

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

JÉSSICA BACH
LUANE SCHIOCHET PINTO

AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA EM UMA INDÚSTRIA
ALIMENTÍCIA

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PATO BRANCO

2014

JÉSSICA BACH
LUANE SCHIOCHET PINTO

AVALIAÇÃO DA DISTORÇÃO HARMÔNICA EM UMA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Elétrica da Coordenação de Engenharia Elétrica – COELT – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Prof. Beatriz Fontana de Vargas

PATO BRANCO

2014

TERMO DE APROVAÇÃO

O trabalho de diplomação intitulado **Avaliação Da Distorção Harmônica em uma Indústria Alimentícia** foi considerado **APROVADO** de acordo com a ata da banca examinadora **Nº 63** de 2014.

Fizeram parte da banca os professores:

Carlos Marcelo De Oliveira Stein

César Augusto Portolann

Beatriz Fontana de Vargas

DEDICATÓRIA

Jéssica Bach

Ao meu pai, Cleomar Bach, minha mãe, Kassia Regina Bach, aos meus irmãos, Kamila, Maria Clara e Júnior, e ao meu namorado Jean Carlo Cantu.

Luane Schiochet Pinto

Ao meu pai, Luciano Antônio Colet Pinto, minha mãe, Rozane Schiochet Pinto, aos meus irmãos, Lais e Luan, aos meus avós João e Regina e ao meu namorado Giovani Alves Teixeira Júnior.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradecemos a Deus por ser nossa fonte de fé e sabedoria e o responsável pelo nosso sucesso durante essa caminhada.

Agradecemos as nossas famílias por nos apoiarem nos momentos difíceis e mostrarem o caminho para que não desistíssemos desse sonho, sendo base na formação de nosso caráter pessoal e profissional.

Agradecemos aos nossos namorados pelo companheirismo e apoio, e por todo o tempo que nos foi privado das vossas companhias.

Agradecemos aos amigos que fizemos durante essa caminhada pelo companheirismo, apoio e experiências transmitidas.

Agradecemos a Empresa Moinho de Trigo Bolson e seu representante Júlio Bolson por abrir as portas e estar sempre de prontidão para que fosse possível a realização deste estudo, e não menos importante, o eletricista responsável pela empresa, Cleomar Bach, que nos auxiliou durante todas as visitas.

Nosso obrigado a Universidade Tecnologia Federal do Paraná – Campus Pato Branco por nos proporcionar um ambiente de estudo agradável com todos os equipamentos necessários para que nossa formação fosse a melhor possível.

Aos professores do Curso de Engenharia Elétrica o nosso sincero agradecimento pelo esforço, dedicação e conhecimento transmitido durante o curso preparando - nos para o futuro da profissão.

Com grande importância, agradecemos nossa professora orientadora Beatriz Fontana de Vargas, por estar presente durante toda a elaboração do estudo compartilhando seu conhecimento e mostrando a melhor forma de se chegar no melhor resultado.

Por fim, agradecemos a banca examinadora Carlos Marcelo Stein e César Augusto Portolan pelas considerações e esclarecimentos.

EPÍGRAFE

“Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade.”

Albert Einstein

RESUMO

BACH, Jéssica; PINTO, Luane S. Avaliação da Distorção Harmônica em uma Indústria Alimentícia. 2014. 143 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2014.

Este trabalho apresenta um estudo da qualidade de energia no sistema elétrico de uma indústria alimentícia, tendo como foco a detecção de harmônicas geradas pelas cargas não lineares presentes na instalação. O levantamento dos dados foi feito utilizando um analisador de grandezas e uma câmera termográfica. Com o analisador de grandezas elétricas foram coletados dados de corrente, tensão, potência ativa, fator de potência, distorções harmônicas de corrente e de tensão e os possíveis distúrbios relacionados à qualidade de energia. Através das medições realizadas no quadro de distribuição principal, foi possível verificar a eficiência de um filtro passivo de energia elétrica existente na instalação. Buscando complementar o estudo, foram coletados termogramas no lado da baixa tensão do transformador de alimentação e do quadro de distribuição, com o intuito de detectar possíveis problemas de sobreaquecimento presentes.

Palavras-chave: Qualidade de Energia Elétrica. Distorção Harmônica. Termografia. Análise de Grandezas Elétricas.

