

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

CASSIO KENJI MORI
DIEGO DO CARMO BADELLI

**DISTORÇÕES HARMÔNICAS – ESTUDO DE CASO DE UMA
PLANTA INDUSTRIAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2014

CASSIO KENJI MORI
DIEGO DO CARMO BADELLI

DISTORÇÕES HARMÔNICAS – ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL

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

Orientador: Prof. Joaquim Eloir Rocha, Dr.

CURITIBA
2014

Cassio Kenji Mori
Diego do Carmo Badelli

DISTORÇÕES HARMÔNICAS – ESTUDO DE CASO DE UMA PLANTA INDUSTRIAL

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

Curitiba, 13 de Agosto de 2014.

Prof. Emerson Rigoni, Dr.
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Coordenadora dos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

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

BANCA EXAMINADORA

Prof. Jair Urbanetz Junior, Dr.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

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

Prof. Luiz Gustavo Trevisan, Esp.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve apoio de diversas pessoas que contribuíram das mais variadas maneiras para que o resultado final fosse alcançado e que sem as mesmas não seria possível chegar aos objetivos propostos neste trabalho.

Dentre essas pessoas podemos destacar todos os familiares com seu apoio incondicional nos momentos decisivos, onde dificuldades foram encontradas no caminho e que puderam ser enfrentadas juntamente com amigos e entes queridos.

Agradecimento também a toda colaboração indireta para a realização do trabalho, principalmente nos vários momentos sozinho onde foram encontrados obstáculos no projeto e foi necessário aprender a resolvê-los.

Um agradecimento especial ao orientador e professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná Joaquim Eloir Rocha, que sempre se apresentou solícitamente para auxiliar na realização da pesquisa, que por meio de suas opiniões e conselhos nos permitiu enriquecer nosso conhecimento e o conteúdo do presente trabalho.

Além disso, gostaríamos de agradecer aos colaboradores da empresa envolvida no estudo da pesquisa, que nos cederam todos os materiais e equipamentos e o incentivo para a realização desse trabalho.

Aprendi que eu posso caminhar sozinho
e isso não quer dizer que eu seja uma pessoa solitária.

Apenas consigo caminhar com os meus
próprios passos sem uma pessoa ao meu lado.

RESUMO

MORI, Cassio K.; BADELLI, Diego do Carmo. Distorções Harmônicas - Estudo de caso de uma planta industrial. 2014. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

O presente trabalho aborda um estudo de caso aprofundado sobre o fenômeno elétrico presente em instalações conhecido como harmônicos, abrangendo toda a gama de estudo que envolve seu comportamento, sendo dividida em tópicos que seriam necessários conhecimento para prosseguimento da metodologia prática posterior. Primeiramente, foram estudadas a definição e percepção de harmônicos, as causas e efeitos, os cálculos relacionados, as normatizações e recomendações envolvidas e os analisadores de energia que seriam utilizados para medição. Em seguida foram estudados os procedimentos para medição de harmônicos, e assim organizado um roteiro com seleção de cargas e pontos que seriam necessários medir para atingir os objetivos propostos de comparação dos dois analisadores utilizados e também das diferentes normatizações que foram pesquisadas. Os procedimentos de medição e aquisição de dados foram detalhados no trabalho e os resultados discutidos com base nos *softwares* de análise dos analisadores. Ao final de todas as medidas organizadas, calculadas e comparadas com as normas, foi verificada a condição da instalação em relação aos harmônicos, e se seria necessário recomendar melhorias e sugestões para controlar a circulação dos mesmos. Ao final foi concluído que aplicar melhorias com os conhecimentos adquiridos para a planta no que compreende os efeitos de harmônicos e aplicação de filtros ou reatores, podem ser eficientes para a qualidade energética em instalações de indústrias que possuam o mesmo perfil de carga, principalmente as do ramo químico.

Palavras-chave: Harmônicos; Eficiência Energética; Qualidade Energética.

ABSTRACT

MORI, Cassio K.; BADELLI, Diego do Carmo;. Distorções Harmônicas - Estudo de caso de uma planta industrial. 2014. 107 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação do Curso Superior de Engenharia Industrial Elétrica – Ênfase Eletrotécnica) – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

This paper discusses a case study in depth about an electrical phenomenon in facilities known as harmonics, covering the full range of study that involves their behavior, divided into topics that would be needed to further knowledge of practical methodology later. Firstly, the definition and perception of harmonics, causes and effects, the calculations related to the regulations and recommendations involved analyzers and energy that would be used for measurement were studied. Then the procedures for measuring harmonics were studied, and well organized with a roadmap of cargo selection and measuring points which would be necessary to achieve the proposed objective comparison of the two analyzers used and also the various regulations that were surveyed. The measurement procedures and data acquisition were detailed in the work and results discussed on the basis of analysis software analyzers. At the end of all organized, calculated and compared with the standards, measurements verified the condition of the facility in relation to the harmonics, and the need to recommend improvements and suggestions for controlling the movement thereof. At the end it was concluded that applying the knowledge gained with improvements to the plant comprising the effects of harmonics and applying filters or reactors, can be effective for energy quality facilities industries that have the same load profile, especially the chemical sector.

Keywords: Harmonics; Electric Efficiency; Electric Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distorção da corrente causada por uma carga não linear.....	23
Figura 2 - Gráfico da tensão pela corrente de um semicondutor e um metal... 26	
Figura 3 - Diagrama de blocos de um conversor de frequência.	28
Figura 4 - Forma de onda do chaveamento PWM.....	29
Figura 5 - Retificador monofásico com filtro capacitivo e forma de onda da saída.	30
Figura 6 - Medição de circuitos monofásicos e trifásicos pela Norma IEC 61000 3-2.....	35
Figura 7 - Entrada de corrente de um equipamento de classe D.	35
Figura 8 - Analisador de energia Embrasul RE6000/N.....	43
Figura 9 - Vista das conexões do analisador de energia Embrasul RE6000/N.45	
Figura 10 - Esquema de ligação do analisador Embrasul RE6000/N em estrela e delta.	45
Figura 11 - Analisador de energia Fluke.	46
Figura 12 - Vista das conexões do analisador de energia Fluke.....	48
Figura 13 - Diagrama da subestação de entrada da instalação.	54
Figura 14 - Circuito SEU-3 com transformador de entrada e cargas.....	55
Figura 15 - Detalhe da alimentação do circuito CDC-4.	56
Figura 16 - Tela com as configurações padrão do analisador Fluke 435 II.	61
Figura 17 - Transformador de 1000 kVA onde foi realizada a medição.	62
Figura 18 - Instalação dos analisadores ao barramento do transformador de entrada.....	63
Figura 19 - Analisadores dispostos para serem ligados simultaneamente.....	63
Figura 20 - (a) Painel do <i>Chiller</i> (b) barramento de alimentação do <i>chiller</i>	64
Figura 21 - (a) Conversor de frequência (b) Analisador ligado à alimentação. 64	
Figura 22 - Motor de Indução alimentado pelo conversor de frequência.....	65
Figura 23 - Tendências de tensão e corrente do transformador de alimentação pelo Fluke 435 II.....	88
Figura 24 - Espectro de harmônicos totais de tensão e corrente do transformador de alimentação pelo Fluke 435 II.	89
Figura 25 - Taxa de distorção harmônica total do transformador de alimentação pelo Fluke 435 II.....	90

Figura 26 - Tendência de harmônicos totais de tensão e corrente do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.	91
Figura 27 - Tendência de harmônicos de corrente do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.....	92
Figura 28 - Tendência de harmônicos de tensão do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.....	93
Figura 29 - Espectro de harmônicos de corrente da fase B do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.....	94
Figura 30 - Espectro de harmônicos de tensão da fase A do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.....	95
Figura 31 - Tendências de tensão e corrente do <i>chiller</i> pelo Fluke 435 II.	96
Figura 32 - Espectro de harmônicos individuais de tensão e corrente do <i>chiller</i> pelo Fluke 435 II.....	97
Figura 33 - Taxa de distorção harmônica total de tensão e corrente do <i>chiller</i> pelo Fluke 435 II.....	98
Figura 34 - Tendência de tensão e corrente do <i>chiller</i> pelo Embrasul RE6000/N.	99
Figura 35 - Tendência de harmônicos totais de tensão e corrente do <i>chiller</i> pelo Embrasul RE6000/N.....	100
Figura 36 - Tendência de harmônicos individuais de corrente do <i>chiller</i> pelo Embrasul RE6000/N.....	101
Figura 37 - Espectro de harmônicos de corrente do motor de indução com conversor de frequência pelo Fluke 435 II.	102
Figura 38 - Taxa de distorção harmônica total de tensão e corrente do motor de indução com conversor de frequência pelo Fluke 435 II.	103
Figura 39 - Tendência de harmônicos totais de corrente do distribuidor e granulador pelo Embrasul RE6000/N.....	104
Figura 40 - Tendência de harmônicos individuais de corrente do distribuidor e granulador pelo Embrasul RE6000/N.....	105
Figura 41 - Tendência dos harmônicos totais de corrente do elevador da torre pelo Embrasul RE6000/N.....	106
Figura 42 - Tendência de harmônicos individuais de corrente do elevador da torre pelo Embrasul RE6000/N.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Limites de correntes harmônicas para as classes na norma IEC 61000 3-2.	36
Tabela 2 - Limites de correntes harmônicas admissíveis para estágio 1 da Norma IEC 61000 3-4.	37
Tabela 3 - Limites de DHT% e DHI% para estágio 2 da Norma IEC 61000 3-4.	38
Tabela 4 - Limites de harmônicos de corrente para tensões de 120 v à 60 kV em porcentagem.	39
Tabela 5 - Limites de harmônicos de corrente para tensões de 61,009 kV à 161 kV em porcentagem.	39
Tabela 6 - Limites de harmônicos de corrente para tensões maiores que 161 kV em porcentagem.	39
Tabela 7 - Valores limites de distorção harmônica total de tensão da norma PRODIST - Módulo 8.	40
Tabela 8 - Valores limites de distorção harmônica individual de tensão da norma PRODIST - Módulo 8.	40
Tabela 9 - Roteiro de medição final do estudo de caso.	59
Tabela 10 - Dados de placa do transformador de alimentação.	59
Tabela 11 - Dados de placa do <i>chiller</i>	60
Tabela 12 - Dados de placa do conversor de frequência.	60
Tabela 13 - Dados de placa do motor de indução trifásico.	60
Tabela 14 - Dados de placa do distribuidor e granulador da correia.	60
Tabela 15 - Dados de placa do elevador da torre.	61
Tabela 16 - Comparação entre as configurações dos analisadores de energia utilizados.	62
Tabela 17 - Distorção harmônica total de corrente das fases do transformador.	68
Tabela 18 – Taxas de Distorção da Demanda de corrente das fases do transformador.	69
Tabela 19 - Taxa de distorção harmônica individual das fases do transformador.	69
Tabela 20 - Distorção harmônica total de tensão das fases do transformador.	70

Tabela 21 - Distorção harmônica individual de tensão das fases do transformador.....	70
Tabela 22 - Taxa de Distorção da Demanda do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.....	71
Tabela 23 - Taxa de distorção harmônica individual do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.....	72
Tabela 24 - Taxa de Distorção Harmônica Total de tensão do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.....	72
Tabela 25 - Distorção harmônica individual de tensão das fases do transformador pelo Embrasul RE6000/N.....	72
Tabela 26 - Distorção harmônica total do <i>chiller</i> pelo Fluke 435 série II.	74
Tabela 27 - Distorção harmônica individual do <i>chiller</i> pelo Fluke 435 série II. .	74
Tabela 27 (Continuação) - Distorção harmônica individual do <i>chiller</i> pelo Fluke 435 série II.....	75
Tabela 28 - Taxa de Distorção Harmônica Total do <i>chiller</i> pelo Embrasul RE6000/N.....	75
Tabela 29 - Taxa de Distorção Harmônica Individual do <i>chiller</i> pelo Embrasul RE6000/N.....	75
Tabela 30 - Distorção harmônica total do conversor de frequência pelo Fluke 435 série II.....	76
Tabela 31 - Distorção harmônica individual do conversor de frequência pelo Fluke 435 série II.....	76
Tabela 32 - Distorção harmônica individual do conversor de frequência pelo Fluke 435 série II.....	77
Tabela 33 - Distorção harmônica total do distribuidor e granulador pelo Fluke 435 série II.....	78
Tabela 34 - Distorção harmônica individual do distribuidor e granulador pelo Fluke 435 série II.....	79
Tabela 35 - Distorção harmônica total do distribuidor e granulador pelo Fluke 435 série II.....	80
Tabela 36 - Distorção harmônica individual do distribuidor e granulador pelo Fluke 435 série II.....	80
Tabela 37 - Lista das cargas com limites acima das normas estudadas.....	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Sequência de fases dos primeiros nove harmônicos.	49
Quadro 2 - Efeitos de cada sequência de fase nas cargas.	49

LISTA DE SIGLAS E ACRÔNIMOS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
DHT	Distorção Harmônica Total
DHTI	Distorção Harmônica de Corrente por Fase
DHTU	Distorção Harmônica de Tensão por Fase
FC	Fator de Crista
FP	Fator de Potência
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Eletronics Engineers</i>
IGBT	<i>Insulated Gate Bipolar Transistor</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
LED	<i>Light-Emmiting Diode</i>
PWM	<i>Pulse-Widht Modulation</i>
RMS	<i>Root Mean Square</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TC	Transformador de Corrente
TP	Transformador de Potencial
UPM	<i>Unified Power Measurement</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

Δ	Delta
Y	Estrela
n	Ordem da componente harmônica
φ	Ângulo de fase da tensão
μ	micro
k	kilo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1.	TEMA	19
1.1.1.	Delimitação do Tema	20
1.2.	PROBLEMA E PREMISSAS	20
1.3.	OBJETIVOS	21
1.3.1.	Objetivo Geral	21
1.3.2.	Objetivos Específicos	21
1.4.	JUSTIFICATIVA	21
1.5.	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	22
1.6.	ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2	CONCEITOS BÁSICOS	23
2.1.	HARMÔNICOS NOS SISTEMAS ELÉTRICOS	23
2.2.	SÉRIE DE FOURIER	24
2.3.	TIPOS DE CARGAS	25
2.3.1.	Cargas Lineares	25
2.3.2.	Cargas Não Lineares	26
2.3.3.	Cargas Presentes no Ambiente Industrial	27
2.3.3.1.	Lâmpadas	27
2.3.3.2.	Conversores de Frequência	28
2.3.3.3.	Motores de Indução CA	29
2.3.3.4.	Grupos de Retificadores	29
2.4.	INDICADORES USADOS PARA QUANTIFICAR HARMÔNICOS	30
2.4.1.	Taxa de Distorção Harmônica Individual	31
2.4.2.	Taxa de Distorção Harmônica Total	31
2.4.3.	Taxa de Distorção da Demanda	32
2.4.4.	Fator de Potência e $\cos \varphi$	32
2.4.5.	Fator de Crista	33
2.4.6.	Normas Regulamentares Envolvendo Harmônicos	33

2.4.6.1.	IEC.....	33
2.4.6.2.	IEEE.....	38
2.4.6.3.	PRODIST – Módulo 8	40
2.4.6.4.	NBR 5410	41
2.5.	ANALISADORES DE ENERGIA.....	41
2.5.1.	Tipos de Analisadores	42
2.5.1.1.	Analisadores Convencionais.....	42
2.5.1.2.	Analisadores com Análise Gráfica	42
2.5.1.2.1.	Embrasul RE6000/N.....	43
2.5.1.2.2.	FLUKE 435 II <i>Power Quality and Energy Analyzer</i>	46
2.5.2.	Metodologia de Medição.....	48
2.6.	EFEITOS DE HARMÔNICOS EM UMA INSTALAÇÃO.....	49
2.6.1.	Sobrecargas nos Cabos Neutros.....	50
2.6.2.	Transformadores	50
2.6.3.	Motores e Geradores.....	51
2.6.4.	Capacitores	52
3	REGISTRO E ANÁLISE DE DADOS	53
3.1.	A PLANTA INDUSTRIAL QUÍMICA.....	53
3.2.	INVENTÁRIO DAS CARGAS A SEREM MEDIDAS.....	56
3.3.	METODOLOGIA DE MEDIÇÃO	58
3.3.1.	Configuração dos Analisadores.....	61
3.3.2.	Desenvolvimento da Medição de Harmônicos.....	62
3.4.	ANÁLISE DE RESULTADOS	65
3.4.1.	Comparação dos <i>Softwares</i> Analisadores de Energia.....	65
3.4.2.	Análise das Medições Realizadas	66
3.4.2.1.	Transformador de entrada de 1000 kVA.....	66
3.4.2.2.	<i>Chiller</i>	73
3.4.2.3.	Motor de Indução com Conversor de Frequência.....	76
3.4.2.4.	Distribuidor e Granulador de Correia	78

3.4.2.5. Elevador da Torre de Granulação.....	79
3.5. MELHORIAS PROPOSTAS	81
4 CONCLUSÕES	83
REFERÊNCIAS.....	84
APÊNDICE A – Resultados da medição do transformador de alimentação.....	88
APÊNDICE B – Resultados da medição do <i>Chiller</i>	96
APÊNDICE C – Resultados da medição do motor de indução.....	102
APÊNDICE D – Resultados da medição do distribuidor e granulador.....	104
APÊNDICE E – Resultados da medição do elevador da torre	106

1 INTRODUÇÃO

A presença de harmônicos no sistema elétrico já era conhecida desde o início do século vinte, sendo esta ocorrência principalmente devido à corrente de magnetização dos transformadores e características construtivas dos geradores síncronos da época (ARRILAGA, 2004). No entanto, nessa época, a imensa maioria das cargas elétricas tinha comportamento linear e, portanto, não geravam harmônicos. Então, a corrente e tensão da rede elétrica eram senóides praticamente perfeitas, o que levou os técnicos da época a não considerar os harmônicos como um problema. No Brasil, além do motivo apresentado anteriormente, dois outros fatores eram determinantes para que a qualidade de energia não fosse considerada uma preocupação (PROCEL, 2001). O primeiro fator consistia no fato de que a maioria dos consumidores, até meados da década de 1970, não necessitava de um fornecimento de energia de alta qualidade, uma vez que os processos e equipamentos da época não eram tão sensíveis aos distúrbios relacionados com qualidade de energia. O segundo fator está ligado ao fato de que, naquela época, as concessionárias de energia operavam dentro de um regime de monopólio estatal e, por isso, a exigência de qualidade era mínima.

A partir da década de 1970, com o desenvolvimento mundial da eletrônica de potência, que possibilitou a criação de grandes conversores, o nível de harmônicos presentes na rede aumentou, uma vez que esses conversores injetam grande quantidade de harmônicos de corrente (DUGAN, 2002). Esta automatização obtida por meio de dispositivos semicondutores e esquemas de controle complexos resultaram em cargas industriais altamente não lineares ligadas ao sistema de distribuição de energia elétrica (ANDRADE, 2006).

A redução de componentes harmônicas nas formas de ondas da tensão e da corrente para níveis aceitáveis tem sido um problema encontrado nos últimos anos no sistema elétrico de potência operando em regime de corrente alternada e uma das principais preocupações consiste no crescimento do uso de equipamentos de eletrônica de potência em todos os setores (instalações industriais, comerciais, serviços públicos e residenciais) (ARRILAGA, 2004).

O conceito de harmônicos é descrito como sendo ondas de tensão ou corrente que possuem uma frequência múltipla da frequência fundamental do sistema. Os harmônicos aparecem quando existem cargas não lineares no sistema elétrico circulando pela impedância do transformador de entrada e pelos circuitos internos. Essas ondas senoidais, somadas irão dar uma onda que não será senoidal, essa deformação na forma de onda afetará a qualidade da energia que chega ao consumidor. É importante destacar que a taxa de variação da amplitude da corrente harmônica depende do tipo e do tamanho da carga (JOORABIAN, 2009).

O IEEE desenvolve normas direcionadas ao avanço da teoria e prática das engenharias elétrica, eletrônica, de comunicações e de computação, assim como ciência da computação, outras engenharias e ciências relacionadas. As normas IEC 61000 e a IEEE 519 tratam especificamente de distúrbios harmônicos e têm o objetivo de limitar a ocorrência dessa perturbação na rede.

Quando grandes cargas que produzem harmônicos são adicionadas a um sistema de energia de uma planta industrial é importante analisar seu impacto sobre o sistema de energia através da realização de uma estimativa e análise harmônica do sistema na fase de concepção. Tal estudo pode identificar quaisquer ressonâncias potencialmente nocivas ou outros níveis de harmônicos que estão superiores aos limites recomendados pela IEEE 519 e se necessário sugerir medidas corretivas (ELLIS, 1996).

Neste trabalho propõe-se um estudo de caso para realizar medições de qualidade de energia em parte de uma planta industrial do ramo químico para analisar possíveis danos aos equipamentos e máquinas da instalação e sugerir melhorias para o melhor desenvolvimento da empresa. Serão utilizados os analisadores de qualidade de energia EMBRASUL modelo RE6000/N - nº 96000947 e FLUKE modelo 435 - nº 25703113 para coleta de informações de tensão, corrente, potência ativa, potência reativa, fator de potência e componentes harmônicas.

1.1. TEMA

Distorções Harmônicas. No ambiente industrial, encontra-se uma grande variedade de cargas não lineares que distorcem a onda de corrente e injetam

componentes harmônicas no sistema de alimentação. A circulação desses harmônicos de corrente na instalação elétrica faz com que apareçam harmônicos de tensão nos barramentos dos diversos circuitos.

1.1.1. Delimitação do Tema

O contexto do estudo foi baseado na análise do fluxo dos harmônicos de corrente e das distorções de tensão em circuitos específicos de uma instalação industrial do ramo químico, permitindo assim a comparação dos valores aferidos com os indicadores de qualidade determinados pelas regulamentações, sendo possível criar soluções e estudos sobre os problemas encontrados.

1.2. PROBLEMA E PREMISAS

A empresa tida como objeto de estudo é uma multinacional química de origem dinamarquesa que atua desde 2000 no mercado de soluções biológicas fornecendo enzimas para outras indústrias. A fábrica é composta por diversas máquinas no processo de produção tais como caldeiras e motores de grandes potências utilizados em torres de granulação e outros processos que utilizam grande número de conversores de frequência, afetando o sistema elétrico com componentes harmônicas, gerando deficiências na qualidade de energia.

Os bancos de capacitores são os equipamentos mais afetados pelos harmônicos, pois perdem vida útil na presença de distorções. Também, os capacitores podem formar circuitos ressonantes com as partes indutivas da instalação, se houver frequências harmônicas que provoquem essa ressonância.

Esse fenômeno amplifica as grandezas tensão e corrente na frequência ressonante. A poluição harmônica causa diversos problemas, tais como o sobreaquecimento de transformadores, condutores, capacitores de potência e motores elétricos. Isso resulta no envelhecimento prematuro dos componentes da instalação elétrica (BONHOMME, 2000).

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo Geral

Analisar o comportamento do fluxo das correntes harmônicas nos principais circuitos de uma instalação industrial do ramo químico com um estudo das cargas especiais, e realizar medições das distorções com a presença de um técnico especializado da área. Avaliar os parâmetros para melhorias na qualidade de energia e melhorias de problemas que podem ser encontrados na indústria.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Apropriar-se dos conhecimentos que envolvem os conceitos de harmônicos com a análise da literatura técnica adequada;
- Identificar os principais problemas que a distorção harmônica causa no conjunto dos componentes de uma instalação industrial;
- Fazer o levantamento, na planta industrial escolhida, das principais cargas geradoras de harmônicos;
- Realizar medições no principal circuito da planta industrial, aferindo o espectro harmônico das tensões e correntes;
- Realizar medições nas principais barras da instalação, aferindo o espectro harmônico das correntes;
- Comparar os resultados das medições com as regulamentações;
- Sugerir ações que atenuem os problemas encontrados.

1.4. JUSTIFICATIVA

Uma instalação industrial pode estar funcionando de forma inadequada pelo desconhecimento do seu corpo técnico a respeito dos efeitos deletérios dos harmônicos. A avaliação do nível dos harmônicos na planta permite a realização de um diagnóstico sobre a qualidade da instalação. Por exemplo, é

possível que esteja ocorrendo uma troca excessiva de banco de capacitores pela presença de um nível harmônico superior ao recomendado pelas normas. Portanto, o estudo se justifica no sentido de evitar que problemas na qualidade de energia gerados em uma instalação sejam propagados pela rede, atinja outros consumidores, diminuindo a eficiência dos equipamentos.

1.5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

A pesquisa foi desenvolvida através de análise de referências bibliográficas, artigos, catálogos, normas técnicas, internet e através de pesquisa diretamente no ramo industrial para compreender metodologias de medição de harmônicos e análise dos dados fornecidos pelos equipamentos para desenvolvimento do estudo de caso.

