Analise de Distorções Harmônicas em Redes Elétricas de Média Tensão

Este livro apresenta um estudo de caso prático sobre análise distorções harmônicas em uma empresa distribuidora de energia elétrica. O objetivo deste trabalho é medir o conteúdo harmônico em pontos de interesse de um barramento do sistema elétrico e analisar os indicadores de qualidade de energia elétrica com base nos critérios estabelecidos pelas normas IEEE Std. 519-2014, EN 50160 e a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02) e PRODIST (módulo 8, 2017). Os resultados das análises obtidos mostraram que a metodologia desenvolvida neste livro é aplicável à medida que os novos requisitos associados à qualidade da energia entrem em vigência, dentre os quais pode se citar as distorções harmônicas, que passarão a ser cobrados às empresas distribuidoras de energia, ou seja, as distribuidoras de energia elétrica deverão se adequar a tais requisitos exigidos pelo PRODIST, obedecendo aos limites de distorção harmônica, caso contrário, as empresas sofrerão penalizações por meio de pesadas multas. Esta pesquisa foi desenvolvida durante um projeto de P&D em qualidade de energia elétrica implantado na empresa Eletrobras Distribuição Amazonas.

Graduado em Automação pela Universidade do Estado do Amazonas (UEA). Graduado em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário do Norte (UNINORTE). Pós-Graduado em Sistemas de Vídeo pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Mestrando em Engenharia de Processos com ênfase em Automação e Controle pela Universidade Federal do Pará (UFPA).

978-620-2-03651-1

Rivanildo Duarte Almeida

Analise de Distorções Harmônicas em Redes Elétricas de Média Tensão

Um estudo de caso em um barramento do sistema elétrico

Novas Edições Acadêmicas

Rivanildo Duarte Almeida

Analise de Distorções Harmônicas em Redes Elétricas de Média Tensão

Rivanildo Duarte Almeida

Analise de Distorções Harmônicas em Redes Elétricas de Média Tensão

Um estudo de caso em um barramento do sistema elétrico

Novas Edições Acadêmicas

Imprint
Any brand names and product names mentioned in this book are subject to trademark, brand or patent protection and are trademarks or registered trademarks of their respective holders. The use of brand names, product names, common names, trade names, product descriptions etc. even without a particular marking in this work is in no way to be construed to mean that such names may be regarded as unrestricted in respect of trademark and brand protection legislation and could thus be used by anyone.

Cover image: www.ingimage.com

Publisher:
Novas Edições Acadêmicas
is a trademark of
International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group
17 Meldrum Street, Beau Bassin 71504, Mauritius

Printed at: see last page
ISBN: 978-620-2-03651-1

Copyright © Rivanildo Duarte Almeida
Copyright © 2017 International Book Market Service Ltd., member of OmniScriptum Publishing Group
All rights reserved. Beau Bassin 2017

DEDICATORIA

Em especial aos meus pais Raimundo da Costa Almeida e Elizabeth Gomes Duarte, por terem passado por momentos difíceis para poder me proporcionar uma boa educação.

AGRADECIMENTOS

Ao professor Dr. Manoel Azevedo por sua orientação e apoio para realização desta pesquisa.

Ao professor Dr. Jandecy Cabral Leite por ter dado incentivo e total apoio para realização desta pesquisa.

Aos meus amigos Moises de Araújo e Hudson Santana, por terem me incentivado e por terem me ajudado nos momentos que precisei.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Distorção harmônica de tensão na barra: dissertação (SOUZA, 2008) 17
Figura 2 - Decomposição de um sinal distorcido: TCC (BRUNO, 2013)..... 18
Figura 3 - Exemplo de decomposição de ondas não senoidais: dissertação (SOUZA, 2011).. 24
Figura 4 – Ponto de acoplamento (PCC): Tese (LEITE, 2013) 29
Figura 5 – Instalação do Analisador de Qualidade de Energia HIOKI PW3198 36
Figura 6 – Analisador de Qualidade de Energia PW3198: elaboração do autor 37
Figura 7 – Sensor de corrente 9695 -03: elaboração do autor 39
Figura 8 – Descrição das partes do sendor: manual sensor 9695-03 39
Figura 9 – Identificação das CATs:Vórtex Equipamentos 40
Figura 10 – Garra de tensão do tipo alicate: elaboração do autor 41
Figura 11 – Tela de análise do software PQA-HiView Pro 9624-50: manual PQA-HiView Pro 9624-50 42
Figura 12 – Transferência dos arquivos de medição para o PC: manual PQA-HiView Pro 9624-50 42
Figura 13 – Tela inicial do software PQA-HiView Pro 9624-50: manual PQA-HiView Pro 9624-50 43
Figura 14 selecionando o arquivo de medição 43
Figura 15 - Janela de análise do software PQA-HiView Pro 9624-50: manual PQA-HiView Pro 9624-50 44
Figura 16 - Tensão RMS medida no alimentador DDAL2-01 46
Figura 17 - Taxa de distorção harmônica total de tensão medida no alimentador DDAL2-01 47
Figura 18 - Corrente RMS medida no alimentador DDAL2-01 48
Figura 19 Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no alimentador DDAL2-0149
Figura 20 - Tensão RMS medida no alimentador DDAL2-02 50
Figura 21 - Taxa de distorção harmônica de tensão medida no alimentador DDAL2-02..... 51
Figura 22 - Corrente RMS medida no alimentador DDAL2-02 51
Figura 23 - Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no alimentador DDAL2-02 52
Figura 24 - Tensão RMS medida no lado de baixa tensão do alimentador DDAL2-03..... 53
Figura 25 - Taxa de distorção harmônica total de tensão medida no alimentador DDAL2-03 54
Figura 26 - Corrente RMS medida no alimentador DDAL2-03 55
Figura 27 - Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no alimentador DDAL2-03 56
Figura 28 - Tensão RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01..... 57
Figura 29 - Taxa de distorção harmônica total de tensão medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01 58
Figura 30 - Corrente RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01 59
Figura 31 - Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF$-01 60
Figura 32 - Tensão RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 da SE DD 61
Figura 33 - Taxa de distorção harmônica total de tensão medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 62
Figura 34 - Corrente RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 63
Figura 35 - Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 64

‘

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

QQE – Qualidade de Energia Elétrica

%TDD – indicador de distorção harmônica da demanda total;

PCC – Ponto de conexão comum

PAC – Ponto de acoplamento comum

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

IEC - *International Electrotechnical commission*

THD – Distorção harmônica total

THDV - Distorção harmônica total de tensão

THDI - Distorção harmônica total de corrente

IHD - Distorção harmônica individual

IHDI - Distorção harmônica individual de corrente

IHDV - Distorção harmônica individual de tensão

DHTv - Distorção harmônica total de tensão

DHTi - Distorção harmônica total de corrente

Pmédia – Potencia média

BT – Baixa Tensão

MT - Média Tensão

AT - Alta Tensão

IL – Carga do consumidor

Ih – Corrente harmônica

Isc – Corrente de curto-circuito

RMS – Raiz quadrática média

TC – Transformador de corrente

TP - Transformador de corrente

TR – Tensão de referência

TL – Tensão de linha

Pu – por unidade

Vac – Tensão alternada

Iac – Corrente alternada

SEDD – Subestação Distrito 2

‘

DDAL2-01 – Alimentador 01 da SEDD

DDAL2-02 - Alimentador 02 da SEDD

DDAL2-03 - Alimentador 03 da SEDD

DDTF4-01 – Transformador 01 da SEDD

DDTF4-02 - Transformador 02 da SEDD

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ordem, frequência e sequência das harmônicas. 20
Tabela 2 – Terminologia 27
Tabela 3 – Limite das distorções harmônicas totais 29
Tabela 4 – Limite de distorção de tensão 30
Tabela 5 - Limites de distorção de corrente para sistemas de 120V a 69kV 30
Tabela 6 – Valores de cada harmônico de tensão 31
Tabela 7 – Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de ... 32
Tabela 8 – Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra alta tensão (EHT) 33
Tabela 9 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no alimentador DDAL2-01 46
Tabela 10 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no alimentador DDAL2-01 47
Tabela 11 - Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no alimentador DDAL2-01 48
Tabela 12 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no alimentador DDAL2-01 49
Tabela 13 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no alimentador DDAL2-01 50
Tabela 14 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no alimentador DDAL2-02 51
Tabela 15 – Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no alimentador DDAL2-02 52
Tabela 16 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no alimentador DDAL2-02 53
Tabela 17 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no alimentador DDAL2-03 54
Tabela 18 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no alimentador DDAL3-03 54
Tabela 19 – Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no alimentador DDAL2-03 55
Tabela 20 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no alimentador DDAL2-03 56
Tabela 21 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01 57
Tabela 22 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF-01 58
Tabela 23 – Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01 59
Tabela 24 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01 60
Tabela 25 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 da SE DD 61
Tabela 26 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 62
Tabela 27 – Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 63

‘

Tabela 28 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 64

SUMÁRIO

CAPITULO 1 10

INTRODUÇÃO 10

1 CONTEXTUALIZAÇÃO 12

1.1 DEFINIÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA DE PESQUISA 12
1.2 OBJETIVOS 13
1.2.1 Objetivo Geral 13
1.2.2 Objetivos Específicos 13
1.3 CONTRIBUIÇÃO E RELEVÂNCIA 13
1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA 14
1.5 ESTRUTURA DO LIVRO 14
CAPITULO 2 16

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS 16

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE HARMÔNICOS 16
2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS 16
2.2.1 Distorção Harmônica Total 20
2.2.2 Distorção Harmônica Individual 22
2.2.3 Série de Fourier 22
2.2.4 Fontes de Harmônicos 24
2.2.5 Efeitos de Harmônicos 25
2.3 NORMAS E RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DE QEE (QUALIDADE de ENERGIA ELÉTRICA) 26
2.3.1 Prodist - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional 26
2.3.2 IEEE Std. - 519-2014 29
2.3.3 EN 50160 - *Power Quality Standard* 31
2.4.4 Norma IEC 61000-3-6 de Compatibilidade Eletromagnética 31
CAPITULO 3 34

3 MATERIAIS E METODOLOGIA 34

3.1 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA HIOKI PW 3198 36
3.2 SENSOR DE CORRENTE HIOKI 9695 – 03 38
3.3 MEDIÇÃO DE TENSÃO 41
3.4 FERRAMENTA DE SOFTWARE UTILIZADA 41
3.4.1 PQA-HiView Pro 9624-50 41
CAPITULO 4 45

4 ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMONICAS EM REDES ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO: ESTUDO DE CASO DE UM BARRAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DA EMPRESA ELETROBRÁS DISTRIBUIÇÃO AMAZONAS 45

4.1 ANALISE DOS DADOS COLETADOS DA REDE ELÉTRICA 45
4.1.1 Análise das Medições Coletadas no Alimentador DDAL2-01 45
4.1.2 Análise das Medições Coletadas no Alimentador DDAL2-02 49
4.1.3 Análise das Medições Coletadas no Alimentador DDAL2-03 53
4.1.4 Análise das Medições Coletadas no Lado de Baixa Tensão do Transformador DDTF4- 01 57

‘

4.1.5 Análise das Medições Coletadas no Lado de Baixa Tensão do Transformador DDTF4- 02 60
CAPITULO 5 65
CONCLUSÃO 65
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS 66
ANEXO 70

‘

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um elemento indispensável para a sociedade moderna, além de oferecer meios para que a população tenha melhor qualidade de vida, representa insumo básico para a maioria das atividades comerciais e industriais. Assim sendo, a energia elétrica pode ser abordada tanto sob o ponto de vista de produto como de serviço (SOUZA, 2008).

A qualidade da energia elétrica – QEE tem se tornado uma preocupação crescente e comum as empresas de energia elétrica e aos consumidores de um modo geral. O conceito da Qualidade de Energia Elétrica está relacionado a um conjunto de alterações que podem ocorrer no sistema elétrico. Uma boa definição para o problema de qualidade da energia é: "Qualquer problema da energia manifestado na tensão, corrente ou nas variações de frequência do sistema elétrico que resulte em falha ou mau funcionamento de equipamentos de consumidores". Tais alterações podem ocorrer em várias partes do sistema de energia, seja nas instalações de consumidores ou no sistema de energia da concessionária (SOUZA, 2008).

Durante os últimos 10 anos, as empresas, comércios e residências em todo o Brasil vêm aumentando o número de equipamentos elétrico-eletrônicos ligados à rede elétrica de alimentação. Este aumento é devido ao avanço tecnológico provocado pela globalização e pelo aumento do poder aquisitivo da sociedade (CIRINO, 2010).

Esses equipamentos são fabricados cada vez mais com componentes variados e de forma muito mais complexas, como por exemplo: microcomputadores e motores de corrente contínua. O problema é que dentro desses equipamentos existem circuitos não-lineares que os torna cargas não-lineares geradoras de harmônicas, que uma vez alimentados, provocam o surgimento de distorções, interferências e espúrios (que são chamados de harmônicas) que, em grande quantidade, podem provocar danos as redes do sistema elétrico. Harmônicos presentes nessas redes são definidos como tensão e correntes senoidais em frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental (CIRINO, 2010).

Define carga não-linear como: Toda carga é dita carga não-linear quando, ao ser alimentada por uma tensão senoidal, a corrente resultante não possui uma forma de onda senoidal na frequência de tensão que a alimenta (IEEE 100, 2000).

As correntes harmônicas, causadas pelas cargas não-lineares, ao penetrarem no sistema elétrico, produzem quedas de tensão ao longo do alimentador e, em consequência, a

tensão na rede torna-se distorcida, portanto, a tensão acaba tendo um conteúdo harmônico. Isso pode gerar perda de eficiência do sistema, bem como, interferir no funcionamento dos equipamentos elétricos, como relés, transformadores, entre outros (GRANDI, 2012).

Para agravar ainda mais este problema, foi constatado que o crescimento na instalação de equipamentos no sistema elétrico para diminuir os efeitos de tais harmônicas não ocorreu de forma satisfatória. Dessa forma, podemos dizer que a tensão que está sendo disponibilizada para o consumidor não é um sinal senoidal puro e sim, um sinal distorcido. Este problema da má qualidade de energia elétrica é um assunto atual e importante (CIRINO, 2010).

O impacto dessas harmônicas no sistema elétrico é bastante prejudicial para os equipamentos de potência, podendo causar aquecimento excessivo em transformadores e geradores, uma redução na eficiência de geração, transmissão e utilização da energia elétrica; mau funcionamento de equipamentos eletrônicos, disparo de dispositivo de proteção; vibrações e diminuição da vida útil de cabos (GONÇALVES, 2010).

Este problema ganhou dimensão internacional, o que provocou a criação de normas e recomendações técnicas que especificam o limite de amplitude de harmônicas de tensão e corrente totais, e também harmônicas de tensão e corrente individuais nas diversas frequências, bem como, criando também normas e metodologias para mensurar essas distorções geradas (CIRINO, 2010).

As normas são: *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE Std. 519-2014), (EN 50160, 2004), nos Estados Unidos, *International Electrotechnical commission* (IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02)) na Europa e PRODIST (modulo 8 – 2017), no Brasil. No decorrer deste trabalho essas normas serão abordadas com mais detalhes.

Este trabalho tem como uma de suas contribuições não só o incentivo a criação de documentos normativos que atribuam responsabilidades sobre violações de limites de distorções harmônicas, mas como também o incentivo a inclusão na tarifação de energia os efeitos do conteúdo harmônico das cargas que poluem o sistema de alimentação.

O objetivo deste trabalho é medir o conteúdo harmônico em um ponto de interesse de um barramento do sistema elétrico e analisar conformidade dos indicadores de distorções harmônicas com base nos critérios estabelecidos pelas normas IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014, EN 50160-2004 e PRODIST (modulo 8 – 2017).