ABSTRACT

BACH, Jessica; PINTO, Luane S. Evaluation of Harmonic Distortion on a Food Industry. 2014. 143 f. Final paper (undergraduate) - Electrical Engineering Course, Federal Technological University of Paraná. Pato Branco, 2014.

This paper presents a study of power quality in the electrical system of a food industry, focusing on detecting harmonics generated by nonlinear loads present in installation. Data collection was done using an electrical quantities analyzer and a thermographic camera. With the electrical quantities analyzer were collected current, voltage, active potency, power factor, harmonic distortion of current and voltage data and possible disturbs related to energy quality. Via measurements on main switchboard, it was possible to check the efficiency of a electric energy passive filter existing in the installation. Seeking to complement the study, thermograms were collected at low voltage side of the transformer and power distribution board, in order to detect possible problems of overheating.

Keywords: Quality of Electricity. Harmonic Distortion. Thermography. Analysis of Electrical Quantities.

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente contínua
DHT	Distorção Harmônica Total
DHT _i	Distorção Harmônica Total de Corrente
DHT _v	Distorção Harmônica Total de Tensão
DTD	Distorção Total de Demanda
DHI _v	Distorção Harmônica Individual de Tensão
DHI _i	Distorção Harmônica Individual de Corrente
FPD	Fator de Potência de Deslocamento
FP	Fator de Potência
HVDC	High Voltage Direct Current (Corrente Contínua em Alta Tensão)
IEC	“International Electrotechnical Commission” (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IEEE	“Institute of Electrical and Electronic Engineers” (Instituto de Engenheiros Eletricista e Eletrônicos)
KW	Quilo Watt (Unidade de potência multiplicada por 10 ³)
KVA	Quilo Volt Ampère (Unidade de potência multiplicada por 10 ³)
KV	Quilo Volt (Unidade de tensão multiplicada por 10 ³)
MW	Mega Watt (Unidade de potência multiplicada por 10 ⁶)
MTA	Máxima Temperatura Admissível
NBR	Norma Brasileira
ONS	Operador Nacional do Sistema
PAC	Ponto de Acoplamento Comum
Prodist	Procedimentos de Distribuição
QEE	Qualidade de Energia Elétrica
QD	Quadro de Distribuição
V _n	Tensão Nominal

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de Transitório	27
Figura 2 - Exemplo de Variações de Tensão	28
Figura 3 - Exemplo de Flutuação de Tensão	29
Figura 4 - Exemplo de Correntes Comportando Harmônicas, e Decomposição da Corrente Global em seus Componentes Harmônicas de Ordem 1 (Fundamental), 3, 5, 7 e 9.	31
Figura 5 – Exemplo (a) de Forma de Onda e (b) Espectro de um Sinal Fortemente Distorcido	35
Figura 6 - Esquema Unifilar Representando a Impedância do Circuito de Alimentação.....	36
Figura 7 - Configuração do Conversor de 6 Pulsos.....	39
Figura 8 - Esquema de uma Soft-Starter Implementado com 6 Tiristores para Acionar um Motor de Indução Trifásico (MIT).	41
Figura 9 - Esquema Básico de um Inversor de Frequência	42
Figura 10 - Triângulo de Potência sem Distorções Harmônicas.....	47
Figura 11 - Triângulo de Potência com Distorções Harmônicas.....	48
Figura 12 - Esquema de um Filtro Passivo.....	59
Figura 13 - Esquema de um Filtro Ativo.	60
Figura 14 - Absorção (α), Reflexão (ρ) e Transmissão (τ).....	63
Figura 15 - Diagrama Unifilar da Entrada de Serviço	66
Figura 16 – Exemplo de Componentes da Entrada de Serviço.....	67
Figura 17 - Cubículo do Transformador de 500kVA	67
Figura 18 - Demanda Contratada e Medida	70
Figura 19 - Filtro de Energia Elétrica Redumax - RX2000	71
Figura 20 - Fluxograma do Processo Produtivo	72
Figura 21 - Conexão do Analisador de Grandezas ao QD Principal	75
Figura 22 - Inversor de Frequência Responsável Pelo Acionamento e Controle do Motor – Exaustor do Pó do Sabor.....	76
Figura 23 - Gráfico de Tendência do Nível de Tensão Medido no Quadro de Distribuição Geral.....	80
Figura 24 - Gráfico de Tendência da Corrente Medida no Quadro de Distribuição Geral	80

