $Q = 0,646 \text{ kVAr}$ para cada fase.

Com esse valor de reativo e de acordo com a expressão 3.1, tem-se que após a inserção do banco de capacitores no circuito, as fases A e B assumirão um valor de fator de potência de:

$$\text{Fase B} \quad 0,646 \text{ kVAr} = 6,421 \text{ kW} \cdot (tg \theta_1 - tg \theta_2)$$

Onde θ_1 é o arco cosseno do fator de potência encontrado para a fase B (FP = 0,933), que equivale a $21,09^\circ$. Com isso, tem-se que:

Fase B

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_2 &= 0,2850 \\ \theta_2 &= 15,91^\circ \\ \cos \theta_2 &= FP = 0,9616 \end{aligned}$$

Esse valor de fator de potência é o valor máximo que a fase B irá assumir.

Fazendo a mesma análise para a fase C, tem-se o seguinte fator de potência pós adição do filtro harmônico:

Fase C

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \theta_2 &= 0,2659 \\ \theta_2 &= 14,89^\circ \\ \cos \theta_2 &= FP = 0,9664 \end{aligned}$$

O que nos permite inferir que a instalação não apresentará uma característica capacitiva após a inserção do filtro.

De acordo com a equação 3.6 e adotando o mesmo fator de qualidade definido para o filtro anterior (10), temos que a resistência necessária para a confecção do filtro será de:

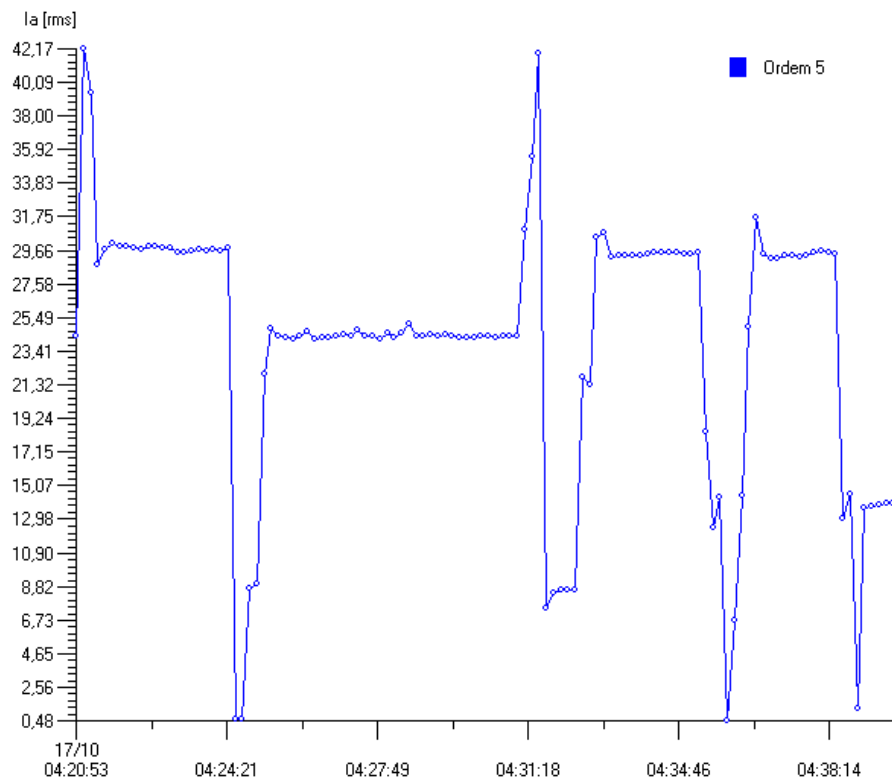
$$R = \frac{\sqrt{\frac{37,84 \text{ mH}}{7,437 \text{ uF}}}}{10}$$

$$R = 7,133 \Omega$$

Esse valor ainda pode ser representado pela resistência dos condutores utilizado na confecção do indutor que será utilizado no filtro.

A corrente máxima para a quinta ordem observada no dia 17/10/2018 apresentou o seguinte valor:

Figura 22 - Ocorrência de correntes de quinta ordem no dia 17/10/2018.



Fonte: (AUTOR; 2019)

Pelo gráfico mostrado de acordo com a figura 21, pode-se observar que o máximo valor RMS de quinta ordem encontrado foi de 42,17 A. De acordo com a equação 3.7, o valor da corrente RMS do sinal fundamental que passará pelo filtro apresentará o seguinte valor:

$$I_f = \frac{267,59 V}{(-j.356,67 + j.14,265 + 1,426) \Omega} = 0,782 A$$

A corrente total RMS que passará pelo filtro será de:

$$I_T = \sqrt{(I_f^2 + I_5^2)}$$

$$I_T = \sqrt{(0,782^2 + 42,17^2)} = 42,177 A$$

Portanto, o indutor que irá compor o filtro deverá apresentar as seguintes características:

Tabela 10 - Características do indutor que será utilizado no filtro.

Características do indutor (núcleo ferromagnético)	
Indutância (L)	37,844 mH
Corrente máxima suportada	42,177 A
Resistência do fio (R)	7,113 Ω

Fonte: (AUTOR; 2019)

3.5.4 PROJETO DE INDUTOR PARA APLICAÇÃO NO FILTRO HARMÔNICO PASSIVO TIPO SHUNT PARA O TRANSFORMADOR PDVT.

Como foi mostrado na seção 3.5.2, o projeto do indutor para a aplicação no filtro passivo que estará presente no transformador PDVT da instalação deverá seguir a mesma metodologia e os mesmos passos adotados anteriormente. Vale ressaltar que o valor da indutância para esse caso é de uma ordem de dez vezes superior ao analisado para o transformador principal.

Adotando as mesmas equações mostradas na seção anterior, as mesmas tabelas de referência e as mesmas variáveis utilizadas, temos que o indutor, de acordo com a equação 3.9, deverá apresentar o seguinte número de espiras:

$$N = \frac{L \cdot i_{m\acute{a}x}}{A_c \cdot B_{m\acute{a}x}}$$

$$N = \frac{37,84 \cdot 10^{-3} \cdot 42,18}{100 \cdot 10^{-4} \cdot 1,5} = 106,41$$

$$N = 107$$

O comprimento do GAP necessário para a confecção desse indutor deverá ter o valor de:

$$g = \frac{\mu_0 \cdot N \cdot i_{m\acute{a}x}}{B_{m\acute{a}x}} - \frac{\mu_0 \cdot l_c}{\mu}$$

$$g = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot 107 \cdot 42,18}{1,5} - \frac{\mu_0 \cdot 100 \cdot 10^{-2}}{4000 \cdot \mu_0} = 3,522 \cdot 10^{-3}$$

$$g = 3,522 \text{ mm}$$

Utilizando o mesmo valor para as características do núcleo do sistema principal, tem-se que o número de espiras necessárias serão 107, o comprimento do entreferro será de 3,5mm e as dimensões do indutor deverão ser de 25 cm x 25 cm x 10 cm, como no caso anterior. Vale ressaltar que esse cálculo foi realizado apenas para se ter uma estimativa das dimensões e características necessárias para a confecção do indutor que será utilizado no filtro, este podendo ser otimizado conforme as características de projeto.

Para verificar a resistência total do condutor presente nos enrolamentos do indutor, foi utilizada a mesma equação para o projeto do indutor para o filtro do transformador principal, como segue abaixo:

$$R = \frac{\rho \cdot n \cdot (MLT)}{A_w} = \frac{1,72 \cdot 10^{-8} \cdot 107 \cdot (4 \cdot 10 \cdot 10^{-2})}{10 \cdot 10^{-3}} = 7,35 \cdot 10^{-5} \Omega$$

Novamente a resistência se manteve baixa em relação ao valor de resistência calculada para que o filtro apresentasse um fator de qualidade com o valor 10, comum em indutores com núcleo a matérias ferromagnéticos. A mesma observação de instalação de um reostato em série com o filtro deverá ser considerada para esse filtro.

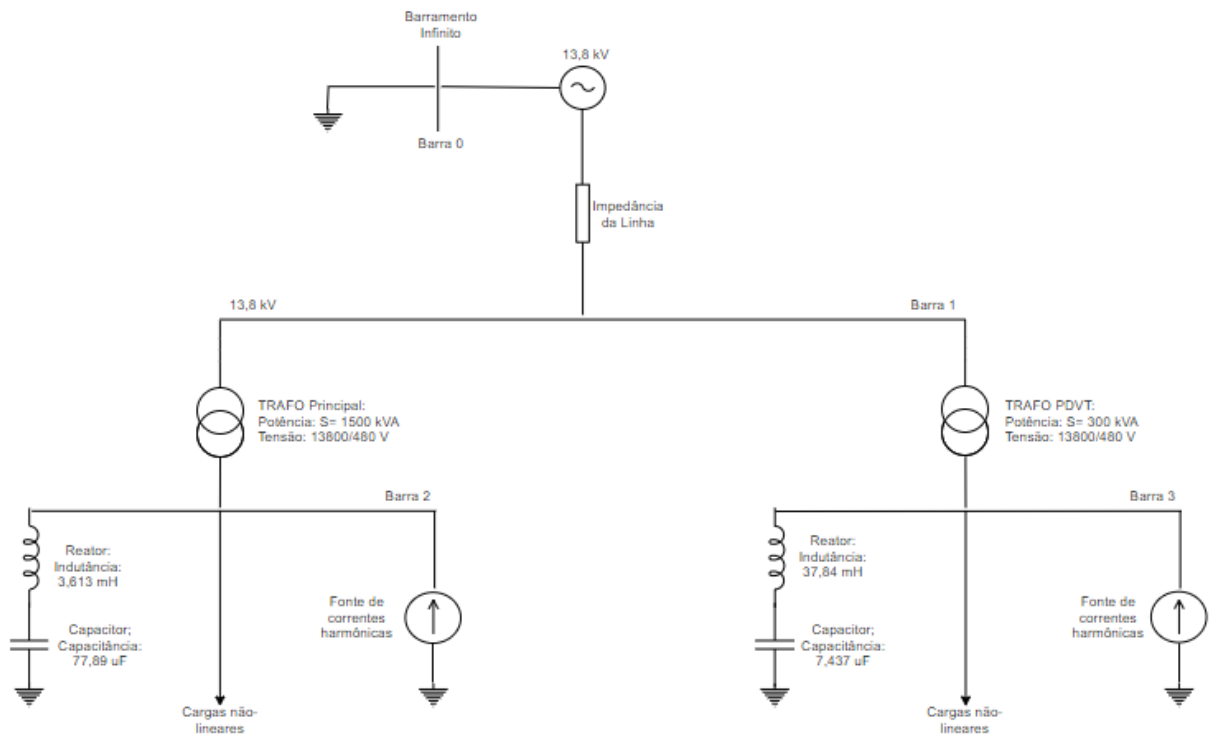
3.6 ESQUEMA DE LIGAÇÃO DO FILTRO PASSIVO SHUNT NA PLANTA INDUSTRIAL

Após feito o dimensionamento dos componentes presentes no filtro harmônico passivo a ser implementado, também foi realizada a montagem de um diagrama unifilar simplificado de como deve ficar o esquema da planta após a inserção do filtro.

A conexão do filtro passivo ao sistema deverá ser realizada por meio de um chaveamento suave, que deve ser realizada por meio de contatores com resistores de pré-carga, para que assim o transitório oscilatório apresente características suaves, possibilitando o melhor funcionamento do circuito e evitando o desgaste aos componentes. A figura 22 ilustra o diagrama unifilar após a inserção do filtro

harmônico. Alguns elementos do circuito foram retirados desta representação para facilitar a compreensão do local de conexão do filtro.

Figura 22 - Diagrama unifilar da planta industrial após a inserção do filtro harmônico.

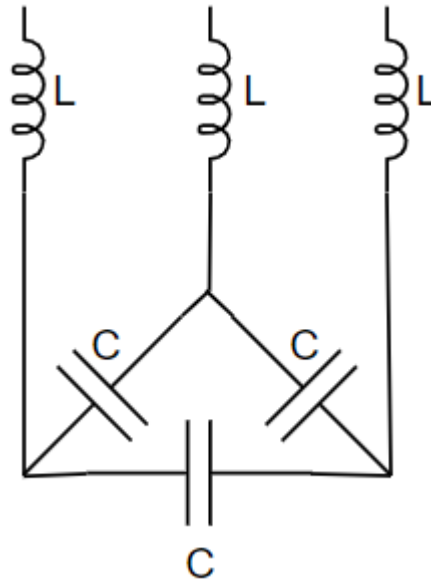


Fonte: (AUTOR; 2019)

Antes da implementação desse filtro também deverá ser realizada uma análise de funcionamento por meio de simulações referentes a presença ou não de frequências ressonantes entre o filtro harmônico inserido e a indutância dos componentes do circuito industrial em questão. Tal fenômeno pode vir a amplificar os efeitos harmônicos de uma certa faixa de frequência, podendo assim vir a causar prejuízos no circuito em questão.

Quanto ao tipo de ligação do banco de capacitores e reatores, para a baixa tensão o esquema de ligação mais utilizado é representado pela figura 22, por ser considerado o mais econômico entre as demais opções:

Figura 23 - Esquema de conexão do filtro harmônico passivo do tipo Shunt trifásico.



Fonte: (AUTOR; 2019)

Com a aplicação correta desse tipo de filtro, espera-se que ocorra a eliminação total da quinta ordem harmônica, sendo esta a maior responsável pela distorção harmônica total do sistema elétrico em questão. A vida útil desse tipo de filtro pode variar de acordo de como será sujeita sua aplicação, sendo uma solução viável para esse tipo de consumidor.

4 RESULTADO E DISCUSSÕES

4.1 DADOS OBTIDOS REFERENTES AOS TERMINAIS EM ANÁLISE

Para que fossem realizadas as análises pertinentes ao estudo realizado na planta industrial conhecida, foram utilizados como base os dados do Módulo 8 do PRODIST – Revisão 10 (2017), onde são disponibilizados valores limites para as distorções harmônicas no sistema elétrico, como já foi mostrado em tópicos anteriores.

Como também já foi citado, foram realizadas dez medidas por segundo em cada ponto de medição que foram previamente estabelecidos. Ao todo, foram medidos quarenta e nove pontos de funcionamento de inversores de frequência conectados a motores e mais dois pontos de baixa tensão da subestação elétrica alimentadora da indústria. Esses dois pontos são referentes aos trafos da indústria, que apresenta dois sistemas independentes: um alimenta a o carregamento e descarga de AT, motores do sistema de combate a incêndio, entre outros. Este trafa será intitulado durante este trabalho de trafa principal. O segundo trafa é responsável pelo carregamento e descarga de VT, e será chamado de trafa PDVT durante este trabalho. Essa separação de sistemas foi realizada devido à distância entre os dois setores e visando maior segurança na situação de possível falha de uma das partes. Na tabela 7, estão apresentados o número de inversores localizados em um mesmo demarrador, com suas respectivas potências, lembrando que o demarrador do PDVT está em outro sistema, porém foi adicionado junto com o restante para simplificação.

Tabela 11 - Terminais de motores e suas potências.

	Motores Elétricos	Potência
Demarrador TQ12	6	2 x 45 kW / 4 x 30 kW
Demarrador LGE2	8	6 x 37 kW / 2 x 30 kW
Demarrador OC e B100	4	2 x 55 kW / 2 x 45 kW
Demarrador TQ13	5	55 kW
Demarrador TQ11	7	55 kW
Demarrador S500	2	30 kW
Demarrador TQ5	11	2 x 55 kW / 5 x 30 kW / 2 x 11 kW / 2 x 7,5 kW
Demarrador QAV	4	2 x 55 kW / 1 x 30 kW / 1 x 22 kW

Demarrador PDVT	2	45 kW
-----------------	---	-------

Fonte: (AUTOR, 2019).

Com o sistema de medição que foi adotado nesse trabalho, foram obtidos valores médios diários para tensão, corrente, potências ativas, reativas e aparente do sistema do lado de baixa tensão de terminal alimentador da indústria (trafo principal), bem como o fator de potência de operação deste sistema. Para essas medições, foi considerado o intervalo do dia 19/10/2018 as 11:39:36,00 até o dia 23/10/2018 as 08:37:24,00, com uma medição a cada 100 milissegundos.

Os valores médios encontrados para os dias 19, 20 e 21 para o transformador principal foram obtidos de acordo com as seguintes tabelas:

Tabela 12 - Grandezas médias encontradas no dia 19/10/2018.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	272,22	272,52	272,03
Correntes [A]	359,87	371,93	362,37
Potências ativas [kW]	92,162	95,353	91,388
Potências reativas [kVAr]	33,200	35,119	37,205
Potências aparentes [kVA]	97,960	101,614	98,671
Fatores de potência	0,941	0,938	0,926

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Tabela 13 - Grandezas médias encontradas no dia 20/10/2018.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	271,05	271,25	271,04
Correntes [A]	330,53	339,31	330,55
Potências ativas [kW]	83,699	85,781	82,351
Potências reativas [kVAr]	30,606	32,394	33,781
Potências aparentes [kVA]	89,119	91,693	89,010
Fatores de potência	0,939	0,935	0,925

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Tabela 14 - Grandezas médias encontradas no dia 21/10/2018.