1.6. ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho será organizado em quatro capítulos:

- O capítulo 1 contém a introdução ao tema, abordagem à problemática pertinente e a justificativa acerca da relevância do tema. Também são abordados os objetivos a serem atingidos e os métodos que foram usados para a aquisição dos resultados.
- O capítulo 2 abrangem os conceitos básicos para o estudo dos harmônicos nos sistemas elétricos e os problemas com harmônicos.
- O capítulo 3 trata a respeito do projeto, contendo informações sobre a pesquisa e a prática, demonstrando o inventário das cargas principais da planta industrial, as medições de harmônicos de tensão e corrente e explicitando demais detalhes relevantes.
- O capítulo 4 resume a pesquisa com as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros, visando a continuidade dos estudos realizados. Posteriormente, estão dispostas as referências e apêndices relacionados.

2 CONCEITOS BÁSICOS

2.1. HARMÔNICOS NOS SISTEMAS ELÉTRICOS

De acordo com Arrilaga (2004), harmônicos na rede elétrica podem ser descritos como sendo ondas de tensão e corrente senoidais em frequências que são múltiplas da frequência principal gerada (ou frequência fundamental). Elas causam componentes de distorção nas formas de onda de tensão e corrente nas cargas principais.

O aparecimento de componentes harmônicas no sistema elétrico é devido à presença de cargas não lineares, cada vez mais comuns nos equipamentos elétricos por conterem mais semicondutores como diodos e transistores em seus circuitos elétricos.

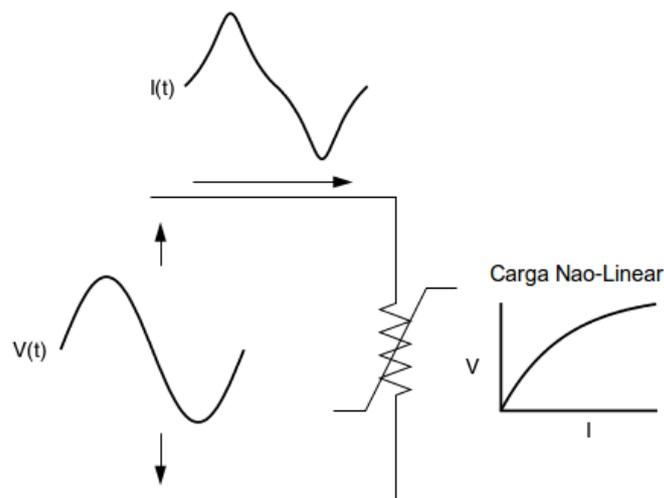


Figura 1 - Distorção da corrente causada por uma carga não linear.
Fonte: Dugan (2002).

Dugan (2002) ainda afirma que, na maioria das componentes harmônicas no sistema elétrico, enquanto a forma de onda da tensão é perfeitamente senoidal, a da corrente é distorcida, assim como na Figura 1. Sendo assim, incrementando o valor da tensão em pequenos valores pode alterar a onda de corrente drasticamente.

2.2. SÉRIE DE FOURIER

Em 1822 Joseph Fourier postulou que qualquer função periódica em um intervalo T pode ser representada por uma componente senoidal fundamental e uma série de componentes senoidais de ordem superior (chamadas de harmônicos) de frequências múltiplas da frequência fundamental (ARRILAGA, 2004).

A série de Fourier é um conceito que é empregado universalmente na análise de problemas de harmônicos. O sistema pode ser analisado separadamente em cada harmônico. Encontrar o sistema que seja responsável pela senoide de cada harmônica individualmente é muito mais direto do que em toda a forma de onda distorcida (DUGAN, 2002).

Uma forma de onda distorcida pode ser analisada utilizando a seguinte equação, referida como série de Fourier, postulada por Fourier:

$$s(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (01)$$

A expressão possui o termo $a_0/2$ que é o valor médio da onda que será somado com todas as componentes senoidais de ordem superior. Integrando o sinal da onda em todo o período T é possível obter seu valor:

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) dt \quad (02)$$

Para calcular a componente cossenoidal a_n que compõe a onda periódica $s(t)$, multiplica-se a onda $s(t)$ pelo cosseno da onda e integra-se esse termo.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \cos(n\omega t) dt \quad (03)$$

Mas para calcular a componente senoidal b_n da onda periódica $s(t)$, multiplica-se a onda $s(t)$ pelo seno da onda e integra-se esse termo.

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} s(t) \sin(n\omega t) dt \quad (04)$$

Considerando que o termo ω é a frequência angular da onda, que é expresso em função do período T :

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (05)$$

Para análise do fenômeno de harmônicos, somente considera-se a existência de componentes senoidais presentes no sistema, já que são formadas por ordens múltiplas da fundamental da rede, que também é senoidal (FIGUEREDO, 1997).

2.3. TIPOS DE CARGAS

As cargas no sistema elétrico podem ser classificadas de acordo com sua linearidade, ou seja, se o comportamento da corrente é proporcional à tensão aplicada ou não. É essa a classificação dada às cargas para análise de harmônicos em um sistema elétrico, que se diferenciam basicamente pelo tipo de circuito e componentes elétrico do equipamento (TAVARES, 2008).

2.3.1. Cargas Lineares

Cargas lineares podem ser descritas como cargas que têm um comportamento linear no que se refere à corrente que circula em relação à tensão aplicada. Em cargas puramente resistivas, o gráfico de tensão pela corrente é uma reta que passa pela origem e tem inclinação igual à resistência ôhmica da carga. Assim como as cargas puramente resistivas, as cargas capacitivas e indutivas também podem ser consideradas lineares, pois a

relação entre tensão e corrente é dada através de integrais e derivadas (TAVARES, 2008).

2.3.2. Cargas Não Lineares

Ao contrário das cargas lineares, que possuem somente componentes resistivas, capacitivas e indutivas, as cargas não lineares não apresentam o mesmo comportamento da corrente em relação à tensão. A presença de componentes semicondutores no circuito dos equipamentos têm se tornado cada vez mais constante, principalmente diodos e transistores que atuam controlando a passagem de corrente, muito presentes em conversores.

Nessas cargas, a forma de onda da corrente absorvida não tem o formato de uma senóide, por mais que a tensão aplicada seja puramente senoidal. Na Figura 2 pode-se perceber a diferença de resposta da corrente em um material não ôhmico semicondutor (esquerda) e um material ôhmico metal (direita) em função da tensão aplicada sobre eles.

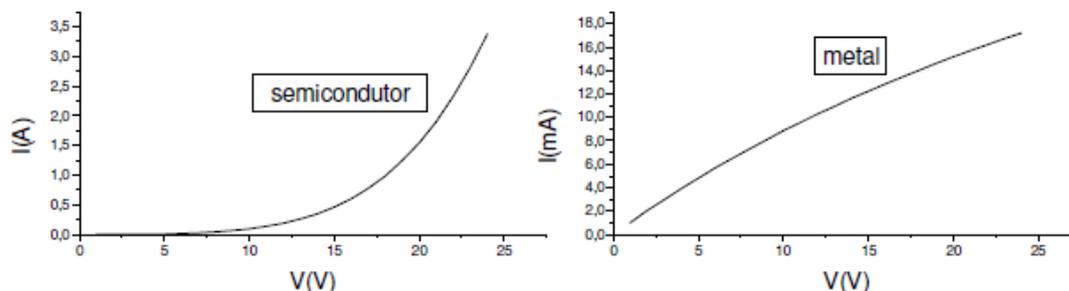


Figura 2 - Gráfico da tensão pela corrente de um semicondutor e um metal.

Fonte: Berleze, 2012.

Os semicondutores atuam no sistema elétrico realizando um chaveamento na corrente de acordo com a tensão aplicada nos seus terminais. Quando ligados num sistema de corrente alternada, a resposta é considerada periódica por responderem na mesma frequência ou em frequências harmônicas da fundamental (TAVARES, 2008).

2.3.3. Cargas Presentes no Ambiente Industrial

A maioria das cargas que causam deformações são conversores estáticos, os quais podem ser de grande potência e em pequena quantidade ou de baixa potência e em grande número.

Dentre as cargas do setor industriais que podem ser consideradas e estudadas estão os sistemas de iluminação, conversores de frequência, fornos de recozimento e fundição por indução eletromagnética, fornos de fundição por arco voltaico e grupos de retificadores (TAVARES, 2008).

2.3.3.1. Lâmpadas

Lâmpadas são cargas sempre presentes em plantas elétricas, porém, o tipo de lâmpada escolhida para compor o sistema de iluminação afeta diretamente a qualidade da energia que circula pela instalação.

As lâmpadas do tipo incandescente (incandescentes comuns, halógenas, dicróicas, etc.) são lâmpadas compostas apenas por um filamento de tungstênio como resistência, sendo uma carga considerada puramente resistiva e com fator de potência unitário. Sendo assim, são cargas lineares que não poluem a instalação elétrica e não geram harmônicos. Porém, não são comumente utilizadas no setor industrial pela baixa eficiência luminosa.

Ao invés das lâmpadas incandescentes, são utilizadas normalmente lâmpadas do tipo calha fluorescente para a iluminação em ambientes onde há maquinários que necessitam que iluminação mais eficiente com nível de fluxo luminoso mais alto e vida útil mais longa. Mas lâmpadas desse tipo são ligadas em reatores eletrônicos que possuem capacitores e indutores para alta frequência, resistores, circuitos integrados e outros componentes eletrônicos, operando o chaveamento a níveis altos de frequência e fator de potência com valores baixos, geralmente abaixo de 0,9, tornando a forma de onda comprometida por harmônicos. Por esse motivo não é aconselhado instalar uma grande quantidade de reatores de baixo fator de potência, sendo possível encontrar lâmpadas fluorescentes com um custo mais elevado que proporcionam fator de potência com valores mais próximos a 0,92, além de

aliviar a carga reativa da instalação e diminuir a carga da correção de fator de potência do banco de capacitores (TAVARES, 2008).

2.3.3.2. Conversores de Frequência

Conversores de frequência são equipamentos considerados grandes produtores de componentes harmônicas, que podem transformar uma corrente de entrada contínua ou uma corrente alternada com frequência fixa (geralmente a de rede com valores de 50 Hz ou 60 Hz) em uma corrente de saída com nível de tensão e frequência ajustáveis. Esses valores possuem a finalidade de regular a alimentação de motores de indução CA que possuem controle de rotação através da frequência de alimentação.

São compostos de um estágio retificador e um estágio inversor:

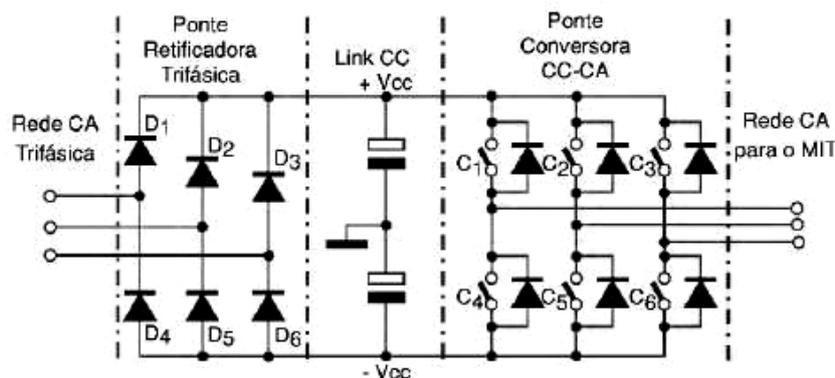


Figura 3 - Diagrama de blocos de um conversor de frequência.
Fonte: Mecatronicaatual (2013)

Dessa maneira, funcionam à base do chaveamento PWM (*Pulse-Width Modulation*) de IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) no lado da saída que recebem a corrente contínua retificada pelo lado de entrada. O chaveamento que controla rapidamente grande quantidade de energia à altas frequências caracteriza a onda como periódica não senoidal, com conteúdo harmônico (ISONI, 2009). O conversores de frequência de 6 e 12 pulsos não geram harmônicos de sequência zero (múltiplos de ordem 3) (SIEMENS, 2005).

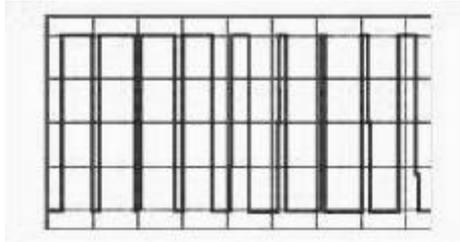


Figura 4 - Forma de onda do chaveamento PWM.

Fonte: Mecatronicaatual (2013)

2.3.3.3. Motores de Indução CA

Quando um motor de indução é submetido a uma tensão PWM proveniente de um conversor de frequência, estará sujeito a tensões harmônicas. Dependendo da modulação PWM empregada, da frequência de chaveamento e de outras particularidades do controle, o motor poderá apresentar aumento de perdas e temperatura, aumento dos níveis de vibração e ruído e perda de rendimento (SIEMENS, 2005).

As perdas pelas distorções harmônicas representam cerca de 1 % das perdas totais. Estas podem aumentar em até 0,5 % quando acionados por conversores conforme a IEC 60034-17.

Segundo S. R. Silva (2009), os efeitos dos harmônicos nos motores são:

- Aumento do aquecimento devido ao crescimento de perdas no ferro e no cobre nas frequências harmônicas;
- Emissão de ruído audível;
- Aparecimento de conjugado frenante, produzidos pelos harmônicos de sequência negativa;
- Aparecimento de conjugado pulsante, pela interação do campo girante fundamental com o de harmônicos, gerando vibração.

2.3.3.4. Grupos de Retificadores

Retificadores são usados em todos os tipos de sistemas elétricos e circuitos eletrônicos com o intuito de converter energia de corrente alternada em corrente contínua. São utilizados como entrada nos já citados conversores

de frequência e lâmpada fluorescentes que necessitam de alimentação com corrente contínua para ser invertida em CA em mais alta frequência que a fornecida pela rede. Em aplicações de potência baixa, usando sistema monofásico, retificadores monofásicos são utilizados como fontes de corrente contínua e fontes para motores CC (FUCHS, 2008).

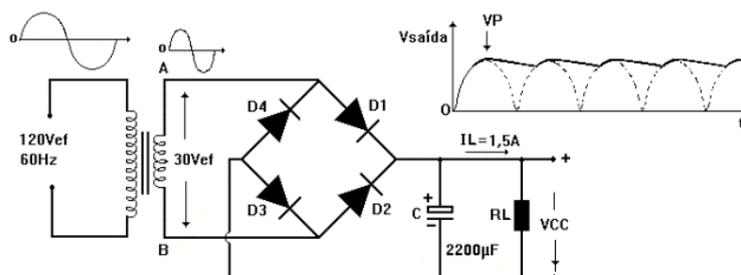


Figura 5 - Retificador monofásico com filtro capacitivo e forma de onda da saída.
Fonte: Souza (2007).

O princípio de formação de distorções harmônicas em retificadores monofásicos e trifásicos é o mesmo, sendo as mesmas dependentes da frequência de chaveamento em que os tiristores operam. O chaveamento PWM que controla os tiristores drena grande quantidade de energia em um curto espaço de tempo gerando transitórios na forma de onda da tensão (ISONI, 2009).

2.4. INDICADORES USADOS PARA QUANTIFICAR HARMÔNICOS

Com todas as componentes senoidais harmônicas somadas à senóide de frequência fundamental, a forma de onda sofre deformações, sendo geralmente os harmônicos de menor ordem com maior valor de distorção efetivo e os harmônicos de maior ordem de menor valor efetivo de distorção.

Usualmente, os harmônicos de maior ordem (normalmente as que compreendem entre a 25ª ordem e a 50ª ordem) não são considerados em análises de sistemas elétricos, já que por mais que causem interferências em sistemas eletrônicos de baixa tensão, elas não afetam geralmente o sistema elétrico.

Os indicadores de harmônicos mais comuns são os indicadores de taxa de distorção harmônica individual e total, os quais resultam valores em

porcentagem sobre o valor referente à tensão de cada componente harmônica e todas juntas em relação ao valor da tensão da componente fundamental (DUGAN, 2002).

2.4.1. Taxa de Distorção Harmônica Individual

A taxa de distorção harmônica individual (DHI%) é o cálculo realizado para se obter a influência de uma determinada componente harmônica em relação à componente principal:

$$DHI\% = \frac{I_n}{I_1} * 100 \quad (06)$$

Onde I_n é o valor RMS da componente harmônica de corrente a ser calculada e I_1 o valor eficaz da componente fundamental da corrente (FUCHS, 2008).

2.4.2. Taxa de Distorção Harmônica Total

A taxa de distorção harmônica total, entretanto, é a medida sobre a quantidade de conteúdo harmônico existente em uma forma de onda. A distorção harmônica total de uma onda é:

$$DHT\% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} * 100 \quad (07)$$

Onde I_n é o valor RMS total de todas as componentes harmônicas presentes na onda, e I_1 é o valor RMS total da componente fundamental da tensão (FUCHS, 2008).

2.4.3. Taxa de Distorção da Demanda

Há também a Taxa de Distorção da Demanda, que indica a taxa percentual da distorção harmônica da corrente em função da máxima demanda de corrente da carga (pico de corrente de demanda, recomendável de um período de pelo menos 12 meses) (IEEE 519-1992, 1992).

$$\text{TDD}\% = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_L} * 100 \quad (08)$$

Onde I_n é o valor RMS total de todos os componentes harmônicos presentes na onda, e I_L o valor RMS da máxima demanda de corrente da carga.

2.4.4. Fator de Potência e $\cos \varphi$

Fator de potência (FP) e $\cos \varphi$ são fatores adimensionais que são usualmente considerados como sendo o mesmo fator. Porém a definição de fator de potência é a relação entre a potência ativa e a potência aparente relacionada à um sinal periódico não senoidal.

$$\text{FP} = \frac{P [W]}{S [VA]} \quad (09)$$

Diferentemente do fator de potência, o $\cos \varphi$ compreende a relação entre a potência ativa e a potência reativa de cada componente harmônica, que é senoidal.

$$\text{COS } \varphi_n = \frac{P_{hn} [W]}{S_{hn} [VA]} \quad (10)$$

Dessa maneira, um método para verificação da existência de componentes harmônicas é medir o $\cos \varphi$ da componente fundamental e o

fator de potência do sinal poluído e analisar se há diferença dos valores medidos, o que indica a presença de harmônicos no sinal (FUCHS, 2008).

2.4.5. Fator de Crista

Com o fator de crista (FC) é possível perceber a presença de harmônicos, pois ele relaciona o valor de pico e o valor eficaz da corrente do sinal. Quanto maior o valor do fator de crista, maior a possibilidade de existência de harmônicos no sinal analisado. Não é um fator que pode ser considerado como fundamental para análise de existência de harmônicos, pois é necessário conhecer os outros fatores de potência e taxa de distorções harmônicas (SANTOS, 2007).

$$FC = \frac{I_{pico} [A]}{I_{rms} [A]} \quad (11)$$

2.4.6. Normas Regulamentares Envolvendo Harmônicos

Dentre as normas regulamentares que abordam o conceito de harmônicos em instalações elétricas as principais a serem consideradas num estudo de uma planta industrial advêm da principal comissão mundial de normas regulamentares IEC (*International Electrotechnical Commission*) e da principal organização voltada ao aperfeiçoamento da tecnologia relacionada à eletricidade IEEE (*Institute of Electrical and Eletronics Engineers*) (SANTOS, 2007).

2.4.6.1. IEC

A *International Electrotechnical Commission* (IEC) é uma comissão mundial fundada em 1906 com o objetivo de preparar e publicar normas regulamentares para todas as tecnologias que estão relacionadas às áreas de elétrica, eletrotécnica e eletrônica. Todas as regulamentações são padronizadas de acordo com consenso realizado pelos membros da comissão

para atender aos interesses e desenvolvimento dos profissionais da área (IEC, 2014).

Deve ser considerado que não existem regulamentações envolvendo harmônicos na rede elétrica que podem ser consideradas como permanentes, mas como uma avaliação dos requisitos de uma instalação, levando em conta que técnicas de análise vão sendo aprimoradas e os padrões precisam ser atualizados.

Os documentos referentes à padronização de harmônicos são pertencentes à seção IEC 61000, que especifica detalhadamente todas as informações (ARRILAGA, 2003).

- IEC 61000 1-4: Regulamenta a emissão de correntes harmônicas de equipamentos que possuem frequência de operação até 9 kHz;
- IEC 61000 2-1: Descreve e divide as principais fontes de harmônicos no sistema em três categorias: Equipamentos de potência, cargas industriais e cargas residenciais;
- IEC 61000 2-2: Possui uma seção sobre níveis de compatibilidade de distorções harmônicas de tensão em instalações industriais de baixa tensão;
- IEC 61000 2-4: Regulamentação sobre compatibilidade de harmônicos para plantas industriais. Também descreve os principais efeitos e causas;
- IEC 61000 3-2: Principais normas que abordam limites para correntes harmônicas na entrada, sendo a corrente de entrada em equipamentos menor ou igual a 16 A por fase. Esses limites são os máximos de harmônicos de corrente produzidos que podem circular, considerando equipamentos elétricos e eletrônicos com alimentação a partir de 220 V, sendo os com tensão menor sem limites definidos.

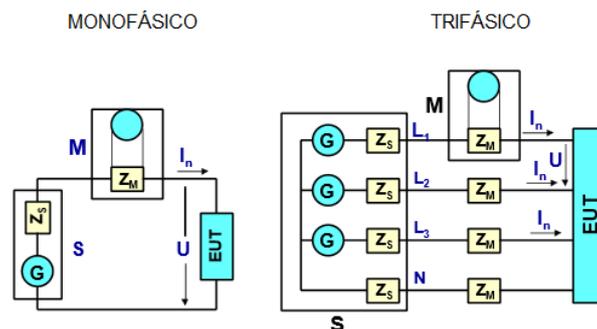


Figura 6 - Medição de circuitos monofásicos e trifásicos pela Norma IEC 61000 3-2.
Fonte: Pomilio (2005).

A Figura 6 ilustra como é feita a medição nos equipamentos pertencentes aos padrões da norma, medindo somente uma fase.

A norma divide os equipamentos em quatro classes distintas (A, B, C, D), de acordo com o tipo de alimentação, o tipo de uso e potência.

Na classe A são separados equipamentos de uso residencial de baixa potência e alimentação trifásica equilibrada, compreendidos principalmente em ferramentas, “*dimmers*” de cargas e equipamentos eletrônicos. Também estão inclusos equipamentos que não fazem parte das classes B, C e D

Os equipamentos da classe B são classificados como equipamentos portáteis e de arco de solda que não são utilizados profissionalmente.

Na classe C estão classificados equipamentos de iluminação como lâmpadas incandescentes, a descarga, LEDs e “*dimmers*” com exceção de incandescentes. Também fazem parte equipamentos de potência ativa superior a 25 W.

E na classe D estão computadores pessoais e monitores de vídeo, bem como equipamentos que possuam a corrente de entrada igual a forma de onda descrita na figura 7 (O SETOR ELÉTRICO, 2006).

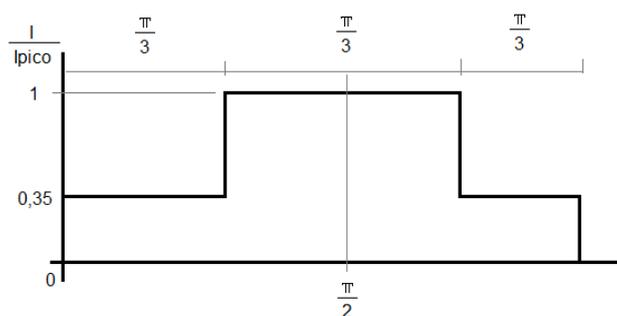


Figura 7 - Entrada de corrente de um equipamento de classe D.
Fonte: O setor elétrico (2006).

Tabela 1 - Limites de correntes harmônicas para as classes na norma IEC 61000 3-2.

Ordem harmônica n	Classe A	Classe B	Classe C	Classe D
Harmônicos ímpares	DHI% admissível [I_n/I₁]	DHI% admissível [I_n/I₁]	DHI% admissível [I_n/I₁]	I harmônica/Watt [mA/W]
3	2,3	3,45	30 * FP	3,4
5	1,14	1,71	10	1,9
7	0,77	1,15	7	1
9	0,4	0,6	5	0,5
11	0,33	0,49	3	0,35
13	0,21	0,31	3	3,85/n
15 ≤ n ≤ 39	0,15 * 15/n	0,225 * 15/n	3	3,85/n
Harmônicos pares				
2	1,08	1,62	2	-
4	0,43	0,64	-	-
6	0,3	0,45	-	-
8 ≤ n ≤ 40	0,23 * 8/n	0,34 * 8/n	-	-

Fonte: IEC 61000 3-2 (2005).

- IEC 61000 3-4: Norma que aborda os limites de emissão de correntes harmônicas para equipamentos que possuem corrente de entrada maiores que 16 A e menor ou igual a 75 A por fase, sendo a tensão de entrada de até 230 V monofásica e até 600 V trifásica.