1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.1 DEFINIÇÃO E JUSTIFICATIVA DA PROPOSTA DE PESQUISA

Nos últimos anos, quando se aborda o termo Qualidade da Energia Elétrica (QEE) tem despertado o interesse dos órgãos reguladores do setor elétrico. Isso se deve pela forte e contínua degradação dos índices de conformidade e continuidade recomendados pelas normas vigentes. O desenvolvimento de equipamentos cada vez mais sensíveis às variações no fornecimento da energia elétrica, a crescente conscientização da população sobre seus direitos enquanto consumidores, aliados à falta de documentos normativos que estabeleçam penalidades sobre violações de limites, são alguns dos fatores que contribuem para que pesquisas sejam realizadas nesta área.

Além disso, os reparos ou substituições de equipamentos elétricos, em face dos elevados níveis dos distúrbios, têm provocado custos financeiros indesejáveis. Os valores desses custos poderiam ser revertidos em investimentos para a melhoria do sistema elétrico da concessionária (SOUZA, 2008).

Dos fenômenos associados à Qualidade da Energia Elétrica, as distorções harmônicas de tensão merecem especial atenção, em virtude da crescente presença de cargas com características não-lineares nas redes elétricas de distribuição. Esta forte disseminação de cargas poluidoras, ou seja, cargas não-lineares, expõem consumidores e concessionária a níveis elevados de distorção harmônica, podendo provocar efeitos indesejáveis sobre o sistema, como o aumento das perdas elétricas, funcionamento inadequado de equipamentos, sobretensões harmônicas, dentre outros. O fenômeno ganha maior relevância se considerada a dificuldade de atribuição de responsabilidade entre supridores e consumidores, sobre a injeção de harmônicos na rede elétrica (SOUZA, 2008).

Por estas razões, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) elaborou o manual de Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (ANEEL, 2012) que conceitua e fornece alguns limites para tais fenômenos (NEVES, 2014).

Desta forma, a elaboração de uma pesquisa ou estudo, com método que possa contribuir para análise de níveis de distorções harmônicas em um sistema elétrico torna-se extremamente útil e economicamente interessante, pois a partir da identificação dos níveis mais elevados de distorções harmônicas no sistema elétrico, será possível conhecer as

condições reais de funcionamento do sistema elétrico e também criar um perfil das cargas conectadas ao mesmo, podendo assim avaliar os impactos harmônicos causados na rede elétrica e atribuir as responsabilidades para quem violar os limites recomendados no PRODIST. Com a vigência do modulo 8 do PRODIST, a violação dos níveis de distorção harmônicas resultará em multas à distribuidora de energia elétrica

1.2 OBJETIVOS

Neste tópico apresenta-se o objetivo geral e os objetivos específicos desta pesquisa.

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo deste trabalho é medir o conteúdo harmônico em um ponto de interesse de um barramento do sistema elétrico e analisar a conformidade dos indicadores de distorções harmônicas na rede da concessionária com base nos critérios estabelecidos pelas normas IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014, EN 50160-2004 e PRODIST (modulo 8, 2017).

1.2.2 Objetivos Específicos

a) Realizar campanha de medição para coleta de dados (níveis de harmônicos) do sistema elétrico;
b) Analisar os níveis de distorções harmônicas no sistema elétrico, considerando as recomendações do IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014, EN 50160-2004 e PRODIST (módulo 8, 2017).
c) Criar um perfil dos alimentadores ou pontos medidos para melhor gerenciamento do sistema elétrico;
d) Criar um relatório das análises das distorções harmônicas realizadas, que sirva como um documento de diagnóstico dos pontos medidos.

1.3 CONTRIBUIÇÃO E RELEVÂNCIA

Tem-se observado um aumento na introdução de novas tecnologias da eletrônica e telecomunicações nos processos de automatização das indústrias, da mesma forma que cresce a presença de cargas que, por suas características não lineares, incide diretamente nos índices de qualidade de energia nestas instalações e também nos sistemas de fornecimento de energia

elétrica. A necessidade de manter um elevado fator de potência conjuntamente com a manutenção dos parâmetros de qualidade de energia é uma questão do ponto de vista da eficiência energética que impacta nos índices de rentabilidade das indústrias (LEITE, 2013).

A presente pesquisa é relevante diante da necessidade de se mensurar e identificar os níveis de distorções harmônicas em sistema de energia elétrica para então, propor soluções que possam minimizar os impactos causados na rede elétrica entre os quais podemos citar:

a) Sobrecarga das redes de distribuição por aumento da corrente eficaz;
b) Sobrecarga dos condutores de neutro em razão da soma das correntes harmônicas de 3^0 ordem;
c) Sobrecarga, vibrações e envelhecimento de alternadores, transformadores e motores;
d) Sobrecarga e envelhecimento dos capacitores de compensação reativa;
e) Deformação da tensão de alimentação;
f) Atuação indevida de sensores e equipamentos de proteção;
g) Queima ou operação inadequada de aparelho sensível;
h) Perturbação das redes de comunicação ou das linhas telefônicas, e;
i) Erros de medição.

Esta pesquisa tem como contribuição apresentar uma metodologia válida para análises de distorções harmônicas considerando as recomendações do IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014, EN 50160-2004 e PRODIST (modulo 8, 2017), que sirva como um material de base e apoio para pesquisas mais avançadas sobre distorção harmônica e qualidade de energia como um todo.

1.4 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

O campo da Qualidade de Energia Elétrica é muito abrangente e vasto, para delimitar a pesquisa, o estudo em questão irá enfocar em apenas análises de distorções harmônicas em pontos específicos de um sistema elétrico através da realização de campanhas de medições.

1.5 ESTRUTURA DO LIVRO

Este livro está dividido em 5 capítulos conforme apresentado abaixo:

No **capítulo *1***, são apresentados, de forma sucinta, os elementos que motivaram à realização desta pesquisa: objetivos, a justificativa, a relevância e contribuição da pesquisa.

No **capítulo *2***, apresenta-se o referencial teórico onde são apresentados os assuntos relacionados aos fundamentos de distorções harmônicas e analisam-se aspectos relacionados com as normas de qualidade de energia, considerando as recomendações do IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02), IEEE Std. 519-2014, EN 50160-2004 e PRODIST (modulo 8, 2017).

No **capítulo *3***, apresentam-se os materiais e metodologia utilizada para análise de distorções harmônicas em redes elétricas.

No **capítulo *4***, apresenta-se aplicação da metodologia utilizada para a análise de distorções harmônicas em um barramento de interesse através de estudos de casos.

No **capítulo *5***, apresenta-se a conclusão.

CAPITULO 2

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Neste capitulo são apresentados os fundamentos teóricos para realização desta pesquisa.

2.1 CONCEITOS BÁSICOS DE HARMÔNICOS

O conceito básico de “harmônicos” foi originalmente definido no ramo da física que estuda o som, conhecido como acústica, significando a vibração de um fio ou coluna de ar, com a presença de frequências múltiplas em relação a uma frequência fundamental, provocando uma distorção do som resultante (SOUZA, 2008).

Acontecimentos análogos a estes ocorrem na área de Engenharia Elétrica, onde deformações na forma de onda de tensão e corrente elétrica também têm sido registradas. Neste caso, os conceitos básicos da física e matemática utilizados na área da Física podem ser imediatamente aplicados na área de engenharia elétrica na busca de uma solução para problemas de distorções harmônicas (SOUZA, 2008).

2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

As distorções harmônicas são um tipo de energia “poluída” que, diferentemente dos transientes de corrente e tensão, estão presentes de forma permanente, associadas ao elevado emprego de cargas não-lineares. Nos sistemas elétricos os harmônicos são definidos como frequências múltiplas da forma de onda fundamental (FREITAS, 2011).

No passado não havia maiores preocupações com harmônicos. Cargas com características não-lineares eram poucas utilizadas e os equipamentos eram mais resistentes aos efeitos provocados por harmônicas. Nos últimos anos, com o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência e com a utilização de métodos que buscam o uso mais racional da energia elétrica, o conteúdo harmônico presente nos sistemas tem-se elevado, causando uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos, comprometendo a qualidade e o próprio uso racional da energia elétrica (CINTIA, 2008).

As correntes harmônicas causadas pelas cargas não-lineares, ao penetrarem o sistema, produzem quedas de tensão ao longo do alimentador, e em consequência, a tensão na rede torna-se distorcida, portanto, a tensão acaba tendo um conteúdo harmônico. Isso pode

gerar perda de eficiência do sistema, bem como, gerar interferência no funcionamento de equipamentos elétricos, como relés, transformadores, entre outros. No caso dos relés pode acontecer um acionamento falso e nos transformadores gera aquecimento tendo como consequência diminuição da vida útil dos transformadores (GRANDI, 2012).

Em geral a distorção harmônica de tensão é o resultado da corrente harmônica circulando através da impedância do sistema elétrico. Considerando que a impedância série se ja linear, para cada frequência harmônica da corrente, há uma queda de tensão de mesma frequência, resultando, desta forma, na distorção da tensão na barra. A Figura (1) abaixo ilustra o fenômeno acima descrito (SOUZA, 2008).

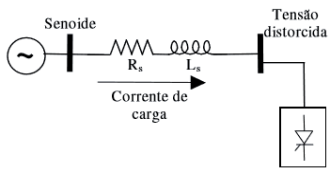


Figura 1 – Distorção harmônica de tensão na barra: dissertação (SOUZA, 2008)

A magnitude da distorção de tensão depende, basicamente, da impedância equivalente vista pela carga não linear ou fonte de corrente harmônica e da corrente consumida pela mesma. Deve-se reconhecer que a carga não exerce controle sobre os níveis de distorção de tensão. Consequentemente, uma mesma carga poderá resultar em distorções de tensão diferentes, dependendo da sua localização no sistema elétrico (SOUZA, 2008).

A decomposição de uma onda de corrente distorcida em componentes harmônicas da corrente fundamental, com amplitudes e desfasamentos angulares, é devida ao matemático francês Jean Baptiste J. Fourier, (1768-1830). Ela é conhecida como Série de Fourier e permite representar, no domínio da frequência, uma determinada função periódica definida no domínio do tempo (SCOLARI, 2013).

Fourier definiu essa deformação da seguinte maneira: toda função periódica e não senoidal pode ser representada pela soma de expressões, série que é composta por uma expressão senoidal em frequência fundamental e por expressões senoidais cuja frequência de cada senóide é múltipla da senóide fundamental e de uma eventual componente contínua, como mostra a figura (2) abaixo (SCOLARI, 2013). No decorrer deste capitulo será abordada a Série de Fourier com mais detalhes.

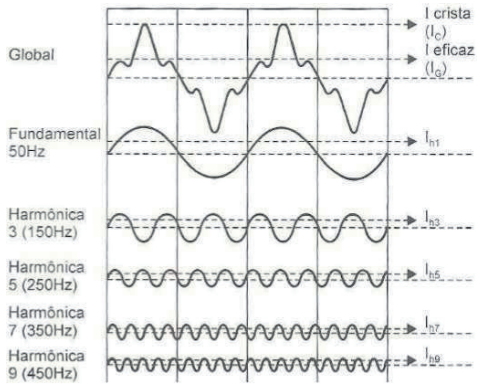


Figura 2 - Decomposição de um sinal distorcido: TCC (BRUNO, 2013)

Observando essa situação, vê-se que o sinal global é a soma ponto a ponto dos sinais fundamentais e harmônicos formados por senóides perfeitas de amplitudes e frequências diferentes. Dessa forma, podemos dizer que um sinal periódico contém harmônicas quando a forma de onda desse sinal não é senoidal ou, dito de outra forma, um sinal contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal senoidal (PROCOBRE, 2001).

Como exemplo pode se dizer que, um circuito com 3ª ordem harmônica possui frequência harmônica de 150Hz para um sistema de frequência fundamental de 50Hz e então uma onda não senoidal com uma distorção harmônica de 3ª ordem possui uma frequência harmônica de 180Hz para uma onda senoidal de frequência fundamental de 60HZ (frequência utilizada no Brasil) (FREITAS, 2011).

A preocupação com a injeção de distorções harmônicas na rede de transmissão de energia elétrica era praticamente restrita aos grandes consumidores industriais, especialmente aqueles de plantas eletroquímicas e eletro-metalúrgicas. Devido as elevadas potências envolvidas nos processos causadores das perturbações, os métodos de mitigação eram normalmente dimensionados considerando o aspecto localizado da geração de harmônicos, ignorando qualquer contribuição por parte do sistema onde a carga produtora de harmônico estivesse conectada (ALMEIDA, 2012).

Hoje há um novo cenário, a situação dos sistemas elétricos de potência passou por alterações significantes. Com os avanços da indústria eletrônica, os fabricantes dos equipamentos elétricos aumentaram a complexidade das cargas elétricas através do uso de componentes eletrônicos. Dessa maneira, os componentes semicondutores tornaram-se presentes em praticamente em todos os tipos de equipamentos elétricos.

Isso é devido principalmente à modernização e inserção de novas tecnologias nos novos sistemas de produção, com o principal objetivo de aperfeiçoar a produção com o menor custo produtivo (GRANDI, 2012).

Os componentes semicondutores foram responsáveis por aprimorar o controle sobre o funcionamento dos equipamentos elétricos, melhorando o seu desempenho e adicionando funcionalidades que permitiram o aumento da sensação de conforto\satisfação por parte dos consumidores de energia elétrica. Mas a inserção dos semicondutores transformou esses equipamentos em fontes produtoras de distorções harmônicas, pois o uso de componentes semicondutores na alimentação de equipamentos elétricos tem, como uma de suas principais consequências, a deformação da forma de onda de corrente fornecida pelo sistema, contribuindo para que a forma de onda da tensão de fornecimento também deixe de ser senoidal (ALMEIDA, 2012).

Ao contrário de pequenos consumidores, nas grandes indústrias, geralmente são aplicados métodos de mitigação no sistema, limitando a distorção harmônica de tensão resultante. Já a principal causa associada com a distorção harmônica verificada nos sistemas de distribuição de baixa tensão está relacionada com cargas eletrônicas, como computadores, televisores e lâmpadas compactas. Essas cargas podem ser encontradas em número cada vez maior nos clientes domiciliares e comerciais, levando a um crescente nível de distorção harmônica na rede. O aumento dessas cargas introduz no sistema de distribuição, distúrbios representados por ondas de frequências superiores, múltipla da frequência fundamental da rede elétrica (60Hz) (ALMEIDA, 2012).

(SILVA, 2008) afirma que,

> As distorções harmônicas vêm contra os objetivos da qualidade do fornecimento de energia promovido por uma concessionária de energia elétrica, que deve fornecer aos seus consumidores uma tensão puramente senoidal, com a amplitude e frequências constantes. Entretanto, o fornecimento de energia a determinados consumidores que causam deformações no sistema fornecedor de energia, prejudica não apenas o consumidor responsável pelo distúrbio, mas também outros conectados à mesma rede elétrica. (SILVA, 2008)

A utilização de eletrodomésticos modernos pode ser apontada como um dos fatores responsáveis por transformar um consumidor residencial em uma carga produtora de harmônicos. Enquanto que a massiva utilização de computadores pessoais e lâmpadas fluorescentes de descarga podem ser apontadas os principais fatores por transformar um

consumidor comercial em uma carga produtora de harmônica. Sendo assim, consumidores residenciais e comerciais tornaram se, também cargas produtoras de harmônicas (ALMEIDA, 2012).

Os sinais harmônicos são classificados quanto a sua ordem, freqüência e seqüência, conforme indicado na tabela (1).

Tabela 1 – Ordem, frequência e sequência das harmônicas.

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
N	N *60	__

Fonte: (Dissertação Gonçalves, 2010).