	Fase A	Fase B	Fase C
Tensões [V]	271,06	271,45	271,14
Correntes [A]	204,62	202,68	199,61
Potências ativas [kW]	51,861	51,124	49,869
Potências reativas [kVAr]	17,698	18,850	18,558
Potências aparentes [kVA]	54,798	54,488	53,210
Fatores de potência	0,946	0,938	0,937

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Observando os dados disponibilizados pelo software citados acima, foi possível observar que a Fase C do sistema sempre possuiu um menor fator de potência quando comparado as outras fases apresentadas.

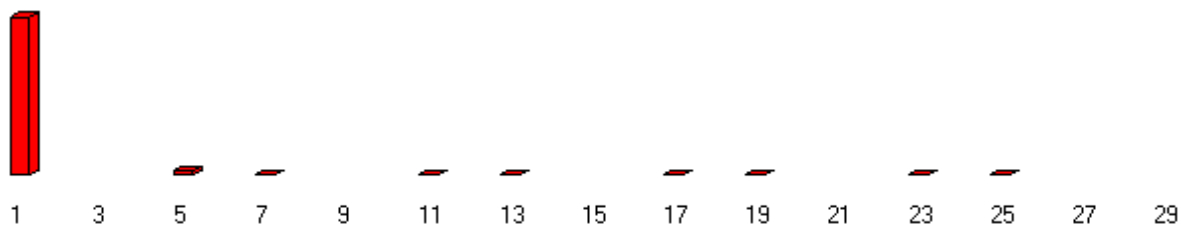
Os dados que foram obtidos referentes às distorções harmônicas de corrente e de tensão por fase foram dadas por meio de gráficos e de tabelas. Para as distorções harmônicas de tensão, foi observado apenas a presença de harmônicas ímpares não múltiplas de três, com valores significativos até a vigésima quinta ordem. Para melhor verificação dos resultados obtidos, são mostradas as tabelas a seguir:

Tabela 15 - Harmônicas de tensão - Fase A.

IMPAR	RMS(V)	%FUND	FASE
1	271,968	100,00	81,21
3			
5	10,943	4,02	60,46
7	3,799	1,39	107,49
9			
11	3,480	1,27	162,15
13	2,084	0,76	180,79
15			
17	3,967	1,45	251,71
19	3,429	1,26	241,43
21			
23	3,177	1,16	237,96
25	1,832	0,67	230,97
27			
29			

Fonte: (AUTOR, 2019).

Figura 24 - Espectro harmônico de tensão - Fase A.



Fonte: (AUTOR, 2019).

Para obtenção desses dados, foram realizadas várias amostragens ao longo do período de medição. Nos casos que serão colocados a seguir, foi selecionado um valor pontual para que seja possível realizar a visualização do comportamento da qualidade do sinal ao longo dos dias.

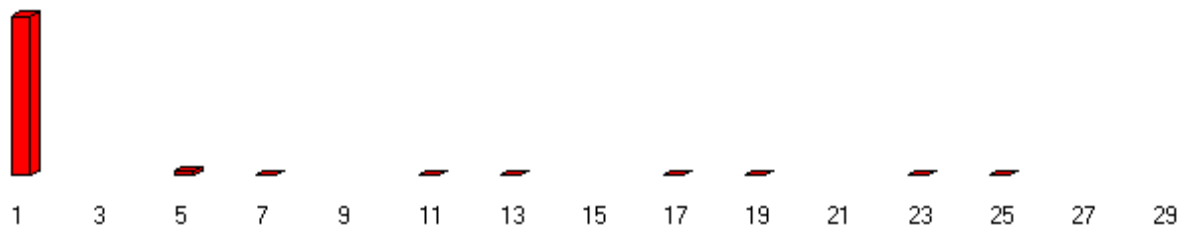
Para a fase B, os valores encontrados foram:

Tabela 16 - Harmônicos de tensão - Fase B.

IMPAR	RMS(V)	%FUND	FASE
1	272,241	100,00	320,93
3			
5	11,444	4,20	180,96
7	3,978	1,46	351,21
9			
11	3,371	1,23	282,30
13	2,511	0,92	64,59
15			
17	3,489	1,28	9,14
19	4,669	1,71	121,42
21			
23	2,680	0,98	0,00
25	2,494	0,91	105,82
27			
29			

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Figura 25 - Espectro harmônico de tensão - Fase B.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

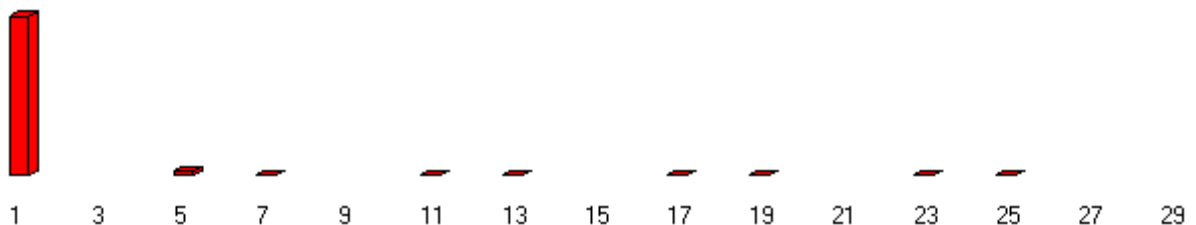
Por último, os dados de distorção de tensão harmônica em um ponto de medição ao longo do período de amostragem para a fase C foram semelhante com:

Tabela 17 – Harmônicos de tensão – Fase C.

IMPAR	RMS(V)	%FUND	FASE
1	271,453	100,00	201,04
3			
5	10,899	4,01	300,32
7	3,845	1,41	231,19
9			
11	3,544	1,30	33,22
13	2,290	0,84	294,74
15			
17	3,711	1,36	119,57
19	4,129	1,52	349,98
21			
23	2,624	0,96	106,25
25	2,156	0,79	332,18
27			
29			

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Figura 26 - Espectro harmônico de tensão - Fase C.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Vale lembrar que os valores de fase mostrados nas tabelas anteriores estão sempre em graus.

Após verificadas as distorções harmônicas de tensão, foi realizada a análise referente as distorções harmônicas de corrente para as três fases do sistema.

Para o caso das distorções harmônicas de corrente, foi observado que estas possuem apenas harmônicas ímpares, sendo as múltiplas de três com valores inferiores aos valores das outras harmônicas ímpares. Também, observou-se a presença de harmônicas relevantes até a vigésima quinta ordem, como será mostrado

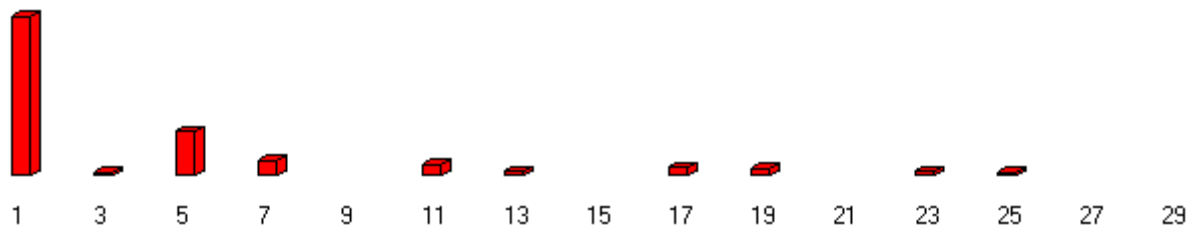
pelas imagens e tabelas a seguir, referente à medição realizada no lado de baixa tensão de terminal alimentador da indústria (trafo principal):

Tabela 18 - Harmônicos de corrente - Fase A.

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	415,433	100,00	74,75
3	9,344	2,24	313,50
5	119,311	28,71	157,36
7	42,262	10,17	241,78
9			
11	32,343	7,78	265,64
13	16,531	3,97	292,71
15			
17	24,868	5,98	344,09
19	19,693	4,74	342,11
21			
23	14,806	3,56	331,39
25	7,906	1,90	327,83
27			
29			

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Figura 27 - Espectro harmônico de corrente - Fase A.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

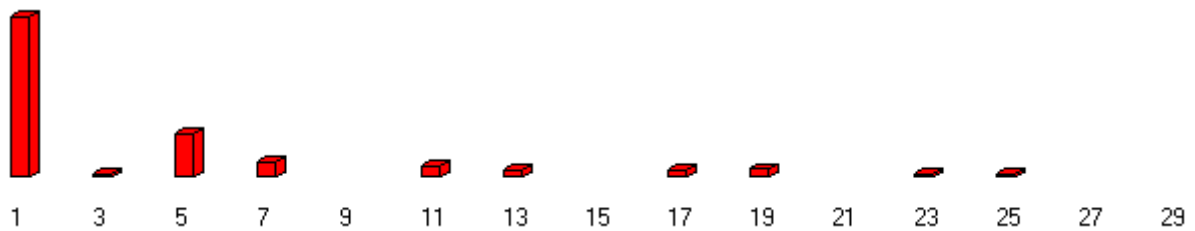
Para a fase B, foram encontrados os seguintes valores pontuais em uma amostragem:

Tabela 19 – Harmônicos de corrente – Fase B.

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	436,588	100,00	312,53
3	10,271	2,35	258,35
5	120,157	27,52	278,17
7	45,586	10,44	119,97
9			
11	30,109	6,89	24,43
13	19,276	4,41	170,55
15			
17	21,105	4,83	105,77
19	25,185	5,76	221,08
21			
23	11,819	2,70	94,83
25	10,412	2,38	201,97
27			
29			

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Figura 28 - Espectro harmônico de corrente - Fase B.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

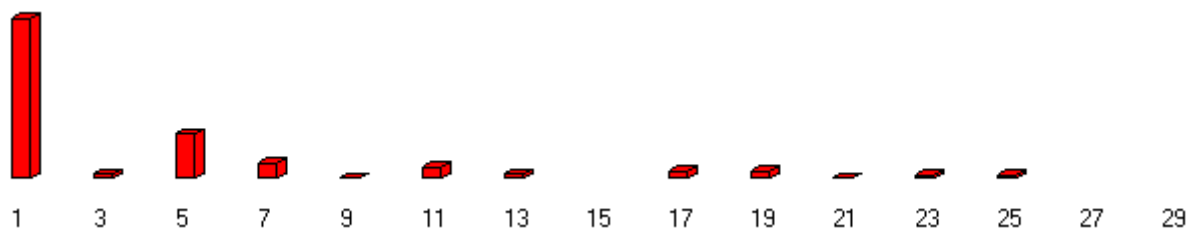
Para a fase C, no mesmo tempo de amostra, obteve-se:

Tabela 20 - Harmônicos de corrente - Fase C.

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	420,730	100,00	188,70
3	17,178	4,08	104,85
5	119,442	28,38	39,85
7	43,750	10,39	353,80
9	4,429	1,05	192,43
11	31,001	7,36	143,17
13	17,849	4,24	41,92
15			
17	22,949	5,45	219,06
19	22,412	5,32	88,19
21	3,489	0,82	245,96
23	11,944	2,83	203,81
25	9,126	2,16	64,33
27			
29			

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

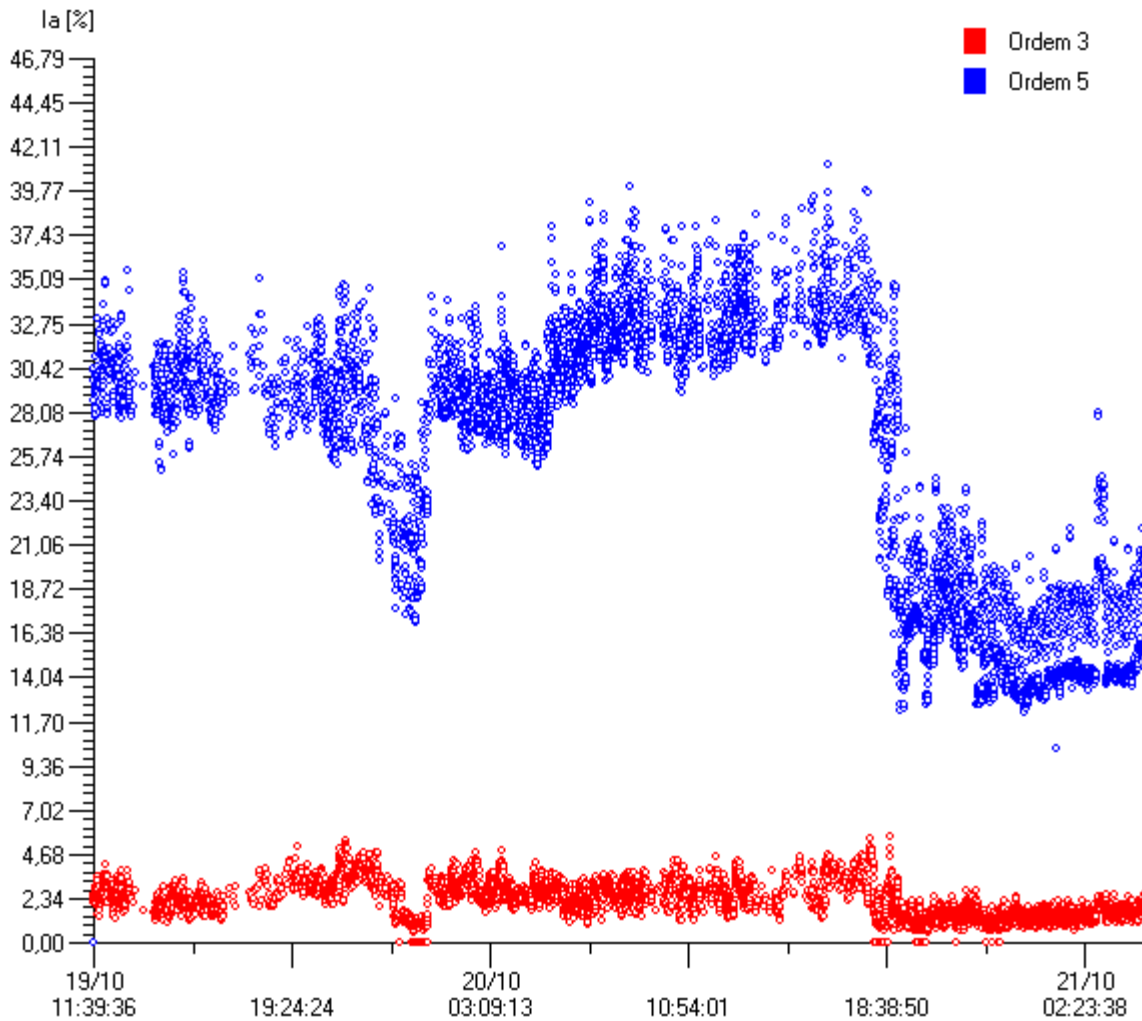
Figura 29 - Espectro harmônico de corrente - Fase C.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Para realizar a integração de todos os dados obtidos da forma exposta acima, como valores médios de potência aparente, fator de potência, e as demais grandezas, foram realizadas várias medidas pontuais para cada fase. O software disponibilizado para realizar essa análise também apresentou gráficos pontuais dos valores de distorções por fase, de maneira extensa e completa, para assim poder disponibilizar os dados médios mais precisos possíveis ao longo do período de amostragem.

Figura 30 - Dados pontuais referentes à distorção harmônica - Fase A.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Na figura acima, pode-se observar uma infinidade de pontos medidos para as distorções de correntes causadas pela terceira e quinta harmônica na fase A do sistema elétrico em questão. Vale lembrar que o gráfico disponibilizado acima não é o gráfico completo do período total de amostragem, tendo em vista que este é muito extenso e não ficaria visível para sua colocação neste documento.

Para fins de verificação da qualidade do sinal e mais fácil entendimento do que se passa pela planta que está sendo analisada, foi adquirido também um relatório geral, do mesmo ponto de coleta dos relatórios anteriores, de como se comportaram os sinais para as três fases, referentes as distorções harmônicas de tensão e de corrente deste sistema principal.

Figura 31 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase A.

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96000663 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase A
Número total de registros 21247

Registro com maior DHT
Registro 2965 07:05:36,00 de 20/10/2018
DHT calculada: 6,71 %
Registro com menor DHT
Registro 5273 21:05:47,00 de 20/10/2018
DHT calculada: 1,42 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 11:40:06,00 de 19/10/2018
Número de componentes harmônicas 9
Registro com menor no. de componentes
Registro 4625 18:45:07,00 de 20/10/2018
Número de componentes harmônicas 2

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1 11:40:06,00 de 19/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 25

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 1,42% e 6,71% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de 3,51%, não ultrapassando o limite de DTT_{95%} de 7,5%. Não foi utilizado o valor máximo de DTT_{95%} por se tratarem apenas de componentes ímpares não múltiplos de 3.