Estabelece limites apenas para harmônicos de ordens ímpares seguindo três estágios de procedimento de conexão para os equipamentos, caso os valores medidos forem superiores aos limites, os estágios devem ser avançados sequencialmente:

- Estágio 1: Conexão simples, medição dos limites individuais de harmônicos com o equipamento conectado em qualquer ponto do sistema de entrada.

Tabela 2 - Limites de correntes harmônicas admissíveis para estágio 1 da Norma IEC 61000 3-4.

Ordem harmônica n	DHI% admissível [I_n/I_1]
3	21,8
5	10,7
7	7,2
9	8,8
11	8,1
13	2,0
15	0,7
17	1,2
19	1,1
21 ≤ n ≤ 25	0,8
27 ≤ n ≤ 31	0,7
≥ 33 (somente harmônicos ímpares)	0,6

Fonte: IEC 61000 3-4 (2005).

- Estágio 2: Conexão baseada na rede e nos dados do equipamento, para equipamentos que não atendam aos limites do estágio 1, se possuírem taxa de curto circuito calculada pela fórmula 14 superior ou igual à 33.

$$I_{cc} = \frac{I_{nom}}{Z\%} \quad (12)$$

$$S_{sc} = \frac{V_{nom}^2}{Z\%} \quad (13)$$

$$R_{scc} = \frac{S_{sc} [VA]}{S_{eq} [VA]} \quad (14)$$

Sendo I_{nom} a corrente do secundário do transformador, $Z\%$ a impedância percentual do transformador, S_{sc} a potência de curto-circuito e S_{eq} a potência aparente do equipamento, sendo possível assim calcular a Taxa de curto circuito R_{scc} pela relação de S_{sc} e S_{eq} .

Com a Taxa de curto circuito encontrada, é feita a consulta na Tabela 3 sobre a Distorção Harmônica Total e Individual dos harmônicos de ordem ímpar até 13ª ordem (POMILIO, 2008).

Tabela 3 - Limites de DHT% e DHI% para estágio 2 da Norma IEC 61000 3-4.

Equipamentos trifásicos não balanceados								
Mínimo	R_{sce}	DHT% admissível	DHI% admissível [I_n/I_1]					
			I₃	I₅	I₇	I₉	I₁₁	I₁₃
	66	25	23	11	8	6	5	4
	120	29	25	12	10	7	6	5
	175	33	29	14	11	8	7	6
	250	39	34	18	12	10	8	7
	350	46	40	24	15	12	9	8
	450	51	40	30	20	14	12	10
	600	57	40	30	20	14	12	10
Equipamentos trifásicos balanceados								
	66	25	-	14	11	-	10	8
	120	29	-	16	12	-	11	8
	175	33	-	20	14	-	12	8
	250	39	-	30	18	-	13	8
	350	46	-	40	25	-	15	10
	450	51	-	50	35	-	20	15
	600	57	-	60	40	-	25	18

Fonte: IEC 61000 3-4 (2005).

- Estágio 3: Quando os estágios 1 e 2 não forem satisfeitos e se a corrente de entrada ultrapassar 75 A, deve ser feito um acordo entre a unidade consumidora e a concessionária para autorização da instalação do equipamento, levando em conta a potência ativa da instalação (POMILIO, 2008).

2.4.6.2. IEEE

O IEEE (*Institute of Electrical and Electronic Engineers*) é um órgão internacional sem fins lucrativos que visa colaborar de forma técnico-profissional ao avanço tecnológico das áreas de eletricidade, eletrônica e computação.

Hoje em dia conta com 400000 associados em 150 países que atuam nas áreas de tecnologia, engenharia e pesquisa, sendo um dos líderes de normas técnicas que servem como referência mundialmente (IEEE, 2014).

Das normas do IEEE, destaca-se somente a norma IEEE 519-1992 no que a aborda a problemática de harmônicos, onde identifica as maiores fontes de harmônicos em sistemas elétricos.

O documento descreve quais os limites aceitáveis em regime permanente para o pior caso de correntes harmônicas de ordem ímpar que circulam entre as fontes e as cargas da instalação.

São três tabelas que expõem o limite da relação da corrente da fundamental da corrente de carga e a corrente de curto circuito entre a fonte e as cargas, sendo o Quadro 5 para sistemas de 120 V a 60 kV, o Quadro 6 de de 69,001 kV a 161 kV e o Quadro 7 para acima de 161 kV (SANTOS, 2007).

Tabela 4 - Limites de harmônicos de corrente para tensões de 120 v à 60 kV em porcentagem.

I_{cc}/I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n > 35$	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 Standard 519-1992 (1992).

Tabela 5 - Limites de harmônicos de corrente para tensões de 61,009 kV à 161 kV em porcentagem.

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

Fonte: IEEE Standard 519-1992 (1992).

Tabela 6 - Limites de harmônicos de corrente para tensões maiores que 161 kV em porcentagem.

I_{cc}/I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n > 35$	TDD
< 50	2,0%	1,0%	0,8%	0,3%	0,2%	2,5%
> 50	3,0%	1,5%	1,2%	0,5%	0,2%	3,8%

Fonte: IEEE Standard 519-1992 (1992).

2.4.6.3. PRODIST – Módulo 8

A norma PRODIST – módulo 8, assim como a IEEE 519 apresenta valores globais de referência de distorções harmônicas totais baseadas na tensão nominal do barramento. Porém a norma recomenda de forma mais simples os limites de emissão de harmônicos de tensão em vez de corrente, apenas pela Tabela 7, considerando a tensão de entrada do circuito de alimentação do sistema.

Tabela 7 - Valores limites de distorção harmônica total de tensão da norma PRODIST - Módulo 8.

Tensão nominal do barramento	DHT% admissível (V_n/V_1)
$V_n \leq 1 \text{ kV}$	10
$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	8
$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	6
$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$	3

Fonte: PRODIST – Módulo 8 – Tabela 3 (2010).

A norma PRODIST, Módulo 8 também regulamenta as emissões de harmônicos pela taxa de distorção harmônica individual em função da tensão, porém, diferentemente das normas IEC e IEEE, a PRODIST detalhada para cada ordem harmônica incluindo as ordens pares, de acordo com a entrada de funcionamento do circuito ou instalação que se encontra, representada pela Tabela 4 do Módulo 8, e reproduzida aqui na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores limites de distorção harmônica individual de tensão da norma PRODIST - Módulo 8.

Ordem	$V_n < 1 \text{ kV}$	$1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$	$13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} < V_n \leq 230 \text{ kV}$
2	2,5	2,0	1,5	1,0
3	6,5	5,0	4,0	2,0
4	1,5	1,0	1,0	0,5
5	7,5	6,0	4,5	2,5
6	1,0	0,5	0,5	0,5
7	6,6	6,0	4,0	2,0
8	1,0	0,5	0,5	0,5
9	2,0	1,5	1,5	1,0
10	1,0	0,5	0,5	0,5

Tabela 8 (Continuação) - Valores limites de distorção harmônica individual de tensão da norma PRODIST - Módulo 8.

11	4,5	3,5	3,0	1,5
12	1,0	0,5	0,5	0,5
13	4,0	3,0	2,5	1,5
14	1,0	0,5	0,5	0,5
15	1,0	0,5	0,5	0,5
16	1,0	0,5	0,5	0,5
17	2,5	2,0	1,5	1,0
18	1,0	0,5	0,5	0,5
19	2,0	1,5	1,5	1,0
20	1,0	0,5	0,5	0,5
21	1,0	0,5	0,5	0,5
22	1,0	0,5	0,5	0,5
23	2,0	1,5	1,5	1,0
24	1,0	0,5	0,5	0,5
25	2,0	1,5	1,5	1,0
>25	1,5	1,0	1,0	0,5

Fonte: PRODIST – Módulo 8 – Tabela 4 (2010).

2.4.6.4. NBR 5410

A norma NBR 5410 possui recomendações referentes ao dimensionamento de condutores, considerando a presença de correntes harmônicas circulando somadas à corrente que serviu de base para o dimensionamento da bitola do condutor, sendo necessário em alguns casos aumentar a bitola do condutor para suportar a passagem da corrente somada às corrente relacionadas aos harmônicos.

2.5. ANALISADORES DE ENERGIA

É de fundamental importância a realização de medições quando se pretende avaliar a qualidade de energia em uma planta industrial, principalmente quando há harmônicos circulando pela instalação, sendo necessárias mesmo quando as cargas especiais presentes no sistema elétrico deveriam apresentar teoricamente valores e níveis de harmônicos iguais aos especificados em projeto pelo fabricante.

A realização deve objetivar alcançar fielmente as grandezas que serão medidas, com planejamento prévio e equipamentos adequados para aferição de dados que sejam consistentes.

Tratando-se de correntes e tensões com frequência consideradas elevadas em relação à frequência de rede (60 Hz), os equipamentos de baixo custo não conseguem medir de forma adequada esses sinais (RIBEIRO, 2007).

2.5.1. Tipos de Analisadores

Para uma análise mais detalhada e íntegra do comportamento da instalação elétrica, os analisadores de energia são capazes de captar distúrbios de nanossegundos em alta frequência à uma gama longa de tempo que pode ser configurada para dias. São divididos em convencionais e com análise gráfica (RIBEIRO, 2007).

2.5.1.1. Analisadores Convencionais

Os analisadores convencionais são de construção mais simples para atender requisitos mais básicos de análise de qualidade de energia. Podem medir algumas grandezas elétricas, tais como queda de tensão temporária (*sags*), elevação de tensão temporária (*swells*), transientes (distúrbio na curva senoidal, que causam aumentos repentinos de tensão), harmônicos (distorções na forma de onda) e fator de potência.

Os analisadores convencionais possuem uma amostragem muito superior à de medidores comuns como multímetros, porém muito menor em relação aos analisadores gráficos com especificações mais avançadas. Como a taxa de amostragem do sinal é menor em relação aos analisadores gráficos, a precisão do equipamento é menor e pode apresentar valores mais distantes dos valores reais do sistema a ser medido (RIBEIRO, 2007).

2.5.1.2. Analisadores com Análise Gráfica

Possuem poderes de processamento e de memória superiores para elaboração de gráficos em tempo real, com uma análise mais detalhada do perfil

das cargas instaladas que pode se estender a meses de duração. Precisam estar certificados e calibrados de acordo com padrões de aparelhos de calibragem de tensão e corrente alternada.

São aparelhos que podem monitorar necessidades máximas de energia, quedas e elevações de tensão, partidas de motores e harmônicos no sistema trifásico. Os harmônicos medidos são os de até 50ª ordem e sistema de amostragem que geralmente são de 16 bits em 8 canais (RIBEIRO, 2007).

2.5.1.2.1. Embrasul RE6000/N

O Embrasul RE6000/N é um analisador de energia portátil composto por um display gráfico que exibe informações que podem ser parametrizadas pelo usuário através das configurações do próprio aparelho.



Figura 8 - Analisador de energia Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.

Realiza todas ou algumas das medições simultaneamente das grandezas parametrizadas que podem ser selecionadas entre:

- Tensão (3 fases + neutro);
- Corrente (3 fases + neutro);
- Potência (3 fases);
- DHTI e DHTU (3 fases);

- Frequência;
- Tensão de linha.

Outras funções também são parametrizáveis para compor a configuração dependendo do ambiente a ser medido, levando em consideração fatores como:

- Relação de transformação de TPs e TCs: se existirem TPs e/ou TCs externos na instalação, o aparelho é programado automaticamente ou pode ser programado manualmente, caso haja uma relação diferente.
- Tipo de memória: pode ser configurada a memória caso o tempo de medição seja esgotado como linear, onde quando a capacidade se esgota a medição termina, e a memória cíclica, que ao esgotar a capacidade os registros mais antigos são sobrescritos pelos mais novos, renovando os valores.
- Transientes: configuração referente ao número máximo de eventos registrados, quais fases que serão monitoradas e os valores de *triggers* para registro de *sags*, *swells*, transientes DHT e frequência.
- *Timer*: programação de tempo entre medições. Pode ser configurado como um intervalo de tempo ou diariamente, escolhendo-se um horário do dia para realizar a medição.
- Harmônicos: Selecionar se o aparelho considerará os valores de tensão, corrente, fator de potência, potência ativa, reativa e aparente em RMS. Além de configurar também o intervalo de aquisição desses dados e o tempo de integração.

Todos os registros manipulados de forma simples, o aparelho vem com o *software* ANL6000 de fábrica, que permite identificar informações importantes como o momento da ocorrência, ordem do harmônico, amplitude da onda e

forma de onda de cada uma das fases de tensão e corrente do sistema em análise (EMBRASUL, 2014).



Figura 9 - Vista das conexões do analisador de energia Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.

Também podem vir inclusos os sensores de corrente TI3000, que são conectados no analisador e em cada uma das fases, seguindo as configurações da figura 10, de acordo com a ligação das fases (EMBRASUL, 2014).

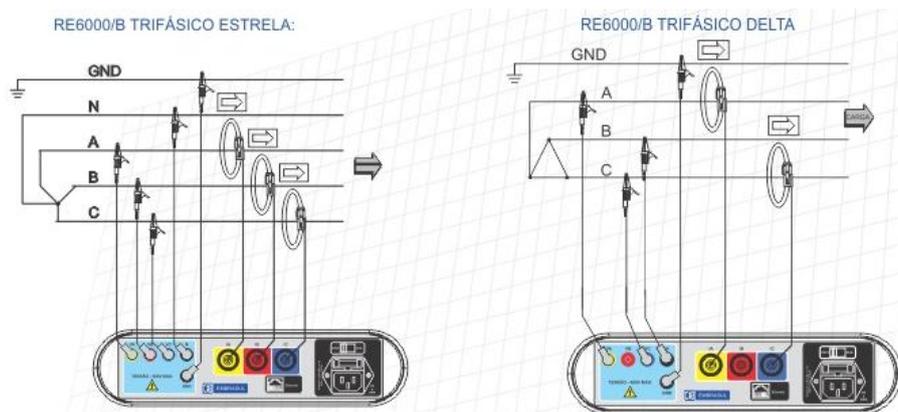


Figura 10 - Esquema de ligação do analisador Embrasul RE6000/N em estrela e delta.
Fonte: Embrasul (2014).

Juntamente com o analisador, vem acompanhado o *software* de análise de qualidade de energia da Embrasul ANL6000, que permite a transferência dos dados coletados pelo analisador para o computador, sendo possível

realizar simulações com a influência de capacitores e diversidade da planta, gerando gráficos com uma boa qualidade de apresentação final.

Os gráficos produzidos podem ser selecionados e configurados pelo usuário, com visualização de análise de tensão, transientes, análises de afundamento de tensão (*sags*), relatório de falta de energia, harmônicos e um relatório completo (EMBRASUL, 2014).

2.5.1.2.2. FLUKE 435 II *Power Quality and Energy Analyzer*

Equipado com funções avançadas de qualidade de energia, o Fluke 435 II, analisador de energia com análise gráfica, oferece um conjunto abrangente de medições para verificar os sistemas de distribuição de força e tem recursos adicionais, como oscilação, transientes, onda de potência, sinalização principal, evento de onda, evento RMS e precisão de entrada de tensão de 0,1 %.

O sistema de medição utilizado é o *Unified Power* (UPM) que mede parâmetros de energia clássica e IEEE 1459-2000, análise detalhada da perda e análise de desequilíbrio.

Este equipamento mede com RMS verdadeiro picos de tensão e corrente, frequência, quedas e picos, transientes, interrupções, energia e consumo de energia, demanda de picos, harmônicos até a 50ª ordem, inter-harmônicos, *flicker*, sinalização na rede de distribuição de energia, corrente de invasão e desequilíbrio (FLUKE, 2012).



Figura 11 - Analisador de energia Fluke.
Fonte: Autoria Própria.

Tipo de memória: Possui a função *Logger* que permite o armazenamento de várias leituras com alta resolução em uma memória de longa duração. As leituras registradas são selecionáveis.

Transientes: A tela de transientes parece semelhante à da forma de onda de perfil, mas sua extensão vertical é ampliada para tornar visíveis os picos de tensão sobrepostos na senoidal de 50 ou 60 Hz. Uma forma de onda é capturada sempre que a tensão (ou corrente RMS) excede os limites ajustáveis. É possível capturar no máximo 9999 eventos.

Harmônicos: Usa-se o modo Harmônico para verificar os harmônicos de tensão e corrente e a DHT% por fase. Neste modo, utiliza-se a Tendência para registrar harmônicos com o tempo.

O aparelho possui a função de captura de dados *PowerWave*. Esta função possibilita que o usuário capture os sinais de tensão, corrente e frequência simultaneamente, em uma alta velocidade, a fim de verificar qual das interações está potencialmente causando mais problemas. Além disso, o modelo 435 II também é capaz de medir a eficiência de conversores de frequência, medindo simultaneamente as energias de CC e CA em um sistema, a fim de determinar a quantidade de energia que está sendo desperdiçada no processo de conversão (FLUKE, 2012).

Os cursores e ferramentas de *zoom* podem ser usados em tempo real durante as medições, ou através dos dados armazenados de medições através do display gráfico. Além disso, as medições armazenadas podem ser transferidas para um PC com o *software* incluído, a fim de realizar análises personalizadas e criar relatórios. Os dados de medição também podem ser exportados para programas comuns de planilhas.

O Fluke 435 também permite que o usuário possa fazer uma avaliação da energia; quantificar as melhorias antes e depois da instalação no consumo de energia para justificar dispositivos de economia de energia.

Solucionar problemas de primeira linha por meio do diagnóstico rápido de problemas na própria tela que permite restabelecer a operação sem demora. Realizar a Manutenção preditiva, ou seja, fazer a detecção e prevenção de problemas de qualidade da energia antes de causarem paradas na operação e estudar de carga para verificar a capacidade do sistema elétrico antes de aplicar as cargas (FLUKE, 2012).



Figura 12 - Vista das conexões do analisador de energia Fluke.
Fonte: Autoria própria.

O manual do usuário traz todas as informações necessárias para a instalação do equipamento aonde será feita a medição e coleta de dados.

Juntamente é acompanhado o *software* PowerLog da Fluke que recebe todos os dados medidos em campo para uma análise no computador com mais detalhes e gráficos precisos para o usuário (FLUKE, 2012).

2.5.2. Metodologia de Medição

A medição de qualidade de energia é influenciada pela sensibilidade, confiabilidade e desempenho dos equipamentos que irão monitorar o sistema, sendo assim, por isso é necessário uma medição realizada com equipamentos precisos para resultados de qualidade satisfatória e confiáveis. Para medição no ambiente industrial, é necessária a utilização de técnicas de medição, com ligação e roteiros padronizados para configuração e aferição dos valores de forma sistemática seguindo as normatizações envolvidas.

Usualmente monitoram-se vários pontos do sistema, com o objetivo de obter através de cada carga sua contribuição para a distorção harmônica de todo o sistema, analisar o perfil harmônico inteiro da instalação e quais barramentos possuem maiores fontes de distorções.

A metodologia de medição utilizada pela concessionária local (COPEL) é definida com integralização de todas as grandezas elétricas medidas em um

intervalo de tempo de 15 minutos. No ponto de medição em questão, o equipamento deve ser programado para analisar até a 30ª ordem de harmônicos pelo menos, sendo o ideal uma análise até a 50ª ordem (GRAPHUS, 2009).

2.6. EFEITOS DE HARMÔNICOS EM UMA INSTALAÇÃO

O grau com que harmônicos podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga. Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de carga resistiva, para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal. Contudo, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicos pode ser prejudicial, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes (IEEE 519-1992, 1992).

Cada harmônico possui um nome, frequência e sequência. A sequência refere-se à rotação física com respeito ao fundamental. Os primeiros nove harmônicos junto com seus efeitos estão listados no Quadro 1 e Quadro 2:

Quadro 1 - Sequência de fases dos primeiros nove harmônicos.

Harmônico	1º	2º	3º	4º	5º	6º	7º	8º	9º
Frequência	60 Hz	120 Hz	180 Hz	240 Hz	300 Hz	360 Hz	420 Hz	480 Hz	540 Hz
Sequência	+	-	0	+	-	0	+	-	0

Fonte: Siemens (2005).

Quadro 2 - Efeitos de cada sequência de fase nas cargas.

Sequência	Rotação	Efeitos
Positiva	Adiante	Aquecimento nos condutores e interruptores do circuito.
Negativa	Reversa	Aquecimento nos condutores e interruptores do circuito e problemas no motor.
Zero	Nula	Aquecimento nos condutores e interruptores do circuito e aumento na corrente do neutro do sistema a 4 fios.

Fonte: Siemens (2005).

2.6.1. Sobrecargas nos Cabos Neutros

Num sistema trifásico de 4 cabos, o neutro pode ser severamente afetado por cargas não lineares conectadas a circuitos ramificados. Em condições normais para uma carga balanceada, a porção de 60 Hz fundamental das correntes de fase se anulará no neutro. Entretanto, num sistema monofásico de 4 cabos com cargas não lineares, certos harmônicos ímpares chamados *triple-n*, múltiplos ímpares da terceira harmônica: 3º, 9º, 15º e etc., não se anulam, porém, ao invés disso, adicionam-se ao neutro.

Em sistemas com muitas cargas monofásicas, a corrente neutra pode de fato exceder a corrente de fase. O perigo aqui é o aquecimento excessivo, porque não há interruptor de circuito no neutro para limitar a corrente como há nos condutores de fase. Corrente excessiva no neutro pode também causar quedas de tensão maiores do que o normal entre o neutro e a terra na fonte de alimentação.

No caso do dimensionamento do condutor neutro, a antiga prática aconselharia a escolha de uma seção nominal menor ou igual à dos condutores de fase correspondentes e o uso de um esquema com o neutro compartilhado entre vários circuitos. Por outro lado, uma correta consideração sobre os efeitos eletromagnéticos que ocorrem com cargas não lineares requer a seleção de um condutor neutro com uma seção nominal maior ou igual à dos condutores de fase correspondentes e baseada na corrente que realmente circula pelo circuito (BARELE, 2014).

2.6.2. Transformadores

Neste caso tem-se um aumento nas perdas no ferro e no cobre. A elevação das perdas no cobre deve-se principalmente ao efeito pelicular, que implica numa redução da área efetivamente condutora à medida que se eleva a frequência da corrente.

Geralmente as componentes harmônicas possuem amplitude reduzida, o que colabora para não tornar esses aumentos de perdas excessivos. Todavia,

podem surgir situações específicas em que surjam componentes de alta frequência e amplitude elevada.

Tem-se ainda uma maior influência das capacitâncias parasitas, entre espiras e entre enrolamento, que podem realizar acoplamentos não desejados e, eventualmente, produzir ressonâncias no próprio dispositivo (ISONI, 2009).

Cargas monofásicas não lineares conectadas a transformadores (configuração Δ -Y) produzem harmônicos *triple-n* que se adicionam ao neutro. Quando esta corrente neutra alcança o transformador, é refletida no circuito primário delta, onde causa superaquecimento e falhas de transformador.

Outro problema é a perda nuclear e perda de cobre. Transformadores são normalmente cotados somente para cargas de corrente de fase de 60 Hz. Correntes harmônicas de frequências mais altas causam aumentada perda de cobre devido a correntes parasitas e histerese, resultando em maior aquecimento do que ocorreria na mesma corrente de 60 Hz. Estes efeitos de aquecimento exigem que os transformadores sejam reduzidos para cargas harmônicas ou substituídos por transformadores especialmente projetados (BARELE, 2014).

2.6.3. Motores e Geradores

O maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona) é o aumento do aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre afetando-se assim sua eficiência e o torque disponível. Conforme SIEMENS (2005), esforços adicionais são produzidos no eixo de máquinas rotativas devido às correntes de sequência positiva e negativa. Além disso, há situações aonde se tem um possível aumento do ruído audível, quando comparado com alimentação senoidal.

A presença de harmônicos no fluxo produz alterações no acionamento, como componentes de torque que atuam no sentido oposto ao da fundamental, como ocorre com o 5^o, 11^o, 17^o, etc. harmônicos. Isto significa que tanto o quinto componente quanto o sétimo induzem uma sexta harmônica no rotor. O mesmo ocorre com outros pares de componentes.

O sobreaquecimento pode ser tolerado dependendo do tipo de rotor utilizado. Rotores bobinados são mais seriamente afetados do que os de

gaiola, por exemplo. Os de gaiola profunda, por causa do efeito pelicular, que conduz a condução da corrente para a superfície do condutor em frequências elevadas, produzem maior elevação de temperatura do que os de gaiola convencional.

O efeito cumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é indicada na literatura como de 5 a 10 % dos valores obtidos com uma alimentação senoidal. Este fato não se aplica a máquinas projetadas para alimentação a partir de conversores, mas apenas àquelas de uso em alimentação direta da rede SIEMENS (2005).

Algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes (por exemplo, 5^o e 7^o, produzindo uma resultante de 6^o harmônico) podem estimular oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas. Isto pode levar a problemas industriais como, por exemplo, na produção de fios, em que a precisão no acionamento é elemento fundamental para a qualidade do produto.

Geradores de emergência estão sujeitos ao mesmo tipo de problema de superaquecimento que os transformadores. Por fornecerem reserva emergencial para cargas geradoras de harmônicos (como equipamentos de processamento de dados), frequentemente são ainda mais vulneráveis. Além do superaquecimento, certos tipos de harmônicos produzem distorção no cruzamento de zero da forma de onda da corrente, que causa interferência e instabilidade para os circuitos de controle dos geradores SIEMENS (2005).

2.6.4. Capacitores

Capacitores de correção podem formar um circuito ressonante com as partes indutoras do sistema de distribuição de energia. Se a frequência ressonante for próxima àquela da tensão harmônica, a corrente harmônica resultante pode crescer substancialmente, sobrecarregando os capacitores e queimando os fusíveis do capacitor (BARELE, 2014).

3 REGISTRO E ANÁLISE DE DADOS

Para a realização dos procedimentos em campo do estudo de caso, foram estudados todos os conceitos e critérios de harmônicos na rede elétrica, levando em conta todos os objetivos específicos, conceitos básicos, indicadores, normatizações relacionadas, analisadores de energia e metodologia de medição.

Dessa maneira, foi possível ter um panorama sobre a problemática envolvida e visualizar como abordar o problema. Como primeiro passo, foi estudada a planta contendo o diagrama unifilar da instalação, para o início da pesquisa sobre a medição.

3.1. A PLANTA INDUSTRIAL QUÍMICA

A planta elétrica completa contempla a entrada de energia através da subestação de entrada, que recebe a energia da concessionária COPEL (Companhia Paranaense de Energia), circula pelas chaves seccionadoras e para-raios até a medição da concessionária. Em seguida, ilustra a derivação com o transformador que alimenta os serviços auxiliares (consumo interno da instalação) e os TCs que derivam para os relés de proteção da entrada. Na saída da subestação o barramento é ligado aos quatro circuitos (SEU-1, SEU-2, SEU-3 e CDC-4) em que é dividida a instalação.

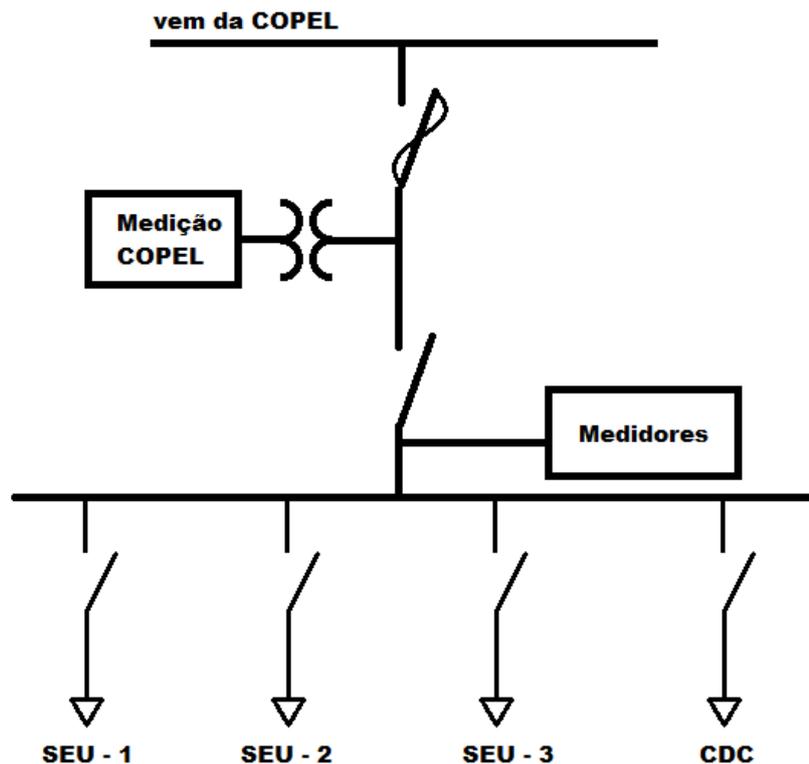


Figura 13 - Diagrama da subestação de entrada da instalação.
Fonte: Autoria própria.

O diagrama também ilustra os transformadores de alimentação dos três diferentes circuitos, sendo o SEU-2 alimentando a portaria, salas de escritórios de administração e laboratórios com cargas como computadores, eletrônicos em geral e iluminação e aquecimento do cubículo.

Os outros dois circuitos (SEU-2 e SEU-3) se dedicam exclusivamente à alimentação de cargas com potência elevada, que são utilizadas nos procedimentos fabris da empresa para a produção de enzimas, basicamente com equipamentos de processos químicos compostos por motores de alta potência, caldeiras aquecidas e maquinário eletrônico de operação e controle dos processos.

O circuito SEU-1 dividido em SEU-1.1 (QDF-1) e SEU-1.2 (QDF-2) com processos separados que alimentam máquinas envolvidas nos processos de evaporação, manutenção, produção e fermentação. O SEU-1.1 é alimentado por um transformador de 1000 kVA e impedância percentual $Z\%$ de 5,25 % com um barramento de alimentação de cobre com corrente nominal I_n de 600 A e corrente de curto-circuito I_{cc} de 50 kA. O SEU-1.2 é alimentado por um transformador de 1500 kVA e impedância percentual $Z\%$ de 6,25 % com um

barramento de alimentação de cobre com corrente nominal maior de I_n de 2900 A e corrente de curto circuito I_{cc} de 50 kA.

O circuito SEU-3 é o circuito com maior número de cargas e com maior potência da instalação, também dividido em dois circuitos (SEU-3.1 e CDC-4). O circuito SEU-3.1 alimenta agitadores de tanques, compressores de ar, *chillers*, bombas, ventiladores da torre e caldeiras, alimentado por um transformador de 2000 kVA e impedância percentual $Z\%$ de 6,00 % com um barramento de alimentação de cobre com corrente nominal de I_n de 3200 A e corrente de curto-circuito I_{cc} de 52 kA.

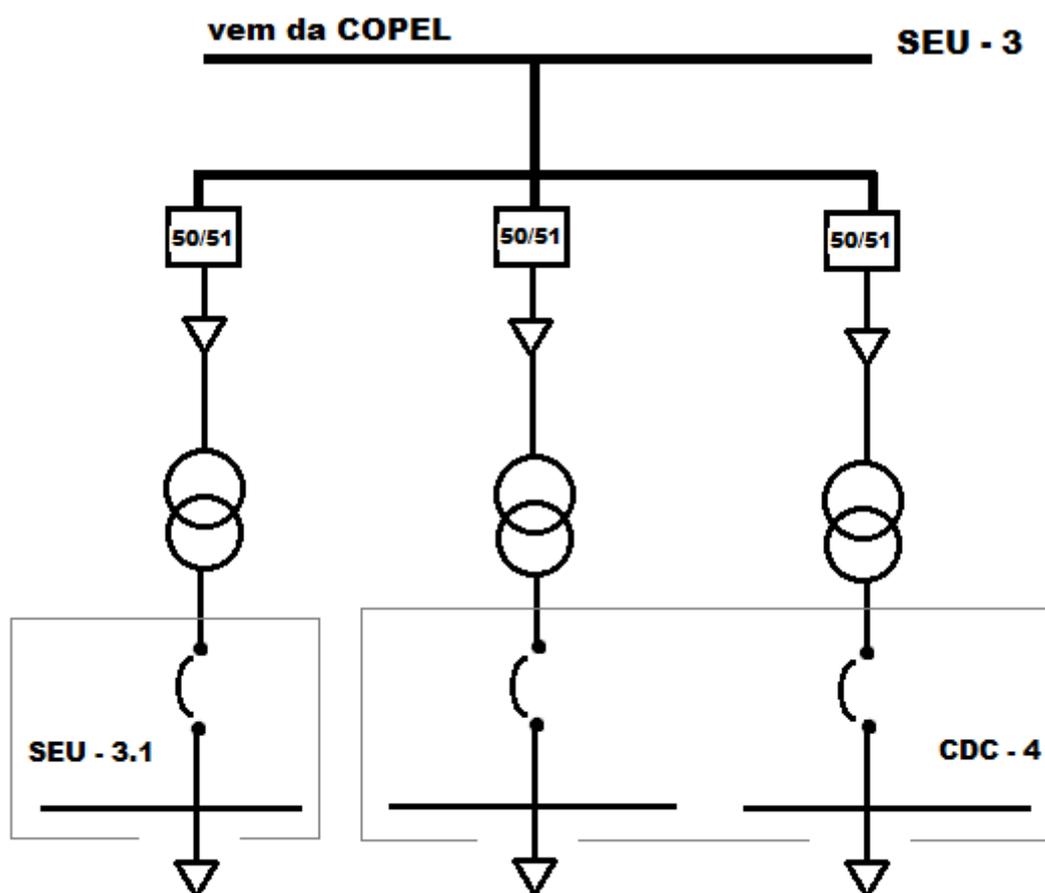


Figura 14 - Circuito SEU-3 com transformador de entrada e cargas.
Fonte: Autoria própria.

O circuito escolhido para realizar o estudo de caso foi o CDC-4 trifásico derivado do SEU-3 por possuir a maior diversidade de tipos de cargas juntas, que alimenta os processos de quatro torres de granulação e suas respectivas cargas. O transformador de alimentação tem potência de 1000 kVA e

impedância percentual $Z\%$ de 5,59 %. A entrada do circuito possui um painel de medição que exibe valores de tensão, corrente, potência, fator de potência, consumo e potência reativa, e um disjuntor de 500 A antes do barramento das cargas.

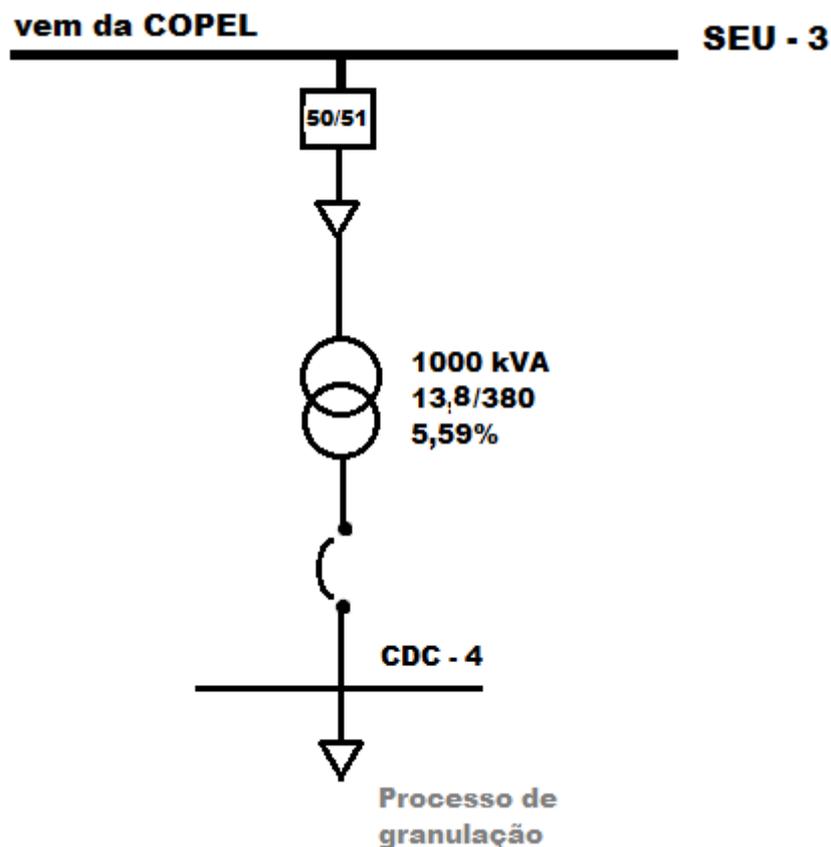


Figura 15 - Detalhe da alimentação do circuito CDC-4.
Fonte: Autoria própria.

3.2. INVENTÁRIO DAS CARGAS A SEREM MEDIDAS

Primeiramente, foram coletados todos os dados com descrição dos circuitos elétricos que dividem a todas as cargas, dos transformadores de alimentação e principalmente das cargas em si, para observar quais os tipos de equipamentos que operam na planta (relacionando-os com o estudo anterior realizado sobre harmônicos em cargas elétricas) e a validade da análise dos mesmos.

- Eletrônicos do escritório com cargas compostas por computadores, eletrônicos e iluminação (das salas de laboratório e administração);

- Evaporador, apenas uma unidade no circuito SEU-2 com potência de 90 kVA;
- 7 *Chillers*, todos espalhados nos processos de cada circuito com potências distintas;
- 3 Compressores nos circuitos SEU-2 e SEU-3 para fornecimento de ar comprimido;
- 2 Motores de 5 CV e 15 CV, de um circuito QD-B1 que é alimentado pelas mesmas cargas do QDF-1;
- Agitadores de tanque;
- Bombas;
- Conversores de frequência, localizados no circuito CDC-4 para comanda a saída de frequência dos processos.

Dessa maneira, foi traçado um perfil elétrico descritivo da indústria, para um estudo sobre como abordar a medição da planta, e obter resultados que quantifiquem o fenômeno nas cargas instaladas com o melhor aproveitamento didático, descrever todo o processo prático de medição e que assim seja válida uma comparação sobre as principais normatizações da IEC 61000-3-4, IEEE 519-1992 e PRODIST módulo 8 pesquisadas no estudo do referencial teórico.

Posteriormente, foi realizado um levantamento das principais cargas com os interesses citados, fazendo um filtro de pesquisa com a linearidade (comportamento ôhmico), potência e estudos anteriores relacionados sobre as mesmas.

Com todos os critérios citados e também acrescentando outros como aproveitamento do procedimento de medição e disponibilidade, foram selecionadas dentre as cargas, as que serão propostas para a medição efetivamente, para realizar um relatório de comportamento harmônico posteriormente. As cinco cargas que serão medidas no estudo de caso estão descritas a seguir.

- Entrada do circuito CDC-4 (Transformador de alimentação);
- *Chiller*;
- Motor de indução;

- Distribuidor e granulador de correia;
- Elevador da torre.

3.3. METODOLOGIA DE MEDIÇÃO

Depois de finalizado todo o levantamento e selecionadas todas as cargas, foi construído um roteiro para medição com o objetivo de acrescentar às cargas os demais equipamentos que serão incluídos na medição de harmônicos, descrever quais os pontos do circuito de alimentação e das cargas que serão analisados e justificando os motivos pelos quais são de aproveitamento para o estudo desenvolvido.

Todas as cargas serão medidas seguindo exclusivamente os estágios da norma IEC 61000-3-4 (limites de harmônicos para indústrias) da IEC, sendo o processo de medição dentro das recomendações do estágio 1, e coletando informações das cargas e do circuito caso seja necessária a realização do estágio 2 ou até mesmo indicação para seguir ao estágio 3 (sem necessidade de medição ou cálculos).

Os pontos de medição que foram adicionados ao roteiro seguindo as recomendações da norma 519-1992 da IEEE são os pontos de entrada de energia da instalação do circuito 3, simulando como uma planta à parte a ser analisada visto que todas as cargas que serão medidas pertencem à esse circuito.

Os pontos das recomendações da ANEEL, PRODIST módulo 8 são os mesmos que os pontos da 519-1992 da IEEE, com limites de harmônicos em relação ao nível de tensão de entrada da instalação elétrica.

Foi estipulado um tempo de medição em cada ponto de 15 minutos, com tempo de integralização dos valores a cada 500 milissegundos, sendo possível assim construir um gráfico com o comportamento harmônico com pelo menos 1800 pontos traçados.

Outro ponto fundamental em questão para a medição é avaliar o horário em que serão realizadas, já que no estudo de caso serão medidos apenas 15 minutos, deve-se escolher o horário onde o maior número de cargas esteja em funcionamento e consumindo a maior quantidade de potência possível para estimar o pior caso (níveis mais altos de harmônicos). Dessa maneira,

somando todos os pontos a serem medidos, foi definido o roteiro final para realização dos procedimentos metodológicos, ilustrado pela Tabela 9.

Tabela 9 - Roteiro de medição final do estudo de caso.

Roteiro de Medição				
Carga	Analizador de energia	Tempo de medição	Tempo de integralização	Motivo
Transformador de entrada CDC-4	Embrasul RE6000/N Fluke 435 série II	15 minutos	0,5 segundos (1800 pontos)	Normas IEEE 519-1992 e PRODIST Módulo 8
<i>Chiller</i>	Embrasul RE6000/N Fluke 435 série II	15 minutos	0,5 segundos (1800 pontos)	Norma IEC 61000-3-4
Motor de Indução	Fluke 435 série II	15 minutos	0,5 segundos (1800 pontos)	Norma IEC 61000-3-4
Distribuidor e Granulador da Correia	Fluke 435 série II	15 minutos	0,5 segundos (1800 pontos)	Norma IEC 61000-3-4
Elevador da Torre de Granulação	Fluke 435 série II	15 minutos	0,5 segundos (1800 pontos)	Norma IEC 61000-3-4

Fonte: Aatoria própria.

Primeiramente com o roteiro, fez-se necessário realizar um levantamento com os dados de placa de todos os equipamentos a serem medidos, para que se obtivesse o maior número de informações a cerca da potência e funcionamento da carga e posteriormente relacioná-las aos resultados de medição encontrados futuramente.

Tabela 10 - Dados de placa do transformador de alimentação.

Transformador de Entrada	
Fabricante	SIEMENS
Tipo	GEAFOL
Potência	1000 kVA
Classe de Isolamento	34 kV
Tap de AT	13,8 kV
Tensão Secundária	380 V
Corrente Primária	43,74 A
Corrente Secundária	1519,34 A
Impedância	5,59%
Peso Total	2400 Kg

Fonte: Aatoria própria.

Tabela 11 - Dados de placa do *chiller*.

Chiller	
Fabricante	TRANE
Potência	132 kW
Tensão de Entrada	380 V
Corrente Nominal	360 A
Pressão PSIG	950 Lbs
Ampacidade mínima	65,3 A
Peso Total	2950 Kg

Fonte: Autoria própria.

Tabela 12 - Dados de placa do conversor de frequência.

Conversor de Frequência	
Fabricante	WEG
Potência	12,6 kVA
Tensão de Entrada	380 V (Trifásico)
Corrente Nominal de Entrada	33 A
Corrente Nominal de Saída	40 A
Frequência de Chaveamento	5 kHz
Motor Máximo	12,5 HP / 9,2 kW
Potência Dissipada Máxima	380 W

Fonte: Autoria própria.

Tabela 13 - Dados de placa do motor de indução trifásico.

Motor de Indução Trifásico	
Fabricante	ELETRO CHIRAGUE
Potência	20 CV
Tensão de Entrada	220/380 v (Trifásico)
Corrente Nominal de Entrada	47/27 A
Classe	F

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14 - Dados de placa do distribuidor e granulador da correia.

Distribuidor e Granulador	
Potência	22 kW
Tensão de Entrada	380 V (Trifásico)
Corrente Nominal	57 A
Rotação	710 rpm

Fonte: Autoria própria.

Tabela 15 - Dados de placa do elevador da torre.

Elevador da Torre	
Potência	18 kW
Tensão de Entrada	380 V (Trifásico)
Corrente Nominal	45 A
Classe	F

Fonte: Autoria própria.

3.3.1. Configuração dos Analisadores

Para a configuração dos analisadores de energia Embrasul RE6000/N e Fluke 435 II, foi necessário avaliar os principais parâmetros que influenciam em uma medição de harmônicos para configurá-los de forma igual ou mais próxima possível.

Ambos os medidores possuem a configuração principal de tempo de medição, sendo selecionada como 15 minutos para o Fluke, e 1 hora para o Embrasul, interrompendo a medição em 15 minutos juntamente com o Fluke. O tempo de integração foi configurado para os dois em 500 milissegundos, valor que coincidia dos dois analisadores. A taxa de amostragem do Fluke 435 II é maior com 416 por ciclo por canal, em comparação com a amostragem de 133 por ciclo de 8 kHz do Embrasul.

O Fluke apresenta a vantagem de oferecer ao usuário a opção de capturar telas durante a medição e configuração, enviada o arquivo de imagem conjugado com o arquivo de leitura gerado.

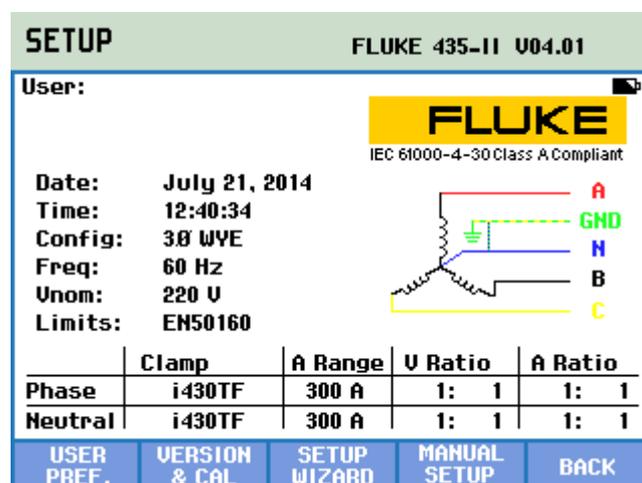


Figura 16 - Tela com as configurações padrão do analisador Fluke 435 II.
Fonte: Autoria própria.

Tabela 16 - Comparação entre as configurações dos analisadores de energia utilizados.

	Embrasul RE6000/N	Fluke 435 Série II
Tempo de medição	15 min	15 min
Intervalo de integralização	500 ms	500 ms
Ordem de harmônicos	até 50 ^a	até 50 ^a
Frequência	60 Hz	60 Hz
Amostragem	133 por ciclo (8 kHz)	416 por ciclo (5000 em 12 ciclos)
Software	ANL6000	PowerLog
Grandezas a registrar	V, A, P, S, Q, FP, DHT%, DHI%	V, A, P, S, Q, FP, DHT%, DHI%

Fonte: Autoria própria.

3.3.2. Desenvolvimento da Medição de Harmônicos

Partindo dos conhecimentos de medição, o roteiro de medição das cargas elaborado e com os dois analisadores de energia configurados, foram iniciadas as medições em campo dentro da planta industrial em estudo.

Primeiramente foi preparado e medido o ponto de entrada do circuito das torres de granulação (CDC-004), simulando a entrada de energia (ponto de acoplamento, pela norma IEEE 519-1992) de uma instalação inteira. Foram conectados os sensores de corrente TI3000 Embrasul ao analisador Embrasul RE6000/N e aos três barramentos derivativos do circuito CDC-004 pelo transformador.

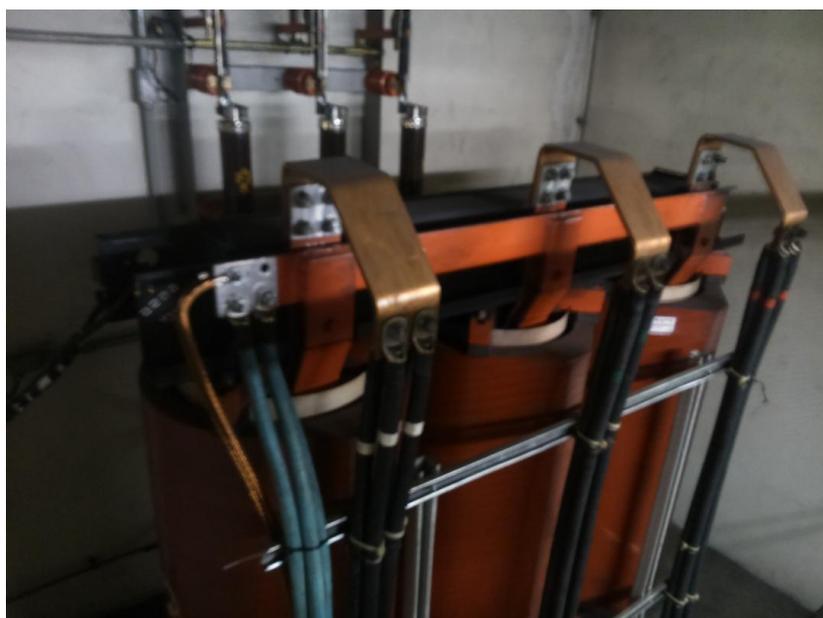


Figura 17 - Transformador de 1000 kVA onde foi realizada a medição.
Fonte: Autoria própria.

Para realizar a medição foram conectados os sensores no painel de saída do transformador. E assim, da mesma maneira, foram conectados os sensores de corrente da Fluke ao analisador Fluke 435 II e ao mesmo barramento.

Com o intuito de comparação entre os dois analisadores configurados como descrito no capítulo 3.4 e ligados, foram iniciados no mesmo instante a medição do mesmo barramento.