As sequencias das harmônicas podem ser positiva, negativa e zero, como é descrito abaixo (PROCOBRE, 2003):

a) Sequência positiva: tendem a fazer os motores a girarem no mesmo sentido que o da componente fundamental, provocando assim, uma sobrecorrente nos seus enrolamentos, que provoca um aumento de temperatura, reduzindo a vida útil e permitindo a ocorrência de danos ao motor;
b) Sequência negativa: tendem a fazer motores girarem em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, freando assim o motor e também causando aquecimento indesejado.
c) Sequência zero: não provocam efeitos no sentido de rotação do motor, porém somasse as correntes algebricamente no condutor neutro, isso implica no surgimento de uma corrente de neutro 3 (três) vezes maior que a corrente de fase, ocasionando aquecimento excessivo do condutor neutro, destruição de bancos de capacitores. (PROCOBRE, 2003).

2.2.1 Distorção Harmônica Total

O indicador de distorção harmônica (DHT) é o indicador mais utilizado para quantificar harmônicos, ou seja, é utilizado para contabilizar a quantidade de harmônicos

presentes em uma onda, ou, em outras palavras, quão distorcida uma onda está em relação a uma onda senoidal (SCOLARI, 2013), sendo adotado como parâmetro pelas principais referências mundiais. É importante compreender que a DHT pode ser utilizada para calcular tanto distorção harmônica de corrente (DHT_I) quanto distorção harmônica de tensão (DHT_V) e também vale ressaltar que a DHT para fins de avaliação do sistema de energia elétrica não é uma informação completa, uma vez que apenas seu valor não é suficiente para quantificar a influência dos harmônicos presentes no local de medição no sistema. A DHT de tensão (DHT_V) e a DHT de corrente (DHT_I) são dadas por: (TEIXEIRA, 2009). A equação (1) e (2) abaixo apresenta a forma genérica de se calcular o DHT_V e DHT_I, respectivamente.

$$DHT_V = \frac{1}{V_1}\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2} \tag{1}$$

$$DHT_i = \frac{1}{I_1}\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h^2} \tag{2}$$

Onde,

h – número inteiro (ordem harmônica)

V_h – valor rms da componente de tensão harmônica h

V_1 – valor rms de tensão fundamental

I_h – valor rms da componente de corrente harmônica h

I_1 – valor rms de corrente fundamental

É necessário que o especialista analise o sistema de energia como um todo, ou seja, é necessário que o especialista analise o valor da DHT e o valor da intensidade da tensão ou corrente para que o mesmo avalie as distorções causadas pelos os efeitos dos harmônicos naquele ponto. Por exemplo, pode-se citar, que uma distorção harmônica de 100% encontrada na corrente de alimentação de um equipamento causaria problemas na rede, porém, se considerado que esse equipamento possui uma corrente muito baixa diante da corrente total da rede, as amplitudes dos harmônicos serão pequenas e facilmente “diluídas” pelas outras

cargas ligadas ao mesmo alimentador. Entretanto, se o equipamento com DHT de 100% possui uma corrente alta em relação às outras cargas ligadas ao alimentador, com certeza esse conteúdo harmônico será nocivo à rede (TEIXEIRA, 2009).

2.2.2 Distorção Harmônica Individual

Para quantificar a distorção harmônica individual de tensão ou corrente, ou seja, para determinar a porcentagem de cada componente harmônica em relação a sua componente fundamental, utiliza-se a IHD (Individual Harmonic Distortion). As equações (3) e (4) expressam tais definições. (SOUZA, 2008).

$$IHDV = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \tag{3}$$

$$IHDI = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \tag{4}$$

Onde:
$IHDV$ - distorção harmônica individual de tensão;
$IHDI$ - distorção harmônica individual de corrente.

2.2.3 Série de Fourier

O físico e matemático francês, Jean - Baptiste Joseph Fourier ao investigar problemas de transmissão de calor, descobriu que toda função com forma de onda periódica, pode ser representada por uma soma infinita de senóides e co-senóides, mais uma componente contínua. Assim, se $f(t)$ é uma função periódica qualquer, pode ser expressa na forma (CIRINO, 2010). Ver equação (5) abaixo:

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \left(a_h \cos\left(\frac{2\pi ht}{T}\right) + b_h \sin\left(\frac{2\pi ht}{T}\right)\right) \tag{5}$$

Onde: a_0 é o valor médio da função $f(t)$, que também pode ser entendido como o valor da componente continua de $f(t)$;

h é o valor da ordem harmônica que compõe o sinal, composta por valores inteiros e positivos;

a_n e b_n são os valores dos coeficientes da série de Fourier para cada ordem harmônica h;

T é o período da função em sua frequência fundamental (h = 1).

As senóides e co-senóides que compõem uma onda periódica não senoidal e que tem frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental são denominados harmônicos de $f(t)$.

Os vetores das componentes harmônicas, obtidos a partir da decomposição em coeficientes da série de Fourier, são apresentados também por (ARRILAGA, 2003) conforme descreve a equação (6) abaixo:

$$\hat{A}_h = A_h \angle \theta_h = a_h + jb_h \tag{6}$$

A amplitude (A_h) e a defasagem (θ_h) do vetor que representa a componente harmônica de ordem h podem ser obtidas a partir dos coeficientes da série de Fourier, apresentado por (ARRILAGA, 2003) pelas as equações (7) e (8) abaixo:

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \tag{7}$$

$$\theta_h = \tan^{-1}\left(\frac{b_h}{a_h}\right) \tag{8}$$

Portanto, se uma carga não-linear conectada à rede elétrica gera uma corrente não-senoidal, mais periódica na frequência fundamental, então a corrente que esta carga está gerando pode ser decomposta em uma somatória de correntes senoidais com distintas frequências de oscilação (SOUZA, 2011). Ver figura (3) abaixo.

Estas correntes senoidais que compõe a corrente da carga não-linear são classificadas como:

a) fundamental: onda com a frequência fundamental do sistema, igual a frequência da tensão da rede elétrica;
b) sub-harmônicos: ondas com frequências inferiores a fundamental;
c) harmônicos: ondas com frequências superiores à fundamenta, múltiplas inteiras da frequência fundamental;
d) inter-harmônicos: ondas com frequências intermediárias às frequências harmônicas, que não são múltiplas inteiras da frequência fundamental (SOUZA, 2011).

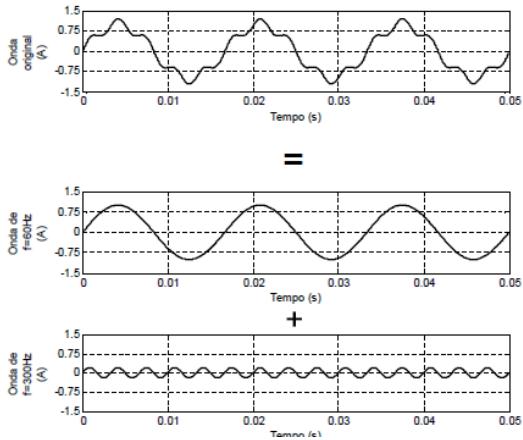


Figura 3 - Exemplo de decomposição de ondas não senoidais: dissertação (SOUZA, 2011).

2.2.4 Fontes de Harmônicos

A energia elétrica é fornecida aos consumidores através de uma tensão senoidal, em uma frequência fundamental bem definida que pode ser 50 ou 60Hz, dependendo do sistema elétrico. No sistema elétrico brasileiro a frequência fundamental é 60Hz.

Quando uma carga é aplicada a esta tensão, a potência média é fornecida pelo produto descrito na equação (9) abaixo (SOUZA, 2011):

$$P_{média} = \frac{1}{T}\int_{t}^{1+T} p(t).dt = \frac{1}{T}\int_{t}^{1+T} v(t).i(t).dt \qquad (9)$$

Onde:

$p(t)$ - é o instantâneo da potência elétrica no instante de tempo t;

$p(t)$ – é o valor instantâneo da tensão elétrica no instante de tempo t;

$i(t) -$ é o valor instantâneo da corrente elétrica no instante de tempo t;

$T -$ é o período da função em sua frequência fundamental.

Conforme definido em (IEEE 100, 2000), uma carga é dita linear se, ao ser alimentada por uma onda senoidal, a corrente resultante possui uma forma de onda também senoidal de mesma frequência da tensão que alimenta. O ângulo de defasagem entre a onda de tensão e a onda de corrente não afeta a linearidade da carga. Cargas apresentando comportamentos puramente resistivos, indutivos, capacitivos ou misturas destes comportamentos são exemplos de cargas lineares.

Por outro lado, uma carga é dita não linear quando, ao ser alimentada por uma tensão senoidal, a corrente resultante não possui uma forma de onda senoidal na frequência da tensão que a alimenta (IEEE 100, 2000). Estas cargas podem possuir elementos que distorcem a forma de onda de corrente, tais como os semicondutores, equipamentos com núcleos ferromagnéticos, (SOUZA, 2011) etc.

As principais fontes de harmônicos conhecidas eram fornos a arco, a magnetização de máquinas elétricas ou de transformadores e lâmpadas fluorescentes. Atualmente fazem parte desta lista os equipamentos eletrônicos que convertem corrente alternada para corrente contínua (retificadores), corrente alternada para corrente continua (inversores) ou que fazem uso de fontes chaveadas (SOUZA, 2011).

2.2.5 Efeitos de Harmônicos

Segundo (SOUZA, 2011), as distorções harmônicas possuem efeitos prejudiciais tanto no sistema elétrico quanto sobre os equipamentos dos consumidores.

No sistema elétrico, a corrente harmônica injetada em um ponto pode entrar em ressonância com o resto do sistema elétrico, resultando em uma maior circulação de corrente, no sistema e, por consequência, maior distorção da tensão.

As correntes harmônicas podem degradar banco de capacitores, queimar fusíveis devido a corrente elevada que circula por eles ou até mesmo resultar em queima desses

materiais. A presença de harmônicos pode ainda causar, um sobreaquecimento inesperado dos transformadores de distribuição, dentro outros efeitos (SOUZA, 2011).

Para os consumidores, alguns dos maiores problemas estão no sobreaquecimento de máquinas elétricas, na sobrecarga do condutor de neutro, em interferência nos sinais elétricos de equipamentos de telecomunicações e em equipamentos eletrônicos de controle (SOUZA, 2011).

2.3 NORMAS E RECOMENDAÇÕES PARA MONITORAÇÃO DE QEE (QUALIDADE de ENERGIA ELÉTRICA)

Nesta seção serão apresentadas as normas que limitam os níveis de distorções harmônicas em redes elétricas de distribuição.

Existem normas internacionais e nacionais para o controle da distorção harmônica das formas de onda de tensão e corrente. São elas: IEEE Std. 519-2014, EN 50160 e a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02). No Brasil, estão vigentes os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica do Sistema Elétrico Nacional – PRODIST (Módulo 8, 2017).

2.3.1 Prodist - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional

O objetivo do PRODIST é estabelecer os procedimentos relativos à qualidade da energia elétrica - QEE, abordando a qualidade do produto e a qualidade do serviço prestado (PRODIST MODULO 8, 2017).

Para a qualidade do produto, este módulo define a terminologia, caracteriza os fenômenos, parâmetros e valores de referência relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão, estabelecendo mecanismos que possibilitem à ANEEL fixar padrões para os indicadores de QEE (PRODIST MODULO 8, 2017).

Para a qualidade dos serviços prestados, este módulo estabelece a metodologia para apuração dos indicadores de continuidade e dos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais, definindo padrões e responsabilidades (PRODIST MODULO 8, 2017).

Este livro abordara procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica somente relacionada a distorções harmônicas.

Nesta subseção serão mostrados valores de referências para distorções harmônicas totais admissíveis para cada classe de tensão nos sistemas de energia elétrica (BT – Baixa Tensão, MT - Média Tensão e AT - Alta Tensão).

A Tabela 2 resume a terminologia aplicável ao cálculo das distorções harmônicas.

Tabela 2 – Terminologia

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_n
Ordem harmônica	h
Ordem harmônica máxima	$hmáx$
Ordem harmônica mínima	$hmin$
Tensão fundamental medida	V_1
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT 95%
Valor do indicador DTTP% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT_p95 %
Valor do indicador DTTI% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT_i95 %
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_3$95 %

Fonte: (Prodist modulo 8, 2017)

As expressões para o cálculo das grandezas DIT_h % , DTT % , DTT_p% , DTT_i% , DTT_3% são:

$$DIT_h\ \% = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \tag{10}$$

Onde:

h = ordem harmônica individual

$$DTT\ \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hmáx} V_h^2}}{V_1} \times 100 \tag{11}$$

Onde:

h = todas as ordens harmônicas de 2 até hmáx.

$h$máx = conforme a classe A ou S.

$$DTT_P\ \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{hp} V_h^2}}{V_1} \times 100 \tag{12}$$

Onde:

h = todas as ordens harmônicas pares, não múltiplas de 3 (h = 2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38,...).

hp = máxima ordem harmônica par, não múltipla de 3.

$$DTT_I\ \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=5}^{hi} V_h^2}}{V_1} \times 100 \tag{13}$$

Onde:

h = todas as ordens harmônicas ímpares, não múltiplas de 3 (h = 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31, 35, 37,...).

hi = máxima ordem harmônica ímpar, não múltipla de 3.

$$DTT_3\ \% = \frac{\sqrt{\sum_{h=3}^{h3} V_h^2}}{V_1} \times 100 \tag{14}$$

Onde:

h = todas as ordens harmônicas múltiplas de 3 (h = 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 27, 30, 33, 36, 39,...)

$\boldsymbol{h3}$ = máxima ordem harmônica múltipla de 3.

De acordo com (PRODIST MODULO 8, 2017), os limites para as distorções harmônicas totais são apresentados na tabela 3.

Tabela 3 – Limite das distorções harmônicas totais

Indicador	Tensão nominal		
	$Vn \leq 1{,}0kV$	$1{,}0kV < Vn < 69kV$	$69kV \leq Vn < 230kV$
DTT 95%	10,0%	8,0	5,0
DTT_p95 %	2,5%	2,0	1,0
DTT_i95 %	7,5%	6,0	4,0
$DTT_3$95 %	6,5%	5,0	3,0

Fonte: (Prodist modulo 8, 2017)

Os limites correspondem ao máximo valor almejado a ser observado no sistema de distribuição. É importante observar que o PRODIST (Modulo 8, 2017) ainda não estabelece limites para as distorções harmônicas totais de corrente, somente para distorção harmônica de tensão.

No caso de medições realizadas utilizando-se TPs com conexão do tipo V ou delta aberto, os limites permitidos para o indicador DTT395% deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicados na Tabela 3 (PRODIST MODULO 8, 2017).

Os acessantes da Rede Básica deverão seguir o determinado nos Procedimentos de Rede ou em regulamentação específica.

2.3.2 IEEE Std. - 519-2014

Essa norma é chamada de "práticas recomendadas e requisitos da norma para o controle de harmônicos em sistemas elétricos de potência". É caracterizada por estabelecer os limites para ambos, não só a distorção da tensão fornecida pelo distribuidor, como também a corrente de carga do consumidor (IEEE Std. 519, 2014).

Limites de harmônicas da norma IEEE 519 – 2014 foram estabelecidas para o PCC entre a concessionária e vários consumidores. Assim, este é o ponto em que outros consumidores podem ser alimentados, ver figura (4) abaixo.

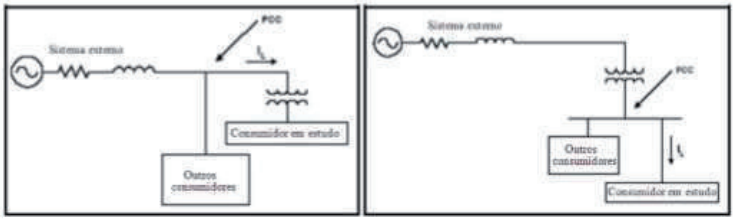


Figura 4 – Ponto de acoplamento (PCC): Tese (LEITE, 2013)

Analisando o nível de distorção de tensão (DHT) no PCC, a concessionária é responsável por manter a qualidade da forma de onda de tensão no PCC, abaixo dos limites máximos de regime permanente apresentados na Tabela 4 abaixo.