Figura 32 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase B.

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96000663 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase B
Número total de registros 21247

Registro com maior DHT
Registro 2965 07:05:36,00 de 20/10/2018
DHT calculada: 7,11 %
Registro com menor DHT
Registro 5013 20:11:47,00 de 20/10/2018
DHT calculada: 1,58 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 11:40:06,00 de 19/10/2018
Número de componentes harmônicas 9
Registro com menor no. de componentes
Registro 4619 18:43:07,00 de 20/10/2018
Número de componentes harmônicas 2

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1 11:40:06,00 de 19/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 25

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase B, de maneira análoga a fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 1,58% e 7,11% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de 3,73%, não ultrapassando o limite de DTT_{95%} de 7,5%. Assim como na fase A, não foi utilizado o valor máximo de DTT_{95%} por se tratarem apenas de componentes ímpares não múltiplos de 3.

Figura 33 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase C.

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96000663 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase C
Número total de registros 21247

Registro com maior DHT
Registro 690 18:44:26,00 de 19/10/2018
DHT calculada: 10,08 %
Registro com menor DHT
Registro 11993 22:50:26,00 de 21/10/2018
DHT calculada: 0,89 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 11:40:06,00 de 19/10/2018
Número de componentes harmônicas 9
Registro com menor no. de componentes
Registro 4619 18:43:07,00 de 20/10/2018
Número de componentes harmônicas 2

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 1 11:40:06,00 de 19/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 25

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase C, de maneira análoga as duas fases analisadas anteriormente, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,89% e 10,08% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de 3,47%, não ultrapassando o limite de DTT_{95%} de 7,5%. Apesar de apresentar um ponto com valor de 10,08% e outros acima de 7,5%, esses pontos fazem parte dos 5% desconsiderados durante o cálculo de DTT_{95%}. Na figura 32, pode-se observar que estes pontos foram desconsiderados na elaboração do gráfico de DHTU, sendo os pontos plotados todos dentro do limite de 7,5%. Assim como nas fases A e B, não foi utilizado o valor máximo de DTT_{95%} por se tratarem apenas de componentes ímpares não múltiplos de 3.

Por meio desses relatórios é possível concluir mais facilmente se é necessário ser aplicado algum tipo de técnica de mitigação de harmônicos ou se o sinal presente na instalação elétrica segue conformidade segundo as normas adotadas.

De acordo com os relatórios que foram obtidos, pode-se observar que a fase C apresenta a maior distorção harmônica total de tensão medida ao longo do período de amostragem (10,08%), no primeiro dia de medições realizados (19/10/2018). As

demais fases apresentaram seu valor máximo de distorções harmônicas totais de tensão no dia seguinte (20/12/2018).

Também é possível adquirir esse tipo de relatório para as distorções harmônicas de corrente, como é mostrado pelas imagens a seguir:

Figura 34 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase A.

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96000663 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase A
Número total de registros 21247

Registro com maior DHT
Registro 9724 13:41:26,00 de 21/10/2018
DHT calculada: 53,50 %
Registro com menor DHT
Registro 13704 09:30:17,00 de 22/10/2018
DHT calculada: 0,00 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 16112 16:55:58,00 de 22/10/2018
Número de componentes harmônicas 25
Registro com menor no. de componentes
Registro 13704 09:30:17,00 de 22/10/2018
Número de componentes harmônicas 0

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 975413:56:06,00 de 21/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 37

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,00% e 53,50% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de aproximadamente 33%, conforme pode ser observado na imagem 34. Segundo o módulo 8 do PRODIST, não há especificado limites para distorção de corrente. Para realizar a avaliação destes valores, a norma IEEE Std 519 foi utilizada como base. Segundo ela, para tensões entre 120V e 69kV o limite para um $I_{sc}/I_L > 1000$ é de 20%, podendo ser inferior de acordo com as correntes nominais e de curto do sistema. O cenário estudado está acima dos valores toleráveis, segundo a norma IEEE.

Figura 35 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase B.

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96000663 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase B
Número total de registros 21247

Registro com maior DHT
Registro 9504 12:27:56,00 de 21/10/2018
DHT calculada: 56,22 %
Registro com menor DHT
Registro 10925 18:53:06,00 de 21/10/2018
DHT calculada: 6,96 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 9756 13:56:46,00 de 21/10/2018
Número de componentes harmônicas 24
Registro com menor no. de componentes
Registro 18489 00:11:48,00 de 23/10/2018
Número de componentes harmônicas 5

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 9756 13:56:46,00 de 21/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 37

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase B, de maneira análoga a fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 6,96% e 56,22% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de aproximadamente 33%, ultrapassando o limite segundo a norma IEEE Std 519.^[UdW1]

Figura 36 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase C.

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96000663 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase C
Número total de registros 21247

Registro com maior DHT
Registro 9504 12:27:56,00 de 21/10/2018
DHT calculada: 57,85 %
Registro com menor DHT
Registro 15440 14:52:48,00 de 22/10/2018
DHT calculada: 0,00 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 9757 13:56:56,00 de 21/10/2018
Número de componentes harmônicas 22
Registro com menor no. de componentes
Registro 15440 14:52:48,00 de 22/10/2018
Número de componentes harmônicas 0

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 9757 13:56:56,00 de 21/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 37

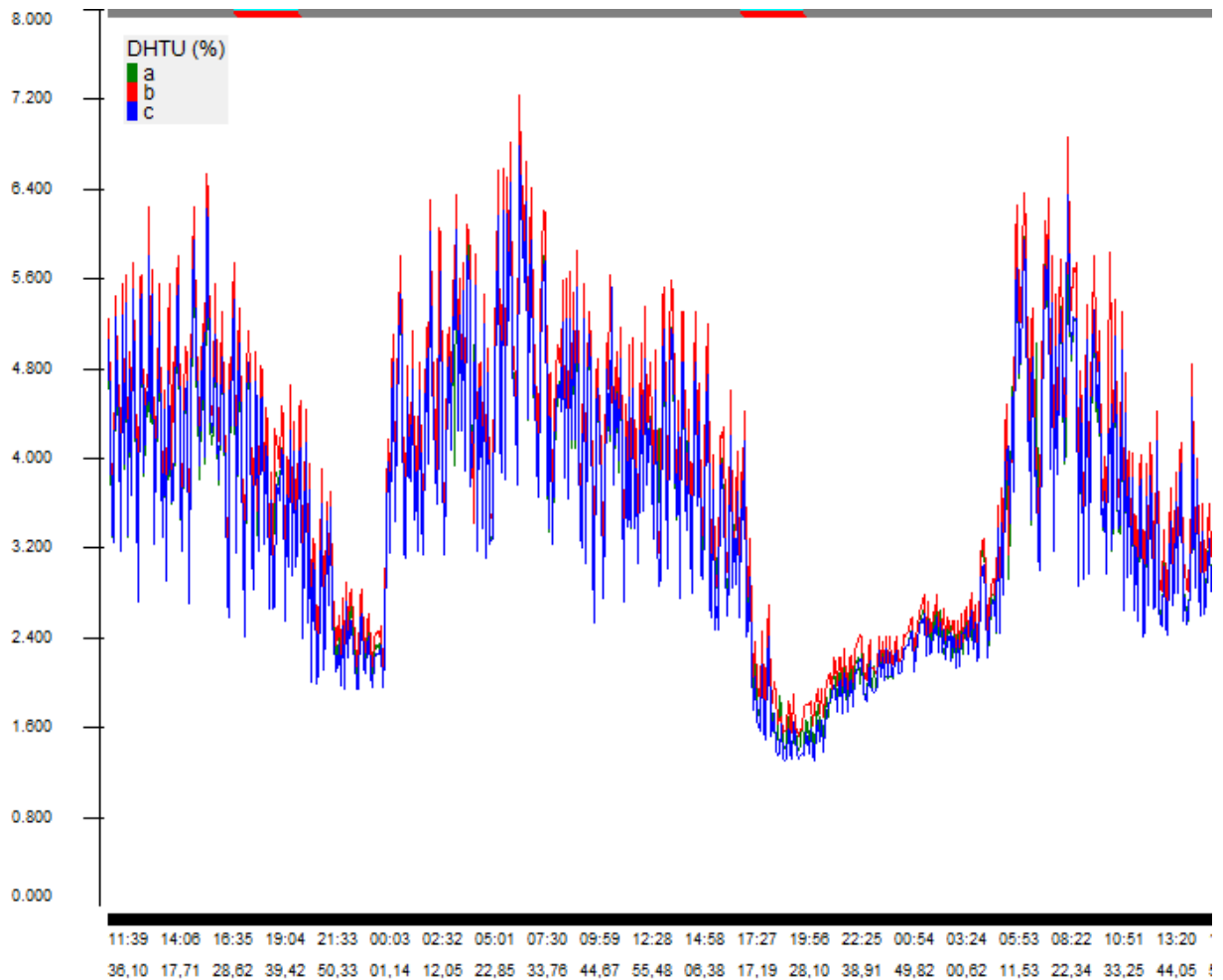
Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase C, de maneira análoga as duas fases analisadas anteriormente, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,00% e 57,85% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de 33%, e como as fases A e B, ultrapassou o limite estipulado pela norma IEEE Std 519.

Com esses dados, pode-se observar que a distorção de corrente total nas fases B e C apresentam o seu valor máximo no dia 21/10/2018, no mesmo horário. Para a fase A, o máximo valor da distorção harmônica total de corrente ocorre no também no dia 21/10/2018, porém está em um horário distinto do ocorrido das outras fases.

Para observar como se comportam as distorções totais de tensão e de corrente do circuito elétrico em questão, foi plotado um gráfico que mostrasse com clareza os períodos em que estas grandezas tiveram seu maior valor. Para melhor visualização, será mostrado um período de amostragem reduzido em relação ao total que foi medido, como segue a figura abaixo:

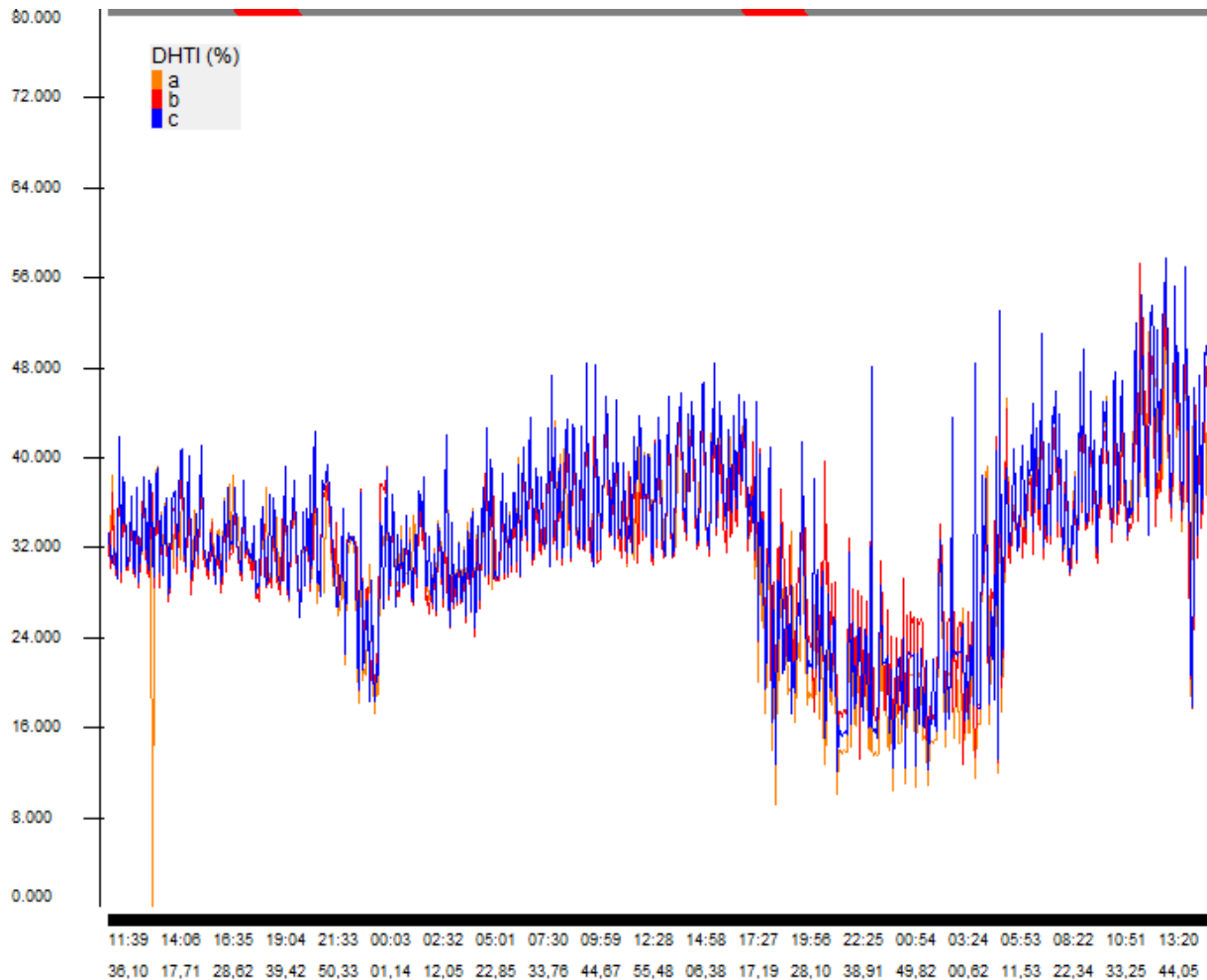
Figura 37 - Distorção total de tensão para as três fases.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

A figura 36 mostra como se comporta as distorções de tensão para as três fases ao longo do tempo do sistema elétrico analisado, em um período aproximado de dois dias.

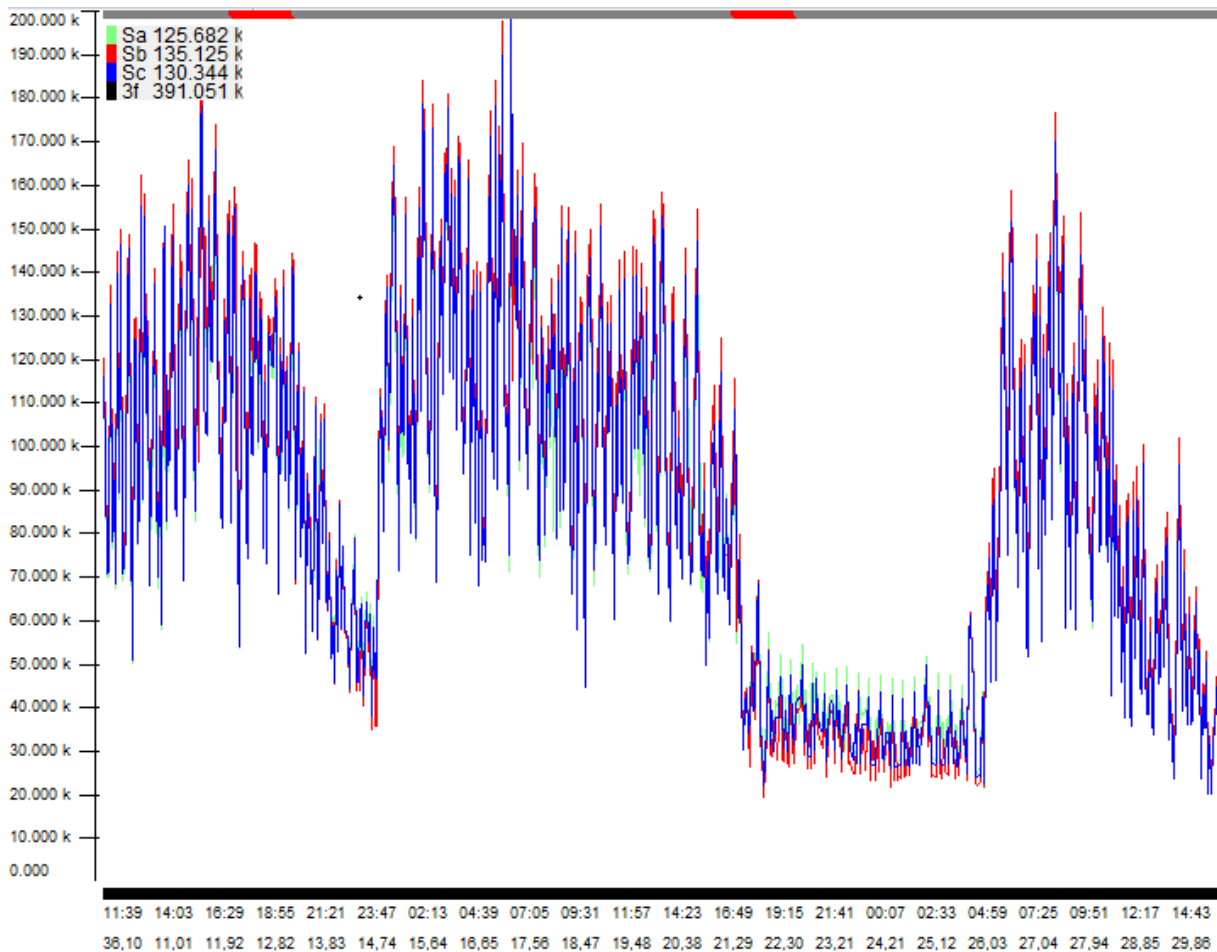
Figura 38 - Distorções totais de corrente para as três fases.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

A figura 37, de maneira análoga a figura 36, mostra o comportamento das distorções harmônicas totais de corrente das três fases no mesmo período de amostragem de sinal. Também foi obtido o gráfico referente a potência aparente demandada pela planta industrial, mostrando assim que seu comportamento é muito semelhante ao comportamento das curvas de distorção harmônica total de tensão, como pode ser observado a seguir:

Figura 39 - Potência aparente demandada pela planta industrial.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Como citado, observou-se que os gráficos referentes a demanda de potência aparente e da distorção harmônica total de tensão do sistema são bem semelhantes em seu comportamento no período em questão.