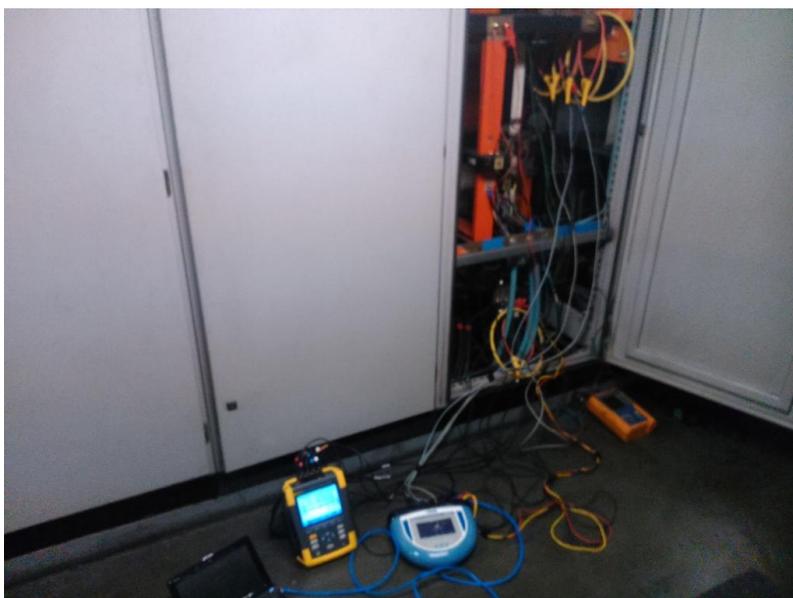


Figura 18 - Instalação dos analisadores ao barramento do transformador de entrada.
Fonte: Autoria própria.



Figura 19 - Analisadores dispostos para serem ligados simultaneamente.
Fonte: Autoria própria.

Ao final da medição, as duas medições terminaram no mesmo instante e obtiveram curvas semelhantes. Essa medição em específico servirá de análise somente das normas IEEE 519-1992 pelos gráficos de harmônicos de corrente e PRODIST – Módulo 8 pelos gráficos de harmônicos de tensão.

Em seguida foi repetido o procedimento de medição simultânea de 15 minutos dos dois analisadores no *chiller*, nos barramentos derivativos de alimentação.

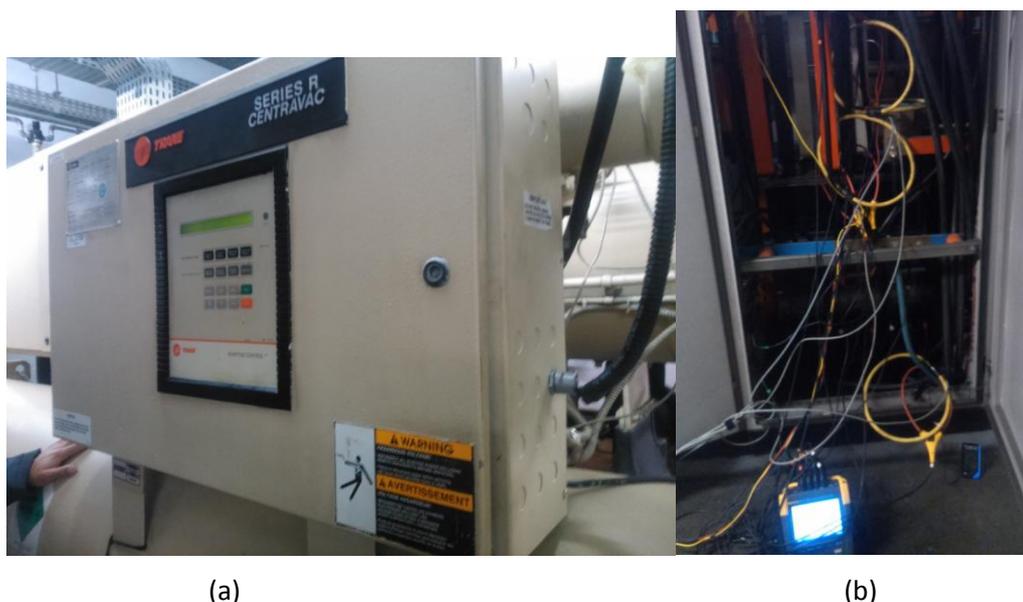


Figura 20 - (a) Painel do *Chiller* (b) barramento de alimentação do *chiller*.
Fonte: Autoria própria.

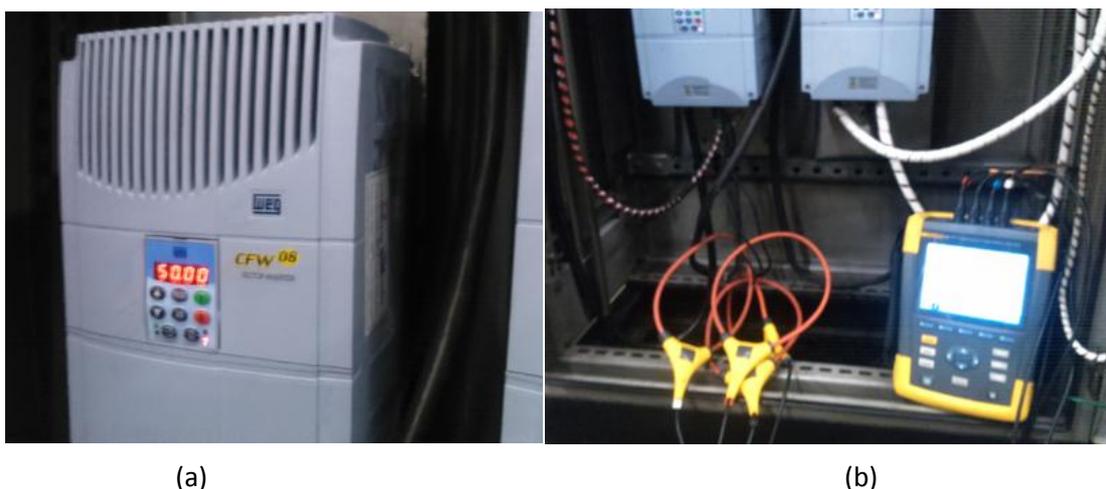


Figura 21 - (a) Conversor de frequência (b) Analisador ligado à alimentação.
Fonte: Autoria própria.



Figura 22 - Motor de Indução alimentado pelo conversor de frequência
Fonte: Autoria própria.

3.4. ANÁLISE DE RESULTADOS

Com todos os dados coletados das medições, foram analisadas as formas de onda e dados provenientes dos analisadores de energia através dos *softwares* fornecidos juntamente com o equipamento instalados em um computador pessoal. Através da interface de protocolo TCP/IP (*Transmission Control Protocol / Internet Protocol*) o analisador Embrasul RE6000/N foi conectado ao computador e assim transferidos através de um cabo de rede *Ethernet* os arquivos das medições para serem abertos pelo *software*. Já as medições do Fluke 435 II foram transmitidas via comunicação USB (*Universal Serial Bus*).

Após a instalação dos *softwares* ANL6000 para análise dos arquivos *.emb do Embrasul RE6000/N e PowerLog para os arquivos *.fpq do Fluke 435 II, todas as medições que foram feitas simultaneamente foram abertas e comparadas uma a uma.

3.4.1. Comparação dos *Softwares* Analisadores de Energia

Ao abrir os programas de análise dos analisadores, é necessário configurá-los para que seja possível visualizar as leituras da melhor forma dependendo de que tipo de medição o usuário realizou, pois os analisadores não coletam dados somente de harmônicos, sendo possível construir desde

relatórios simples até mais completos de causas e comportamento e até mesmo soluções com banco de capacitores.

3.4.2. Análise das Medições Realizadas

Com todas as leituras organizadas pelos *softwares*, o próximo passo foi interpretar todas as formas de ondas e espectros fornecidos pelos analisadores e verificar se há mudanças entre elas, tanto numericamente como graficamente.

3.4.2.1. Transformador de entrada de 1000 kVA

Como no estudo de caso o transformador simula a entrada de energia de uma instalação inteira, as medições são as de distorção harmônica individual e total de corrente e tensão, para as normas IEEE 519-1992 e PRODIST - módulo 8 respectivamente.

As curvas de corrente e tensão do transformador não apresentaram grandes alterações durante o período de medição, com níveis de harmônicos homogêneos em todas as ordens, de forma proporcional. O harmônico de terceira ordem no neutro apresentou valores consideráveis em relação às outras, com valores percentuais perto do valor da fundamental, gerando harmônicos de corrente de valores proporcionais também.

Pela Figura 27 do Apêndice A , a Taxa de Distorção Harmônica Total de tensão na fase A foi um valor numérico menor em relação às outras fases, gerando também valores de Taxa de Distorção Harmônica Total de corrente menor.

A tendência dos harmônicos de corrente que circularam pela fase A mostrou valores percentuais estáveis em relação a variação, com exceção das ordens 7, 11 e 13, que com valores maiores percentuais variaram mais que as outras ordens em geral. Porém nas fases B e C o harmônico de 11^a ordem alcançou valores maiores que os normatizados e as outras curvas foram mais estáveis.

O gráfico de tendência dos harmônicos que circulam pelo neutro mostra que a corrente quase que total do barramento é composta pelos harmônicos,

principalmente o ímpar de terceira ordem, quase alcançando o valor numérico do harmônico de ordem fundamental.

Com os gráficos fornecidos pelo *software* PowerLog, foram construídas tabelas para organizar os dados coletados e realizar a comparação com as normas. Os dados são os valores máximos encontrados durante a medição de 15 minutos, para se considerar o pior caso. A Tabela 17 ilustra as Taxas de Distorção Harmônica Total das três fases.

Como a tensão de entrada da instalação considerando o transformador de alimentação é 13,8 kV, então a distorção máxima admissível pela norma IEEE 519-1992 é seguindo a Tabela 4, para tensões de 120 V à 60 kV.

Para consultar a Tabela 4 é necessário ter o valor da relação de corrente de curto circuito pela corrente máxima consumida pela carga I_{cc}/I_L , calculado a seguir.

$$I_{cc} = \frac{Inom}{Z\%}$$

$$I_{cc} = \frac{1519,34}{0,0559} = 27179,60$$

A norma recomenda realizar a média de consumo dos últimos 12 meses para a variável corrente máxima consumida pela carga. O valor adotado pela medição através do analisador foi 361,7 A, considerando como o valor máximo de corrente medida durante o período de 15 minutos.

$$\frac{I_{cc}}{I_L} = \frac{27179,60}{361,7} = 75,14$$

Com o valor de I_{cc}/I_L encontrado, consultando a tabela do IEEE para valores de 50 a 100, os limites tolerados pela norma são divididos em faixas de valores de acordo com a ordem do harmônico.

Com os valores de referência da normatização, foram comparados os dados coletados do analisador Fluke sobre a taxa de distorção harmônica individual de corrente estão na Tabela 19.

Tabela 17 - Distorção harmônica total de corrente das fases do transformador.

DHT% (A) Fase A	DHT% (A) Fase B	DHT% (A) Fase C
4,96	7,13	7,80

Fonte: Autoria própria.

O analisador Fluke 435 II não exibe valores diretamente de Taxa de Distorção da Demanda, somente de Taxa de Distorção Harmônica Total, Logo a distorção da média das raízes de todas as componentes juntas é dividida pela primeira ordem, não pela corrente máxima da demanda.

Como os valores de distorção harmônica total de corrente são baseados no valor de corrente média medida no intervalo de medição de 345 A, então pode-se estimar o valor de Taxa de Distorção da Demanda conhecendo o valor máximo de corrente de demanda durante o período. Para encontrar o valor em Ampères da DHT%, foi multiplicado o valor percentual de distorção das três fases por 345 A.

$$\frac{\sqrt{Ia_2^2 + Ia_3^2 + Ia_4^2 + \dots}}{345} = 0,0496$$

$$\sqrt{Ia_2^2 + Ia_3^2 + Ia_4^2 + \dots} = 17,112 A$$

Da mesma maneira, foram calculadas para as fases B e C:

$$\sqrt{Ib_2^2 + Ib_3^2 + Ib_4^2 + \dots} = 24,598 A$$

$$\sqrt{Ic_2^2 + Ic_3^2 + Ic_4^2 + \dots} = 26,91 A$$

Em seguida foram divididos os valores em unidade de Ampères pelo valor da corrente máxima de demanda, para assim encontrar a Taxa de distorção da Demanda.

$$TDDa\% = \frac{17,112}{361,7} = 0,0473$$

$$TDDb\% = \frac{24,598}{361,7} = 0,0680$$

$$TDDc\% = \frac{26,91}{361,7} = 0,0743$$

Tabela 18 – Taxas de Distorção da Demanda de corrente das fases do transformador.

TDD% (A) Fase A	TDD% (A) Fase B	TDD% (A) Fase C
4,473	6,80	7,43

Fonte: Autoria própria.

Tabela 19 - Taxa de distorção harmônica individual das fases do transformador.

Ordem	DHI% (A) Fase A	DHI% (A) Fase B	DHI% (A) Fase C
3	1,06	1,36	0,72
5	2,93	2,89	2,49
7	1,67	1,53	0,67
9	0,39	0,77	0,42
11	1,94	4,68	5,59
13	2,36	1,73	0,85
15	0,13	0,15	0,10
17	0,16	0,20	0,12
19	0,06	0,05	0,02
21	0,02	0,02	0,01
23	0,08	0,10	0,07
25	0,04	0,07	0,04
> 25	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Pela comparação das tabelas de dados coletados de Taxa de Distorção de Demanda e da norma IEEE, as três fases não apresentaram valores superiores ao valor de 12 % recomendado, sendo considerados valores normais, porém os valores de Taxa de Distorção Harmônica Individual de 11ª ordem das fases B e C foram maiores que os 4,5% recomendados.

Para analisar se o transformador está dentro da normatização PRODIST módulo 8, foram coletadas os gráficos de distorção harmônica total e individual das três fases de tensão, descritas nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Distorção harmônica total de tensão das fases do transformador.

DHT% (v) Fase AN	DHT% (v) Fase BN	DHT% (v) Fase CN
1,98	2,03	2,24

Fonte: Autoria própria.

Também foram mensurados os valores de Taxa de distorção harmônica individual de tensão, para consulta da Tabela 4 do módulo 8 da PRODIST, que define limites para todas as ordens, não somente limites para as ordens ímpares.

Tabela 21 - Distorção harmônica individual de tensão das fases do transformador.

Ordem	DHI% (v) Fase AN	DHI% (v) Fase BN	DHI% (v) Fase CN
2	0,06	0,04	0,05
3	0,42	0,23	0,15
4	0,02	0,02	0,02
5	1,81	1,77	1,92
6	0,02	0,01	0,03
7	0,48	0,25	0,62
8	0,03	0,01	0,02
9	0,17	0,15	0,09
10	0,03	0,03	0,05
11	0,25	0,86	0,97
12	0,02	0,03	0,02
13	0,39	0,36	0,14
14	0,01	0,01	0,01
15	0,02	0,03	0,02
16	0,01	0,00	0,00
17	0,01	0,01	0,01
18	0,00	0,00	0,00
19	0,01	0,01	0,01
20	0,00	0,00	0,00
21	0,01	0,01	0,00
22	0,00	0,00	0,00
23	0,01	0,01	0,00
24	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00
> 25	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Ao contrário da IEEE 519-1992, a PRODIST não leva em consideração o cálculo da relação da corrente de curto-circuito e corrente máxima da carga,

sendo necessário somente o valor de tensão nominal do barramento de alimentação da instalação.

Foi possível observar então que os valores de taxa de distorção harmônica total e individual de tensão estão dentro dos limites normatizados pela PRODIST, sendo então a IEEE mais conservadora do que a PRODIST.

Os gráficos gerados pelo *software* da Embrasul ANL6000 possuem uma apresentação diferente dos gráficos do PowerLog da empresa Fluke, com diferenças de estética e de organização de dados.

As variações de tensão não são apresentadas utilizando a mesma escala que o PowerLog, mas com as variações sendo ilustradas mais suavemente e com faixas de referência para valores adequados, precários e críticos. Em contrapartida as variações de corrente são muito mais visíveis por ocuparem uma região maior do mesmo gráfico (com as escalas de cada grandeza nos dois lados), diferentemente do PowerLog que imprime um gráfico por sinal.

Os gráficos de tendência de harmônicos de tensão e corrente apresentam apenas os valores ímpares de menor ordem medidos, não sendo representados por linhas e sim pontos integralizados configurados pelo usuário.

A queda de corrente observada às 13h10 é a mesma registrada nos gráficos do PowerLog, os valores de taxa de distorção harmônica total muito maiores, e os valores de taxa de distorção harmônica individual menores, mostrando que mesmo os analisadores medindo a mesma carga no mesmo instante acabam apresentando diferenças nesses aspectos, podendo influenciar a comparação com as normas por estes motivos.

Da mesma maneira que o analisador Fluke, as mesmas medições realizadas no mesmo instante de Taxa de Distorção Harmônica Individual e Total de tensão e Taxa de Distorção da Demanda da corrente foram levantadas pelo *software* da Embrasul ANL6000.

Tabela 22 - Taxa de Distorção da Demanda do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.

TDD% (A) Fase A	TDD% (A) Fase B	TDD% (A) Fase C
4,35	5,93	6,03

Fonte: Autoria própria.

Tabela 23 - Taxa de distorção harmônica individual do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.

Ordem	DHI% (A) Fase A	DHI% (A) Fase B	DHI% (A) Fase C
3	1,04	1,90	1,43
5	2,85	4,45	3,28
7	1,61	1,99	1,51
9	0,00	0,00	0,58
11	1,84	1,60	2,27
13	2,85	0,00	2,81
> 14	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

A diferença de valores em relação aos obtidos pelo analisador Fluke sobre Taxa de Distorção Harmônica Total foram consideráveis em comparação com a norma IEEE 519-1992, mas estando todos os valores dentro dos limites admissíveis também, pois pela norma IEEE 519-1992 os valores não ultrapassaram 12 %. Porém, os valores de Taxa de Distorção Harmônica Individual, os resultados da Embrasul foram menores, indicando valores permitidos pela norma enquanto os da Fluke apresentaram valores de harmônicos de 11^a ordem acima dos limites.

A seguir os valores percentuais de harmônicos de tensão para realizar igualmente a comparação do Fluke, mas dessa vez com o Embrasul, em relação à norma PRODIST – módulo 8.

Tabela 24 - Taxa de Distorção Harmônica Total de tensão do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.

DHT% (v) Fase AN	DHT% (v) Fase BN	DHT% (v) Fase CN
2,10	2,16	2,43

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25 - Distorção harmônica individual de tensão das fases do transformador pelo Embrasul RE6000/N.

Ordem	DHI% (v) Fase AN	DHI% (v) Fase BN	DHI% (v) Fase CN
2	0,00	0,00	0,00
3	0,42	0,23	0,15
4	0,00	0,00	0,00
5	1,81	1,77	1,92
6	0,00	0,00	0,00
7	0,48	0,25	0,62

Tabela 25 (Continuação) - Distorção harmônica individual de tensão das fases do transformador pelo Embrasul RE6000/N.

8	0,00	0,00	0,00
9	0,17	0,15	0,09
10	0,00	0,00	0,00
11	0,25	0,86	0,97
12	0,00	0,00	0,00
13	0,39	0,36	0,14
14	0,00	0,00	0,00
> 25	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Mesmo o analisador Embrasul RE6000/N apresentando valores maiores que os do Fluke 435 II, as Distorções Individual e Total de tensão no transformador se mantiveram dentro dos limites da norma PRODIST, com valores em torno de 2 %, abaixo dos 8 % recomendados pela norma.

As diferenças de resultados dos analisadores pode ser relacionada principalmente à classe dos equipamentos (sendo o Fluke de classe A e o Embrasul classe S), sendo o Fluke o mais preciso entre os dois. Outro fator também são os sensores de corrente utilizados, que podem apresentar resultados mais confiáveis se usados os de escala compatíveis com a corrente medida. Os sensores de corrente TI3000 da Embrasul possuem capacidade máxima de 300 A e os da Fluke 1000 A.

3.4.2.2. *Chiller*

A medição do *chiller* seguiu os procedimentos dos estágios descritos pela norma IEC 61000-3-4, e os analisadores foram programados para coletar os dados de distorção harmônica total e individual de corrente até harmônicos de 25ª ordem no ponto de alimentação das cargas.

Primeiramente foram utilizados os dados de tensão nominal no circuito V_{nom} e a impedância percentual $Z\%$, para o cálculo da potência de curto circuito S_{sc} pela fórmula (13) (POMILIO, 2008).

$$S_{sc} = \frac{V_{nom}^2}{Z\%}$$

$$S_{sc} = \frac{380^2}{0,0559}$$

$$S_{sc} = 2583184,257 \text{ VA}$$

Com a potência de curto circuito encontrada, através da norma IEC pode-se calcular pela fórmula (14) a Taxa de curto circuito R_{sce} pela relação da Potência de curto circuito encontrada S_{sc} pela potência aparente S_{eq} do equipamento e assim realizar a consulta na norma (POMILIO, 2008).

$$R_{sce} = \frac{S_{sc} [\text{VA}]}{S_{eq}[\text{VA}]}$$

$$R_{sce} = \frac{2583184,257}{132000}$$

$$R_{sce} = 19,56$$

Depois de encontrada a Taxa de curto circuito, foram coletados os resultados da medição de Taxa de Distorção harmônica Individual e Total realizados pelo Fluke 435 II, discriminados nas Tabelas 26 e 27 a seguir.

Tabela 26 - Distorção harmônica total do *chiller* pelo Fluke 435 série II.

DHT% (A) Fase A	DHT% (A) Fase B	DHT% (A) Fase C
2,60	2,30	2,26

Fonte: Autoria própria.

Tabela 27 - Distorção harmônica individual do *chiller* pelo Fluke 435 série II.

Ordem	DHI% (A) Fase A	DHI% (A) Fase B	DHI% (A) Fase C
3	0,80	1,98	1,57
5	4,38	4,58	3,68
7	2,14	2,16	2,32
9	0,33	0,42	0,12
11	2,25	2,05	0,79
13	0,33	0,66	0,84
15	0,07	0,10	0,07

Tabela 27 (Continuação)28 - Distorção harmônica individual do *chiller* pelo Fluke 435 série II.

17	0,14	0,02	0,14
19	0,06	0,05	0,05
21	0,03	0,04	0,02
23	0,03	0,07	0,04
25	0,05	0,06	0,06
> 25	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Da mesma maneira que o analisador Fluke 435 II, os mesmo valores foram coletados e dispostos em forma de tabela pelo Embrasul RE6000/N.

Tabela 29 - Taxa de Distorção Harmônica Total do *chiller* pelo Embrasul RE6000/N.

DHT% (A) Fase A	DHT% (A) Fase B	DHT% (A) Fase C
5,48	5,57	5,14

Fonte: Autoria própria.

Tabela 30 - Taxa de Distorção Harmônica Individual do *chiller* pelo Embrasul RE6000/N.

Ordem	DHI% (A) Fase A	DHI% (A) Fase B	DHI% (A) Fase C
3	0,85	1,90	1,42
5	4,45	4,41	3,22
7	2,06	2,07	1,25
9	0,00	0,00	0,58
11	2,26	1,90	2,46
13	0,32	0,00	0,46
15	0,00	0,00	0,00
> 15	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Pelos resultados apresentados por ambos os analisadores, somente pelo estágio 1 da norma IEC 61000-3-4 foi possível chegar a conclusão de que o *chiller* não ultrapassa nenhum dos valores normatizados de distorção harmônica, não sendo necessário o cálculo de taxa de curto circuito para consultar a tabela do estágio 2. Esses níveis baixos podem ser explicados pela alimentação direta na rede do *chiller*, sem o chaveamento de conversores de potência e semicondutores.

3.4.2.3. Motor de Indução com Conversor de Frequência

Assim como *chiller*, o conversor de frequência foi medido no ponto de entrada para análise dos dados de distorção harmônica total e individual de corrente, sendo esse alimentando um motor de indução de 20 CV.

A taxa de curto circuito também foi calculada para consulta do estágio 2 da norma IEC.

$$R_{sce} = \frac{S_{sc} [VA]}{S_{eq}[VA]}$$

$$R_{sce} = \frac{2583184,257}{14710}$$

$$R_{sce} = 175,60$$

O conversor de frequência foi medido somente com o analisador Fluke 435 II, pois ele possuía sensores menores que cabiam nos condutores do conversor, enquanto os sensores TI3000 da Embrasul são rígidos e maiores, não sendo possível acomodá-los no local de medição.

Tabela 31 - Distorção harmônica total do conversor de frequência pelo Fluke 435 série II.

DHT% (A) Fase A	DHT% (A) Fase B	DHT% (A) Fase C
23,46	22,20	23,67

Fonte: Autoria própria.