Tabela 4 – Limite de distorção de tensão

Tensão no barramento do PAC	Harmônicos individuais (%)	Distorção harmônica total – THD (%)
$V \leq 1kV$	5,0	8,0
$1kV < V \leq 69kV$	3,0	5,0
$69kV < V \leq 161kV$	1,5	2,5
$161kV < V$	1,0	1,5

Fonte: (IEEE Std 519 – 2014)

Estes limites devem ser cumpridos para a pior condição de operação do sistema com duração maior que uma hora. Para períodos de curto prazo, durante as condições iniciais ou transitórias, esses limites podem ser ultrapassados em 50%. Os limites de distorção de corrente dependem da relação que existe entre a carga do consumidor (IL) e a corrente de curto-circuito (Isc) no PCC. Um elevado Isc/IL significa que o sistema admiti níveis de distorção harmônica mais elevados (IEEE Std. 519, 2014).

Utiliza-se o indicador de distorção harmônica de demanda total (TDD) para analisar os limites de distorção harmônica de corrente. O Indicador TDD é a razão entre a raiz quadrada da média quadrática do conteúdo harmônico, considerando componentes harmônicas até a ordem 50 e excluindo especificamente inter-harmônicas, expressas como uma percentagem da corrente de máxima de demanda, expressa pela equação (15) (IEEE Std. 519, 2014).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} I_h}}{I_1} \times 100 \tag{15}$$

Os limites de distorção harmônica de corrente são apresentados na tabela 5.

Tabela 5 - Limites de distorção de corrente para sistemas de 120V a 69kV

Distorção harmônica máxima em percentagem da demanda máxima de corrente de carga (I_L)						
Ordem harmônica individual (harmônicos impares)						
I_{SC}/I_L	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h < 50$	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Fonte: (IEEE Std 519 – 2014)

Onde:

I_{SC} - é a corrente de fase do curto-circuito trifásico no PCC;

I_L - é a corrente máxima de demanda do consumidor calculada como a média das registradas nos últimos 12 meses;

2.3.3 EN 50160 - *Power Quality Standard*

A norma europeia EN 50160 define parâmetros de qualidade de energia no PCC, indicando os desvios permitidos. Relativamente aos harmônicos de tensão, durante o período de uma semana, 95% dos valores eficazes de cada harmônico de tensão (valores médios em cada 10 minutos), não devem ultrapassar os valores indicados na tabela (6) abaixo (EN 50160, 2004).

Tabela 6 – Valores de cada harmônico de tensão

Harmônicos ímpares				Harmônicos Pares	
Não múltiplos de 3		Múltiplos de 3			
Ordem	**% da tensão nominal**	**Ordem**	**% da tensão nominal**	**Ordem**	**% da tensão nominal**
5	6%	3	5%	2	2%
7	5%	9	1,5%	4	1%
11	3,5%	15	0,5%	6 até 24	0,5%
13	3%	21	0,5%		
17	2%				
19	1,5%				
23	1,5%				
25	1,5%				
DHTt < 8%					

Fonte: (EN 50160, 2004)

2.4.4 Norma IEC 61000-3-6 de Compatibilidade Eletromagnética

A norma IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 61000-3-6, 2008) da série 61000 da IEC (Comissão Eletrotécnica Internacional) estabelece os limites de emissão de harmônicos para as instalações conectadas a sistemas elétricos de potência. Para a tensão elétrica esta norma define (LEITE, 2013):

a) A Distorção Harmônica Total de Tensão ($\%THDV$). Calculada como a relação entre a tensão rms dos harmônicos superiores considerados e a tensão fundamental (V1), apresentado na equação (16) (IEC/TR, 61000-3-6, 2008).

$$\%THDV = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} V_h^2}}{V_1} \times 100 \tag{16}$$

b) A Distorção Harmônica Individual de tensão de ordem h ($\%IHDV_h$). Calculada como a relação entre a tensão de um harmônico individual (V_h) e a tensão fundamental de acordo com a equação (17) (IEC/TR, 61000-3-6, 2008).

$$\%IHDV_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \tag{17}$$

A referência (IEC/TR 61000-3-6, 2008) estabelece dois tipos de limites: (1) níveis de compatibilidade como é mostrado na Tabela 7 abaixo e (2) níveis de planejamento, como apresentado na Tabela 8. Quando as emissões de harmônicos das cargas não lineares não superam os níveis de compatibilidade estabelecidos, assegura-se uma boa qualidade de energia. Por outro lado, os níveis de planejamento (mais restritivos que os de compatibilidade) são seguidos como guias para o planejamento do sistema e os mesmos asseguram o cumprimento dos níveis de compatibilidade (IEC/TR, 61000-3-6, 2008).

Tabela 7 – Níveis de compatibilidade para as tensões harmônicas individuais em redes de baixa tensão (BT) e média tensão (MT)

Impares não múltiplas de 3		Impares múltiplas de 3		Pares	
Ordem de Harmônico h	**Tensão Harmônica %**	**Ordem de Harmônico h**	**Tensão Harmônica %**	**Ordem de Harmônico h**	**Tensão Harmônica %**
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1.5	4	1
11	3.5	15	0.4	6	0.5
13	3	21	0.3	8	0.5
17≤ h ≤49	2.27(17/h) - 0.27	21≤ h ≤ 45	0.2	10 ≤ h ≤ 50	0.25(10/h) + 0.25

Fonte: (IEC/TR, 61000-3-6, 2008)

Os limites de harmônicos de tensão são estabelecidos para evitar os efeitos nocivos dos harmônicos em regime permanente e em curto prazo que se define como:

a) Efeitos de regime permanente são relacionados fundamentalmente a efeitos térmicos em capacitores, cabos, transformadores, motores e outros, e são medidos em média a intervalo de 10 minutos (IEC/TR, 61000-3-6, 2008).

b) Efeitos a curto prazo que se manifestam em equipamentos eletrônicos sensíveis a níveis de harmônicos tendo como intervalo de interesse para registro a faixa de 3 segundos ou menos (IEC/TR, 61000-3-6, 2008).

O nível de compatibilidade do $THDV$ para média e baixa tensão é de 8% para harmônicos de regime permanente (intervalos de 10 minutos) e de 11% para harmônicos de curta duração (intervalos menores que 3 segundos) (IEC/TR, 61000-3-6, 2008).

Segundo (LEITE, 2013), os limites de compatibilidade da Tabela 7 e de planejamento da Tabela 8 para as tensões harmônicas individuais são válidos para harmônicos estacionários. Estes limites devem ser modificados pelo fator K_{hvs} para ser utilizados com harmônicos de curta duração conforme equação (18).

$$K_{hvs} = 1.3 + 0.7\frac{h-5}{45} \tag{18}$$

Tabela 8 – Níveis de planejamento para tensões harmônicas individuais em redes de média (MT), alta (AT) e extra alta tensão (EHT).

Impares não múltiplas de 3			**Impares múltiplas de 3**			**Pares**		
Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica h %		Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica h %		Ordem de Harmônico h	Tensão Harmônica h %	
	MT	AT-EHT		MT	AT-EHT		MT	AT-EHT
5	5	2	3	4	2	2	1.8	1.4
7	4	2	9	1.2	1	4	1	0.8
11	3	1.5	15	0.3	0.3	6	0.5	0.4
13	2.5	1.5	21	0.2	0.2	8	0.5	0.4
$17 \leq h \leq 49$	1.9(17/h) -0.2	1.2(17/h)	$21 \leq h \leq 45$	0.2	0.2	$10 \leq h \leq 50$	0.25(10/h) + 0.22	0.19(10/h) +0.16

Fonte: (IEC/TR 61000-3-6, 2008)

Segundo (LEITE, 2013), esta norma não estabelece explicitamente limites para a distorção da corrente no PCC, no entanto, a mesma contempla a possibilidade de converter os limites de distorção para a tensão em limites de distorção para a corrente ao utilizar a impedância em frequências harmônicas do sistema externo de energia.

CAPITULO 3

3 MATERIAIS E METODOLOGIA

Neste capitulo são apresentados os materiais e a metodologia utilizada para análise de distorções harmônicas em redes elétricas.

As análises de distorções harmônicas nos pontos selecionados foram realizadas através de campanhas de medições simultâneas em campo, pois com essa metodologia foi possível identificar a real condição dos pontos monitorados.

O equipamento utilizado para realizar as medições foi o Analisador de Qualidade de Energia HIOKI MODELO PW3198 e acessórios. Este equipamento é capaz de registrar potências ativas, reativas e aparentes, níveis de tensão, variações de tensão de curta duração, desequilíbrios de tensão, corrente elétrica, fator de potência, frequência da linha, distorções harmônicas totais e individuais de tensão e de corrente e espectro de frequência de distorções harmônicas de tensão e corrente.

Para a medição das correntes foi utilizado um sensor de corrente modelo HIOKI SENSOR 9695-03 de fabricação da HIOKI.

Para medições das tensões foi utilizado garras de conexão do tipo jacaré.

As medições ou instalações dos equipamentos foram realizadas com auxílio dos pontos dos secundários dos TCs e TPs nas cabines das subestações, permanecendo lá por um período mínimo de 7 dias de acordo com a PRODIST MODULO 8 - 2017/ANEEL.

Os procedimentos adotados tanto para a realização das medições como para as análises dos dados tiveram como base o módulo 8 do PRODIST, que trata das questões envolvendo a qualidade da energia elétrica.

Para o desenvolvimento desta pesquisa a metodologia adotada foi dividida nas seguintes fases:

a) Definição do local da pesquisa;
b) Escolha dos pontos de interesse a serem monitorados;
c) Como será realizado este trabalho;
d) Instrumento de coleta de dados;
e) Instalação dos equipamentos;
f) Retirada dos equipamentos;
g) Analise dos dados coletados da rede elétrica.

A metodologia de desenvolvimento desta pesquisa teve como base pesquisas em teses, dissertações, artigos de revistas.

Abaixo são descritas as fases para desenvolvimento desta pesquisa:

a) Definição do local da pesquisa;

Brasil – Amazonas – Manaus – Empresa Eletrobrás Distribuição Amazonas

b) Escolha dos pontos de interesse a serem monitorados;

A escolha dos pontos a serem monitorados consistiu em realizar a medição em alimentadores interligados em um ponto de acoplamento comum, com base em medições simultâneas em pontos da rede elétrica, para então quantificar qual o nível de distorção harmônica de tensão e corrente nesses pontos.

c) Como será realizada esta pesquisa;

Esta pesquisa será baseada em campanhas de medições sincronizadas realizadas em campo nos pontos selecionados do sistema de energia elétrica em estudo, através de um Analisador de qualidade de energia de THD devidamente calibrado, o qual irá medir os níveis de distorções harmônicas presentes no sinal.

Duração da medição: 7 dias

- Intervalos de cada medição: a cada 10 minuto.

d) Instrumentos para realização das medições em campo;

O instrumento utilizado para a realização das medições em campo, foi o Analisador de Qualidade de Energia HIOKI PW3198 devidamente calibrado, direcionado somente para efetuar este tipo de medição. Outro instrumento utilizado foi a organização das medições a serem realizadas, pois para a coleta das medições, as mesmas foram planejadas e realizadas em condições controladas para aos propósitos estabelecidos.

e) Instalação dos equipamentos;

Os analisadores de qualidade de energia foram instalados na cabine da subestação de média tensão utilizando se os secundários dos TCs e TPs. O analisador de qualidade de energia permaneceu instalado por um período mínimo de 7 dias, de acordo com o Prodist modulo8/ANEEL. Na figura (5) abaixo é mostrado a maneira que o Analisador de Qualidade de Energia PW3198 é instalado.

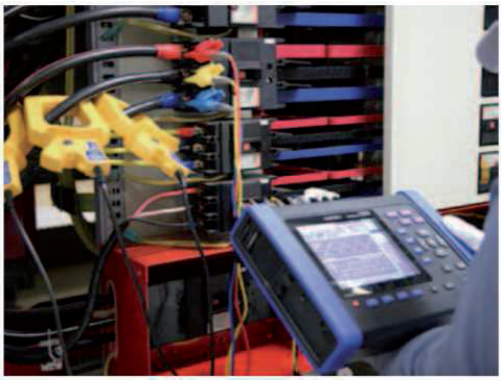


Figura 5 – Instalação do Analisador de Qualidade de Energia HIOKI PW3198

f) Retirada dos equipamentos;

A retirada dos equipamentos sempre foi realizada no oitavo dia de monitoração, para então o analisador de qualidade de energia monitorar por 7 (sete) dias completos e no mínimo até a 25^0 ordem harmônica de acordo com o Prodist modulo 8 /ANEEl.

Teve se o cuidado na coleta e manipulação dos arquivos de medição gerados pelo o analisador de qualidade de energia, para garantir uma medição valida, e uma análise correta.

Após a retirada dos equipamentos, foi coletado os arquivos de medição gerados pelo o Analisador de qualidade de energia e realização das análises dos parâmetros medidos de acordo com o Prodist modulo 8/ANEEL.

g) Analise dos dados coletados da rede elétrica

As análises dos dados coletados foram realizadas respeitando os limites para distorções harmônicas totais e individuais descritas nas normas IEEE Std. 519-2014, EN 50160 e a IEC 61000-3-6 (IEC/TR, 2008-02) e Prodist (modulo 8, 2017).

No próximo capitulo será descrito os resultados das análises realizadas.

3.1 ANALISADOR DE QUALIDADE DE ENERGIA HIOKI PW 3198

O analisador de qualidade de energia PW3198 é um instrumento analítico para monitoração e gravação de anomalias no fornecimento de energia elétrica, permitindo investigar rapidamente as causas. Este instrumento pode ser utilizado para avaliar problemas no fornecimento de energia elétrica como: queda de tensão, flutuações, harmônicos, etc.

O analisador de qualidade de energia PW3198 possui as seguintes características:

a) Está em conformidade com CAT IV 600V;
b) Medição de tensaõ de alta precisão. Exatidão de 0,1% na leitura;
c) Está em conformidade com a norma IEC 61000-4-30 Classe A;
d) A funcionalidade de ajuste rápido assegura que não se pederá a incidência de nenhum fenômeno anormal;
e) Ampla seleção de sensores de corrente;
d) Capacidade disponível para utilização com sinais de corrente de fuga até 5000 A;
f) Medi componentes harmônicos em alta qualidade apartir de 2Khz até 80Khz;
g) Capacidade para medir todos os parametros necessários para analise de qualidade de energia;
h) Medição de transitorios de tensão para uma tensão de 6000V apartir de 5Khz até 700Khz;
i) Suporte para linhas de 400KHz;
j) Medições simultâneas de 3 canais de flicker;
k) Fácil comunicação com computador, via USB ou LAN;
l) Armazenamento de dados em cartão de memoria SD.

O analisador de qualidade de energia PW3198 é mostrado na figura (6) abaixo:

Figura 6 – Analisador de Qualidade de Energia PW3198: elaboração do autor

As especificações do Analisador de qualidade de energia PW3198 são as seguintes:

a) Classe A de acordo com a IEC 61000-4-30;
b) Medição de sobretensão transitória de alta frequência de no máximo 6 kv pico com taxa de amostragem de no mínimo 1MHz;
c) Medição e registro de tensão e corrente harmônicas e interharmônicas de acordo com a IEC 610004-7 e com taxa de amostragem mínima de 256 amostras/ciclo;
d) Medição e registro dos ângulos de fase da tensão e corrente harmônicas e interharmônicas;
e) Medição das potências harmônicas e fator de potência;
f) Medição de flicker de acordo com a IEC 61000-4-15;
g) Medição da corrente de inrush;
h) Medição de sags, swells e interrupções;
i) Memória de massa de no mínimo 2 GB;
j) Três sensores de corrente na faixa (aproximada): 1A à 100 A;
k) Três sensores flexíveis de corrente na faixa: 200 A à 5000 A.