Figura 25 - Gráfico de Tendência da Tensão do Condutor de Neutro Medida no Quadro de Distribuição Geral.....	81
Figura 26 - Gráfico de Tendência da Corrente do Condutor de Neutro Medida no Quadro de Distribuição Geral.....	81
Figura 27 - Gráfico Referente a Potência Ativa Medida em um Dia Típico de Produção.....	82
Figura 28 - Curvas do Fator de Potência Real e de Deslocamento em um Dia Típico de Produção.....	83
Figura 29 - Ondas de (a) Tensão e (b) Corrente Obtidas no Barramento do Quadro de Distribuição Geral.....	84
Figura 30 - Gráfico das Distorções Totais de Corrente em cada fase.....	86
Figura 31 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Corrente de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3.....	88
Figura 32 - Espectro de Frequência da Corrente - Valores Máximos.....	90
Figura 33 - Gráficos das Distorções Totais de Tensão em Cada Fase.....	91
Figura 34 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11°.....	92
Figura 35 - Espectro de Frequência da Tensão - Valores Máximos.....	93
Figura 36 - Gráfico de Tendência do Nível de Tensão Medido no Quadro de Distribuição Geral.....	94
Figura 37 - Gráfico de Tendência da Corrente Medida no Quadro de Distribuição Geral.....	95
Figura 38 - Gráfico de Tendência da Tensão do Condutor Neutro Medida no Quadro de Distribuição Geral.....	96
Figura 39 - Gráfico de Tendência da Corrente do Condutor Neutro Medida no Quadro de Distribuição Geral.....	96
Figura 40 - Gráfico Referente a Potência Ativa Medida em um Dia Típico de Produção.....	97
Figura 41 - Curvas do Fator de Potência Real e de Deslocamento em um Dia Típico de Produção.....	98
Figura 42 - Fator de Potência Referente ao Dia 14 de Abril de 2014.....	98
Figura 43 - Ondas de Tensão (a) e Corrente (b) Obtidas no Barramento do Quadro de Distribuição Geral.....	99
Figura 44 - Gráfico das Distorções Totais de Corrente em Cada Fase.....	101

Figura 45 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Corrente de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3	102
Figura 46 - Espectro de Frequência da Corrente - Valores Máximos.....	104
Figura 47 - Gráficos das Distorções Totais de Tensão em Cada Fase	105
Figura 48 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem(a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3	107
Figura 49 - Espectro de Frequência da Tensão - Valores Máximos.....	108
Figura 50 - Ondas de Tensão (a) e Corrente (b) do Inversor 01	111
Figura 51 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L12; (b) Fase L23 e (c) Fase L31– Inversor 01	112
Figura 52 - Espectro de Frequência da Tensão - Valores Máximos.....	113
Figura 53 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Corrente de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3 – Inversor 01	115
Figura 54 - Espectro de Frequência da Corrente - Valores Máximos.....	116
Figura 55 - Ondas de Tensão (a) e (b) Corrente do Inversor 05	117
Figura 56 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11°	118
Figura 57 - Espectro de Frequência da Tensão - Valores Máximos.....	119
Figura 58 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Corrente de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3 – Inversor 01	121
Figura 59 - Espectro e Frequência da Corrente - Valores Máximos.....	122
Figura 60 – Transientes	123
Figura 61 - Tela da Função Flicker.....	124
Figura 62 - Flicker	125
Figura 63 - Tela da Função Desequilíbrio	126
Figura 64 - Fasor de Desequilíbrio de (a) Tensão e (b) de Corrente.....	126
Figura 65 - Tabela de Eventos	128
Figura 66 - Variação da Frequência	129
Figura 67 - Vista Superior do Transformador de Alimentação.....	130
Figura 68 – (a)Termograma do Transformador e (b) Foto do Transformador Referente a Parte de Cobre.	130
Figura 69 - (a)Termograma do Transformador e (b) Foto do Transformador Referente a Parte de Borracha	131
Figura 70 - Pontos de Coleta dos Termogramas no Quadro de Distribuição Geral	132