Tabela 32 - Distorção harmônica individual do conversor de frequência pelo Fluke 435 série II.

Ordem	DHI% (A) Fase A	DHI% (A) Fase B	DHI% (A) Fase C
3	3,37	3,86	4,08
5	3,64	3,53	3,54
7	11,77	11,11	11,78
9	10,08	9,35	10,01
11	1,08	1,16	1,04
13	0,90	0,90	0,92
15	1,02	1,03	1,09

17	1,31	1,23	1,25
19	0,60	0,60	0,63
21	0,53	0,54	0,50
23	0,46	0,47	0,47
25	0,42	0,42	0,43
> 25	0,20	0,20	0,20

Fonte: Autoria própria.

Como o resultado do cálculo de taxa de curto circuito indicou um valor superior a 33, e o níveis de distorção harmônica individual de 7^a, 9^a, 15^a e 17^a ordens foram superiores aos limites do estágio 1, denotados em vermelho na Tabela 31, o motor de indução precisou ser analisado seguindo a recomendação do estágio 2 da norma IEC, levando em conta o fator de Taxa de curto circuito.

Com a taxa de curto circuito igual a 175,60, foi consultada a tabela da norma pela linha de mínimo R_{sce} de 175 e novamente avaliada nos aspectos de distorção.

Tabela 33 - Distorção harmônica individual do conversor de frequência pelo Fluke 435 série II.

Ordem	DHI% (A) Fase A	DHI% (A) Fase B	DHI% (A) Fase C
3	3,37	3,86	4,08
5	3,64	3,53	3,54
7	11,77	11,11	11,78
9	10,08	9,35	10,01
11	1,08	1,16	1,04
13	0,90	0,90	0,92

Fonte: Autoria própria.

Como o estágio 2 só prevê limites até harmônicos de 13^a ordem, os harmônicos de 7^a e 9^a ordem continuaram fora dos limites pela norma, sendo necessário então ir para o estágio 3, onde somente há a recomendação de se realizar um acordo com a concessionária de energia sobre a emissão de harmônicos do equipamento.

Os valores superiores de harmônicos de 7^a e 9^a ordem sugerem uma possível ressonância com os bancos de capacitores entre a faixa de frequências dessas ordens, elevando seus valores de Taxa de Distorção Harmônica Individual de corrente.

3.4.2.4. Distribuidor e Granulador de Correia

Continuando o estudo de caso, a próxima carga a ser medida foi o conjunto que compõe o processo de granulação do setor da indústria, sendo uma derivação da alimentação para o processo do equipamento que realiza a distribuição e granulação dos compostos químicos.

O conjunto do equipamento é controlado por motores que são controlados por conversores de frequência, podendo gerar distorções harmônicas totais e individuais em algumas ordens para o barramento de alimentação do circuito CDC-4.

Calculando a Taxa de Curto Circuito do equipamento, utilizando a equação (14), descrita no capítulo 3.

$$R_{sce} = \frac{S_{sc} [VA]}{S_{eq}[VA]}$$

$$R_{sce} = \frac{2583184,257}{22000}$$

$$R_{sce} = 117,41$$

Os valores medidos de DHT% e DHI% de corrente pelo Fluke 435 II estão descritos pelas Tabelas 33 e 34.

Tabela 34 - Distorção harmônica total do distribuidor e granulador pelo Fluke 435 série II.

DHT% (A) Fase A	DHT% (A) Fase B	DHT% (A) Fase C
15,42	17,23	21,89

Fonte: Autoria própria.

Tabela 35 - Distorção harmônica individual do distribuidor e granulador pelo Fluke 435 série II.

Ordem	DHI% (A) Fase A	DHI% (A) Fase B	DHI% (A) Fase C
3	9,58	11,03	13,51
5	2,16	5,49	9,57
7	5,12	6,50	6,48
9	1,01	1,19	1,87
11	3,78	4,96	5,74
13	0,46	0,46	0,49
15	0,10	0,11	0,11
17	0,01	0,01	0,01
19	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00
> 25	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Como o valor da Taxa de Curto Circuito R_{scc} calculado de 117,41 foi superior à 33, os valores aferidos foram comparados com o estágio 2 da norma IEC. Após a comparação, percebe-se que as medições do distribuidor e granulador estão dentro dos limites aceitáveis pelo estágio 2, porém deve-se ressaltar que a Distorção Harmônica Individual de corrente de 11ª ordem da fase B chegaram a 4,96 %, muito próximo dos 6 % recomendados. Pode-se concluir que o equipamento esta dentro das normas se tivesse sido realizada a medição em um maior espaço de tempo e fossem apresentados estes resultados.

3.4.2.5. Elevador da Torre de Granulação

O último equipamento a ser medido foi o elevador da torre de granulação, que faz o transporte dos compostos químicos ao longo da torre por motores controlados através de conversores de frequência, assim como o distribuidor e o motor de indução medidos anteriormente.

A Taxa de Curto Circuito foi calculada como os outros equipamentos anteriores avaliados pela norma IEC 61000-3-4.

$$R_{sce} = \frac{S_{sc} [VA]}{Seq[VA]}$$

$$R_{sce} = \frac{2583184,257}{18000}$$

$$R_{sce} = 143,51$$

As Tabelas 35 e 36 informam os valores medidos do elevador da torre de granulação.

Tabela 36 - Distorção harmônica total do distribuidor e granulador pelo Fluke 435 série II.

DHT% (A) Fase A	DHT% (A) Fase B	DHT% (A) Fase C
12,34	12,87	16,66

Fonte: Autoria própria.

Tabela 37 - Distorção harmônica individual do distribuidor e granulador pelo Fluke 435 série II.

Ordem	DHI% (A) Fase A	DHI% (A) Fase B	DHI% (A) Fase C
3	2,97	3,06	4,21
5	3,64	5,33	8,12
7	11,86	12,11	14,72
9	1,66	1,99	2,21
11	0,78	1,16	1,47
13	0,50	0,82	0,90
15	0,21	0,23	0,29
17	0,09	0,10	0,10
19	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00
23	0,00	0,00	0,00
25	0,00	0,00	0,00
> 25	0,00	0,00	0,00

Fonte: Autoria própria.

Assim como o motor de indução do item 3.4.2.3, o elevador da torre de granulação também apresentou um valor superior à Taxa de Curto Circuito de

33, além de valores de Taxa de Distorção Harmônica Individual de 7ª ordem nas três fases superiores aos limites do estágio 1.

Ao comparar com os limites do estágio 2, percebe-se que os limites de 7ª ordem continuam muito acima dos recomendados de 10 %, sendo necessário assim como o motor de indução passar para o estágio 3 da norma que indica um acordo com a concessionária sobre os valores que o equipamento emite de harmônicos.

Ao final da análise, das cinco medições realizadas no estudo de caso, apenas duas não tiveram emissão de harmônicos significativa, enquanto o transformador não ficou dentro da norma IEEE 591-1992 em apenas uma frequência de harmônico e o motor de indução e elevador da torre de granulação não ficaram dentro dos limites da norma IEC 61000-3-4 de forma mais representativa.

Tabela 38 - Lista das cargas com limites acima das normas estudadas.

Cargas com Distorção Acima das Normatizações		
Equipamento	Ordem	Norma
Transformador de alimentação	11 ^a (Fases B e C)	IEEE 519-1992
Motor de Indução	7 ^a , 9 ^a , 15 ^a e 17 ^a (Fases A, B e C)	IEC 61000-3-4
Elevador da Torre de Granulação	7 ^a (Fases A, B e C)	IEC 61000-3-4

Fonte: A autoria própria.

3.5. MELHORIAS PROPOSTAS

Considerando a Tabela 37 com todas as irregularidades em relação às normas e recomendações estudadas no presente trabalho, o transformador de alimentação, o motor de indução e o elevador da torre de granulação que emitem valores percentuais altos no sistema, que precisa de medidas para correção e inibição da circulação destes harmônicos.

Os problemas da circulação de harmônicos de 7ª, 9ª, 11ª, 15ª e 17ª encontrados no estudo de caso foram abordados no capítulo 2.6, tais como a sobrecarga nos cabos de neutros, que podem ser vistos em na Figura 23 do Apêndice A do barramento principal de neutro do transformador, o aumento do

aquecimento e perdas do ferro e cobre do transformador e motores, o que afeta a eficiência das máquinas, e também a ressonância com os bancos de capacitores instalados.

Para o perfil de harmônicos observados na instalação, recomenda-se a instalação de reatores de linha, como uma solução que necessita de menos investimento pelos seus aspectos construtivos mais simples, que simplesmente aumentam a impedância da fonte, diminuindo a distorção harmônica de corrente, sendo necessário instalá-los na alimentação da carga geradora de harmônicos.

Outra sugestão seria a instalação de filtros passivos, parametrizados para filtrar as principais ordens ímpares encontradas. A instalação deve ser realizada no barramento de alimentação das cargas, para que as correntes não circulem, causando os efeitos citados anteriormente.

Com a filtragem desses harmônicos gerados principalmente pelos conversores de frequência, os níveis de Taxa de Distorção Harmônica de corrente devem diminuir a níveis aceitáveis para as cargas na norma IEC 61000-3-4, e com isso a Taxa de Distorção Harmônica de corrente também reduziria a níveis aceitáveis no transformador de entrada pela norma IEEE 519-1992.

Outra alternativa seria a instalação de filtros ativos, com sistema eletrônico mais avançado que dá mais opções ao usuário. Porém é uma opção com custo maior e que não nem sempre é considerada como um investimento necessário, pois apesar de a empresa em questão apresentar níveis fora das normas, eles podem ser corrigidos utilizando métodos mais simples, como os filtros passivos ou os reatores de linha.

4 CONCLUSÕES

Com a finalização de todos os procedimentos colocados como objetivo no primeiro capítulo foi possível através de cada um deles encontrar soluções e alternativas nos problemas encontrados durante a realização do estudo. O presente trabalho que foi realizado tem como função principal orientar e dar suporte a futuros casos que necessitem medição de harmônicos em ambientes industriais, auxiliando o leitor em uma cuidadosa comparação entre normas a serem seguidas e entre os dois principais analisadores de energia utilizados no mercado.

O objetivo principal de realizar todas essas análises juntamente a um estudo de caso de medição real proporcionou um enriquecimento nos conceitos que envolvem a metodologia de medição e análise de resultados, que pode vir a servir de referência em campo por essa área de trabalho.

Os resultados encontrados foram de níveis anormais de espectro harmônico dentro da faixa da instalação medida em três locais, e devem-se frisar as condições de realização do trabalho proposto nas questões de tempo de medição e de integralização dos resultados, perfil de consumo da instalação (quais cargas são utilizadas e em qual horário do dia) e a pequena parte da instalação em que foi realizado o estudo, fatores que limitaram um aprofundamento prático nesses quesitos, o qual não era o objetivo principal do presente trabalho. Como foram encontrados níveis anormais de harmônicos, foram sugeridas prováveis soluções, dando um suporte ao leitor caso encontre níveis acima das normas citadas.

Dessa maneira, com todas as informações teóricas e práticas adquiridas ao final do estudo de caso, o leitor pode se especializar com mais referências a partir do suporte inicial apresentado aqui e realizar consultorias sobre qualidade de energia na área de análise de harmônicos para instalações industriais. Com todo conhecimento necessário adquirido, é possível construir relatórios específicos sobre medições com análises e conclusões sobre os resultados encontrados *in loco*, e sugerir detalhadamente ao cliente contratante as soluções que devem ser tomadas para proteger a instalação dos problemas que os harmônicos podem causar.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, G. V. Jr. **Contribuições da Distorção Harmônica de Tensão Entre Concessionária e Consumidor**, 2006.

ARRILAGA, J. W. **Power System Harmonics** 2ª Edição. John Wiley & Sons, 2004.

BARELE. **Distorções harmônicas**, 2014. Disponível em: <http://www.barele.pt/ficheiros/historia_empresa/Distorcoes_Harmonicas.pdf> Acesso em 15 de Fevereiro de 2014

BERLEZE. **Relatório Experimental Elementos ôhmicos e Não-Ôhmicos**. Disponível em: <<http://s3.amazonaws.com/magoo/ABAAAenHgAE-0.jpg>>. Universidade Federal do Paraná, 2012. Acesso em 8 de Abril de 2014.

BONHOMME, H. C. **Filtro Ativo Paralelo para Aplicações de Baixa Tensão**. Maio de 2000.

DUGAN, R. E. **Electrical Power Systems Quality**. 2ª Edição, 2002.

ELLIS, R. G. **Harmonic Analysis of Industrial Power Systems**, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, 1996.

EMBRASUL. **Manual Analisador de Energia RE6000 e Software de análise de qualidade de energia ANL6000**, 2014.

FIGUEIREDO, D. **Análise de Fourier e Equações Diferenciais Parciais**. IMPA-CNPq. Rio de Janeiro, 1997.

FLUKE. **Manual Analisador de Qualidade de Energia 435 série II**, 2012.

FUCHS, E. F. **Power quality in power systems and electrical machines**. San Diego, California, USA: Elsevier Academic Press, 2008.

GRAPHUS Energia. **Medição e Verificação de Energia e Harmônicas - Relatório Final - TR02**. São Jose dos Pinhais, 2009.

IEC. **IEC - Global Reach**, 2014. Disponível em IEC: <<http://www.iec.ch/about/globalreach/?ref=menu>>. Acesso em 11 de Fevereiro de 2014

IEC. **Norma IEC 61000 - Electromagnetic compatibility (EMC)**, 2005.

IEEE. **IEEE Brasil**, 2014. Disponível em IEEE: <<http://www.ieee.org.br/>>. Acesso em: 12 de Fevereiro de 2014.

IEEE. **IEEE Standard 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, 1992.

ISONI, M. **A Moderna Eficientização Energética e seus Possíveis Efeitos sobre o Desempenho Operacional de Equipamentos e Instalações Elétricas**, 2009. Disponível em: <http://www.engeparc.com.br/cariboost_files/4-Harmonicas.pdf>. Acesso em: 28 de Janeiro de 2014.

JOORABIAN, Mahmood. **Harmonic estimation in a power system using a novel hybrid Least Squares. Adaline algorithm**, 2009.

MECATRONICAATUAL. **Modulação PWM nos Inversores de Frequência**, 2013. Disponível em <<http://www.mecatronicaatual.com.br/educacao/1508-modulao-pwm-nos-inversores-de-frequncia>>. Acesso em 09 de Janeiro de 2014.

O SETOR ELÉTRICO. **NORMAS RELATIVAS A FATOR DE POTÊNCIA**, 2006. Disponível em TLA Capacitores: <<http://www.tlacapacitores.com.br/arquivos/uploads/2011/09/normas-relativas-a-fator-de-potencia-e-distorcao-harmonicas.pdf>>. Acesso em 11 de Fevereiro de 2014.

POMILIO, J. A. **Efeitos de harmônicas em componentes do sistema de energia elétrica**, 2008, Disponível em <<http://www.dsce.fee.un->

icamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html>. Acesso em 07 de Fevereiro de 2014.

POMILIO, J. A. **Eletromagnetic Compatibility low-Frequency Standards**, 2008, Disponível em <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf-files/IEC.pdf>>. Acesso em 07 de Março de 2014.

PROCEL. **CONSERVAÇÃO DE ENERGIA – Eficiência Energética de Instalações e Equipamentos**, 2ª Edição. Editora EFEI, 2001.

RIBEIRO, C. F. **Influência dos Harmônicos na Qualidade de Energia**, 2007. Disponível em UFOP: <<http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2007/C-RISTIANO%20FELIPE.pdf>>. Acesso em 02 de Março de 2014.

SANTOS, F. M. **QUALIDADE DE ENERGIA - COMPARAÇÃO DAS NORMAS IEC 61000-3-2 E IEEE 519**, 2007. Disponível em <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10000459.pdf>>. Acesso em 05 de Fevereiro de 2014.

SIEMENS. **Jonadas Técnicas Novas Perspectivas**, 2005. Disponível em Siemens: <http://www.siemens.com.br/medias/FILES/2437_20050623100759.-pdf>. Acesso em 01 de Março de 2014.

SILVA, S. R. **Efeitos da distorções Harmônicas**, departamento de Engenharia Elétrica UFMG, Agosto 2009.

SOUZA, I. J. **Circuitos Retificadores**, 2007. Disponível em Ivairsouza: <http://ivairsouza.com/circuitos_retificadores.html>. Acesso em 09 de Janeiro de 2014.

TAVARES, P. H. **Harmônicos em instalações elétricas**, 2008. Disponível em <http://www.engematec.com.br/site/downloads/harmonicos_em_Instalacoes_elétricas.pdf>. Acesso em 8 de Janeiro de 2014.

VORTEX Equipamentos; FLUKE. **Compreendendo Harmônicos de Energia: Resolução básica de problemas utilizando multímetros ou alicates de corrente.** Disponível em: <<http://www.vortex.com.br/notas/harmonicas.pdf>>. Acesso em: 09 de Fevereiro de 2014.

APÊNDICE A – Resultados da medição do transformador de alimentação

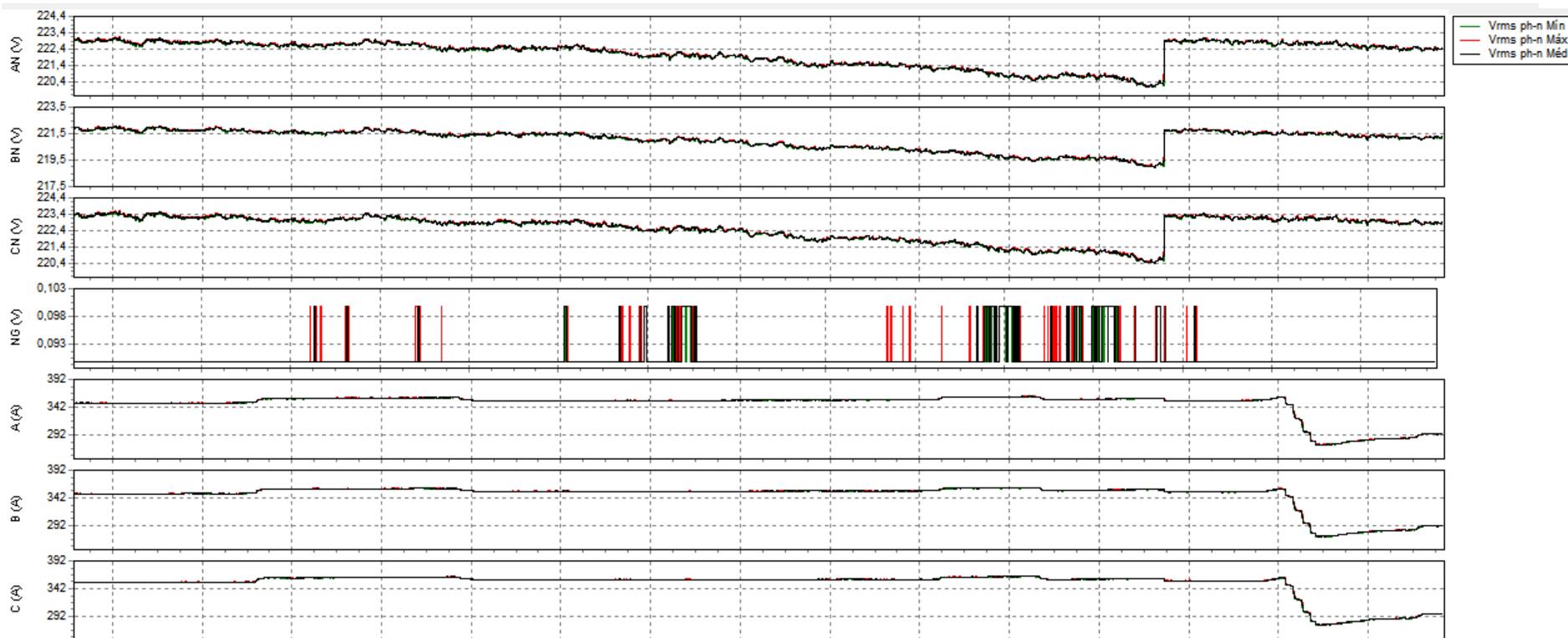


Figura 23 - Tendências de tensão e corrente do transformador de alimentação pelo Fluke 435 II.
Fonte: Autoria própria.



Figura 24 - Espectro de harmônicos totais de tensão e corrente do transformador de alimentação pelo Fluke 435 II.
Fonte: Autoria própria.

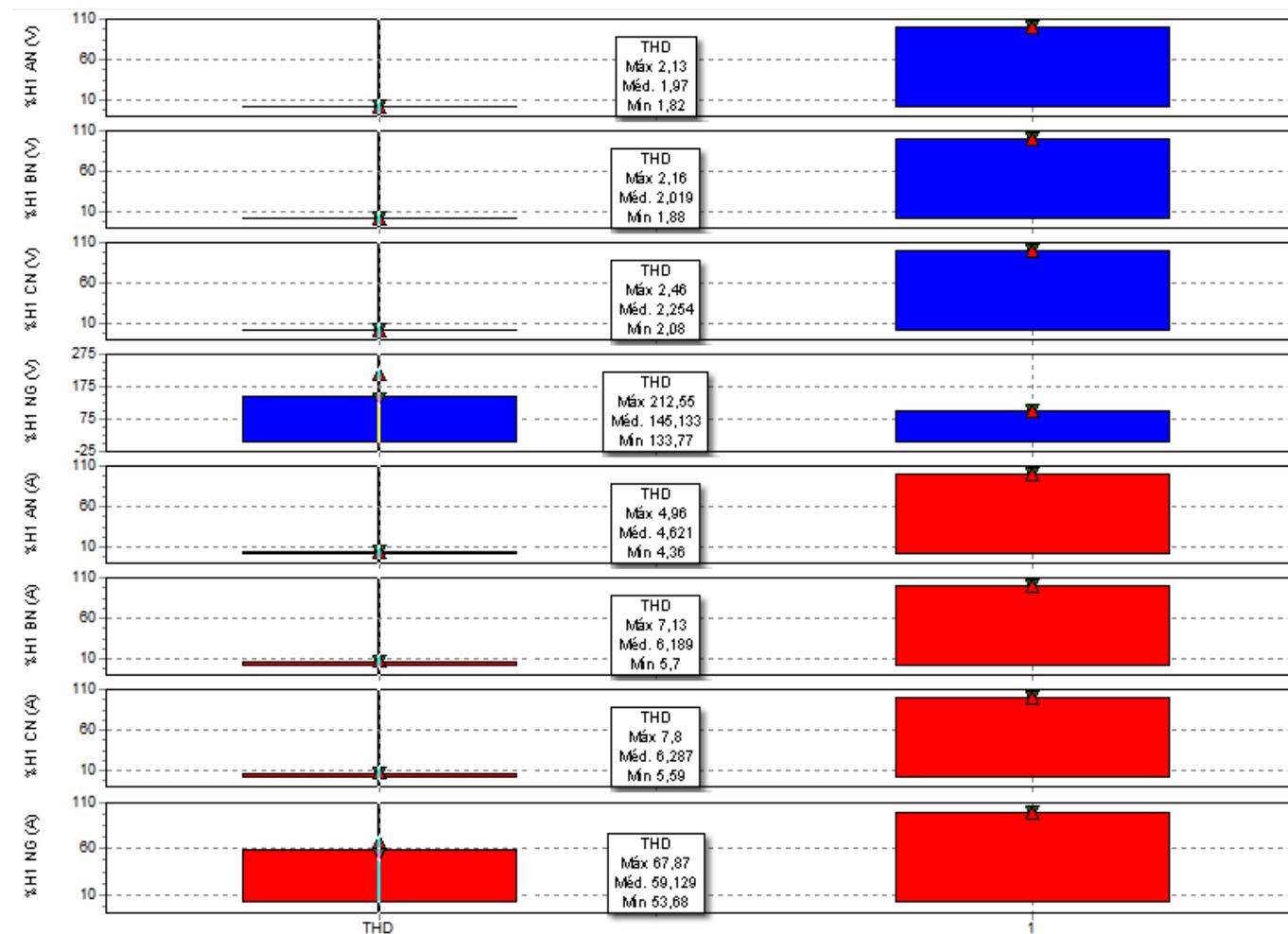


Figura 25 - Taxa de distorção harmônica total do transformador de alimentação pelo Fluke 435 II.
Fonte: Autoria própria.