3.2 SENSOR DE CORRENTE HIOKI 9695 – 03

O sensor 9695-03 é de tensão de saída, e 100 A de medição AC . Os sensor 9695-03 foi projetado para medir correntes alternadas em um condutor sem desligá-lo a partir da linha de energia, com o auxilio de TCs e TPs. Este sensor é fácil de operar e adequado para a medição de corrente elétrica e de energia em vários campos.

As especificações deste sensor são as seguintes:

a) Corrente primária: 100 A AC;
b) Tensão de saída : 1 mV AC / A;
c) Precisão de amplitude: 100 A, 45Hz a 66Hz, no centro do núcleo;
d) Exatidão Fase: ± 1 ° (45 Hz a 5 kHz);
e) Características de amplitude de freqüência: ± 1% a 40 Hz a 5 kHz (desvio de precisão);
f) Efeito da posição do condutor: ± 0,5% (desvio do centro);
g) Efeito de eletromagnetismo externo: 0,1 - equivalente ou inferior (em um campo electromagnético de CA de 400 A / m);
h) Máxima corrente admissível: 130 A contínuo (a 45 a 66 Hz, a temperatura ambiente de 50 ° C);
i) Coeficiente Temperatura:. 0,02% leitura / ° C;

j) Rigidez dielétrica: 3536 V ACrms para 15 segundos (entre Circuito elétrico e núcleo);

k) Tensão nominal máxima para a Terra: 300 V ACrms ou inferior (condutor isolado);

l) Umidade e temperatura de funcionamento: 0 a 50 ° C (32 a 122 ° F), 80% RH ou menos (sem condensação);

m) Temperatura e humidade de armazenamento : -10 a 60 ° C (14 a 140 ° F), 80% de HR ou inferior (sem condensação);

n) Ambiente operacional: Interior, até 2000 m (6562- pés) ASL.

Este sensor é um acessorio do Analisador de Qualidade de Energia Elétrica PW3198 O sensor 9695-03 é mostrado na figua (7) abaixo:

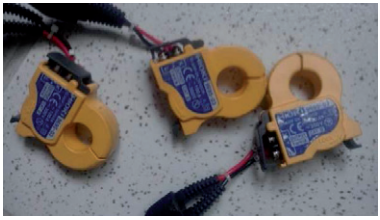


Figura 7 – Sensor de corrente 9695 -03: elaboração do autor

Na figura (8) abaixo são descritas as partes do sensor:

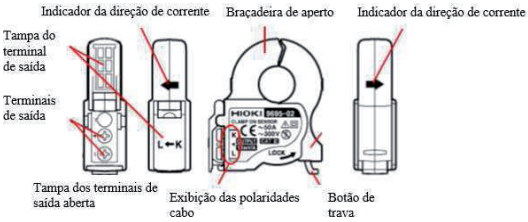


Figura 8 – Descrição das partes do sendor: manual sensor 9695-03

Este produto está em conformidade com os requisitos de segurança para CAT III produtos de medição. Para garantir a operação segura de produtos de medição, IEC 61010

estabelece normas de segurança para diversos ambientes elétricos, classificados como CAT I a CAT IV, e chamou categorias de medição. Estes são definidos como segue.

CAT I: circuitos elétricos secundários, ligados a uma tomada elétrica AC através de um transformador ou dispositivo similar.

CAT II: circuitos primários elétricos em equipamentos conectados a uma tomada elétrica AC por um cabo de alimentação (ferramentas portáteis, eletrodomésticos, etc.)

CAT III: circuitos primários elétricos de equipamentos pesados (instalações fixas), ligados diretamente ao painel de distribuição, e alimentadores do painel de distribuição aos pontos de venda.

CAT IV: O circuito a partir da saida de serviço para a entrada de serviço, e para o medidor de energia e dispositivo de proteção de sobrecorrente primário (painel de distribuição). Categorias de número mais alto correspondem aos ambientes eléctricos com maior energia momentânea, portanto, um produto de medição projetado para ambientes CAT III pode suportar maior energia momentânea de um projetado para CAT II. Usar um produto de medição em um ambiente designado com uma categoria de número maior do que aquele para o qual o produto é classificado poderia resultar em um acidente grave, e deve ser cuidadosamente evitado.

Nunca use um CAT I para medir produto em ambientes CAT II, CAT III, CAT IV.

As categorias de medição estão conformes com as categorias de sobretensão das Normas IEC60664.

Para melhor compreensão das normas ver figua (9) abaixo.

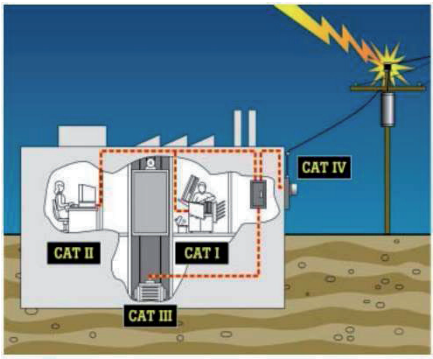


Figura 9 – Identificação das CATs:Vórtex Equipamentos

3.3 MEDIÇÃO DE TENSÃO

Para a medição de tensão foi utilizado garras de tensão do tipo jacaré. Estas garras são acessórios do Analisador de Qualidade de Energia Elétrica PW3198.

As garras coloridas são garras de fases e as garras pretas são garras de neutro. Ver figura (10) abaixo.

Figura 10 – Garra de tensão do tipo alicate: elaboração do autor

3.4 FERRAMENTA DE SOFTWARE UTILIZADA

3.4.1 PQA-HiView Pro 9624-50

O PQA-HiView Pro 9624-50 é uma aplicação de software para análise de dados de medição em formato binário do Hioki PW3198, 3196 e 3197 para análise de qualidade de energia em um computador.

O PQA-HiView Pro 9624-50 pode carregar e ler apenas os dados binários gravados com a Hioki PW3198, 3196 e 3197.

O PQA-HiView Pro 9624-50 oferece as seguintes funções mostradas na figura (11) abaixo:

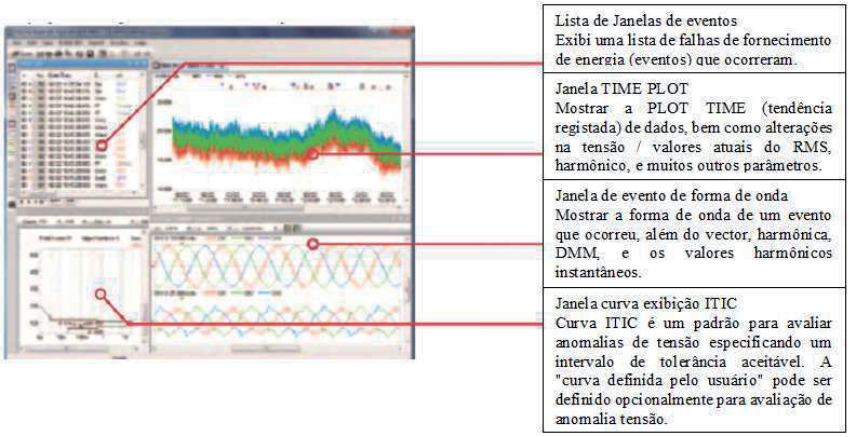


Figura 11 – Tela de análise do software PQA-HiView Pro 9624-50: manual PQA-HiView Pro 9624-50

Outras funções:

Conversão de dados de medição em CSV: converte os dados no intervalo especificado na janela PLOT TEMPO em formato CSV e, em seguida, salvar para posterior processamento. O 9624-50 também pode converter formas de onda de eventos em formato CSV. Dados abertos CSV usando qualquer software de planilha disponível no mercado para a gestão avançada de dados e análise.

A coleta de dados dos arquivos de medição é realizada passo a passo, da seguinte forma:

Após a desinstalação dos equipamentos, segue o passo a passo:

Passo 1: retirar o cartão SD com os arquivos medições e transferir para o PC, para serem processados utilizando o software PQA-HiView Pro 9624-50. Ver figura (12) abaixo.

Figura 12 – Transferência dos arquivos de medição para o PC: manual PQA-HiView Pro 9624-50

Passso 2: No menu software PQA-HiView Pro 9624-50, click em open, para abrir o arquivo de medição, indicado na figura (13) abaixo.

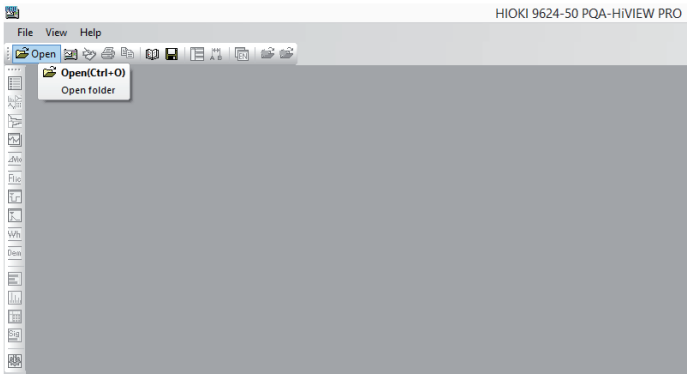


Figura 13 – Tela inicial do software PQA-HiView Pro 9624-50: manual PQA-HiView Pro 9624-50

Passo 3: Selecione o arquivo de medição, como indicado na figura (14) abaixo e click em OK.

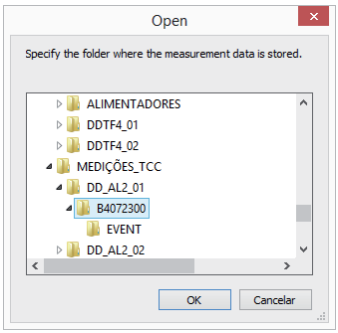


Figura 14 selecionando o arquivo de medição

Passo 4: Realizar as análises dos arquivos de medição, na janela de análise do software PQA-HiView Pro 9624-50. Ver figura (15) abaixo.

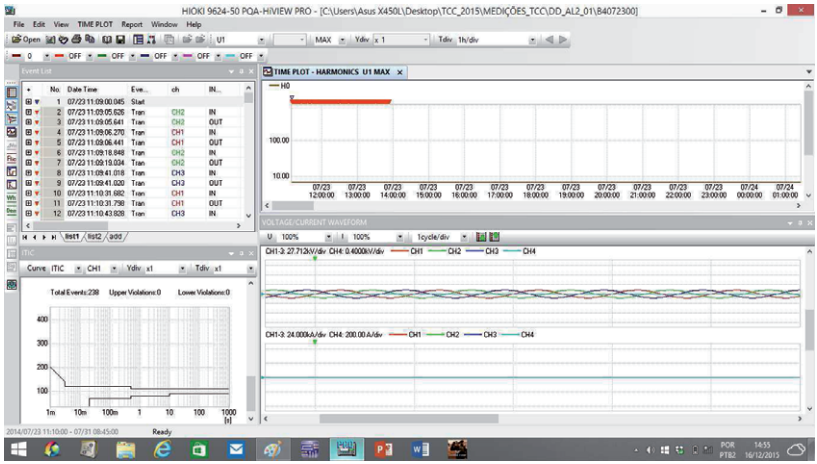


Figura 15 - Janela de análise do software PQA-HiView Pro 9624-50: manual PQA-HiView Pro 9624-50

CAPITULO 4

4 ANÁLISE DE DISTORÇÕES HARMONICAS EM REDES ELÉTRICA DE MÉDIA TENSÃO: ESTUDO DE CASO DE UM BARRAMENTO DO SISTEMA ELÉTRICO DA EMPRESA ELETROBRAS DISTRIBUIÇÃO AMAZONAS

Neste capitulo será aplicada a metodologia na análise de distorções harmônicas em redes elétricas.

4.1 ANALISE DOS DADOS COLETADOS DA REDE ELÉTRICA

As analises foram realizadas com medições coletadas no período de 24 de julho de 2014 à 30 de julho de 2014. Neste período realizou-se uma campanha de medição na subestação distrito 2 (SE DD) da empresa Eletrobrás Distribuição Amazonas, no qual instalaram-se 5 analisadores de qualidade da energia PW 3198 da HIOKI para a realização de medições simultâneas, nos seguintes pontos de medição: transformadores DDTF4-01 e DDTF4-02; e alimentadores DDAL2-01, DDAL2-02 e DDAL2-03. O anexo A mostra o diagrama unifilar da subestação Distrito 2 e a localização dos pontos de instalação dos analisadores de qualidade da energia (pontos com círculo em vermelho), para esta campanha de medição, totalizando 5 pontos de medição simultânea.

4.1.1 Análise das Medições Coletadas no Alimentador DDAL2-01

Analisando os registros da Figura (16) abaixo, que ilustram os perfis das tensões nas fases A, B e C do alimentador DDAL2-01 (13,8 kV) num período de 07 dias (24/07/2014 a 30/07/2014), verificou-se que o valor da tensão RMS violou o nível adequado (0,93 TR ≤TL ≤1,05 TR), conforme estabelecidos no módulo 8 do PRODIST, atingindo um valor igual a 1,0673 pu na fase A; 1,0629 pu na fase B; e 1,0624 pu na fase C. A Tabela (9) contém os valores máximos, mínimos e médios de tensões registrados neste período.

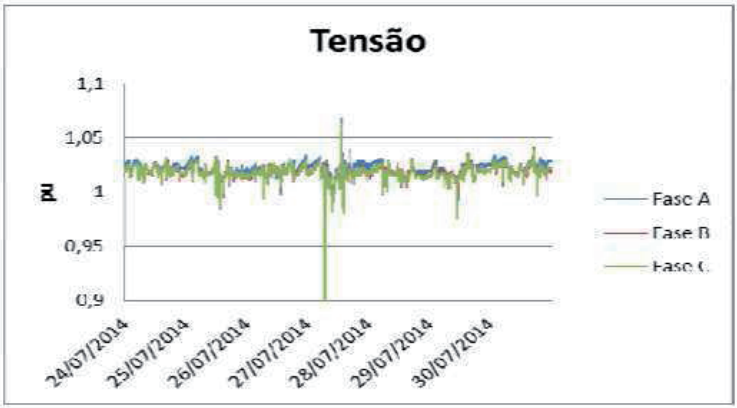


Figura 16 - Tensão RMS medida no alimentador DDAL2-01

De acordo com a Tabela (9), o valor mínimo atingido pela tensão na fase C é de 0,5548 pu, o qual caracteriza um afundamento de tensão. Afundamento de tensão é uma variação rápida do valor RMS da tensão, usualmente de 0,5 a 30 ciclos, sendo que o valor RMS da tensão pode variar entre 0,1 pu - 0,9 pu. As consequências para cargas sensíveis pode ser a parada de processos críticos, acarretando prejuízos significativos para os consumidores.

Tabela 9 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no alimentador DDAL2-01

	Valores Mínimos (pu)	Valores Máximos (pu)	Valores Médios (pu)
Fase A	0,9922	1,0673	1,0215
Fase B	0,9975	1,0629	1,0188
Fase B	0,5548	1,0624	1,0184

De acordo com a análise acima do alimentador DDAL2-01, faz-se necessário investigar o que ocasionou as sobretensões nas fases A, B, C e o afundamento na fase C.