Figura 71 – (a) Termograma e (b) Imagem Real das Conexões do Quadro Geral de Distribuição.....	132
Figura 72 – (a) Termograma e (b) Imagem Real dos Condutores do Quadro Geral de Distribuição.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ordem, Frequência e Sequência das Harmônicas.....	31
Tabela 2 - Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais (em Porcentagem da Tensão Fundamental)	52
Tabela 3 - Níveis de Referência Para Distorções Harmônicas Individuais de Tensão (em Porcentagem da Tensão Fundamental)	53
Tabela 4 - Limites de Tensão Harmônica IEEE 519-1992	54
Tabela 5 - Limites de Distorção da Corrente Para Sistemas de Distribuição	54
Tabela 6 - Níveis de Compatibilidade Para as Harmônicas de Tensão em Redes Públicas de BT.	55
Tabela 7 - Níveis de Compatibilidade Para Harmônicas	56
Tabela 8 - Limites Para Equipamentos da Classe A	57
Tabela 9 - Limites para Equipamentos da Classe C	57
Tabela 10 - Limites para Equipamentos da Classe D	57
Tabela 11 - Máxima Temperatura Admissível (MTA)	62
Tabela 12 - Nível de Emissividade	64
Tabela 13 - Relação dos Inversores de Frequência Instalados na Indústria	68
Tabela 14 - Informações da Soft-Starter Utilizada para Acionamento de Dois Motores	68
Tabela 15 - Histórico de Demanda e Consumo.....	69
Tabela 16 - Comparação dos Valores da DHTi Medida com os Valores da Norma IEEE 519	87
Tabela 17 - Comparação das Componentes Harmônicas de Corrente até a 25° Ordem com a Norma IEEE 519.....	89
Tabela 18 - Comparação da DHTv Medida com as Principais Normas Nacionais e Internacionais Vigentes	91
Tabela 19 - Comparação da Componentes Harmônicas de Tensão até a 25° Ordem com as Principais Normas Vigentes.....	93
Tabela 20 - Comparação dos Valores da DHTi Medida com os Valores da Norma IEEE 519	101
Tabela 21 - Comparação das Componentes Harmônicas de Corrente até a 25° Ordem com a Norma IEEE 519.....	103

Tabela 22 - Comparação da DHTv Medida com as Principais Normas Nacionais e Internacionais Vigentes	105
Tabela 23 - Comparação da Componentes Harmônicas de Tensão até a 25° Ordem com as Principais Normas Vigentes.....	108
Tabela 24 - Comparação dos Níveis de Distorções Harmônicas de Tensão	109
Tabela 25 - Comparação dos Níveis de Distorções Harmônicas de Corrente	110
Tabela 26 – Valores Percentuais Médios das Componentes Harmônicas de Tensão	113
Tabela 27 - Valores Percentuais Médios das Componentes Harmônicas de Corrente	116
Tabela 28 - Valores Percentuais Médios das Componentes Harmônicas de Tensão	119
Tabela 29 - Comparação das Componentes Harmônicas de Corrente com Norma IEC 61000 3-2	122
Tabela 30 - Abreviações dos Eventos do Analisador	127

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	20
1.1	OBJETIVO GERAL	22
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
2	REVISÃO TEÓRICA.....	25
2.1	QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	25
2.1.1	Distúrbios Associados à Qualidade da Energia Elétrica.....	26
2.2	DISTORÇÕES HARMÔNICAS	29
2.2.1	Indicadores de Harmônicas.....	32
2.2.1.1	Distorção Harmônica Total (DHT).....	32
2.2.1.2	Distorção Total de Demanda (DTD).....	34
2.2.1.3	Distorção Harmônica Individual (DHI).....	34
2.2.1.4	Espectro Harmônico	35
2.2.2	Origem das Harmônicas.....	36
2.2.3	Principais Equipamentos Geradores de Harmônicas	37
2.2.3.1	Dispositivos a Arco	37
2.2.3.2	Conversores Estáticos	38
2.2.4	Efeitos Causados por Distorções Harmônicas em Componentes do Sistema Elétrico	43
2.2.4.1	Motores e Geradores	43
2.2.4.2	Transformadores.....	44
2.2.4.3	Cabos de Alimentação	45
2.2.4.4	Sistemas de Comunicação	45
2.2.4.5	Equipamentos de Proteção e Medição	46
2.2.4.6	Sistemas de Iluminação.....	46
2.2.4.7	Fator de Potência com Harmônicas.....	47