Para a visualização pontual de todas as grandezas referentes a uma fase do circuito, foi disponibilizado também um relatório completo, referente a todas as medições que foram realizadas ao longo dos cinco dias de medição (aproximadamente quatro milhões), mostrando detalhadamente a hora, a grandeza específica e o dia da medição em questão.

Tabela 21 - Relatório parcial das grandezas elétricas referentes a fase A.

Grandezas - fase A									
DATA	HORA	Ua	la	Pa	Qa	Sa	FPa	DHTua	DHTia
19/10/2018	11:39:36,00	271,60	424,80	108,222 k	39,993 k	115,376 k	0,938	5,00	33,17
19/10/2018	11:39:36,10	271,54	421,19	107,167 k	39,954 k	114,373 k	0,937	4,95	33,25
19/10/2018	11:39:36,20	271,39	448,80	114,374 k	41,890 k	121,804 k	0,939	5,20	32,84
19/10/2018	11:39:36,30	271,43	450,30	114,896 k	41,701 k	122,229 k	0,940	5,24	32,82
19/10/2018	11:39:36,40	271,50	426,60	108,761 k	39,835 k	115,826 k	0,939	5,01	33,07
19/10/2018	11:39:36,50	271,50	430,50	109,751 k	40,197 k	116,881 k	0,939	5,07	33,03
19/10/2018	11:39:36,60	271,51	430,50	109,759 k	40,200 k	116,889 k	0,939	5,03	32,89
19/10/2018	11:39:36,70	271,56	429,30	109,590 k	39,776 k	116,585 k	0,940	5,03	32,90
19/10/2018	11:39:36,80	271,58	429,89	109,634 k	40,154 k	116,756 k	0,939	5,03	32,84
19/10/2018	11:39:36,90	271,62	429,60	109,570 k	40,131 k	116,688 k	0,939	5,01	32,89
19/10/2018	11:39:37,00	271,75	431,69	110,158 k	40,346 k	117,314 k	0,939	5,04	33,07
19/10/2018	11:39:37,00	271,74	431,39	110,078 k	40,317 k	117,229 k	0,939	5,03	33,11
19/10/2018	11:39:37,10	271,75	428,39	109,320 k	40,039 k	116,422 k	0,939	5,00	33,10
19/10/2018	11:39:37,20	271,63	428,69	109,348 k	40,050 k	116,452 k	0,939	5,00	33,17
19/10/2018	11:39:37,30	271,64	432,30	110,388 k	40,065 k	117,434 k	0,940	5,01	32,93
19/10/2018	11:39:37,40	271,64	430,50	109,812 k	40,219 k	116,945 k	0,939	5,00	33,07
19/10/2018	11:39:37,50	271,69	429,00	109,449 k	40,087 k	116,559 k	0,939	5,00	33,14
19/10/2018	11:39:37,60	271,63	431,39	110,037 k	40,302 k	117,185 k	0,939	5,00	33,17
19/10/2018	11:39:37,70	271,67	432,30	110,279 k	40,391 k	117,443 k	0,939	4,99	33,10
19/10/2018	11:39:37,80	271,69	435,89	111,328 k	40,407 k	118,434 k	0,940	5,00	32,96
19/10/2018	11:39:37,90	271,76	435,30	111,085 k	40,686 k	118,301 k	0,939	5,00	33,07
19/10/2018	11:39:38,00	271,68	438,00	111,856 k	40,598 k	118,996 k	0,940	5,04	32,95
19/10/2018	11:39:38,10	271,66	435,60	111,117 k	40,697 k	118,335 k	0,939	5,07	33,10
19/10/2018	11:39:38,20	271,57	434,69	110,972 k	40,278 k	118,056 k	0,940	5,03	33,03
19/10/2018	11:39:38,30	271,66	436,19	111,388 k	40,428 k	118,498 k	0,940	5,04	32,85
19/10/2018	11:39:38,40	271,58	439,50	112,202 k	40,724 k	119,364 k	0,940	5,04	32,82
19/10/2018	11:39:38,50	271,63	440,10	112,376 k	40,787 k	119,549 k	0,940	5,04	32,82
19/10/2018	11:39:38,60	271,70	440,10	112,405 k	40,797 k	119,579 k	0,940	5,07	33,00
19/10/2018	11:39:38,70	271,75	442,19	112,958 k	40,898 k	120,168 k	0,940	5,07	33,03
19/10/2018	11:39:38,80	271,74	444,00	113,293 k	41,494 k	120,652 k	0,939	5,12	33,09
19/10/2018	11:39:38,90	271,70	444,89	113,631 k	41,242 k	120,884 k	0,940	5,09	32,78
19/10/2018	11:39:39,00	271,74	445,80	113,873 k	41,330 k	121,142 k	0,940	5,08	32,74
19/10/2018	11:39:39,10	271,75	447,60	114,215 k	41,832 k	121,635 k	0,939	5,09	32,72
19/10/2018	11:39:39,20	271,68	447,60	114,312 k	41,490 k	121,608 k	0,940	5,11	32,72

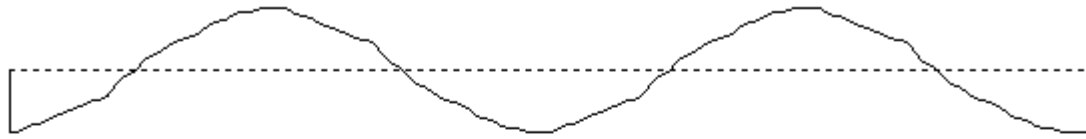
Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Lembrando que “DHTua” é a distorção harmônica total de tensão na fase A, “DHTia” é a distorção harmônica total da corrente na fase A, “FPa” é o fator de potência na fase A, “Sa, Qa, Pa” são as potências aparente, reativas e ativas, respectivamente e “Ua, la” são as tensões na fase A e corrente na fase A.

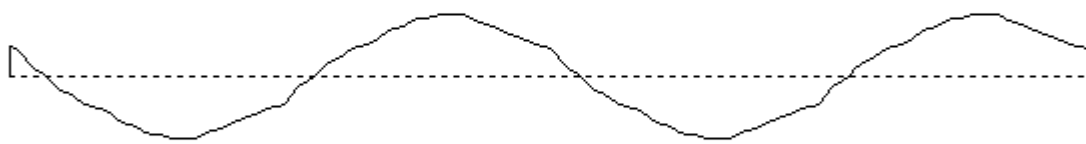
Por fim, o software também disponibilizou as características dos sinais referentes a corrente e a tensão do sistema elétrico em que estava inserido o analisador de sinal. Para mostrar tal função, será mostrado os sinais de tensão encontrados no dia 20/10/2018, para as três fases, podendo ser visível assim a distorção do sinal fundamental da senoide entregue pela concessionária.

Figura 40 - Formas de ondas distorcidas presentes no circuito elétrico analisado.

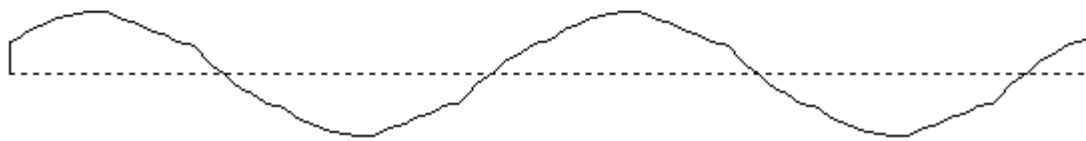
Sinal de Tensão - fase A / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Sinal de Tensão - fase B / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Sinal de Tensão - fase C / sábado 20/10/2018 08:22:36,00

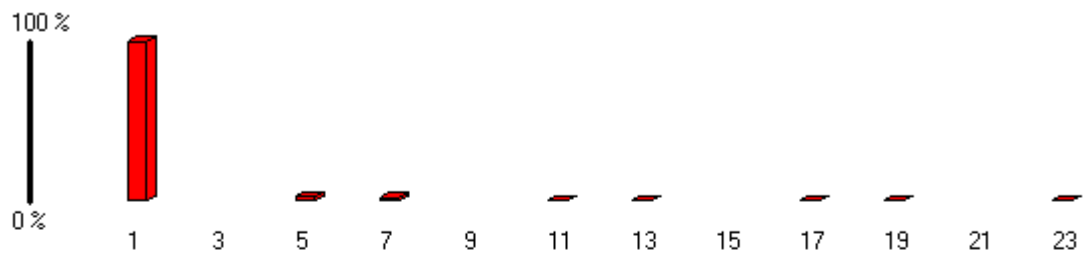


Fonte: (AUTOR; 2019)

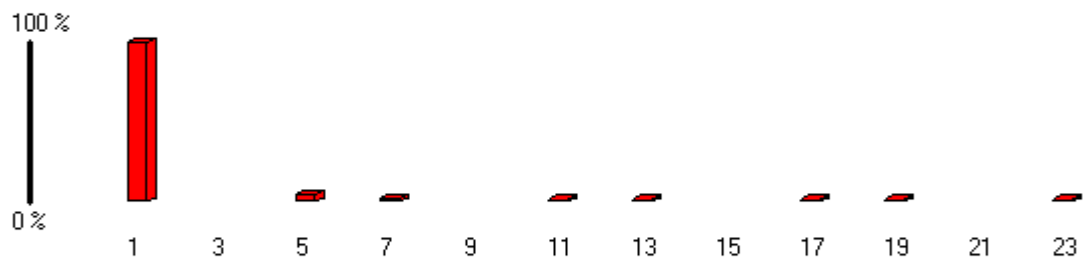
Na figura acima, foram retidos dois ciclos da forma de onda presente na instalação elétrica industrial. Pode-se observar uma pequena distorção quando comparada a uma onda senoidal pura, mostrando visualmente o valor de distorção encontrado nos relatórios mostrados anteriormente por fase. No caso desse intervalo (08:22:36), o espectro harmônico encontrado para as três fases eram de:

Figura 41 - Espectro harmônico encontrado para as formas de ondas obtidas na figura 39.

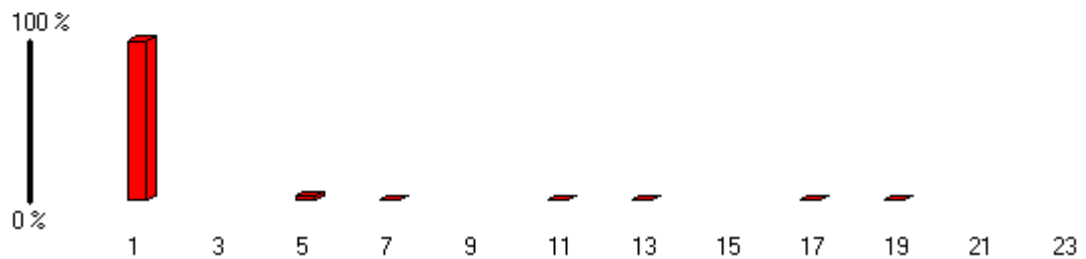
Harmônicas de Tensão - fase A / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Harmônicas de Tensão - fase B / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Harmônicas de Tensão - fase C / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Fonte: (AUTOR; 2019)

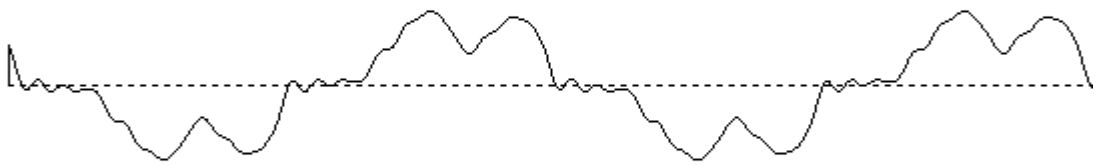
Com essas duas imagens, pode-se visualizar com clareza a relação do espectro harmônico de um sinal analisado com sua distorção real na rede. A mesma análise foi realizada para os sinais de corrente do sistema, obtendo as seguintes formas de ondas para as três fases do circuito:

Figura 42 - Formas de onda referente as correntes das três fases do sistema no dia 20/10/2018.

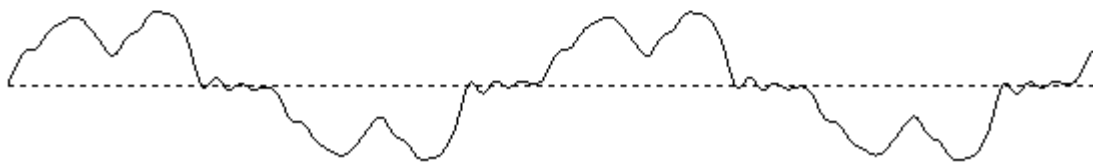
Sinal de Corrente - fase A / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Sinal de Corrente - fase B / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Sinal de Corrente - fase C / sábado 20/10/2018 08:22:36,00

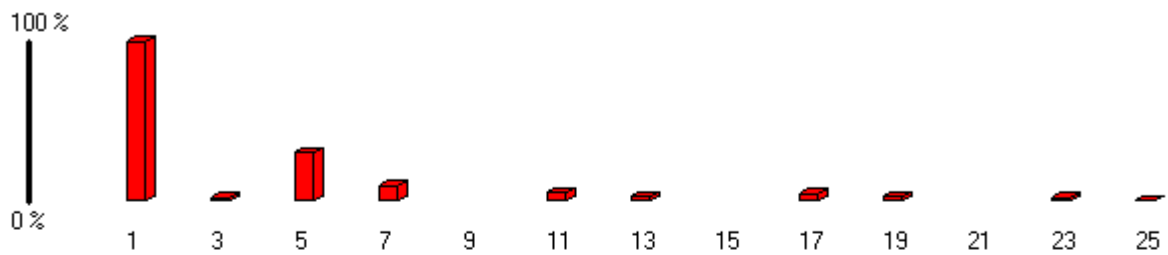


Fonte: (AUTOR; 2019)

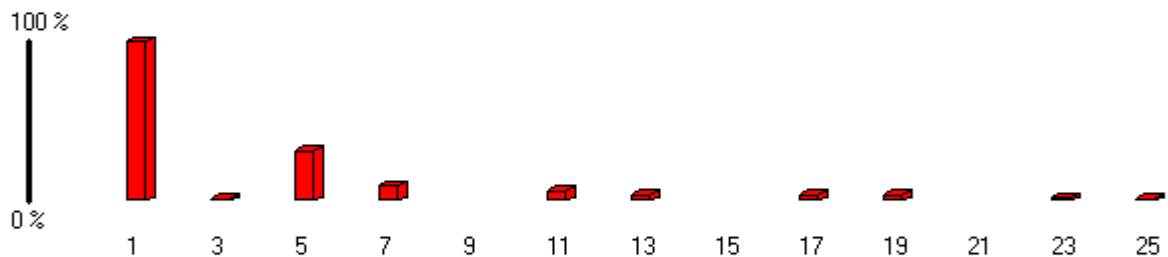
Nesse caso, pode-se observar que a distorção harmônica total de corrente apresenta um valor muito superior ao valor encontrado para os sinais de tensão do circuito elétrico. Para comprovar isso, foi verificado o espectro harmônico para o sinal das três correntes, obtendo a seguinte imagem:

Figura 43 - Espectro harmônico referente aos sinais obtidos de acordo com a figura 41.