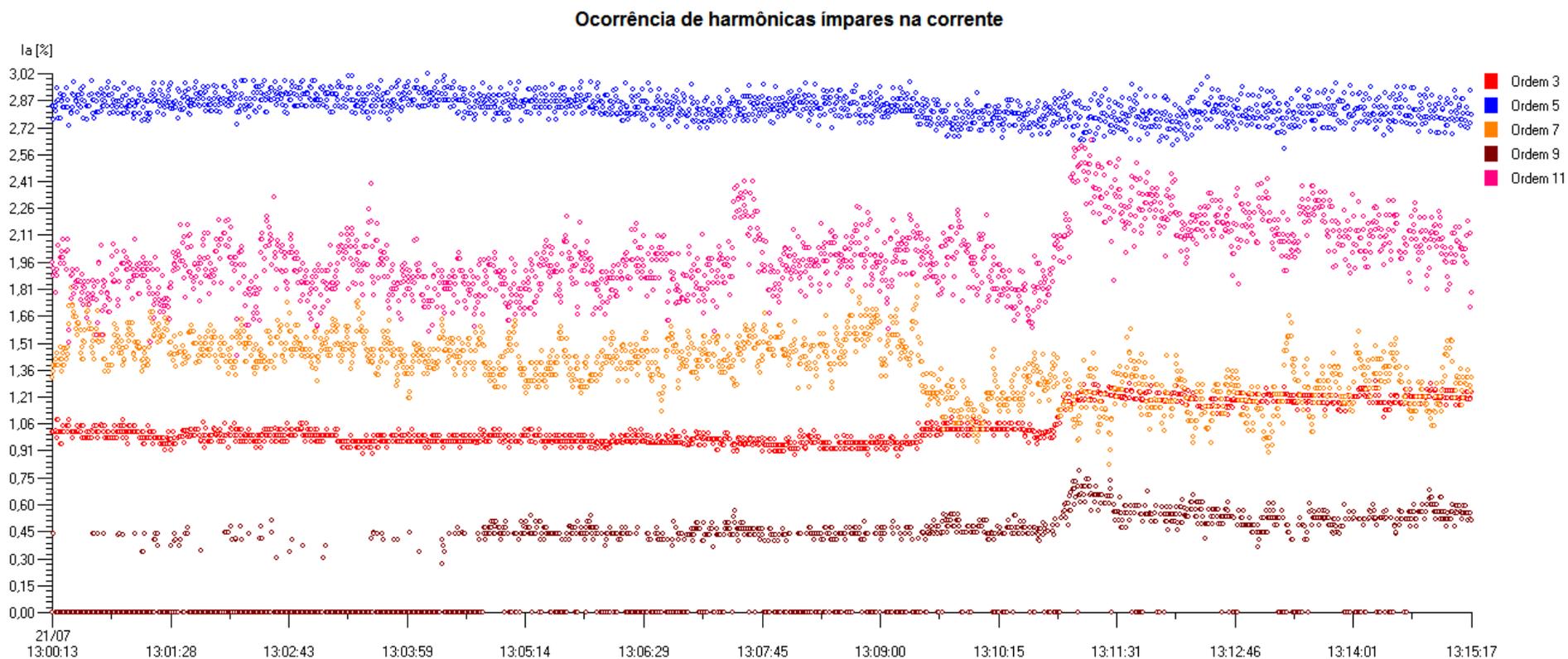
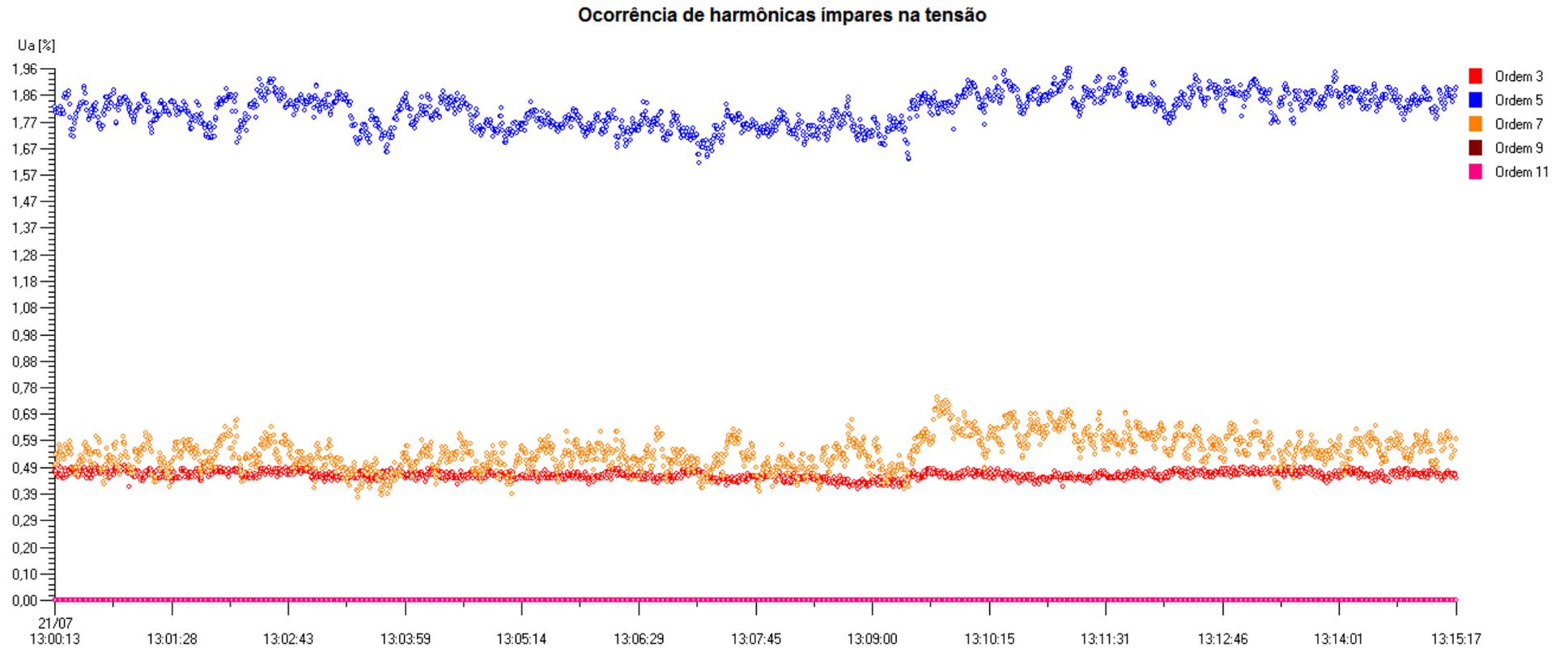
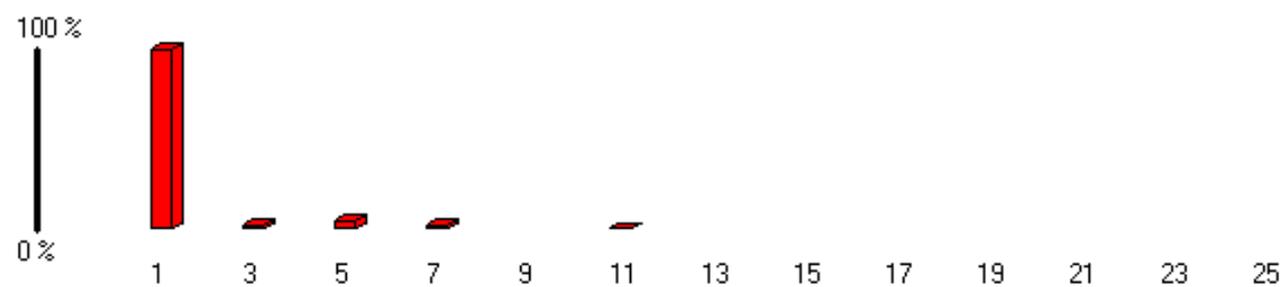


Figura 27 - Tendência de harmônicos de corrente do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.



**Figura 28 - Tendência de harmônicos de tensão do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.**

EMBRASUL RE6000/B/H/T/N N.S:96000947 V.S.2,16 ANL 2,64 (500 milissegundos)
Harmônicas de Corrente - fase B / segunda-feira 21/07/2014 13:41:52,00

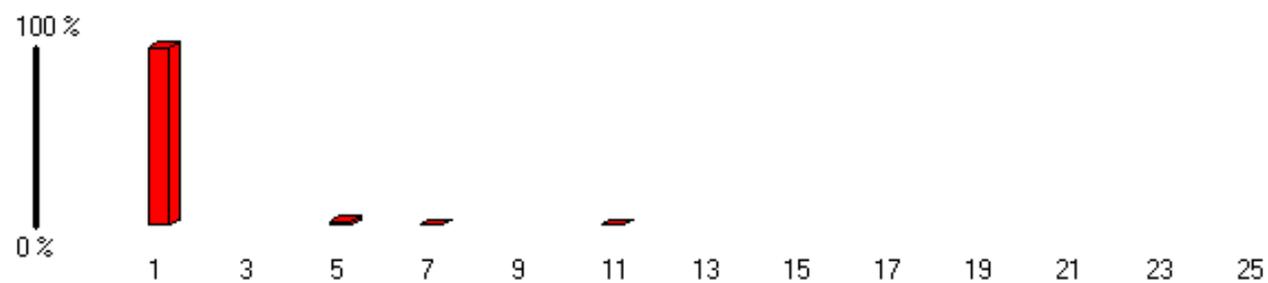


Registro: 1
RMS: 296,100 (A)
Componentes: 5
DHT: 5,481 %
Fundamental: 59,94 Hz

Figura 29 - Espectro de harmônicos de corrente da fase B do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.

EMBRASUL RE6000/B/H/T/N N.S:96000947 V.S.2,16 ANL 2,64 (500 milissegundos)

Harmônicas de Tensão - fase A / segunda-feira 21/07/2014 13:23:52,00



Registro: 2069

RMS: 224,020 (V)

Componentes: 4

DHT: 2,616 %

Fundamental: 59,94 Hz

Figura 30 - Espectro de harmônicos de tensão da fase A do transformador de alimentação pelo Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE B – Resultados da medição do *Chiller*

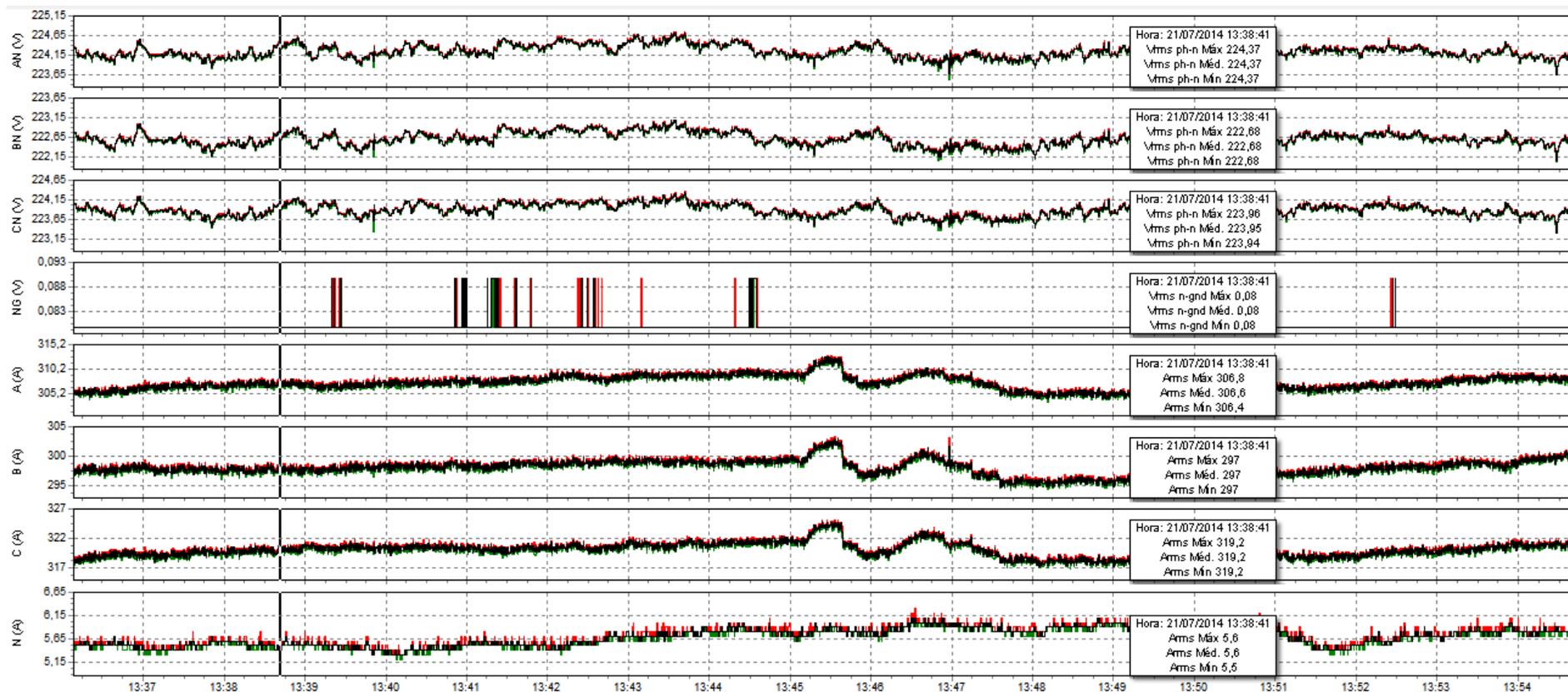


Figura 31 - Tendências de tensão e corrente do *chiller* pelo Fluke 435 II.
Fonte: Autoria própria.



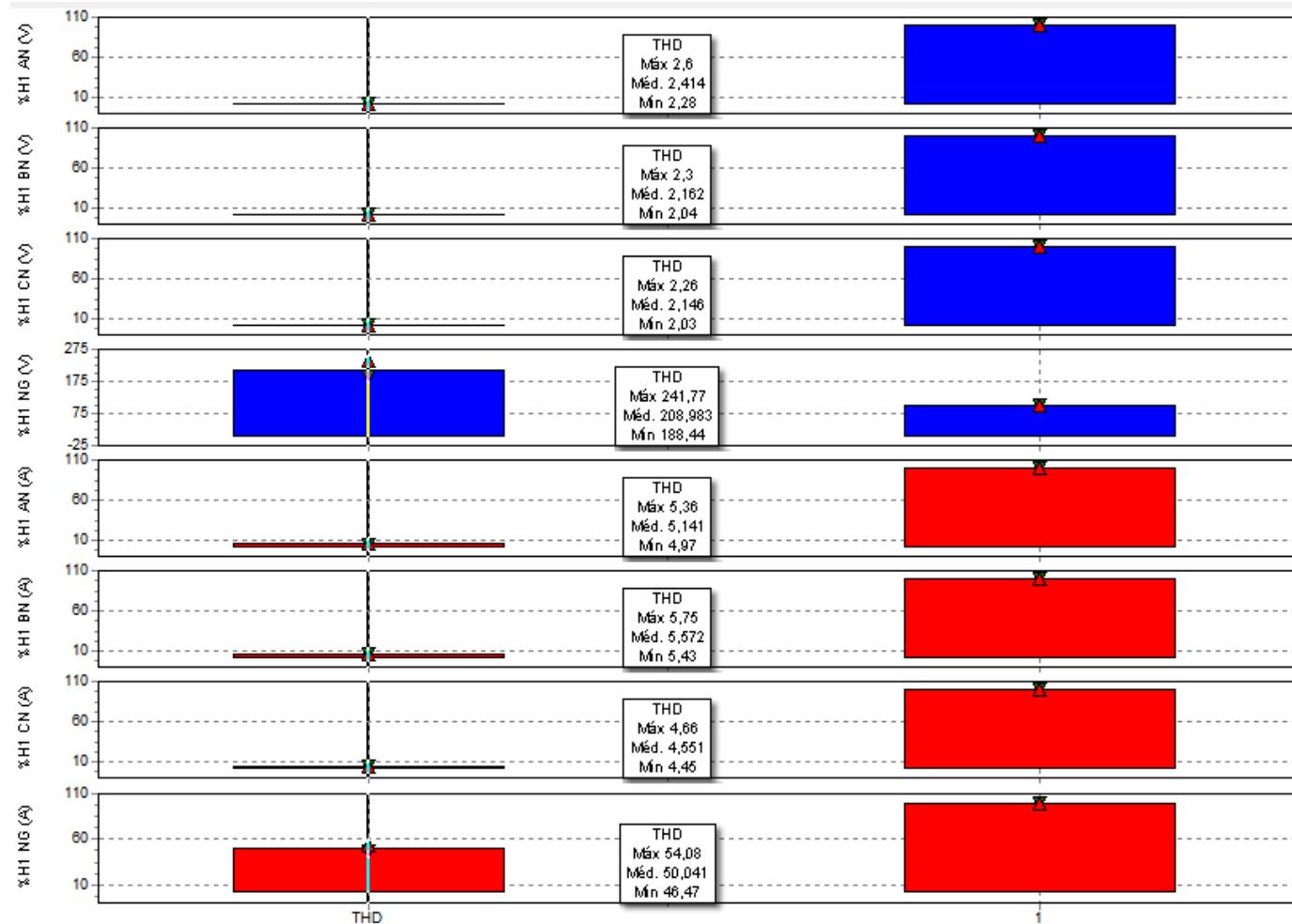


Figura 33 - Taxa de distorção harmônica total de tensão e corrente do *chiller* pelo Fluke 435 II.
Fonte: Autoria própria.

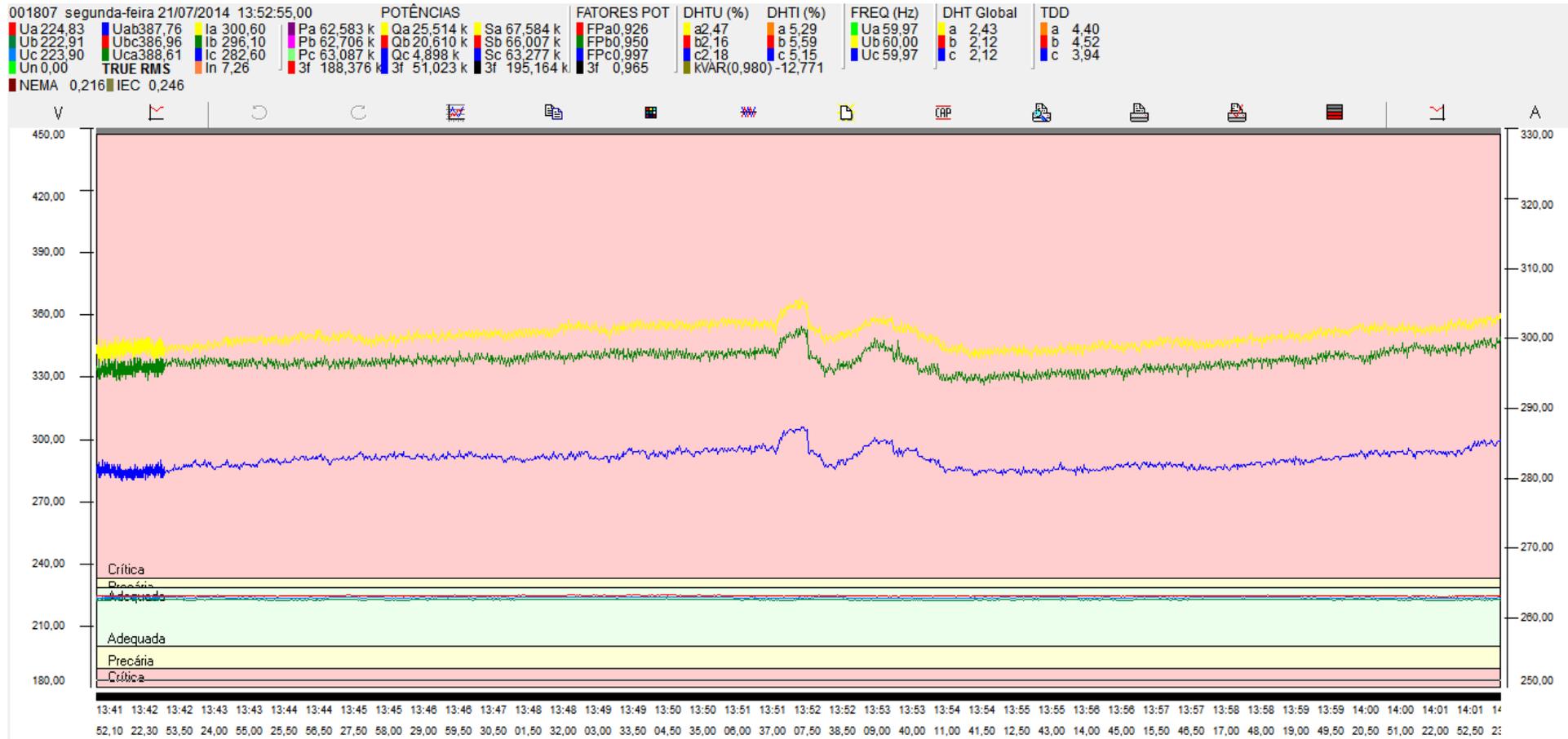


Figura 34 - Tendência de tensão e corrente do *chiller* pelo Embrasul RE6000/N.
 Fonte: Autoria própria.

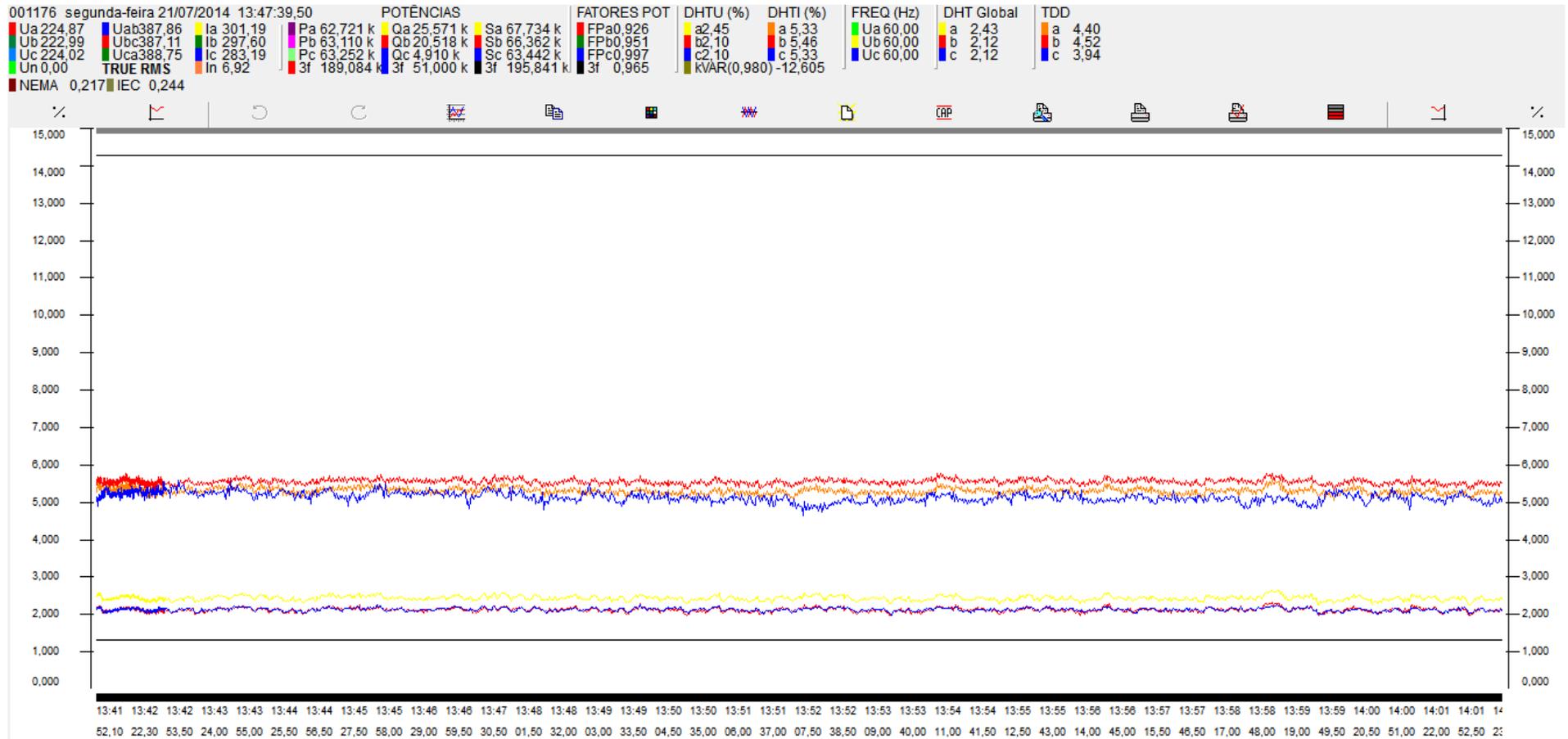


Figura 35 - Tendência de harmônicos totais de tensão e corrente do *chiller* pelo Embrasul RE6000/N.
 Fonte: Autoria própria.