Analisando a figura (17), que mostra a taxa de distorção harmônica total de tensão das três fases do alimentador DDAL2-01 (13,8 KV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observou-se que os valores de DHT de tensão atingiu um valor máximo igual a 7,17% na fase A, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pelo módulo 8 do PRODIST, que é de 8 % para esse nível de tensão. A Tabela

(10) contém os valores máximos, mínimos e médios de distorções harmônicas totais de tensão registrados neste período.

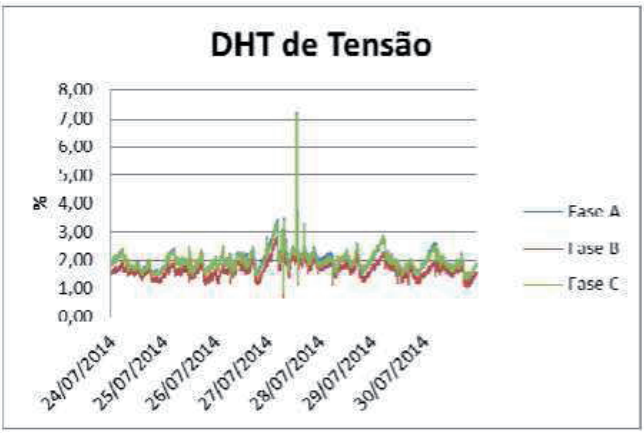


Figura 17 - Taxa de distorção harmônica total de tensão medida no alimentador DDAL2-01

Tabela 10 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no alimentador DDAL2-01

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	1,21	7,17	2,00
Fase B	0,73	3,30	1,69
Fase B	0,91	7,15	1,98

A Figura (18) apresenta um ciclo semanal do consumo do conjunto de cargas que são alimentadas pela linha DDAL2-01. De acordo com essa figura, verificou-se que os dias de semana apresentaram padrões de consumo similares, atingindo valores máximos iguais a 275A na fase A, 274A na fase B e 270A na fase C. Durante os dias domingo (27/07/2014) e segunda (28/07/2014) o registro das medidas sinaliza que ocorreu uma redução drástica de consumo, representado na Figura (18) por valores de corrente praticamente nulas para a classe de medição da garra de corrente aqui utilizada. A Tabela (11) contém os valores máximos, mínimos e médios de corrente registrados neste período. Observa-se, na Tabela (11) que os valores mínimos para as correntes nas fases A-B-C foram registrados como sendo zero. No entanto, verifica-se na Figura (19), que as taxas de distorção de corrente DHT_I não é nula para este intervalo de medição, o que confirma que essas correntes não são nulas, mas sim

apresentam valores muito baixo, o que se reflete em taxas de distorção harmônica mais elevadas.

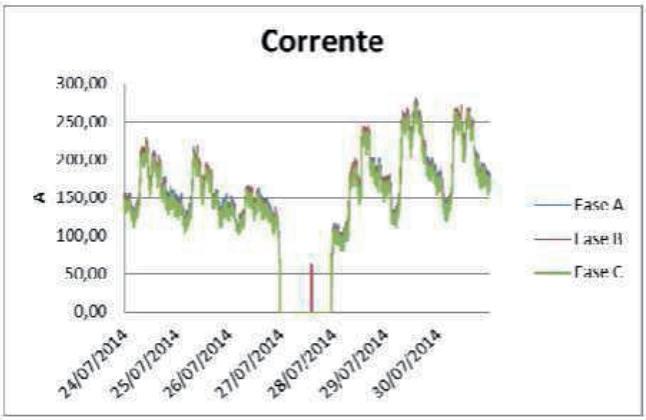


Figura 18 - Corrente RMS medida no alimentador DDAL2-01

Tabela 11 - Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no alimentador DDAL2-01

	Valores Mínimos (A)	Valores Máximos (A)	Valores Médios (A)
Fase A	0,0	275,0	146,43
Fase B	0,0	274,0	144,08
Fase B	0,0	273,0	140,73

Analisando a Figura (19) abaixo, que mostra a taxa de distorção harmônica total de corrente (DHT_I) das três fases do alimentador DDAL-01 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observou-se que os valores de DHT de corrente foram maiores em alguns momentos do dia 27/07/2014 (domingo) e 28/07/2014 (segunda-feira), alcançando um valor máximo igual a 16,99% na fase A, 20,96% na fase B e 20,89 na fase C. Nos demais momentos, a distorção de corrente apresentou valores razoáveis, ficando na maioria das vezes abaixo de 4%, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pela norma IEEE Std. - 519-2014, que é de 5% % para a relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ = 10. A Tabela (12) abaixo contém os valores máximos, mínimos e médios das distorções harmônicas totais de corrente, registrados neste período.

A distorção harmônica de corrente nos dias 27/07/2014 e 28/07/2014 mostrada na figura (19) é devido a redução da corrente fundamental, pois a distorção harmônica de

corrente é inversamente proporcional a corrente fundamental, considerando assim para diagnóstico os valores médios medidos mostrado na tabela (12), pois a distorção harmônica é um fenômeno de regime permanente.

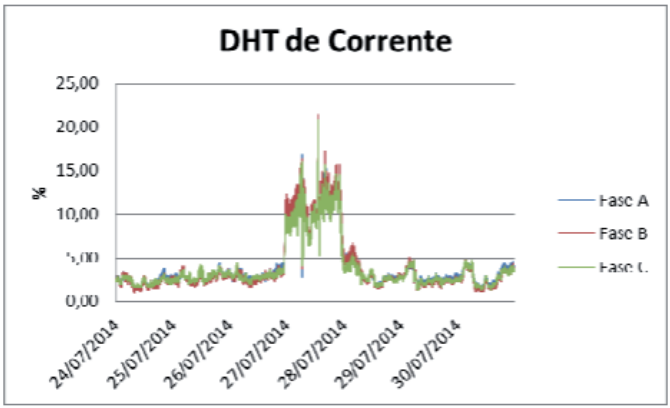


Figura 19 Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no alimentador DDAL2-01

Tabela 12 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no alimentador DDAL2-01

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	2,52	16,99	4,06
Fase B	1,37	20,96	3,97
Fase B	1,86	20,89	3,86

4.1.2 Análise das Medições Coletadas no Alimentador DDAL2-02

Analisando os registros da Figura (20) abaixo, que ilustram os perfis da tensão nas fases A, B e C do alimentador DDAL2-02 (13,8 kV) num período de 07 dias (24/07/2014 a 30/07/2014), verificou-se que o valor da tensão rms violou o limite superior do intervalo considerado de tensão adequada (0,93 TR <TL <1,05 TR), conforme estabelecido no módulo 8 do PRODIST, atingindo um valor igual a 1,0655pu na fase A; 1,0615pu na fase B; e 1,0601pu na fase C. A Tabela (13) contém os valores máximos, mínimos e médios de tensões registrados neste período. Analisando esses valores, verifica-se que também neste circuito

ocorreram afundamentos de tensão, sendo a ocorrência registrada nas três fases, com as tensões atingindo os valores mínimos de: Fase A = 0,6055; Fase B = 0,588; Fase C = 0,6931.

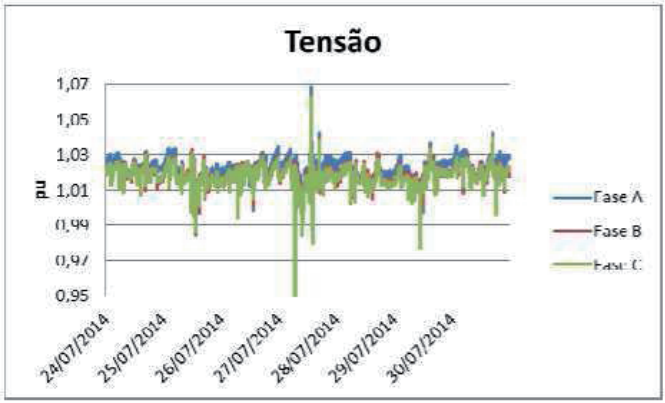


Figura 20 - Tensão RMS medida no alimentador DDAL2-02

Tabela 13 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no alimentador DDAL2-01

	Valores Mínimos (pu)	Valores Máximos (pu)	Valores Médios (pu)
Fase A	0,6055	1,0655	1,0219
Fase B	0,5881	1,0615	1,0187
Fase B	0,6931	1,0601	1,0180

De acordo com a análise acima do alimentador DDAL2-02, faz-se necessário investigar o que ocasionou as sobretensões e os afundamentos nas fases A, B, C.

Analisando a Figura (21) abaixo, que mostra a taxa de distorção harmônica total de tensão (DHT_V) das três fases do alimentador DDAL2-02 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observou-se que os valores de DHT de tensão atingiu um valor máximo igual a 7,13% na fase A, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pelo módulo 8 do PRODIST, que é de 8 % para esse nível de tensão. A Tabela (14) contém os valores máximos, mínimos e médios de distorções harmônicas totais de tensão registrados neste período.

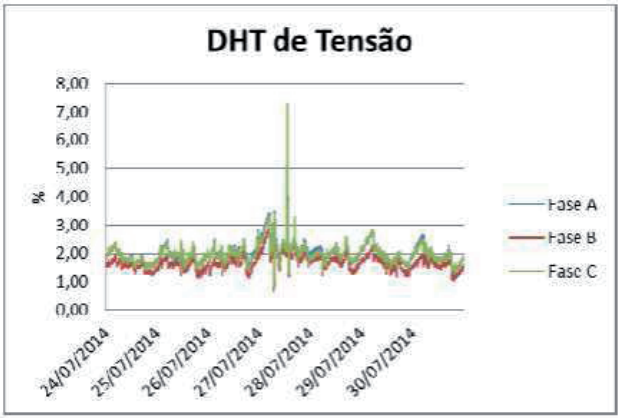


Figura 21 - Taxa de distorção harmônica de tensão medida no alimentador DDAL2-02

Tabela 14 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no alimentador DDAL2-02

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	1,15	7,13	2,00
Fase B	0,86	6,47	1,69
Fase B	1,06	7,03	1,99

A Figura (22) abaixo apresenta um ciclo semanal do consumo de cargas que são alimentadas pela linha DDAL2-02. De acordo com essa figura, verificou-se que os dias de semana apresentaram padrões de consumo similares, atingindo valores máximos iguais a 161,8A na fase A, 161,50A na fase B e 158,60A na fase C. Também ocorreu uma redução típica de fim de semana, no consumo, no sábado e domingo. A Tabela (15) contém os valores máximos, mínimos e médios de corrente, registrados neste período.

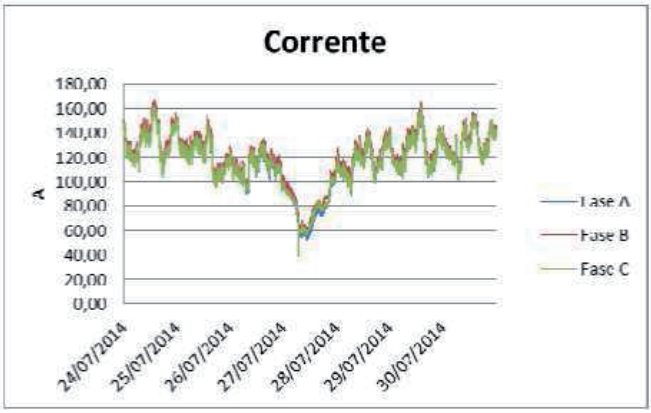


Figura 22 - Corrente RMS medida no alimentador DDAL2-02

Tabela 15 – Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no alimentador DDAL2-02

	Valores Mínimos (A)	Valores Máximos (A)	Valores Médios (A)
Fase A	42,90	161,8	116,76
Fase B	45,30	161,50	120,38
Fase B	44,10	158,60	116,82

Analisando a Figura (23) abaixo, que mostra a taxa de distorção harmônica total de corrente (DHT_I) das três fases do alimentador DDAL2-02 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observou-se que os valores de DHT de corrente foram maiores em alguns momentos do dia 27/07/2014 (domingo) e 28/07/2014 (segunda-feira), alcançando um valor máximo igual a 13,02% na fase A, 11,42% na fase B e 11,06% na fase C. Nos demais momentos, a distorção de corrente apresentou valores razoáveis, ficando na maioria das vezes abaixo de 5%, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pela norma IEEE Std. - 519-2014, que é de 5% % para a relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ = 10. A Tabela (16) contém os valores máximos, mínimos e médios das distorções harmônicas totais de corrente, registrados neste período.

A distorção harmônica de corrente nos dias 27/07/2014 e 28/07/2014 mostrada na figura (23) é devido a redução da corrente fundamental, pois a distorção harmônica de corrente é inversamente proporcional a corrente fundamental, considerando assim para diagnóstico os valores médios medidos mostrado na tabela (16), pois a distorção harmônica é um fenômeno de regime permanente.

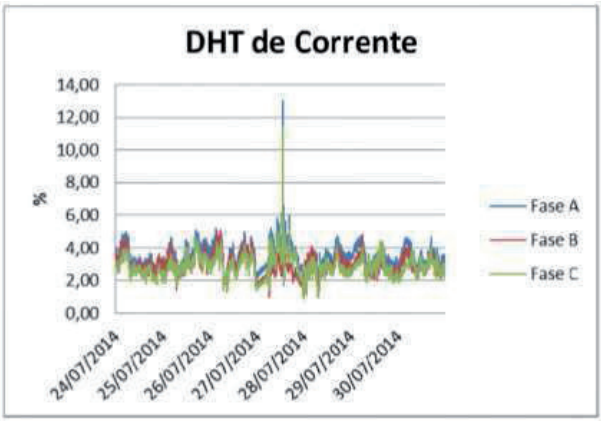


Figura 23 - Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no alimentador DDAL2-02

Tabela 16 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no alimentador DDAL2-02

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	1,21	13,02	3,50
Fase B	1,03	11,42	2,90
Fase B	1,04	11,06	2,88

4.1.3 Análise das Medições Coletadas no Alimentador DDAL2-03

Analisando os registros da Figura (24), que ilustram os perfis da tensão nas fases A, B e C do alimentador DDAL2-03 (13,8 kV) num período de 07 dias (24/07/2014 a 30/07/2014), verificou-se que o valor da tensão RMS violou o nível adequado (0,93 TR <TL <1,05 TR), conforme estabelecidos no módulo 8 do PRODIST, atingindo um valor igual a 1,0654pu na fase A e 1,0605pu na fase C. A Tabela (17) contém os valores máximos, mínimos e médios de tensões registrados neste período. Observa-se, pelos valores mínimos informados, que também ocorreram afundamentos de tensão nas fases A (0,6057 pu) e C (0,5935 pu) deste alimentador.

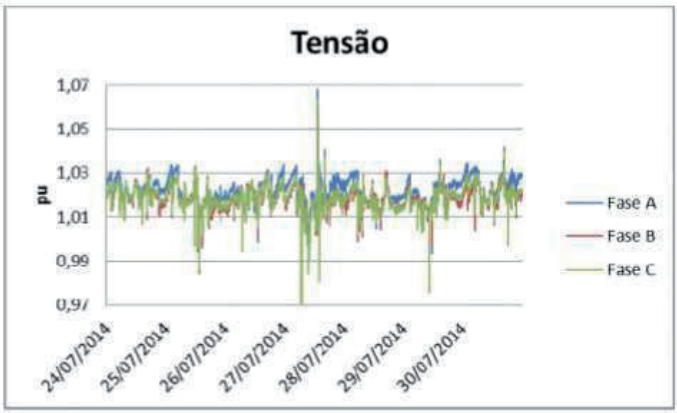


Figura 24 - Tensão RMS medida no lado de baixa tensão do alimentador DDAL2-03

Tabela 17 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no alimentador DDAL2-03

	Valores Mínimos (pu)	Valores Máximos (pu)	Valores Médios (pu)
Fase A	0,6057	1,0654	1,0218
Fase B	0,9863	1,0375	1,0184
Fase B	0,5935	1,0605	1,0185

De acordo com a análise acima do alimentador DDAL2-03, faz-se necessário investigar o que ocasionou as sobretensões e os afundamentos nas fases A, C.