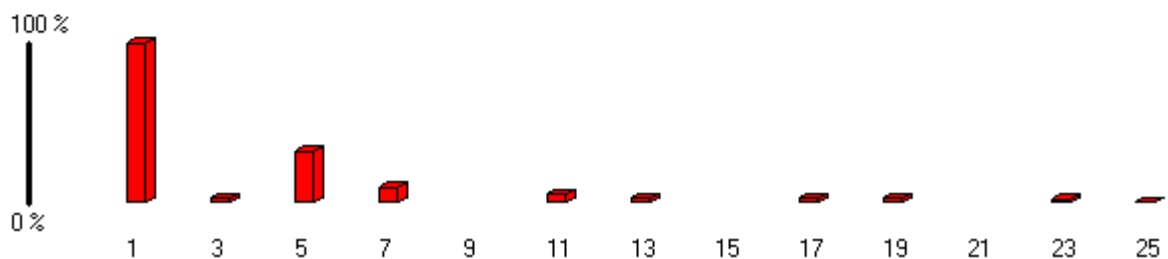
Harmônicas de Corrente - fase A / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Harmônicas de Corrente - fase B / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Harmônicas de Corrente - fase C / sábado 20/10/2018 08:22:36,00



Fonte: (AUTOR; 2019)

De acordo com o espectro harmônico acima fica comprovado que o sinal obtido na figura 41 apresenta uma distorção harmônica total muito maior para o sinal de corrente do que o sinal de tensão (figura 39).

O outro ponto crítico de coleta de dados foi o lado de baixa da subestação do PDVT, sistema independente do circuito principal, como mencionado anteriormente. Este sistema tem um trafo exclusivo e apresenta suas distorções divergindo das análises anteriores referente ao trafo principal.

Tabela 22 - Grandezas médias do trafo PDVT.

Máximos, médios e mínimos de tensões e correntes por fase.

Não considerados registros em queda e volta de energia. Tensão zero: 0.00 V

Fase A: tensões [V]

Média	261.78		
Mínimo	150.93	09:02:06,40	19/10/2018
Máximo	274.51	19:49:07,49	17/10/2018

Correntes [A]

Média	24.98		
Mínimo	-16.07	02:47:15,08	19/10/2018
Máximo	184.34	08:02:13,63	18/10/2018

Fase B: tensões [V]

Média	261.60		
Mínimo	146.50	09:02:06,40	19/10/2018
Máximo	275.63	19:42:46,69	17/10/2018

Correntes [A]

Média	25.31		
Mínimo	-17.53	02:47:15,08	19/10/2018
Máximo	175.63	04:05:59,91	18/10/2018

Fase C: tensões [V]

Média	262.40		
Mínimo	0.05	09:02:06,70	19/10/2018
Máximo	277.72	19:45:01,69	17/10/2018

Correntes [A]

Média	26.96		
Mínimo	-16.67	04:17:36,64	17/10/2018
Máximo	171.65	08:02:13,63	18/10/2018

	Fora de ponta				Ponta					
FASE	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP	kWh	kWh(g)	kVArh	kVAh	FP
A	297.046	0.000	117.575	319.469	0.930	76.494	0.000	29.747	82.074	0.932
B	284.444	0.000	86.487	297.302	0.957	75.707	0.000	27.153	80.429	0.941
C	318.692	0.000	96.361	332.942	0.957	86.744	0.000	26.599	90.731	0.956
Total	900.183	0.001	300.424	948.990	0.948	238.945	0.000	83.499	253.114	0.944

Potências médias, por fase e trifásicas, no intervalo

FASE	kW	kVAr	kVA	FP
A	5.591	2.205	6.011	0.930
B	5.391	1.701	5.653	0.954
C	6.069	1.841	6.342	0.957
Total	17.052	5.747	17.994	0.948

Potências aparentes por fase, segundo máximos e mínimos trifásicos

FASE	kVA(max)	Hbrário	kVA(min)	Hbrário
A	48.426	18/10/2018 08:03:25,73	0.000	19/10/2018 09:02:06,50
B	45.942	18/10/2018 08:03:25,73	0.000	19/10/2018 09:02:06,50
C	45.088	18/10/2018 08:03:25,73	0.000	19/10/2018 09:02:06,50
3f	139.438	18/10/2018 08:03:25,73	0.000	19/10/2018 09:02:06,50

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Observando os dados disponibilizados pelo software citados acima, foi possível observar que a Fase A do sistema sempre possuiu um menor fator de potência quando comparado as outras fases apresentadas.

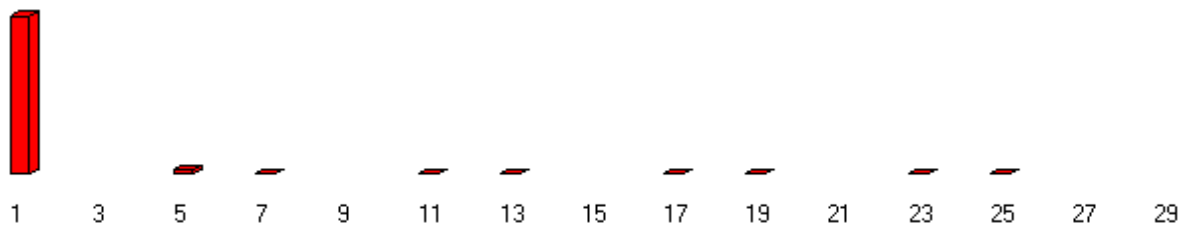
Para as distorções harmônicas de tensão, de maneira análoga ao trafo principal, foi observado apenas a presença de harmônicas ímpares não múltiplas de três, com valores significativos até a vigésima quinta ordem. Para melhor verificação dos resultados obtidos, são mostradas as tabelas pontuais de uma medição a seguir:

Tabela 23 - Harmônicas de tensão - Fase A – trafo PDVT

IMPAR	RMS(V)	%FUND	FASE
1	266.521	100.00	57.12
3			
5	5.076	1.90	305.72
7	3.039	1.14	319.57
9			
11	1.639	0.61	300.54
13	1.734	0.65	311.13
15			
17	1.814	0.68	240.60
19	1.336	0.50	225.00
21			
23	2.228	0.83	180.92
25	1.384	0.51	148.49
27			
29			

Fonte: (AUTOR, 2019).

Figura 44 - Espectro harmônico de tensão - Fase A – trafo PDVT



Fonte: (AUTOR, 2019).

Para obtenção desses dados, foram realizadas várias amostragens ao longo do período de medição. Nos casos que serão colocados a seguir, foi selecionado um valor pontual para que seja possível realizar a visualização do comportamento da qualidade do sinal ao longo dos dias.

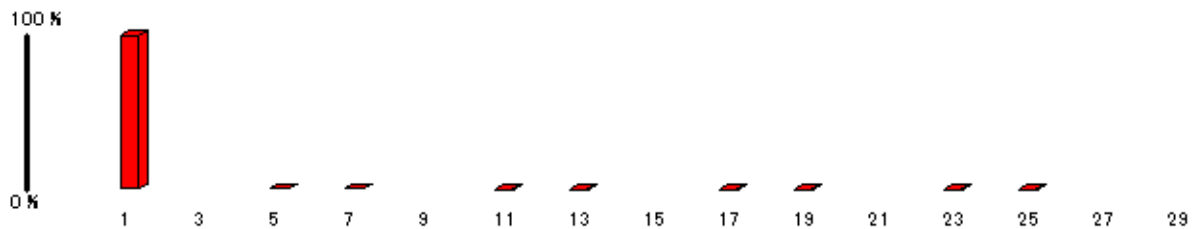
Para a fase B, os valores encontrados para o mesmo ponto foram:

Tabela 24 - Harmônicos de tensão - Fase B – trafo PDVT

IMPAR	RMS(V)	%FUND	FASE
1	266.910	100.00	29.26
3			
5	4.491	1.68	174.41
7	1.990	0.74	139.92
9			
11	1.353	0.50	87.09
13	1.608	0.60	44.38
15			
17	1.178	0.44	224.86
19	1.019	0.38	246.31
21			
23	1.242	0.46	18.06
25	1.226	0.45	41.66
27			
29			

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Figura 45 - Espectro harmônico de tensão - Fase B – trafo PDVT



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

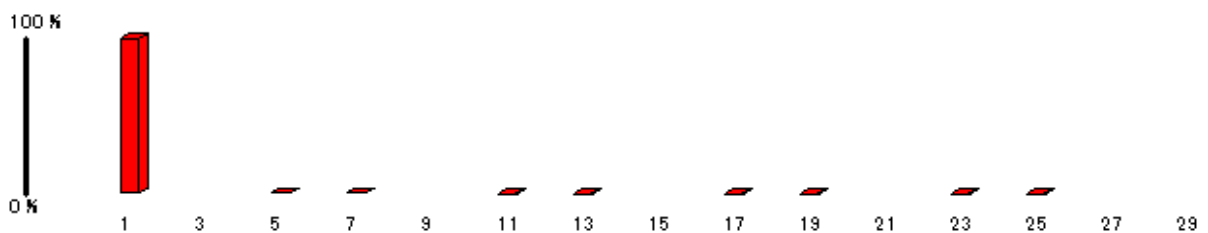
Por último, os dados de distorção harmônica de tensão, para o mesmo ponto selecionado para a fase A e fase B, encontrada para fase C foram:

Tabela 25 – Harmônicos de tensão – Fase C – trafo PDVT

IMPAR	RMS(V)	%FUND	FASE
1	267.162	100.00	268.72
3			
5	4.051	1.51	309.85
7	2.130	0.79	15.16
9			
11	1.089	0.40	211.11
13	1.633	0.61	264.94
15			
17	1.089	0.40	339.38
19	1.025	0.38	108.72
21			
23	1.057	0.39	137.10
25	1.249	0.46	265.38
27			
29			

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Figura 46 - Espectro harmônico de tensão - Fase C – trafo PDVT



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Vale lembrar que os valores de fase mostrados nas tabelas anteriores estão sempre em graus.

Após verificadas as distorções harmônicas de tensão, foi realizada a análise referente as distorções harmônicas de corrente para as três fases deste sistema da PDVT.

Para o caso das distorções harmônicas de corrente, foi observado que estas possuem apenas harmônicas ímpares, sendo as múltiplas de três com valores inferiores aos valores das outras harmônicas ímpares. Também, observou-se a

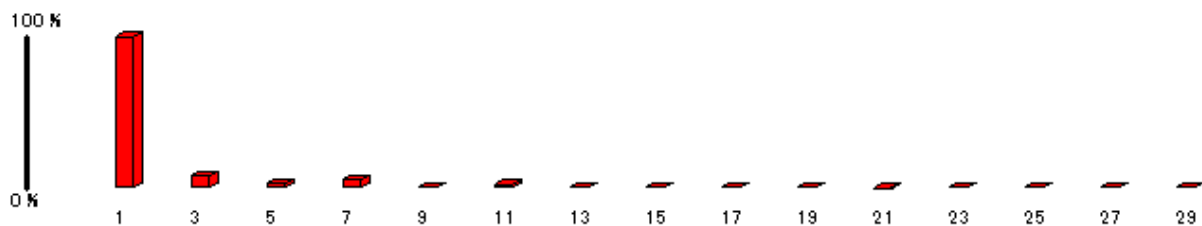
presença de harmônicas relevantes até a vigésima quinta ordem, como será mostrado pelas imagens e tabelas a seguir, referente à medição realizada no lado de baixa tensão de terminal alimentador da indústria (trafo principal):

Tabela 26 - Harmônicos de corrente - Fase A – trafo PDVT

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	13.492	100.00	339.38
3	1.199	8.88	274.13
5	0.557	4.12	5.93
7	0.861	6.38	359.82
9	0.252	1.86	81.69
11	0.371	2.75	205.22
13	0.247	1.83	168.79
15	0.171	1.26	340.26
17	0.195	1.44	186.32
19	0.223	1.65	54.36
21	0.076	0.56	258.35
23	0.228	1.69	115.04
25	0.095	0.70	323.70
27	0.138	1.02	194.76
29	0.204	1.51	36.03

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Figura 47 - Espectro harmônico de corrente - Fase A – trafo PDVT



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

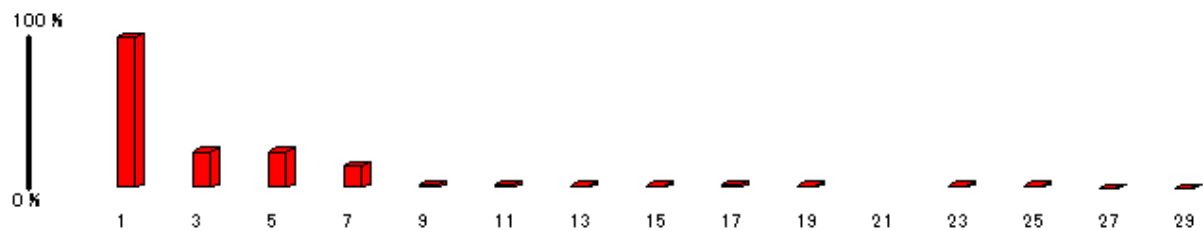
Para a fase B, foram encontrados os seguintes valores:

Tabela 27 – Harmônicos de corrente – Fase B – trafo PDVT

ÍMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	10.058	100.00	228.99
3	2.361	23.47	331.78
5	2.334	23.20	84.55
7	1.463	14.54	208.78
9	0.199	1.97	281.82
11	0.230	2.28	311.92
13	0.172	1.71	289.33
15	0.066	0.65	3.64
17	0.243	2.41	333.28
19	0.128	1.27	41.61
21			
23	0.066	0.65	105.55
25	0.075	0.74	215.46
27	0.062	0.61	202.76
29	0.062	0.61	235.23

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Figura 48 - Espectro harmônico de corrente - Fase B – trafo PDVT



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

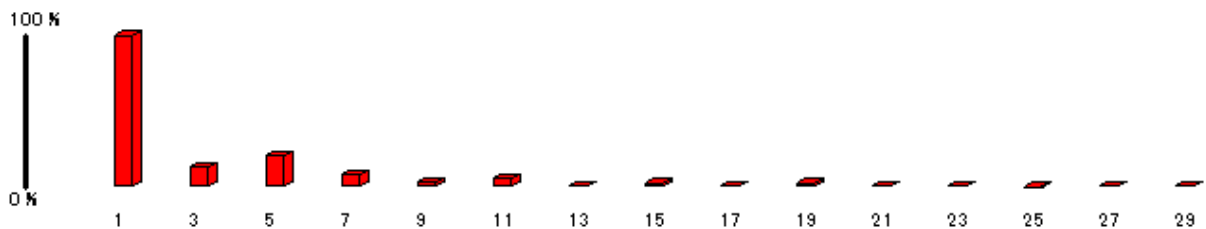
Para a fase C, obteve-se:

Tabela 28 - Harmônicos de corrente - Fase C.