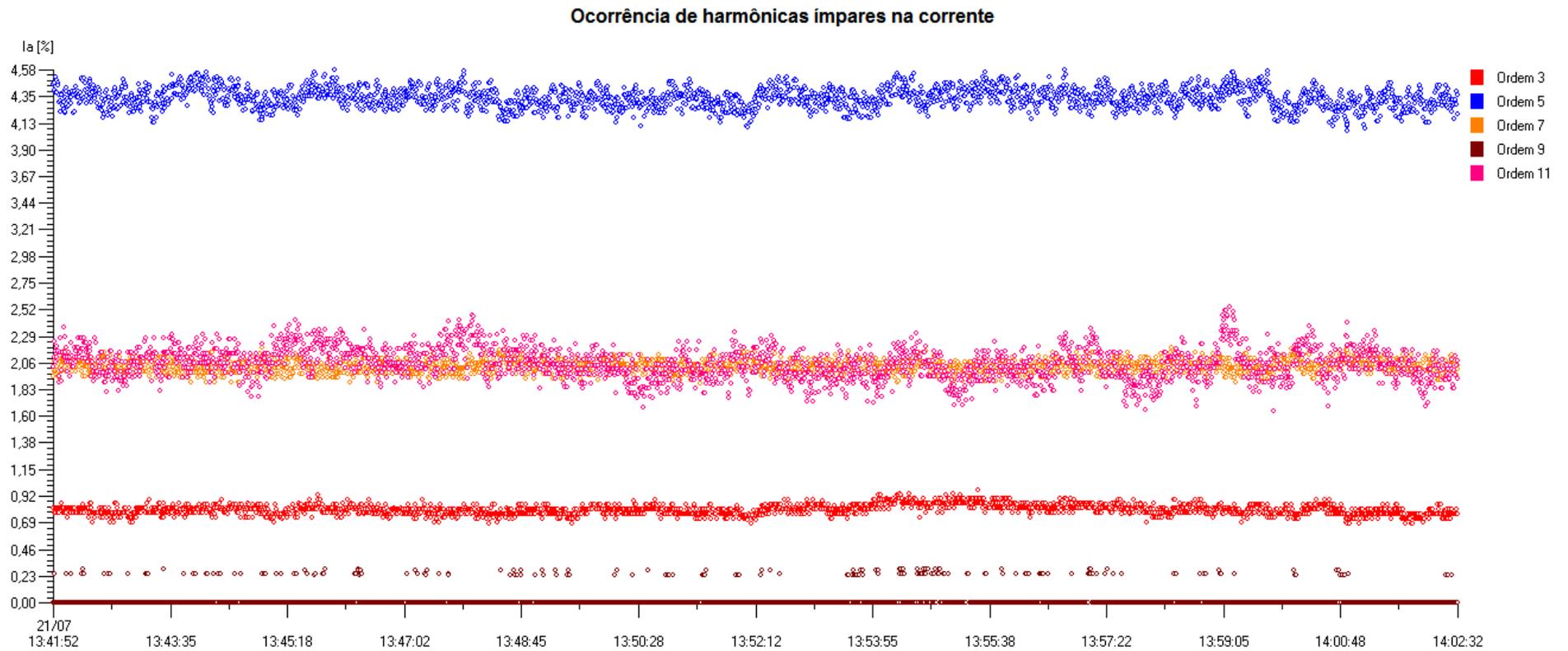


Figura 36 - Tendência de harmônicos individuais de corrente do *chiller* pelo Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE C – Resultados da medição do motor de indução

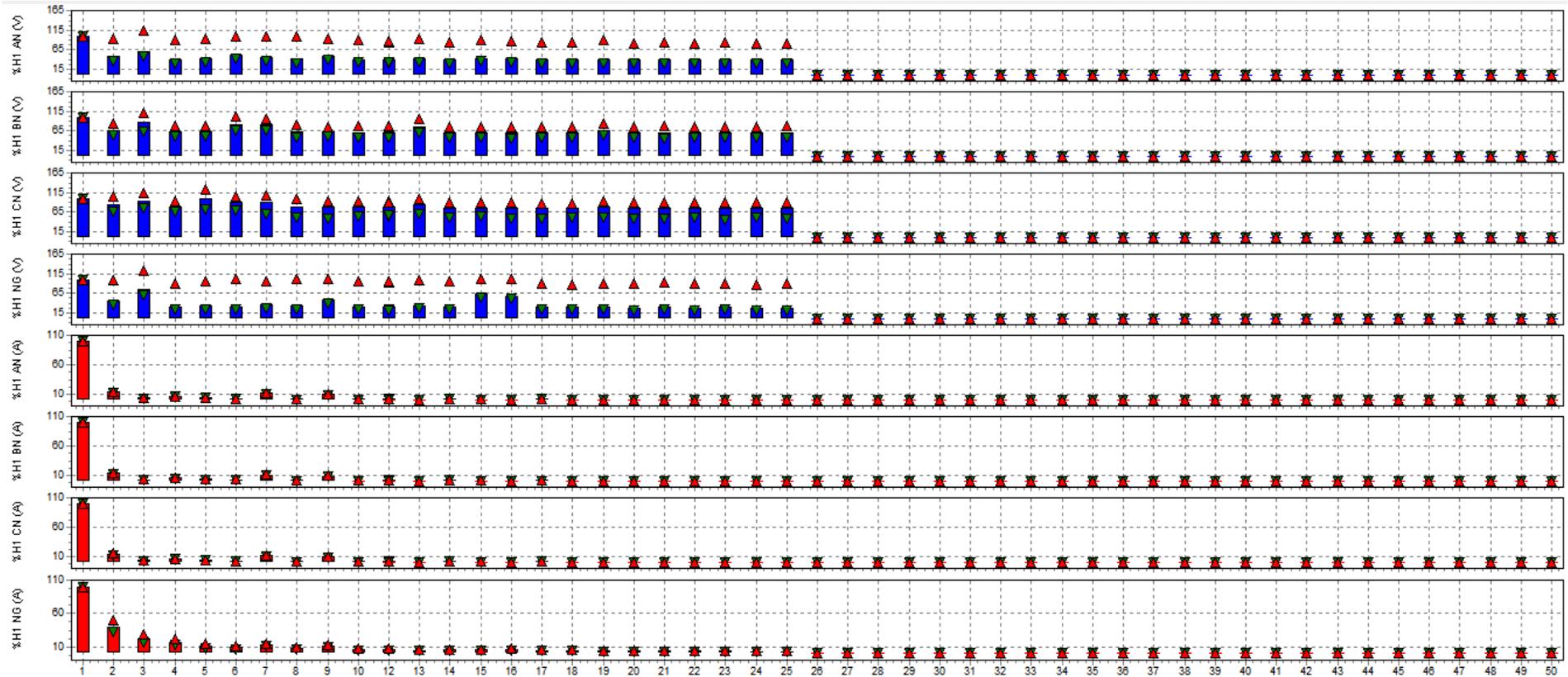


Figura 37 - Espectro de harmônicos de corrente do motor de indução com conversor de frequência pelo Fluke 435 II.
Fonte: Autoria própria.

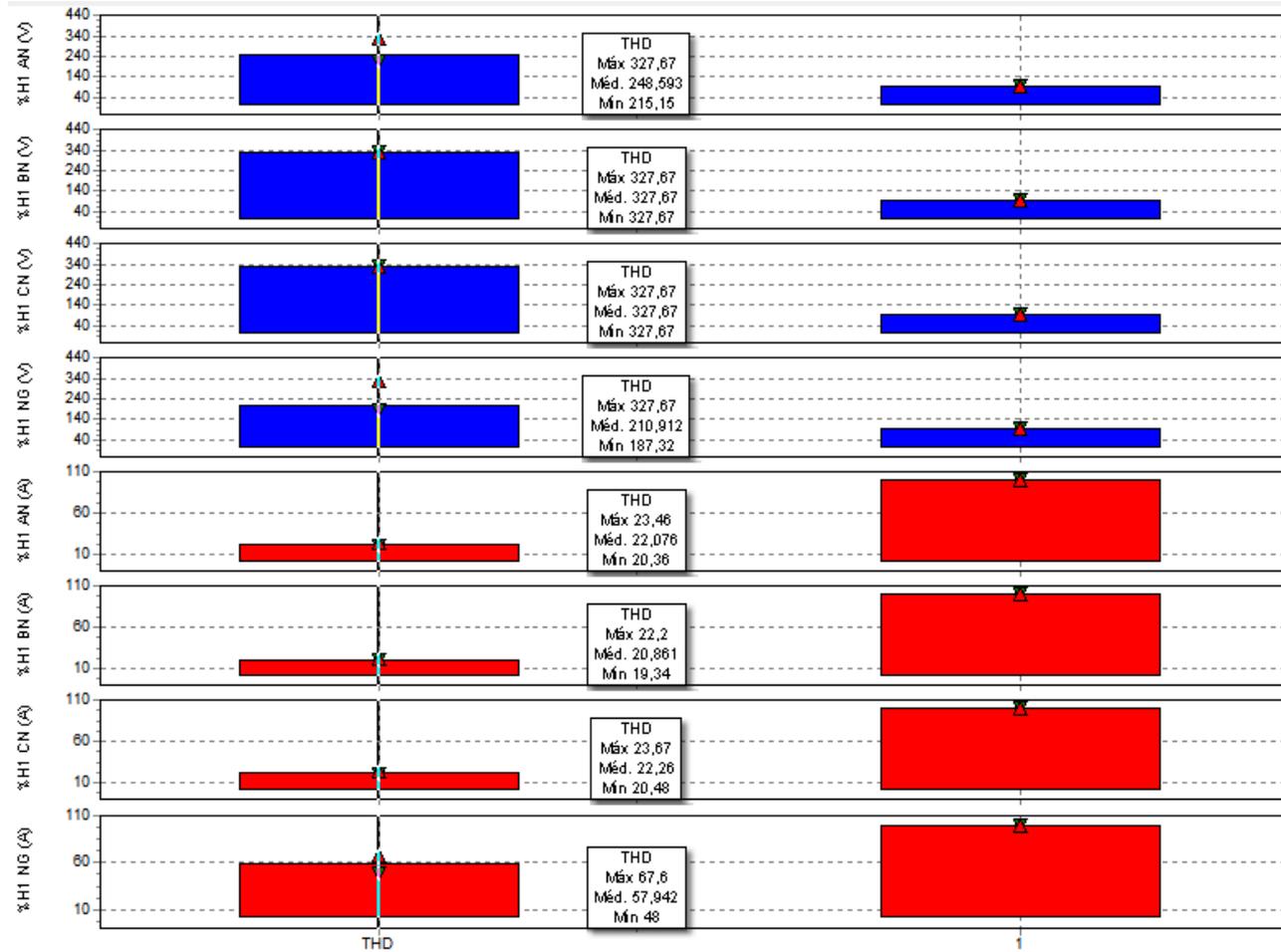


Figura 38 - Taxa de distorção harmônica total de tensão e corrente do motor de indução com conversor de frequência pelo Fluke 435 II.
Fonte: Autoria própria.

APÊNDICE D – Resultados da medição do distribuidor e granulador

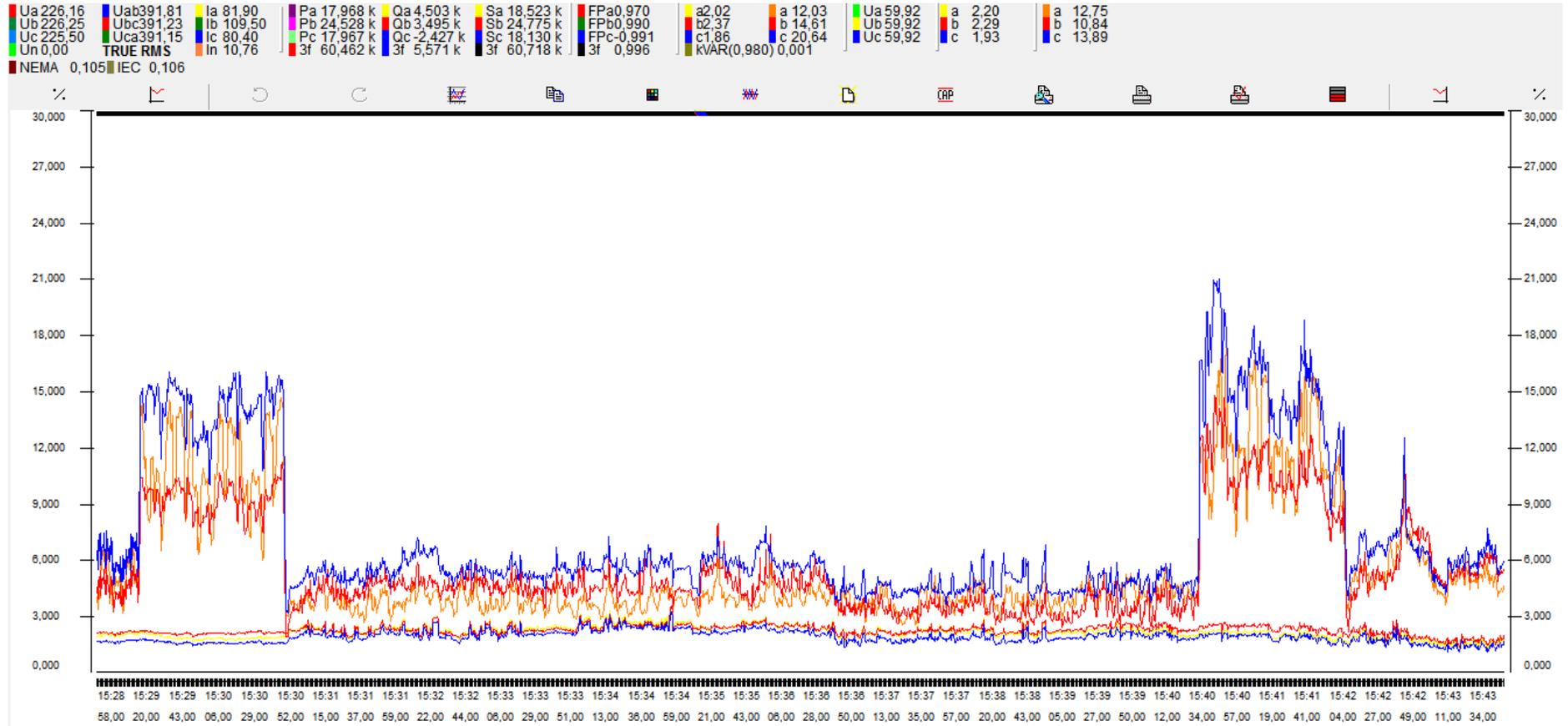
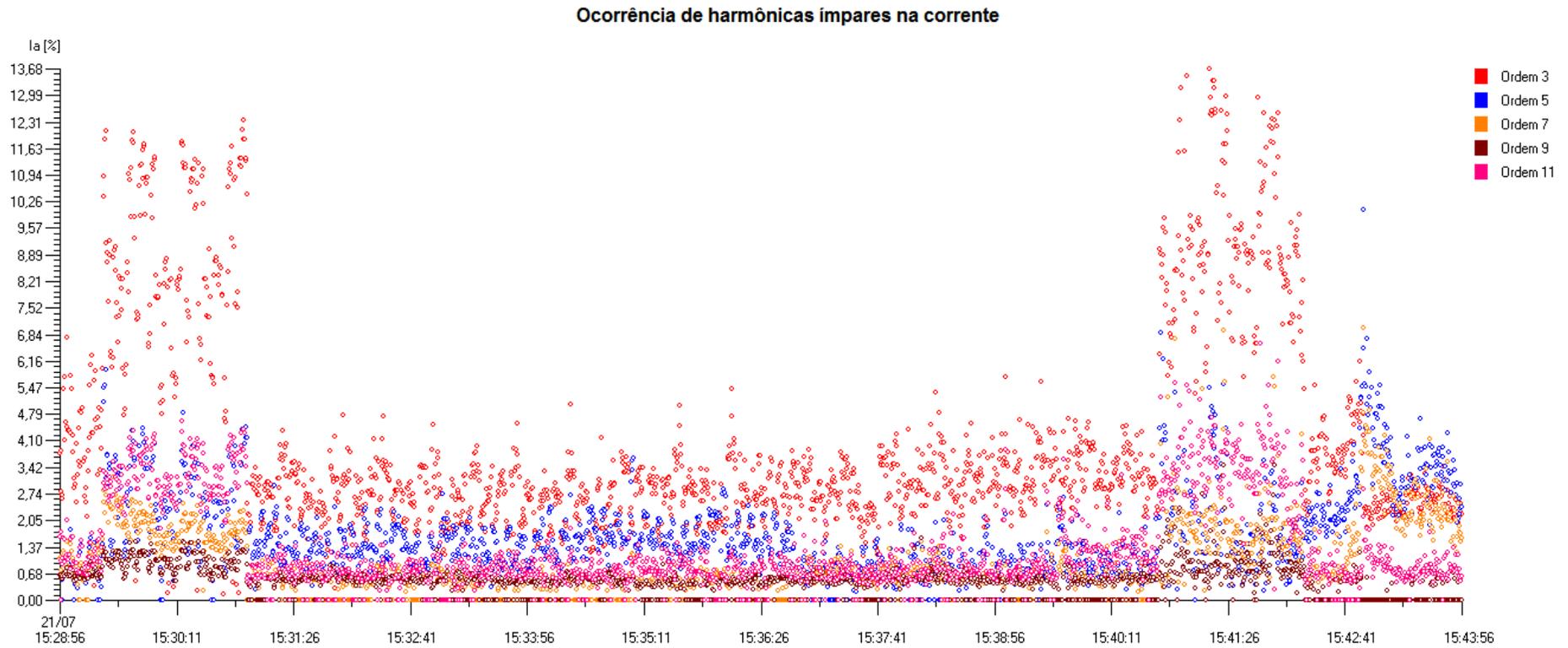


Figura 39 - Tendência de harmônicos totais de corrente do distribuidor e granulador pelo Embrasul RE6000/N.
 Fonte: Autoria própria.



**Figura 40 - Tendência de harmônicos individuais de corrente do distribuidor e granulador pelo Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.**

APÊNDICE E – Resultados da medição do elevador da torre

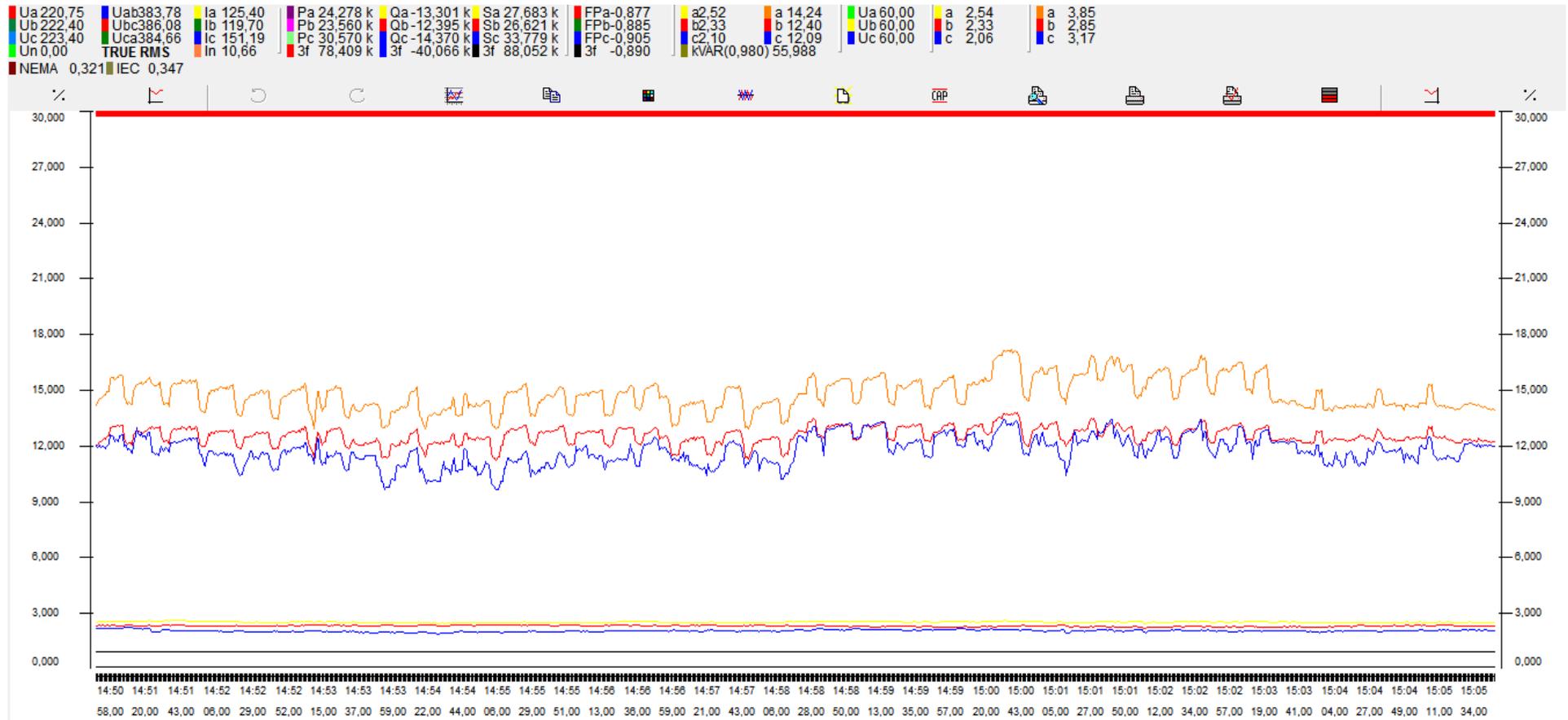


Figura 41 - Tendência dos harmônicos totais de corrente do elevador da torre pelo Embrasul RE6000/N.
 Fonte: Autoria própria.

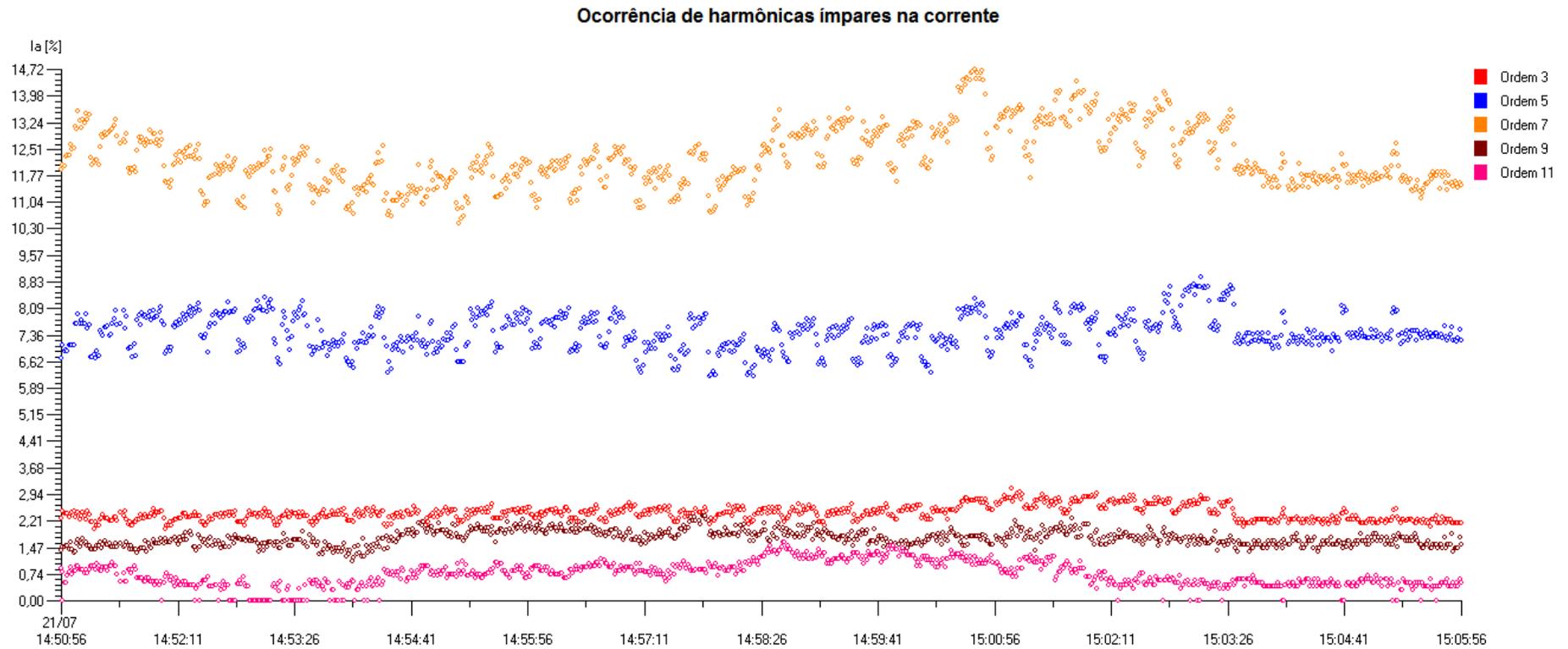


Figura 42 - Tendência de harmônicos individuais de corrente do elevador da torre pelo Embrasul RE6000/N.
Fonte: Autoria própria.