Analisando a Figura (25), que mostra a taxa de distorção harmônica total de tensão (DHT_V) das três fases da linha DDAL2-03 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observou-se que os valores de DHT de tensão atingiu um valor máximo igual a 7,16 % na fase A, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pelo módulo 8 do PRODIST, que é de 8 % para esse nível de tensão. A Tabela (18) contém os valores máximos, mínimos e médios de distorções harmônicas totais de tensão registrados neste período.

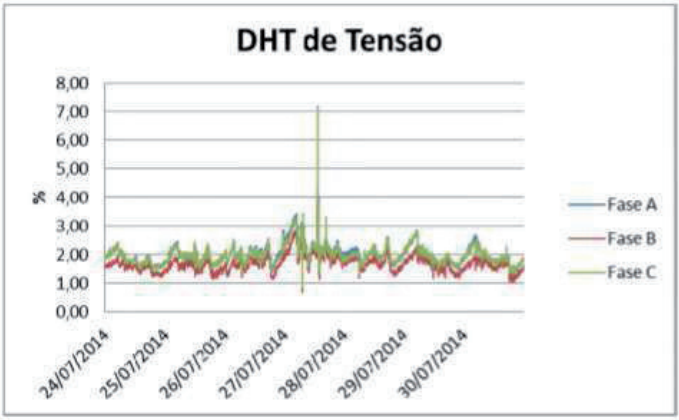


Figura 25 - Taxa de distorção harmônica total de tensão medida no alimentador DDAL2-03

Tabela 18 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no alimentador DDAL3-03

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	1,08	7,16	1,95
Fase B	0,79	6,37	1,66
Fase B	0,96	7,11	1,99

A Figura (26) abaixo, apresenta um ciclo semanal do consumo do conjunto de cargas que são alimentadas pela linha DDAL2-03. De acordo com essa figura, verificou-se que os dias de semana apresentaram padrões de consumo similares, atingindo valores máximos iguais a 93,30A na fase A, 99,30A na fase B e 98,80A na fase C. Durante o período do final de semana ocorreu uma redução no consumo, o que é normalmente esperado em fins de semana. A Tabela (19) contém os valores máximos, mínimos e médios de corrente registrados neste período.

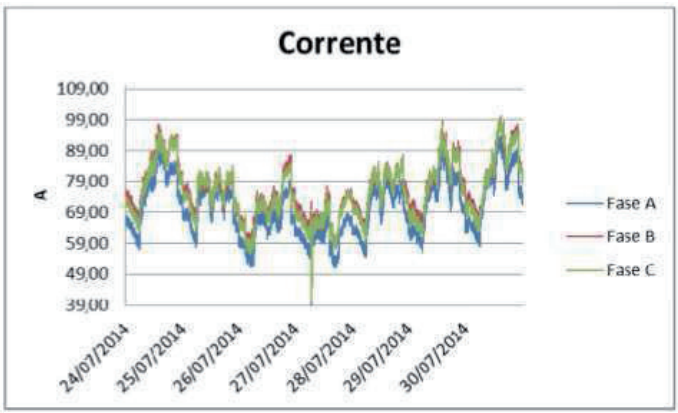


Figura 26 - Corrente RMS medida no alimentador DDAL2-03

Tabela 19 – Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no alimentador DDAL2-03

	Valores Mínimos (A)	Valores Máximos (A)	Valores Médios (A)
Fase A	39,10	93,30	70,48
Fase B	42,70	99,30	76,54
Fase B	40,30	98,80	75,60

Analisando a Figura (27) abaixo, que mostra a taxa de distorção harmônica total de corrente (DHT_I) das três fases do alimentador DDAL2-03 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observou-se que os valores de DHT de corrente foram maiores em alguns momentos no dia 27/07/2014 (domingo) e 28/07/2014, alcançando um valor máximo igual a 7,79% na fase A, 7,36% na fase B e 7,77% na fase C. Nos demais momentos, a distorção de corrente apresentou valores razoáveis, ficando na maioria das vezes abaixo de 5%, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pela norma

IEEE Std. - 519-2014, que é de 5% % para a relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ = 10. A Tabela (20) abaixo contém os valores máximos, mínimos e médios das distorções harmônicas totais de corrente, registrados neste período.

As distorções harmônicas de corrente nos dias 27/07/2014 e 28/07/2014 mostrada na figura (27) são devido à redução da corrente fundamental, pois a distorção harmônica de corrente é inversamente proporcional a corrente fundamental, considerando assim para diagnóstico os valores médios medidos mostrados na tabela (20), pois a distorção harmônica é um fenômeno de regime permanente.

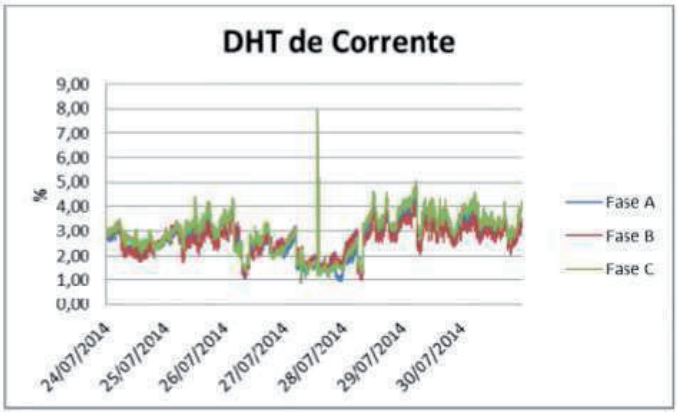


Figura 27 - Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no alimentador DDAL2-03

Tabela 20 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no alimentador DDAL2-03

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	1,15	7,79	2,75
Fase B	1,12	7,36	2,65
Fase B	1,24	7,77	2,96

4.1.4 Análise das Medições Coletadas no Lado de Baixa Tensão do Transformador DDTF4- 01

Analisando os registros da Figura (28) abaixo, que ilustram os perfis das tensões nas fases A, B e C do transformador DDTF4-01 (13,8 kV) num período de 07 dias (24/07/2014 à 30/07/2014), verificou-se que o valor da tensão rms violou os limites inferior e superior do nível adequado (0,93 TR <TL <1,05 TR), conforme estabelecidos no módulo 8 do PRODIST, atingindo sobretensões de 1,0658pu na fase A; 1,0608pu na fase B e 1,0604pu na fase C. As fases A e C apresentaram afundamentos de tensão respectivamente de 0,5701pu e 0,5546 pu, fato este que pode criar problemas sérios para consumidores com cargas sensíveis. A Tabela (21) contém os valores máximos, mínimos e médios de tensões registrados neste período.

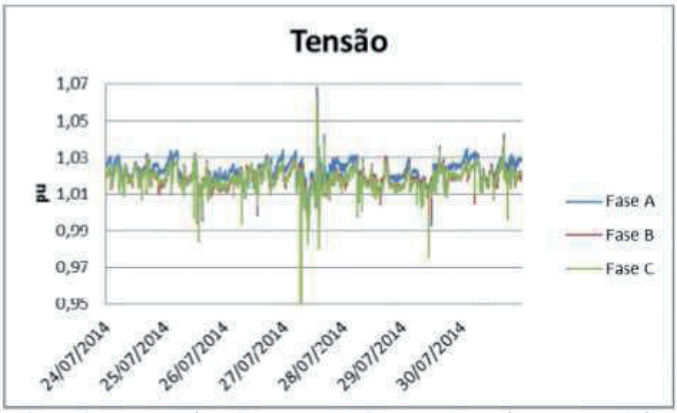


Figura 28 - Tensão RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01

Tabela 21 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01

	Valores Mínimos (pu)	Valores Máximos (pu)	Valores Médios (pu)
Fase A	0,5701	1,0658	1,0221
Fase B	0,9533	1,0608	1,0185
Fase B	0,5546	1,0604	1,0181

De acordo com a análise acima do transformador DDTF4-01, faz-se necessário investigar o que ocasionou as sobretensões nas fases A, B, C e os afundamentos nas fases A e C.

Analisando a Figura (29) abaixo, que mostra a taxa de distorção harmônica total de tensão (DHT_V) das três fases do transformador DDTF4-01 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observou-se que os valores de DHT de tensão atingiram um valor máximo igual 7,09% na fase A, 6,44% na fase B e 7,05% na fase C, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pelo módulo 8 do PRODIST, que é de 8 % para esse nível de tensão. A Tabela (22) abaixo contém os valores máximos, mínimos e médios de distorções harmônicas totais de tensão registrados neste período.

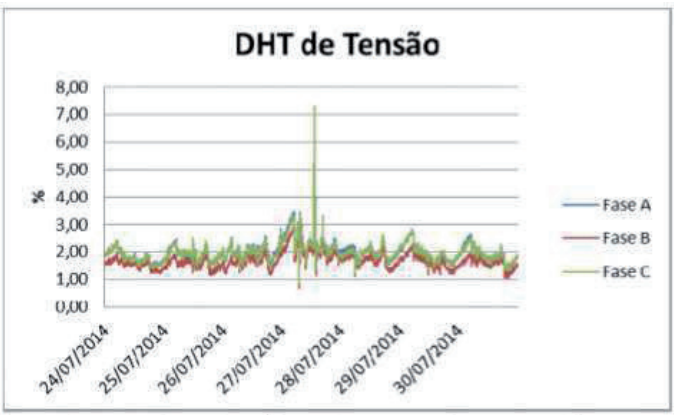


Figura 29 - Taxa de distorção harmônica total de tensão medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01

Tabela 22 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF-01

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	1,06	7,09	2,00
Fase B	0,81	6,44	1,69
Fase B	1,07	7,05	1,98

A Figura (30) abaixo apresenta um ciclo semanal de cargas que são alimentadas pela linha DDTF4-01. De acordo com essa figura, verificou-se um bom equilíbrio no carregamento das três fases, apresentando comportamentos sobrepostos. O máximo valor de corrente registrado no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01 durante o período

considerado foi igual a 709A na fase A, 708A na fase B e 703A na fase C. A Tabela (23) contém os valores máximos, mínimos e médios de correntes registrados neste período.

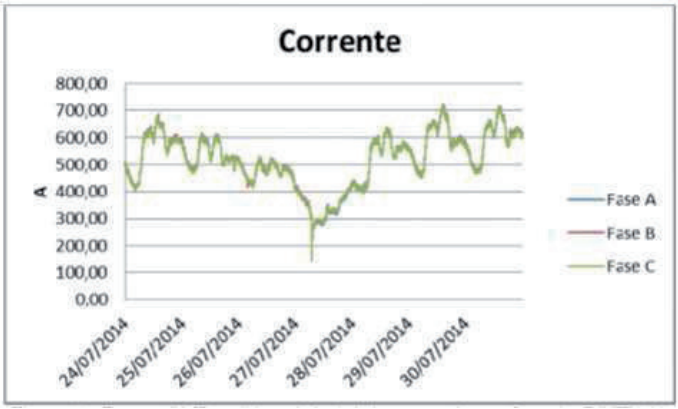


Figura 30 - Corrente RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01

Tabela 23 – Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01

	Valores Mínimos (A)	Valores Máximos (A)	Valores Médios (A)
Fase A	160,0	709,0	519,0
Fase B	162,0	708,0	519,0
Fase B	166,0	703,0	517,0

Analisando a Figura (31) abaixo, que mostra a taxa de distorção harmônica total de corrente (DHT_I) das três fases do transformador DDTF4-01 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observa-se que os valores de DHT de corrente se encontram em níveis baixos na maior parte do período de medição, ultrapassando em poucos instantes, valores acima de 20%, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pela norma IEEE Std. - 519-2014, que é de 5% % para a relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ = 10. A Tabela (24) abaixo contém os valores máximos, mínimos e médios das distorções harmônicas totais de corrente registrados neste período.

A distorção harmônica de corrente nos dias 27/07/2014 e 28/07/2014 mostrada na figura (31) é devido a redução da corrente fundamental, pois a distorção harmônica de corrente é inversamente proporcional a corrente fundamental, considerando assim para

diagnóstico os valores médios medidos mostrado na tabela (24), pois a distorção harmônica é um fenômeno de regime permanente.

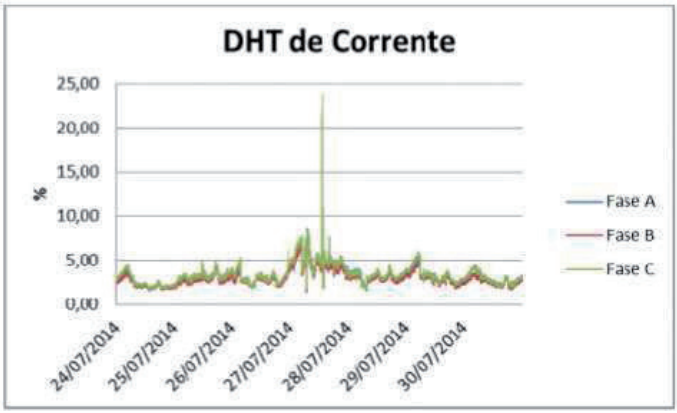


Figura 31 - Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF$-01

Tabela 24 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-01

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	1,46	23,82	3,22
Fase B	1,45	21,38	3,01
Fase B	2,26	23,80	3,39

4.1.5 Análise das Medições Coletadas no Lado de Baixa Tensão do Transformador DDTF4- 02

Analisando os registros da Figura (32) abaixo, que ilustram os perfis das tensões nas fases A, B e C do transformador DDTF4-02 (13,8 kV) num período de 07 dias (24/07/2014 à 30/07/2014), verificou-se que o valor da tensão rms violou o nível adequado (0,93 TR <TL <1,05 TR), conforme estabelecidos no módulo 8 do PRODIST, durante todo período de medição, atingindo um valor igual a 1,0668pu na fase A, 1,0630pu na fase B e 1,0742pu na fase C. A Tabela (25) abaixo contém os valores máximos, mínimos e médios de tensões

registrados neste período. Como observado, a fase C apresenta afundamento de tensão com valor igual a 0,5600 pu.

De acordo com a análise acima do transformador DDTF4-02, faz-se necessário investigar o que ocasionou as sobretensões nas fases A, B, C e o afundamento na fases C.

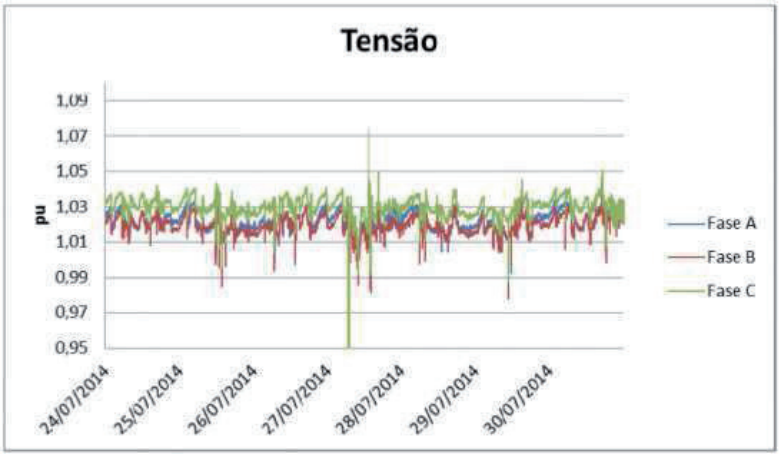


Figura 32 - Tensão RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 da SE DD

Tabela 25 – Valores máximos, mínimos e médios de tensão medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 da SE DD

	Valores Mínimos (pu)	Valores Máximos (pu)	Valores Médios (pu)
Fase A	0,5600	1,0668	1,0217
Fase B	0,9541	1,0630	1,0197
Fase B	0,9504	1,0742	1,0301

Analisando a Figura (33), que mostra a taxa de distorção harmônica total de tensão (DHT_V) das três fases do transformador DDTF4-02 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observou-se que os valores de DHT de tensão atingiram um valor máximo igual 7,25% na fase A, 6,53% na fase B e 6,60% na fase C, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pelo módulo 8 do PRODIST, que é de 8 % para esse nível de tensão. A Tabela (26) contém os valores máximos, mínimos e médios de distorções harmônicas totais de tensão registrados neste período.