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	13.066	100.00	113.90
3	1.844	14.11	154.81
5	2.803	21.45	222.23
7	1.194	9.14	38.58
9	0.427	3.26	209.61
11	0.772	5.90	72.59
13	0.244	1.86	19.33
15	0.283	2.16	201.75
17	0.209	1.60	68.20
19	0.301	2.30	250.35
21	0.113	0.86	87.75
23	0.244	1.86	301.20
25	0.052	0.40	92.41
27	0.192	1.46	15.29
29	0.122	0.93	210.54

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

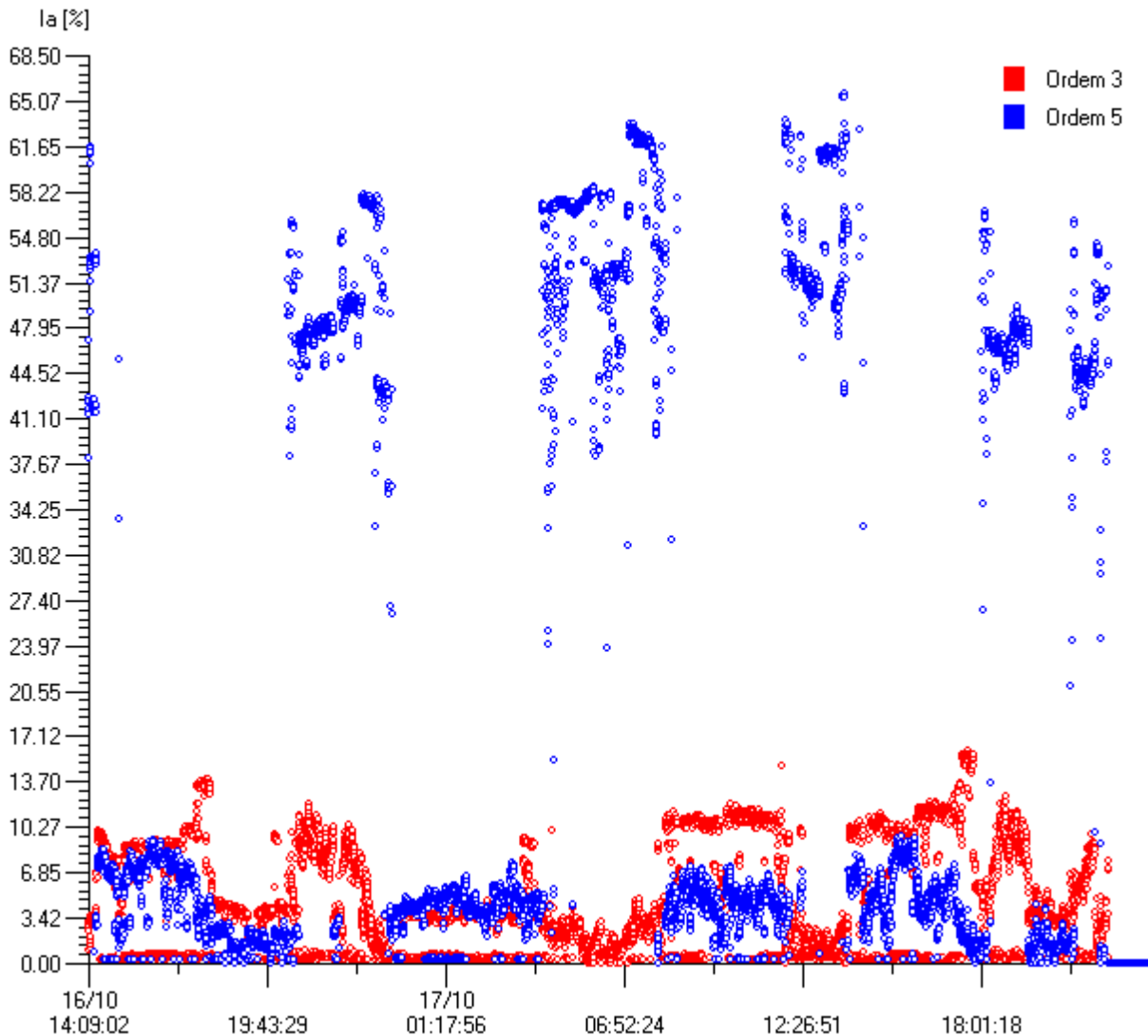
Figura 49 - Espectro harmônico de corrente - Fase C.



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

O software disponibilizado para realizar essa análise também apresentou gráficos pontuais dos valores de distorções por fase por meio de gráficos de pontos, de maneira extensa e completa, para assim poder disponibilizar os dados médios mais precisos possíveis ao longo do período de amostragem.

Figura 50 - Dados pontuais referentes à distorção harmônica - Fase A – trafo PDVT



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Na figura acima, pode-se observar uma infinidade de pontos medidos para as distorções de correntes causadas pela terceira e quinta harmônica na fase A do sistema elétrico em questão. Vale lembrar que o gráfico disponibilizado acima não é o gráfico completo do período total de amostragem, tendo em vista que este é muito extenso e não ficaria visível para sua colocação neste documento.

Para fins de verificação da qualidade do sinal e mais fácil entendimento do que se passa pela planta que está sendo analisada, foi adquirido também um relatório geral, do mesmo ponto de coleta dos relatórios anteriores, de como se comportaram os sinais para as três fases, referentes as distorções harmônicas de tensão e de corrente deste sistema principal.

Figura 51 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase A – trafo PDVT

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase A
Número total de registros 24042

Registro com maior DHT
Registro 19662 20:52:20,00 de 18/10/2018
DHT calculada: 3,82 %

Registro com menor DHT
Registro 24040 09:02:10,00 de 19/10/2018
DHT calculada: 0,00 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 10315 18:46:55,00 de 17/10/2018
Número de componentes harmônicas 22

Registro com menor no. de componentes
Registro 24040 09:02:10,00 de 19/10/2018
Número de componentes harmônicas 0

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 254021:10:53,00 de 16/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 49

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,00% e 3,82% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de 1,77%, não ultrapassando o limite de DTT_{95%} de 7,5%. Não foi utilizado o valor máximo de DTT_{95%} por se tratarem apenas de componentes ímpares não múltiplos de 3.

Figura 52 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase B – trafo PDVT

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96001396 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase B
Número total de registros 24042

Registro com maior DHT
Registro 8415 13:30:14,00 de 17/10/2018
DHT calculada: 4,32 %
Registro com menor DHT
Registro 24040 09:02:10,00 de 19/10/2018
DHT calculada: 0,00 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 10457 19:10:35,00 de 17/10/2018
Número de componentes harmônicas 23
Registro com menor no. de componentes
Registro 24040 09:02:10,00 de 19/10/2018
Número de componentes harmônicas 0

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 240520:48:23,00 de 16/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 49

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase B, de maneira análoga a fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,00% e 4,32% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de 1,79%, não ultrapassando o limite de DTT_{95%} de 7,5%. Assim como na fase A, não foi utilizado o valor máximo de DTT_{95%} por se tratarem apenas de componentes ímpares não múltiplos de 3. [UdW2]

Figura 53 - Relatório global de harmônicos de tensão - Fase C – trafo PDVT

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96001396 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Tensão - fase C
Número total de registros 24042

Registro com maior DHT
Registro 7847 11:55:34,00 de 17/10/2018
DHT calculada: 4,17 %
Registro com menor DHT
Registro 24040 09:02:10,00 de 19/10/2018
DHT calculada: 0,00 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 8109 12:39:14,00 de 17/10/2018
Número de componentes harmônicas 18
Registro com menor no. de componentes
Registro 24040 09:02:10,00 de 19/10/2018
Número de componentes harmônicas 0

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 2261 20:24:23,00 de 16/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 49

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase C, de maneira análoga as duas fases analisadas anteriormente, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,00% e 4,17% durante o período analisado. O valor médio durante este período foi de 1,85%, não ultrapassando o limite de DTT_{95%} de 7,5%. Assim como nas fases A e B, não foi utilizado o valor máximo de DTT_{95%} por se tratarem apenas de componentes ímpares não múltiplos de 3.

Por meio desses relatórios é possível concluir mais facilmente se é necessário ser aplicado algum tipo de técnica de mitigação de harmônicos ou se o sinal presente na instalação elétrica segue conformidade segundo as normas adotadas.

De acordo com os relatórios que foram obtidos, pode-se observar que a fase B apresenta a maior distorção harmônica total de tensão medida ao longo do período de amostragem (4,32%), no segundo dia de medições realizados (17/10/2018), mesma data de pico de distorção das outras fases do sistema.

Também é possível adquirir esse tipo de relatório para as distorções harmônicas de corrente, como é mostrado pelas imagens a seguir:

Figura 54 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase A – trafo PDVT

EMBRASUL RE6000/B/H N.S.:96001396 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase A
Número total de registros 24042

Registro com maior DHT
Registro 8518 13:47:24,00 de 17/10/2018
DHT calculada: 81,62 %
Registro com menor DHT
Registro 11472 22:01:01,00 de 17/10/2018
DHT calculada: 0,00 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 13 14:09:32,00 de 16/10/2018
Número de componentes harmônicas 50
Registro com menor no. de componentes
Registro 12783 01:45:38,00 de 18/10/2018
Número de componentes harmônicas 4

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 642507:58:34,00 de 17/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 50

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,00% e 81,62% durante o período analisado. Segundo o módulo 8 do PRODIST, não há especificado limites para distorção de corrente. Para realizar a avaliação destes valores, a norma IEEE Std 519 foi utilizada como base. Segundo ela, para tensões entre 120V e 69kV o limite para um $I_{sc}/I_L > 1000$ é de 20%, podendo ser inferior de acordo com as correntes nominais e de curto do sistema. O cenário estudado está acima dos valores toleráveis, segundo a norma IEEE.

Figura 55 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase B – trafo PDVT

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96001396 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase B
Número total de registros 24042

Registro com maior DHT
Registro 91 14:22:32,00 de 16/10/2018
DHT calculada: 96,77 %
Registro com menor DHT
Registro 11472 22:01:01,00 de 17/10/2018
DHT calculada: 0,00 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 3 14:07:52,00 de 16/10/2018
Número de componentes harmônicas 50
Registro com menor no. de componentes
Registro 12783 01:45:38,00 de 18/10/2018
Número de componentes harmônicas 4

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 932 16:42:42,00 de 16/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 50

Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase B, de maneira análoga a fase A, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,00% e 96,77% durante o período analisado, ultrapassando o limite segundo a norma IEEE Std 519 para o valor máximo.

Figura 56 - Relatório global de harmônicos de corrente - Fase C – trafo PDVT

EMBRASUL RE6000/B/H N.S:96001396 V.S.2,16 ANL 2,64 (100 milissegundos)

Relatório Global de harmônicas

Os valores de máximos e mínimos exibidos são os primeiros a serem localizados no arquivo.

Sinal considerado: Corrente - fase C
Número total de registros 24042

Registro com maior DHT
Registro 29 14:12:12,00 de 16/10/2018
DHT calculada: 84,88 %
Registro com menor DHT
Registro 11472 22:01:01,00 de 17/10/2018
DHT calculada: 0,00 %

Registro com maior no. de componentes
Registro 1 14:07:32,00 de 16/10/2018
Número de componentes harmônicas 50
Registro com menor no. de componentes
Registro 11650 22:30:41,00 de 17/10/2018
Número de componentes harmônicas 3

Registro com harmônica de mais alta ordem
Registro 974317:11:34,00 de 17/10/2018
Harmônica de mais alta ordem 50

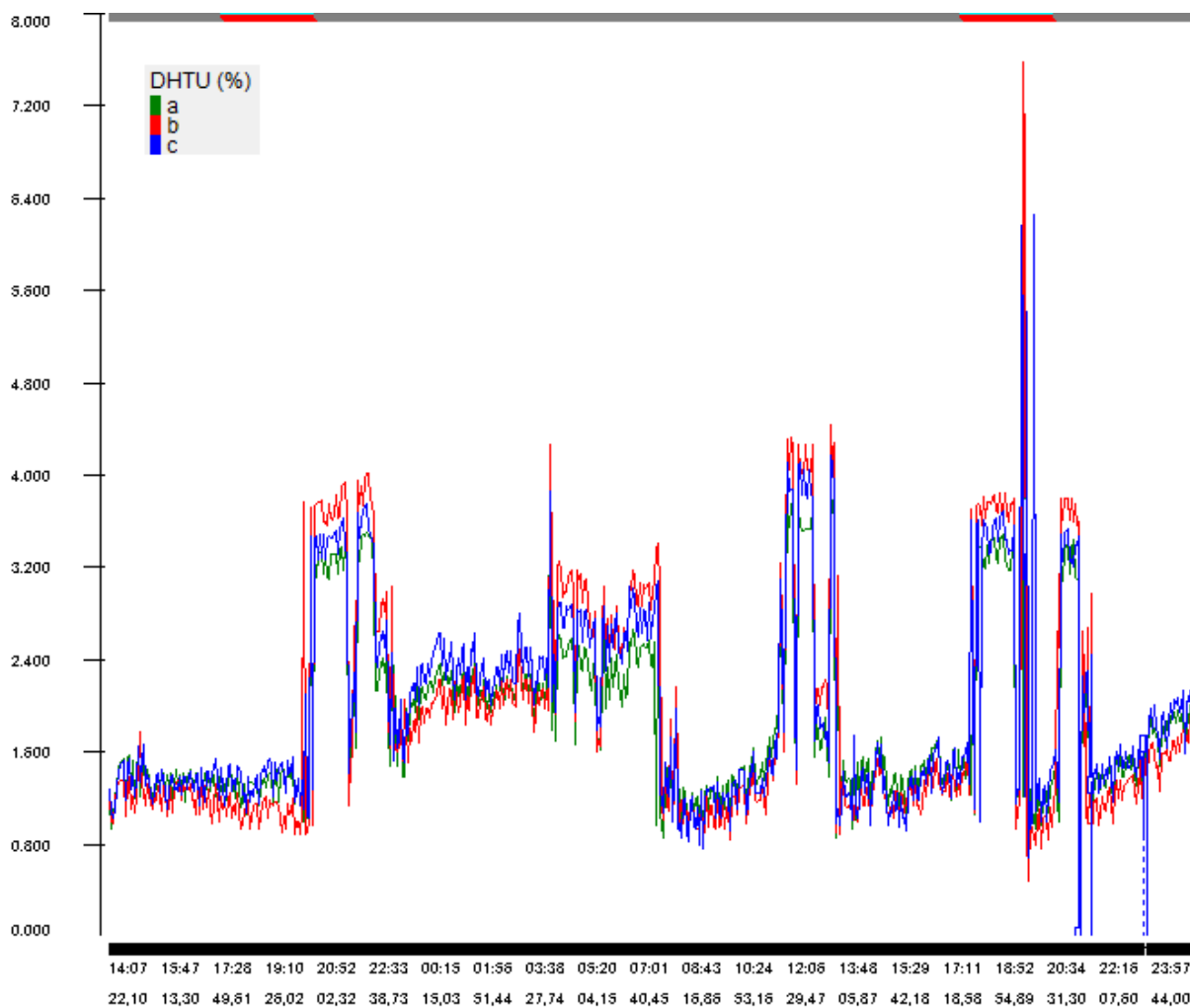
Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Nos valores obtidos na fase C, de maneira análoga as duas fases analisadas anteriormente, pode-se observar que os registros extremos de DHT foram de 0,00% e 84,88% durante o período analisado. Como nas fases A e B, ultrapassou o limite estipulado pela norma IEEE Std 519.

Com esses dados, pode-se observar que a distorção de corrente total nas fases B e C apresentam o seu valor máximo no dia 16/10/2018, em horários próximos: apenas 10 minutos de diferença. Para a fase A, o máximo valor da distorção harmônica total de corrente ocorre no dia 17/10/2018.

Para observar como se comportam as distorções totais de tensão e de corrente do circuito elétrico em questão, foi plotado um gráfico que mostrasse com clareza os períodos em que estas grandezas tiveram seu maior valor. Para melhor visualização, será mostrado um período de amostragem reduzido em relação ao total que foi medido, como segue a figura a seguir:

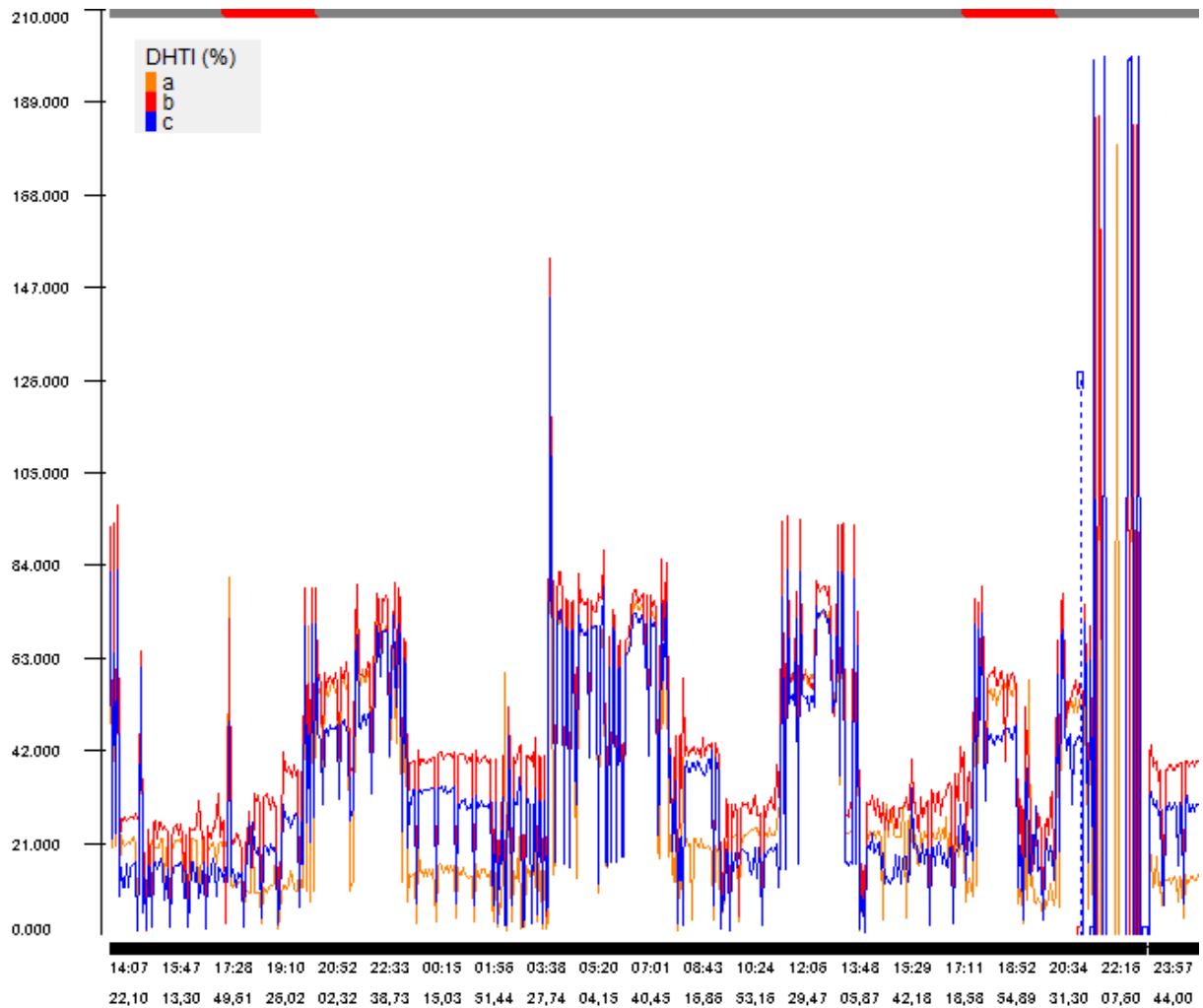
Figura 57 - Distorção total de tensão para as três fases referente ao trafo PDVT



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

A figura 56 mostra como se comporta as distorções de tensão para as três fases ao longo do tempo do sistema elétrico analisado, em um período aproximado de dois dias.