2.2.4.8	Bancos de Capacitores	49
2.2.4.9	Sobreaquecimentos e Tensão Elevada entre Neutro e Terra	50
2.3	NORMAS TÉCNICAS	51
2.3.1	PRODIST – Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica	52
2.3.2	IEEE Std 519 – 1992.....	53
2.3.3	IEC 61000 2-2.....	55
2.3.4	IEC 61000 2-4.....	55
2.3.5	IEC 61000 3-2.....	56
2.4	FILTROS PARA HARMÔNICAS	57
2.4.1	Filtros Passivos	58
2.4.2	Filtros Ativos.....	59
2.5	INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA.....	60
2.5.1	Emissividade	62
3	INDÚSTRIA EM ESTUDO	65
3.1	DESCRIÇÃO GERAL DA INDÚSTRIA.....	65
3.2	INSTALAÇÃO ELÉTRICA.....	65
3.2.1	Histórico de Consumo e Demanda da Indústria	68
3.2.2	Filtro de Harmônicas	70
3.3	Manutenção Elétrica.....	71
3.4	PROCESSO PRODUTIVO.....	71
4	METODOLOGIA	74
4.1	MEDIÇÕES COM ANALISADOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS.....	74
4.1.1	Parâmetros de Medição Utilizados para o Analisador de Grandezas	76
4.2	INSPEÇÃO COM A CÂMERA DE TERMOGRAFIA.....	77
4.2.1	Parâmetros de Medição Utilizados para o Câmera Termográfica.....	78
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
5.1	MEDIÇÕES REALIZADAS COM O FILTRO LIGADO.....	79

5.1.1	Tensão e Corrente nas Fases.....	79
5.1.2	Potência Ativa e Fator de Potência.....	82
5.1.3	Avaliação das Distorções Harmônicas.....	83
5.1.3.1	Distorções Harmônicas de Corrente.....	85
5.1.3.2	Distorções Harmônicas de Tensão.....	90
5.2	MEDIÇÕES REALIZADAS COM O FILTRO desligado.....	94
5.2.1	Tensão e Corrente nas Fases.....	94
5.2.2	Potência Ativa e Fator de Potência.....	96
5.2.3	Avaliação das Distorções Harmônicas.....	99
5.2.3.1	Distorções Harmônicas de Corrente.....	100
5.2.3.2	Distorções Harmônicas de Tensão.....	104
5.3	COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES REALIZADAS COM O FILTRO DE HARMÔNICAS LIGADO E DESLIGADO.....	109
5.4	AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA.....	110
5.4.1	Inversor 01.....	110
5.4.1.1	Distorções Harmônicas de Tensão.....	111
5.4.1.2	Distorções Harmônicas de Corrente.....	114
5.4.2	Inversor 05.....	117
5.4.2.1	Distorções Harmônicas de Tensão.....	117
5.4.2.2	Distorções Harmônicas de Corrente.....	120
5.5	ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA.....	123
5.5.1	Função Transiente.....	123
5.5.2	Função de Oscilação (Flicker).....	124
5.5.3	Função Desequilíbrio.....	125
5.5.4	Função de Reduções e Aumentos de Tensão (Dips & Swells).....	127
5.5.5	Frequência.....	128
5.6	TERMOGRAFIA.....	129

5.6.1	Transformador de Alimentação	129
5.6.2	Quadro de Distribuição Geral.....	131
6	CONCLUSÃO	134
	Referências	137
	ANEXO A	142

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de energia elétrica (QEE), durante muito tempo, limitou-se à quantidade de desligamentos que o sistema elétrico era submetido, ou seja, quanto menor fosse o número desses eventos melhor era a qualidade da energia elétrica entregue ao consumidor.