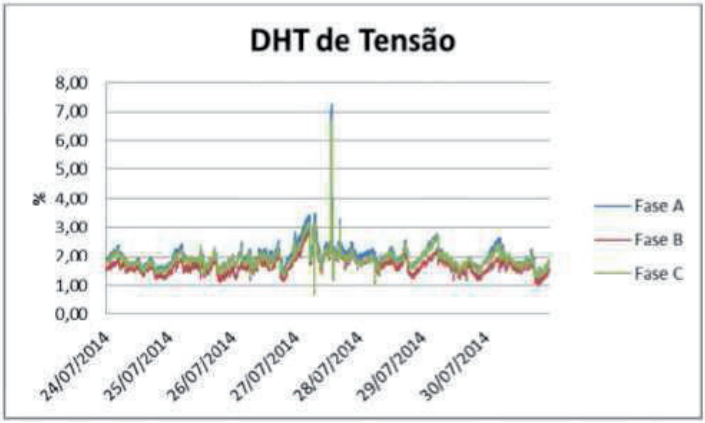


Figura 33 - Taxa de distorção harmônica total de tensão medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02

Tabela 26 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTv medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	1,04	7,25	1,98
Fase B	0,72	6,53	1,68
Fase B	0,83	6,60	1,89

A Figura (34) abaixo apresenta um ciclo semanal do consumo do conjunto de cargas que são alimentadas pela linha DDTF4-02. De acordo com essa figura, observa-se que a fase B está mais carregada que as fases A e C, as quais apresentam carregamentos iguais. Esse carregamento muito desigual das fases provoca desequilíbrios de tensão, que se ultrapassarem os 2% tolerado pela norma, podem implicar em multas para a concessionária. Portanto, é recomendado realizar uma ação remanejamento de cargas entre as fases, para buscar o equilíbrio entre elas. O máximo valor de corrente registrado no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02 durante o período considerado foi igual a 709A na fase A 969A na fase B e 723A na fase C. A Tabela (27) contém os valores máximos, mínimos e médios de corrente registrados neste período.

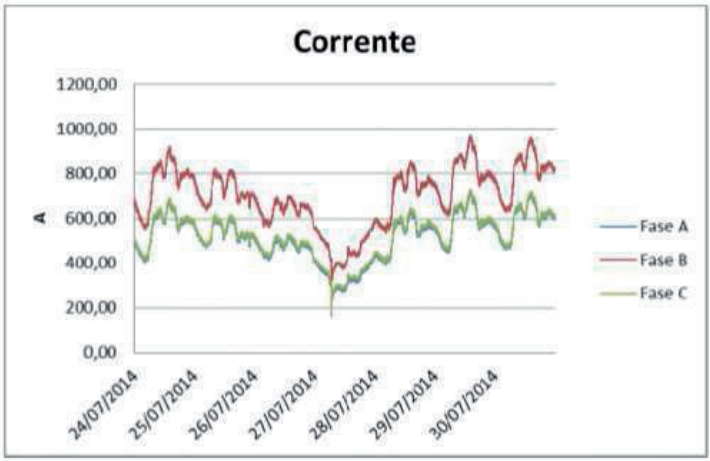


Figura 34 - Corrente RMS medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02

Tabela 27 – Valores máximos, mínimos e médios de corrente medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02

	Valores Mínimos (A)	Valores Máximos (A)	Valores Médios (A)
Fase A	164,0	709,0	515,46
Fase B	227,0	969,0	698,76
Fase B	171,0	723,0	524,68

Analisando a Figura (35) abaixo, que mostra a taxa de distorção harmônica total de corrente (DHT_I) das três fases do transformador DDTF4-02 (13,8 kV) da SE DD durante o período de 24/07/2014 a 30/07/2014, observa-se que os valores de DHT de corrente se encontram em níveis bem baixos, ultrapassando em poucos instantes, valores acima de 20%, estando, portanto, em conformidade com o limite estabelecido pela norma IEEE Std. - 519-2014, que é de 5% % para a relação $\frac{I_{SC}}{I_L}$ = 10.. A Tabela (28) abaixo contém os valores máximos, mínimos e médios das distorções harmônicas totais de corrente registrados neste período.

A distorção harmônica de corrente nos dias 27/07/2014 e 28/07/2014 mostrada na figura (35) é devido a redução da corrente fundamental, pois a distorção harmônica de corrente é inversamente proporcional a corrente fundamental, considerando assim para diagnóstico os valores médios medidos mostrado na tabela (28), pois a distorção harmônica é um fenômeno de regime permanente.

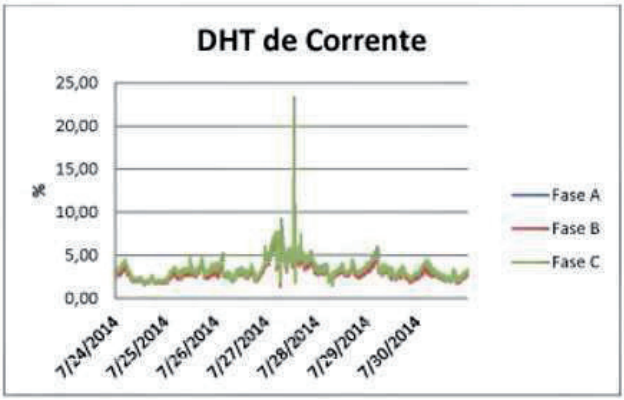


Figura 35 - Taxa de distorção harmônica total de corrente medida no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02

Tabela 28 – Valores máximos, mínimos e médios de DHTi medidos no lado de baixa tensão do transformador DDTF4-02

	Valores Mínimos (%)	Valores Máximos (%)	Valores Médios (%)
Fase A	2,29	23,32	3,22
Fase B	1,43	20,24	3,01
Fase B	2,57	23,18	3,39

CAPITULO 5

CONCLUSÃO

A pesquisa apresentada contempla um conjunto de etapas que permitem o monitoramento e o diagnóstico da qualidade de energia elétrica através da análise do indicador DHT em sistemas de redes elétricas

A pesquisa realizada sobre a qualidade de energia elétrica agregou um conhecimento importante sobre os fundamentos da qualidade de energia elétrica, seus indicadores, bem como na delimitação dos tipos de distúrbios inerente a qualidade de energia elétrica focalizando nas distorções harmônicas, na análise do indicador total de distorção harmônica (DHT), bem como nas normas e recomendações regulamentadoras.

Que apesar de em alguns momentos os níveis de distorções harmônicas em alguns alimentadores estarem fora dos limites estabelecidos no Prodist modulo 8, revisão ano 2017, na maioria do período da medição estiveram normais abaixo do limite estabelecido pelo Prodist modulo 8, não causando nenhuma anomalia ao sistema. Considera-se os valores médios medidos, pois a distorção harmônica é um fenômeno de regime permanente.

Esta pesquisa serve como base para concessionarias de energia elétrica investigar e determinar as influências individuais de um conjunto de cargas residenciais ou indústrias na distorção de tensões na rede elétrica, de tal forma que sejam capazes de aplicar metodologias de controle dos níveis de distorção harmônica, a partir do conhecimento dos principais causadores do problema.

Desta forma conclui-se que a proposta é aplicável à medida que os novos requisitos associados à qualidade da energia elétrica entrem em vigência, dentre os quais pode se citar as distorções harmônicas, que passarão a ser cobrados às empresas distribuidoras de energia elétrica, ou seja, as distribuidoras de energia deverão se adequar a tais requisitos exigidos pelo PRODIST, obedecendo aos limites de distorção harmônica, caso contrário, as empresas sofrerão penalizações por meio de pesadas multas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8** – Qualidade da Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 395/2009, Data de vigência: 01/01/2010.

ALMEIDA, Carlos Frederico Meschini. **Fontes distribuídas de harmônicos em sistemas elétricos de potência**. São Paulo: USP, 2012. Tese (Doutorado em Engenharia em Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ALVES, Gilberto Manoel. **Medições de distorções harmônicas em um sistema de energia elétrica.** Campinas: UNICAMP, 1997. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

ARRILAGA, J, WATSON, N. R., **"*Power System Harmonics*"**, *second edition, University of Canterbury,* 2003.

AZEVEDO, Manoel Socorro Santos. **Otimização multiobjetivo da compensação de potência reativa em redes de distribuição considerando restrições de distorção harmônica.** Pará: UFPA, 2014. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará, Pará, 2014.

BRITO JÚNIOR, Jorge de Almeida. **Estudo da qualidade de energia elétrica com distorções harmônicas e o fator de potência através de um sistema com lógica fuzzy**. Pará: UFPA, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade federal do Pará, Belém, 2011.

CIRINO, Weverson dos Santos. **Aplicação de filtro harmônico em sistemas elétricos de baixa tensão utilizando lógica fuzzy**. Pará: UFPA, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Instituto de Tecnologia da Universidade Federal do Pará (ITEC), Pará, 2010.

DUARTE Silvio Xavier. **Proposta de indicador de qualidade de tensão a partir do impacto de distorções harmônicas e desequilíbrios sobre motores de indução**. São Paulo: USP, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FASSBINDER, Stefan. **Análise, quantificação e efeitos das correntes harmônicas**. Revista: Eletricidade Moderna, São Paulo, p34 – 45, nov. 2014.

FERNANDES, Ricardo Augusto Souza. **Identificação de Fontes de Correntes Harmônicas por Redes Neurais Artificiais**. São Paulo: USP, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

FERNANDES, Ricardo Augusto Souza. **Localização e identificação de consumidores com alta contribuição para a distorção harmônica de tensão em sistemas de distribuição**. São Paulo: USP, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

FREITAS, Stefani Carolline Leal de. **"Supressor Eletromagnético de Componentes Harmônicas de Sequência Zero"**. São Paulo: UNESP, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 2011.

GALHARDO, Marcos André Barros. **Contribuições ao estudo da compensação de harmônicos em sistemas de energia elétrica**. Pará: UFPR, 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará, Pará, 2006.

GONÇALVES, Benevaldo Pereira. **Metodologia para diagnosticar a qualidade de energia elétrica referente à distorção harmônica em sistema trifásico de baixa tensão utilizando lógica fuzzy.** Pará: UFPA, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará, Pará, 2010.

GRANDI, Andre Luis Zago de. **Metodologia para avaliação de distorção harmônica de corrente em transformadores de distribuição**. São Paulo: USP, 2012.Dissertação(Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

LEITE, Jandecy Cabral. **Projeto multicritério de filtros harmônicos passivos para instalações industriais utilizando técnicas de inteligência computacional.** Pará: UFPA, 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, Belém- Pará, 2013.

NEVES, Ana Bárbara Fernandes. **Análise dos efeitos do desequilíbrio e da distorção harmônica de tensão no conjugado e no rendimento de um motor de indução trifásico.** Brasília: UnB, 2014. Dissertação de (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de Brasília (faculdade de tecnologia), Brasília, 2014.

OLIVEIRA, Roniere Henrique de. **Estudo da viabilidade da utilização de filtros passivos na filtragem de 3^0 harmônica de corrente em transformadores de distribuição.** Santa Catarina: UFSC, 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

OMORI, Júlio Shigeaki. A**plicação de filtro ativo trifásico em sistemas de distribuição de baixa tensão**. Paraná: UTFPR, 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

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

PROCOBRE, Scheneider**. Qualidade de Energia - Harmonicas. Workshop Instalações.** Elétricas de Baixa Tensão. 2003.

RODRIGUES, José Eduardo. **Interferência de harmônicas em equipamentos de medição de energia elétrica**. São Paulo: USP, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

SCOLARI, Bruno Sabino; CERQUEIRA, Fernando Bonancio; KRAVETZ, Peterson Luiz. **Caracterização dos problemas relativos à qualidade de energia elétrica causados por um forno de aquecimento a indução**. Paraná: UTFPR, 2013. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SILVA, Alexandre Moriel da. **Uma análise comparativa entre a simulação do modelo clássico de Capacitores de Potência e Capacitores de Potência Reais Testados em um Ambiente Laboratorial Controlado**. São Paulo: USP, 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, São Paulo, 2013.

SILVA, Cíntia Gonçalves Mendes da. **"Diagnóstico sobre a utilização das lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) como promotoras de eficiência energética nos sistemas de iluminação no Brasil"**. São Paulo: USP, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

SOUZA Wyrllen Everson de. **Análise das distorções harmônicas de tensão a partir de características dos transformadores e de dados de consumo**. Paraná: UFPR, 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

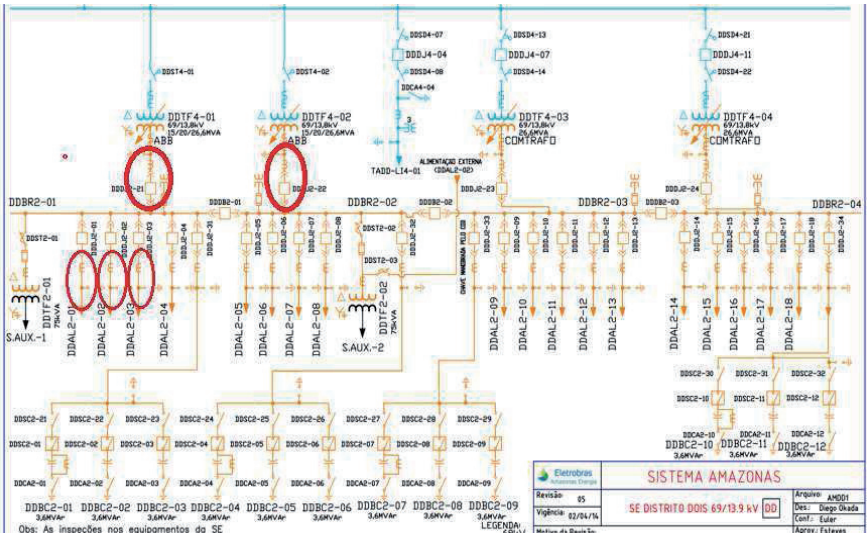
SOUZA, Tiago Poles de. **Métodos de Avaliação de Contribuição de Harmônicos por Correlação e Análise Fasorial**. São Paulo: USP, 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

TEIXEIRA, Douglas Ângelo. **Análise das distorções harmônicas – estudo de caso de um sistema industrial**. Minas Gerais: UFMG, 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2009.

ZAKOWICZ, Rafael. **Análise do conteúdo harmônico na entrada de subestações retificadoras ferroviárias**. São Paulo: USP, 2012. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012.

ANEXO

ANEXO A - DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO DISTRITO 2 DA ELETROBRAS DISTRIBUIÇÃO AMAZONAS



More Books!

yes I want morebooks!

Buy your books fast and straightforward online - at one of the world's fastest growing online book stores! Environmentally sound due to Print-on-Demand technologies.

Buy your books online at

www.get-morebooks.com

Compre os seus livros mais rápido e diretamente na internet, em uma das livrarias on-line com o maior crescimento no mundo! Produção que protege o meio ambiente através das tecnologias de impressão sob demanda.

Compre os seus livros on-line em

www.morebooks.es

OmniScriptum Marketing DEU GmbH
Bahnhofstr. 28
D - 66111 Saarbrücken
Telefax: +49 681 93 81 567-9

info@omniscriptum.com
www.omniscriptum.com

OMNIScriptum