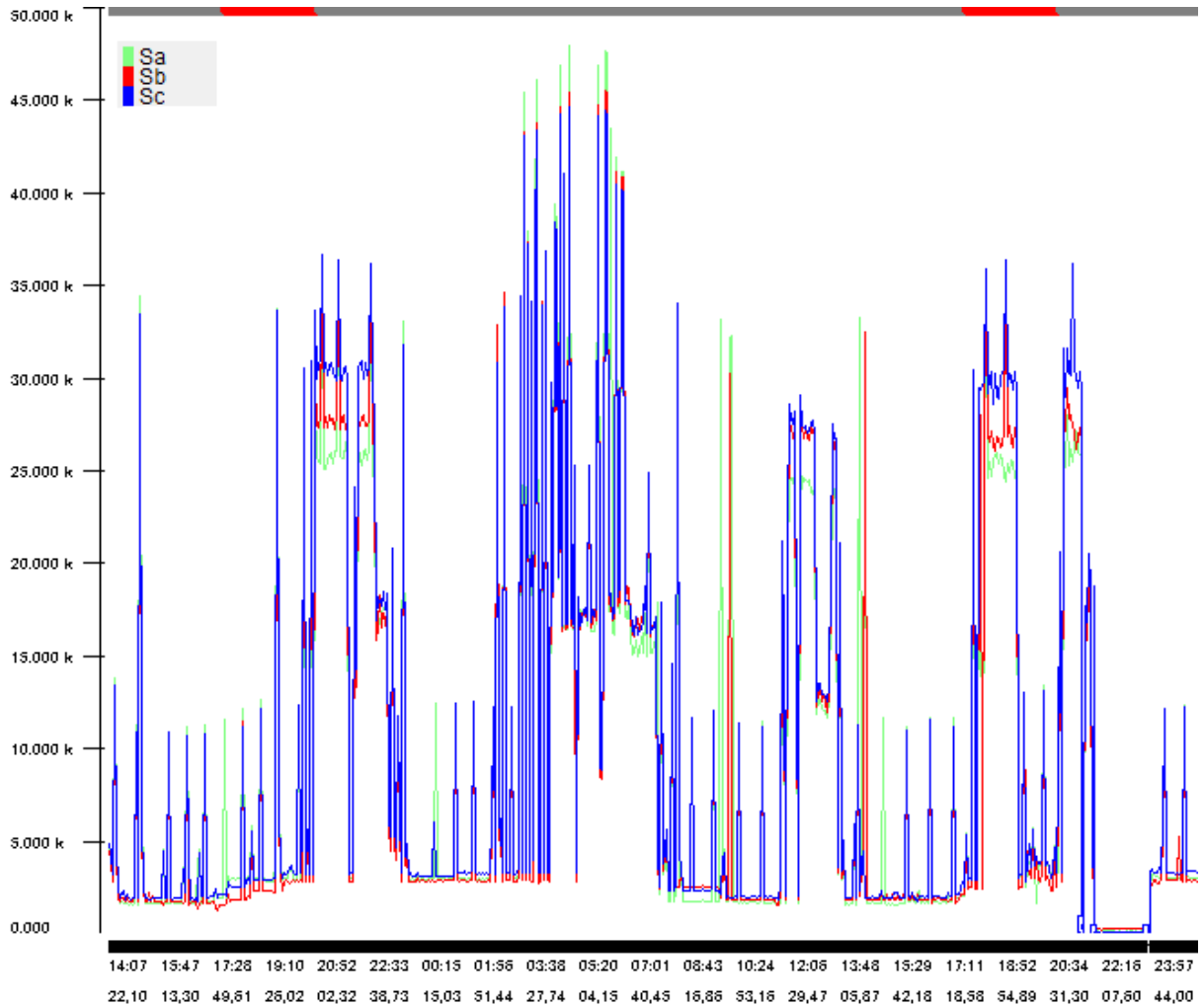
Figura 58 - Distorções totais de corrente para as três fases referente ao trafo PDVT



Fonte: (EMBRASUL, 2018).

A figura 57, de maneira análoga a figura 56, mostra o comportamento das distorções harmônicas totais de corrente das três fases no mesmo período de amostragem de sinal. Também foi obtido o gráfico referente a potência aparente demandada pela planta industrial, mostrando assim que seu comportamento é muito semelhante ao comportamento das curvas de distorção harmônica total de tensão, como pode ser observado a seguir:

Figura 59 - Potência aparente demandada pela planta industrial.



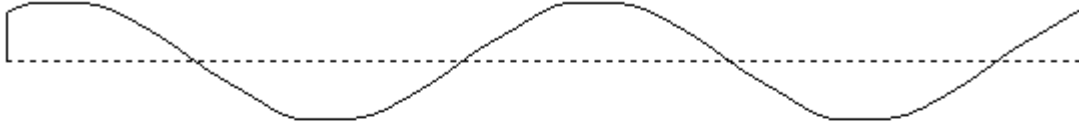
Fonte: (EMBRASUL, 2018).

Como citado, observou-se também que os gráficos referentes a demanda de potência aparente e da distorção harmônica total de tensão do sistema são bem semelhantes em seu comportamento no período em questão.

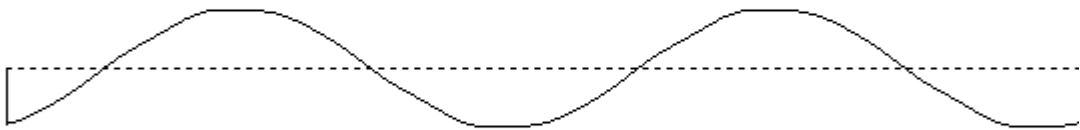
Por fim, o software também disponibilizou as características dos sinais referentes a corrente e a tensão do sistema elétrico em que estava inserido o analisador de sinal. Para mostrar tal função, será mostrado os sinais de tensão encontrados no dia 17/10/2018, para as três fases, podendo ser visível assim a distorção do sinal fundamental da senoide entregue pela concessionária.

Figura 60 - Formas de ondas distorcidas presentes no circuito elétrico analisado

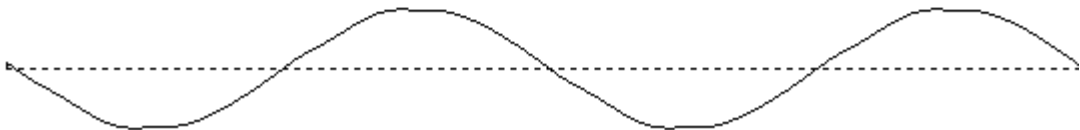
Sinal de Tensão - fase A / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Sinal de Tensão - fase B / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Sinal de Tensão - fase C / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Fonte: (AUTOR; 2019)

Na figura acima, foram retidos dois ciclos da forma de onda presente na instalação elétrica industrial. Pode-se observar uma pequena distorção quando comparada a uma onda senoidal pura, mostrando visualmente o valor de distorção encontrado nos relatórios mostrados anteriormente por fase. No caso desse intervalo (04:00:53), o espectro harmônico encontrado para as três fases eram de:

Figura 61 - Espectro harmônico para as formas de ondas obtidas na figura 59

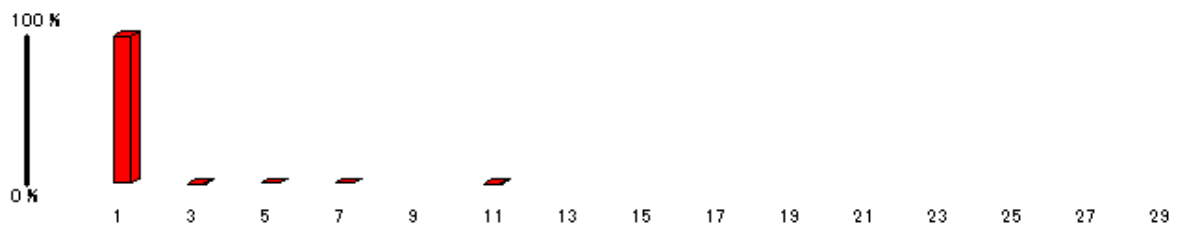
Harmônicas de Tensão - fase A / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Harmônicas de Tensão - fase B / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Harmônicas de Tensão - fase C / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Fonte: (AUTOR; 2019)

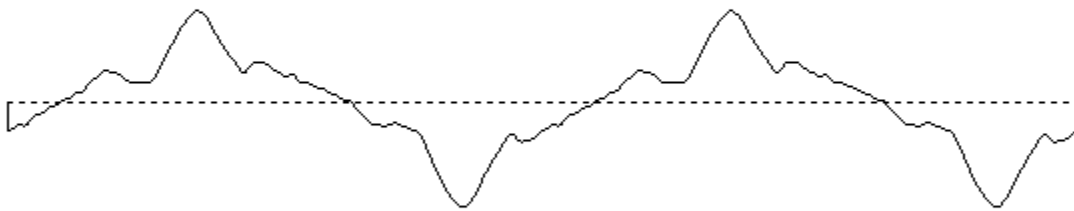
Com essas duas imagens, pode-se visualizar com clareza a relação do espectro harmônico de um sinal analisado com sua distorção real na rede, que no caso apresentou menos distorção que na situação mostrada para o transformador principal. A mesma análise foi realizada para os sinais de corrente do sistema, obtendo as seguintes formas de ondas para as três fases do circuito:

Figura 62 - Formas de onda das correntes das três fases do sistema PDVT - dia 17/10/2018

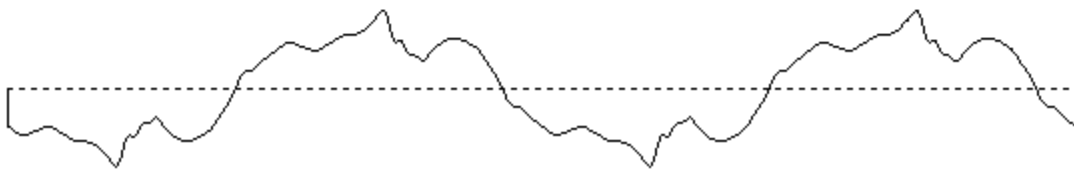
Sinal de Corrente - fase A / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Sinal de Corrente - fase B / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Sinal de Corrente - fase C / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00

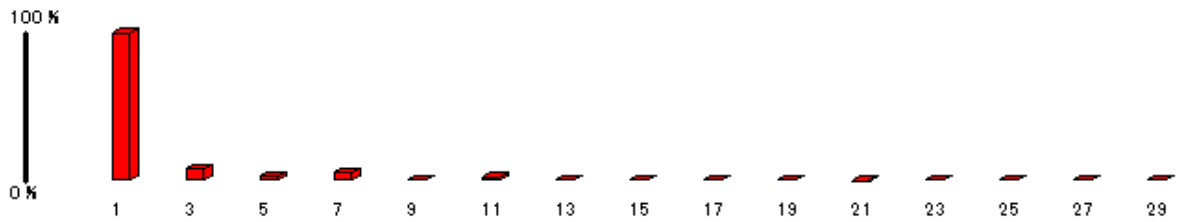


Fonte: (AUTOR; 2019)

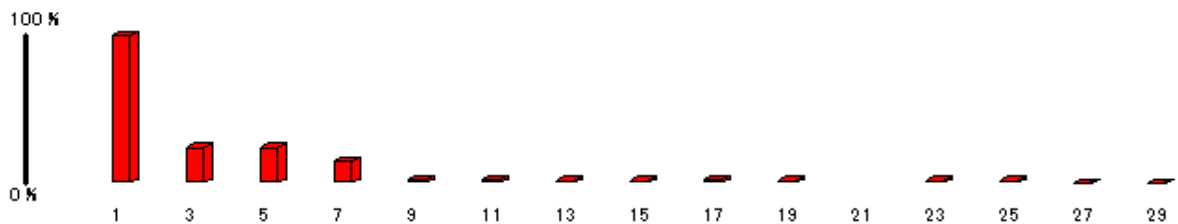
Nesse caso, pode-se observar que a distorção harmônica total de corrente apresenta um valor muito superior ao valor encontrado para os sinais de tensão do circuito elétrico. Para comprovar isso, foi verificado o espectro harmônico para o sinal das três correntes, obtendo a seguinte imagem:

Figura 63 - Espectro harmônico dos sinais obtidos de acordo com a figura 61

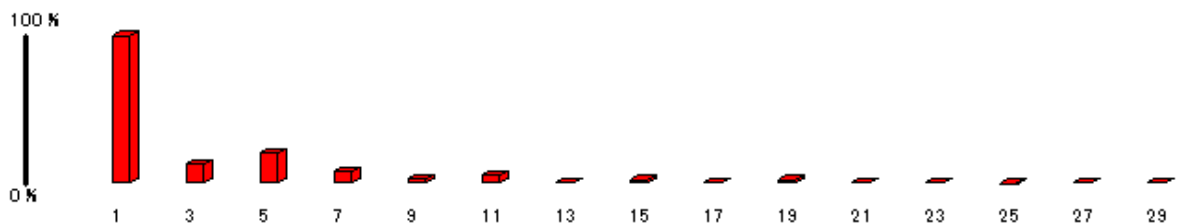
Harmônicas de Corrente - fase A / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Harmônicas de Corrente - fase B / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Harmônicas de Corrente - fase C / quarta-feira 17/10/2018 04:00:53,00



Fonte: (AUTOR; 2019)

De acordo com o espectro harmônico acima fica comprovado que o sinal obtido na figura 62 apresenta uma distorção harmônica total muito maior para o sinal de corrente do que o sinal de tensão (figura 60).

Foi selecionado esse ponto em específico pois este nos permite perceber que ocorre uma influência de diferentes intensidades das principais ordens harmônicas nas fases, tornando seu sinal diferente uma da outra, fato que não ocorreu na análise do trafo principal, onde os três sinais sempre se comportavam de maneira semelhante. Pode-se observar, também, que nesse ponto há a existência de harmônicas de terceira ordem, fato que não estava presente no caso anterior.

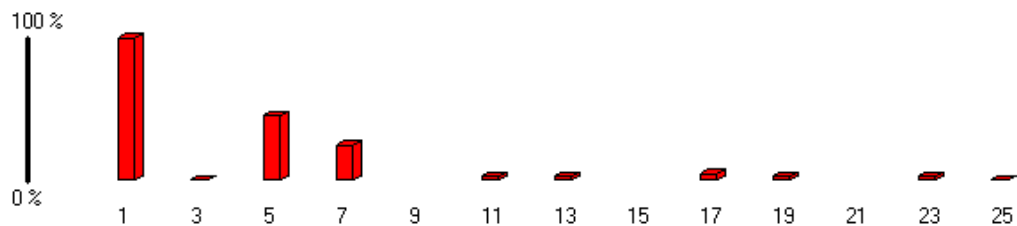
Tal fato se deve, principalmente, as diferentes características de cargas que são conectadas no trafo principal e no trafo PDVT da indústria em questão, sendo perceptível, principalmente, pelo espectro harmônico dos sinais analisados.

4.2 RESPOSTA ESPERADA DO SISTEMA APÓS A IMPLEMENTAÇÃO DO PROJETO DE FILTRO HARMÔNICO PASSIVO DO TIPO SHUNT.

De acordo com os valores obtidos na seção anterior, foi possível verificar que a quinta ordem harmônica é a mais impactante nas distorções harmônicas causadas no sistema, fato devido a característica das cargas presentes no mesmo. Com a eliminação integral dessa componente, o sistema deve apresentar uma significativa melhora, principalmente na distorção harmônica total de corrente, que apresenta valores significativos em ambos os terminais analisados.

Pegando um exemplo pontual, onde a distorção harmônica total de corrente apresentou o seu maior valor no terminal principal do circuito em análise na fase A (registro 9724), o espectro harmônico sem a implementação do filtro apresentou o seguinte comportamento:

Figura 64 - Harmônicas de corrente - Fase A – Terminal principal (dia 28/10/2018 às 13:41:26).



Registro: 9724
RMS: 177,900 (A)
Componentes: 12
DHT: 53,504 %
Fundamental: 60,00 Hz

A fase é exibida em graus

ÍMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	156,859	100,00	99,14
3	1,295	0,82	122,60
5	72,673	46,33	273,25
7	39,143	24,95	97,38
9			
11	6,476	4,12	244,29
13	6,620	4,22	327,17
15			
17	6,907	4,40	102,52
19	6,188	3,94	150,60
21			
23	6,764	4,31	233,78
25	2,015	1,28	296,36

Fonte: (AUTOR; 2019)

Pode-se observar que a quinta ordem harmônica apresenta um valor de DHI (distorção harmônica individual) de 46,33 %, valor próximo dos 53,504 % que é a distorção total do sistema. Com isso, pode-se inferir que com sua total remoção do sistema, o valor da distorção harmônica total irá sofrer um grande decréscimo.

Para calcular o valor de distorção harmônica total de corrente corrigida foi levado em conta apenas os valores mais expressivos de distorções harmônicas (no caso, até a 25ª ordem), utilizando a seguinte equação:

$$DHTi\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_{h_{RMS}}^2}}{I_{1_{RMS}}} \cdot 100 \quad (4.1)$$

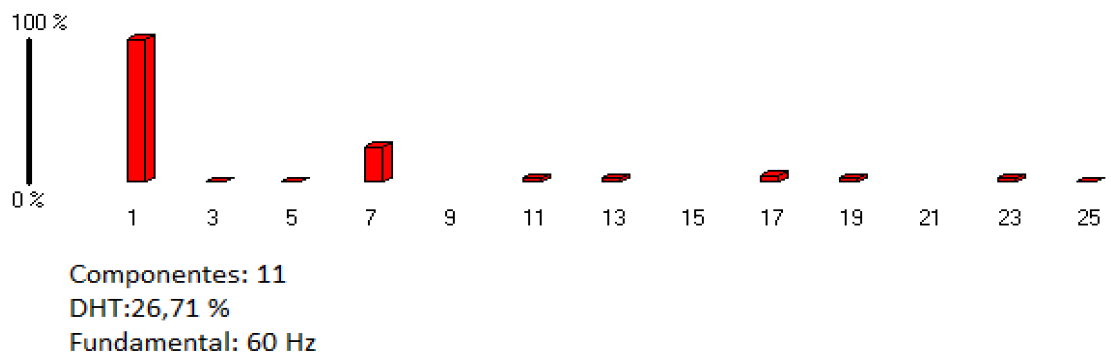
Sabendo que o valor da corrente de quinta harmônica agora é zero, tem-se que:

$$DHTi\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{25}} (1,295^2 + 0^2 + \dots + 2,015^2)}}{156,85} \cdot 100$$

$$DHTi\% = \frac{41,897}{156,85} \cdot 100 = 26,71 \%$$

Com esse valor corrigido de distorção harmônica total do sistema, a instalação passaria a entrar no rigor da norma internacional IEEE STD 519, que limita o máximo de distorções harmônicas de corrente para baixa tensão. O novo espectro harmônico do sinal apresentaria um comportamento de acordo com a figura a seguir:

Figura 65 - Espectro harmônico corrigido - Corrente Fase A.

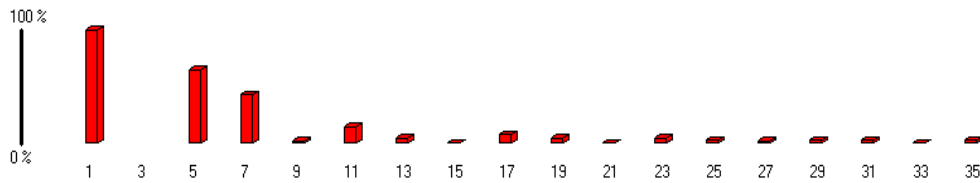


Fonte: (AUTOR; 2019)

Os valores mais detalhados de corrente RMS, de intensidade de correntes e máxima ordem harmônica observados devem ser obtidos através de uma simulação mais detalhada do circuito. O resultado acima apresenta apenas uma projeção da resposta do sistema após a ideal implementação do filtro harmônico no sistema.

O terminal do transformador PDVT apresentou um valor de distorção harmônica total de corrente na fase A superior ao valor do terminal principal da instalação (registro 8518), como pode ser observado na figura a seguir:

Figura 66 - Harmônicas de corrente - Fase A – Terminal PDVT (dia 16/10/2018 às 14:07:32).



Registro: 8518
 RMS: 39,840 (A)
 Componentes: 37
 DHT: 81,622 %
 Fundamental: 59,94 Hz

A fase é exibida em graus

IMPAR	RMS(A)	%FUND	FASE
1	30,864	100,00	0,48
3			
5	20,243	65,58	142,64
7	13,489	43,70	127,96
9	0,613	1,98	279,66
11	4,732	15,33	264,24
13	1,555	5,03	198,28
15	0,357	1,15	318,25
17	2,564	8,30	272,50
19	1,374	4,45	234,36
21	0,533	1,72	354,77
23	1,379	4,46	291,09
25	1,132	3,66	242,35
27	0,618	2,00	350,20
29	1,151	3,72	312,31
31	1,118	3,62	225,17
33	0,499	1,61	322,73
35	1,179	3,82	256,37

Fonte: (AUTOR; 2019)

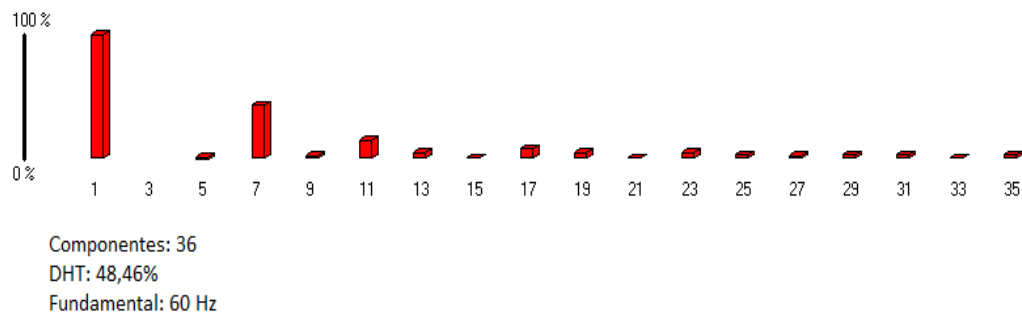
De acordo com a imagem acima, pode-se observar que a quinta ordem harmônica tem o valor mais expressivo de distorção harmônica individual, com 65,58 % enquanto a distorção harmônica total se manteve em 81,662 %. Para realizar o cálculo dessa distorção corrigida, foi utilizada novamente a equação 4.1 com os valores até a 35ª ordem harmônica, obtendo o seguinte resultado:

$$DHTi\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=25} (0^2 + 13,489^2 + 0,613^2 + \dots + 1,179^2)}}{30,864} \cdot 100$$

$$DHTi\% = \frac{14,959}{30,864} \cdot 100 = 48,46 \%$$

O espectro harmônico corrigido esperado para essa parte da instalação pode ser representado por:

Figura 67 - Espectro harmônico corrigido para o transformador PDVT.



Fonte: (AUTOR; 2019)

O valor obtido com a correção da distorção harmônica apresentou um valor muito abaixo do valor anterior, porém este ainda apresenta um valor elevado. Para corrigir completamente o problema, poderá ser implementado, juntamente ao filtro de quinta ordem, um filtro para anular a sétima ordem harmônica presente no circuito, que tem um impacto grande no valor final da distorção harmônica total de corrente.

Caso os filtros projetados sejam implementados de forma correta, além de realizar a correção do fator de potência de ambas as instalações para 0,95 indutivo, irão também reduzir quase que pela metade a incidência de harmônicas de corrente, que são as mais expressivas na planta.

As distorções harmônicas de tensão também sofrerão um decréscimo, ajudando assim a melhorar a QEE da instalação e evitando possíveis problemas futuros junto a concessionária que fornece energia a planta industrial.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma avaliação da situação atual em relação às distorções harmônicas de corrente e tensão de um grande consumidor industrial. Foram levantadas as características das tensões e correntes das saídas das subestações e dos inversores dos motores de indução, individualmente.

Analizou-se a qualidade de energia elétrica a partir destes pontos, comparando os valores individuais e totais de distorções presentes no sistema. Foram indicados os principais responsáveis por esta distorção do circuito, as cargas não lineares presentes na operação do terminal.

O terminal está a mais de 40 anos instalada no local e não havia apresentado nenhum problema de harmônicos na sua planta, porém nos últimos anos, com o acréscimo de inversores e sistemas de automação, fez-se necessário um estudo de demanda e distorções para avaliação do atual estado do sistema elétrico do terminal.

A partir desta análise fez-se possível identificar os principais agentes na criação de distorções e anomalias nos sinais da rede interna da indústria, impulsionando medidas de correção nestes elementos e corroborando com ações e programas de manutenção preventiva.

A distorção de tensão nos pontos analisados está convergente com os valores indicados como aceitáveis pelo módulo 8 do PRODIST, que limita em 10% a distorção para tensões abaixo de 1kV.

Para as distorções de corrente, observa-se uma predominância dos harmônicos de 5ª ordem devido à presença praticamente absoluta de inversores na composição de cargas do sistema. Essas distorções têm maior intensidade no sistema PDVT, com mais de 200% em alguns pontos, e também com valores significativos no sistema principal.

Para corrigir estas distorções, a instalação de filtros e a manutenção dos reatores dos inversores se faz necessário. Como há a predominância de harmônicos de 5ª ordem em todos os sistemas analisados, outra solução proposta para coibir as distorções é a inserção de um filtro shunt específico para esta frequência. Esta opção de filtro shunt deve ser adicionado junto de um filtro capacitivo para correção do fator de potência das cargas da indústria, que ainda não é presente na instalação devido ao fato de quase que todas as cargas presentes apresentam alto fator de potência ou correção própria, como é o caso dos motores comandados por inversores.

O dimensionamento dos indutores determinou a viabilidade de confecção destes para os valores específicos desta planta industrial. Os valores de indutância, apesar de elevados em decorrência do baixo valor do banco de capacitores necessário, entram em conformidade com as dimensões físicas (25cm de largura, 25cm de altura e 10cm de profundidade) e características elétricas do núcleo ferromagnético (B_{MAX} de 1,5T) determinadas para os dois sistemas, conforme tabela abaixo.

Tabela 29 - Características físicas dos indutores propostos

Características dos indutores (núcleo ferromagnético)		
Sistema	Principal	PDVT
Indutância (L)	3,613 mH	37,844 mH
Número de Espiras	42	107
Comprimento do gap	5,91mm	3,52mm
Secção transversal do condutor	70mm ²	10mm ²

Fonte: (AUTOR, 2019)

Com a instalação deste filtro e supondo seu funcionamento ideal a previsão de DTT% é de queda do valor inicial de 50,07% no sistema principal e de 40,62% no sistema PDVT. Estes pontos são referentes aos maiores valores obtidos na análise de corrente da fase A. Essa queda, apesar de expressiva, ainda mantém ambos os sistemas acima dos limites legais previstos pela IEEE std 519, deixando a possibilidade de um estudo aprofundado sobre a instalação de filtros compostos para mitigar outras ordens de distorção harmônica.

Este estudo, apesar de apresentar índices de distorção dentro dos limites legais, faz-se necessário para diagnosticar e fomentar a criação de um programa de melhoria constante no terminal. A partir de programas como este, é possível a criação de medidas para mitigar as distorções hoje presentes e evitar a aquisição de produtos e equipamentos que acrescentam futuramente ruídos na rede.

Caso ocorra a necessidade de realizar a inserção de filtros harmônicos do tipo *shunt* juntamente a bancos de capacitores para realizar a correção do fator de potência da planta em questão, deverá ser realizado um trabalho mais detalhado referente ao comportamento desta quando estiver em operação a plena carga.

Como foi citado em tópicos anteriores, há a possibilidade de ocorrer problemas que somente foram citados nesse trabalho, como a ressonância entre o filtro harmônico e o sistema. Tal fenômeno pode causar problemas graves a instalação,

como a amplificação da incidência de uma certa ordem harmônica, podendo causar o comprometimento dos componentes elétricos e prejuízos operacionais.

É possível realizar simulações por meio de softwares específicos (como o HarmZs, por exemplo) de como a instalação elétrica irá reagir com a inserção desses componentes, permitindo assim concluir se será viável ou não realizar a execução de tal projeto, bem como propor soluções para possíveis problemas que possam ser encontrados.

Além disso, também poderá ser realizado um estudo mais aprofundado de quais características físicas e elétricas deverão apresentar os componentes presentes no filtro harmônico passivo do tipo *shunt* selecionado. Nesse trabalho foi dada apenas uma ideia das dimensões físicas do indutor a ser utilizado para a confecção desse tipo de filtro, de maneira simples e robusta.

Para a sua devida aplicação, deverá ser caracterizado de maneira mais concreta e detalhada os componentes a serem utilizados nesse filtro e suas características mínimas necessárias para que seja possível ser realizada sua utilização, conforme normas já existentes, como por exemplo a norma internacional IEEE Std 1531, que prevê as especificações para a aplicação de filtros harmônicos.

REFERÊNCIAS

- AREDES, M., WATANABE, E. H., **Power Quality Considerations on Shunt/Series Current And Voltage Conditioners**. 10th IEEE International Conference on Harmonics and Quality of Power, Vol. 2, pp. 595 - 600, 2002.
- CARVALHO, A. C. de C. **Diagnóstico do consumo e da qualidade de energia numa indústria metalúrgica**. Trabalho de Conclusão de Curso de Pós-Graduação, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, 2004.
- DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; BEATY, W. H. **Electrical Power Systems Quality**. 2. ed. McGraw-Hill, 2002.
- GALHARDO, M. A. B; PINHO, J. T. **Conceitos de distorções e não-linearidade**. Seminário Brasileiros sobre Qualidade da Energia Elétrica, Artigo Universitário, Aracaju, SE, 2003.
- IEEE Std. 519-1992, **IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**, 1992.
- SADIKU, M. N. O; Alexander, C. K. **Fundamentos de Circuitos Elétricos**. 5ª. Ed. Porto Alegre, AMGH, 2013.
- TEIXEIRA, D. Â. **Análise das distorções harmônicas – Estudo de caso em um sistema industrial**, Universidade Federal de Minas Gerais, Dissertação de Mestrado, 2009.
- AFONSO, J. L.; MARTINS, J. S. **As Oportunidades das Ameaças: A Qualidade da Energia Elétrica**. Ciclo de Seminários, Departamento de Electrónica Industrial, Universidade do Minho Campus de Azurém, Guimarães – Portugal, 2003.
- BALTAZAR, A. C. S. **Qualidade da Energia no Contexto da Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro**. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.
- BRASIL, AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 1**. Introdução, aprovado pela Resolução Normativa 664/2015.
- Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST – Módulo 8**. Qualidade da energia elétrica, aprovado pela Resolução Normativa 728/2016.
- LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em Sistemas Elétricos**. 1ª. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- NETO, A. F. **Filtros Ativos Paralelos Aplicados a Sistemas Elétricos Trifásicos a Quatro Fios**. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Londrina, Londrina – PR, 2009.

OLIVEIRA, J. C. Projeto SIDAQEE. **Qualidade de Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade**. Grupo de Qualidade e Racionalização da Energia Elétrica. Cap. II, Universidade Federal de Uberlândia, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberlândia, 2000.

ORTMANN, M. S. **Filtro Ativo Trifásico com Controle Vetorial Utilizando DSP: Projeto e Implementação**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

PAULILO, G. **Conceitos Gerais Sobre Qualidade da Energia. Cap. 1: Qualidade de Energia**. O Setor Elétrico. Ed 84: p 28 – 35, 2013.

EMBRASUL. **Analisador de Energia RE6000**. Ed 5, 2015.

SOLID STATE OPTRONICS. **Solid State Relays vs. Electromechanical Relays**. Application Note 40, Rev 02, 2014.

SCHNEIDER ELECTRICS. **Altivar 61 - Variable speed drives for synchronous and asynchronous motors. Installation Manual**. Ed 1, 2015.

DRAGAN MAKSIMOVIĆ, ROBERT WARREN ERICKSON. **Fundamentals of power electronics**, Ed 1, 1997.

STEPHEN D. UMANS, FITZGERALD E KINGSLEY. **Máquinas elétricas**, Ed 7, 2014.