Atualmente o conceito de qualidade de energia elétrica pode ser definido como “a ausência relativa de variações nos níveis de tensão provocados pelo sistema da concessionária, incluindo a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, transitórios e harmônicas medidas no ponto de entrega da energia” (GAMA; OLIVEIRA, 1999) que possam causar falha, má operação ou defeito em algum equipamento do consumidor. Segundo Dias (2002) a excelência em “QEE é a disponibilidade da energia elétrica, com forma de onda senoidal pura, sem alterações na amplitude, como se emanasse de uma fonte de potência infinita” (DIAS, 2002).

Com o intuito de aumentar a eficiência e a produtividade do sistema elétrico como um todo, houve o crescimento da aplicação de equipamentos utilizando a eletrônica de potência (RAMALHETE; SIMONETTI, 2009). Esses equipamentos melhoram o rendimento e controlabilidade e desta forma contribuem para economia com custos de energia (VASCONCELLOS, *et al.*, 2011). Apesar de fornecerem um controle otimizado do fluxo de energia, esses equipamentos funcionam como cargas não lineares, uma vez que a corrente não é proporcional à tensão aplicada, e com isso as ondas se tornam distorcidas quando comparadas à senoide da tensão original (ALVES, 2010).

A circulação da corrente distorcida pelas impedâncias da instalação elétrica provoca distorção na forma de onda da tensão (SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE, 2003). Estas distorções tanto na tensão quanto na corrente são chamadas de distorções harmônicas e causam impacto direto na qualidade da energia elétrica.

As distorções harmônicas são caracterizadas por serem uma combinação de componentes de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental, no caso 60Hz. Desta forma, “pode-se dizer que um sinal periódico contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal puramente senoidal” (RODRIGUES, 2009). Essas distorções harmônicas podem ser

classificadas como pares e ímpares, sendo que as ímpares são mais frequentes e possuem maior intensidade, portanto são as maiores causadoras de problemas.

Na grande maioria dos casos, as harmônicas surgem dentro da própria instalação do consumidor, que possui diversas cargas não lineares. Dentre estas cargas estão os retificadores, as fontes de tensão chaveadas, os controladores de velocidade variável, fornos a arco, dispositivos saturáveis, equipamentos de solda, entre outros dispositivos encontrados nas plantas industriais (TEIXEIRA, 2009).

Níveis elevados de distorção harmônica em uma instalação elétrica podem causar problemas tanto para as redes de distribuição das concessionárias quanto para a própria instalação elétrica do consumidor. Em máquinas elétricas, as distorções harmônicas provocam aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, comprometendo a eficiência da máquina, bem como redução da vida útil (POMILIO, 1997). No caso de bancos de capacitores, estes são muito sensíveis às harmônicas, que podem ocasionar aquecimento e encurtar a vida útil do capacitor, bem como o fenômeno da ressonância paralela que provoca a queima de capacitores. Outros problemas devido às harmônicas são a degradação das características de atuação dos relés de proteção, aumento da queda de tensão nas instalações elétricas, além da alteração no fator de potência da instalação, já que o triângulo de potências recebe uma terceira dimensão devido à potência aparente necessária para sustentar a distorção do sinal (DIAS, 2002).

O reconhecimento da existência de problemas devido às distorções harmônicas incentivou o desenvolvimento de normas específicas para tratar deste assunto. As principais normas internacionais envolvidas são o Guide Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Std 519-1992 e a norma International Electrotechnical Commission (IEC) da série 61000, sendo que cada uma delas tem como objetivo limitar o nível de distorção harmônica tanto nas tensões quanto nas correntes para instalações elétricas, além de estabelecer limites quanto ao nível de harmônicas que os equipamentos podem introduzir na rede (FREITAS; CORRÊA, 2007).

As novas tendências no setor energético, incluindo criação de normas específicas sobre níveis de emissão de componentes harmônicas indicam a necessidade de consumidores e fornecedores conhecerem a QEE negociada, e assim ambas as partes podem se beneficiar do suprimento de uma energia elétrica de qualidade.

No Brasil ainda não existem normas sobre distorção harmônica injetada pelo consumidor, a legislação vigente que trata da QEE como produto na distribuição é o módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), elaborado pela ANEEL.

A avaliação dos níveis de distorções harmônicas no sistema elétrico, no lado da baixa tensão, de uma indústria alimentícia é fundamental por dois motivos principais. O primeiro relaciona-se ao interesse da própria indústria, enquanto consumidor (proprietário), em avaliar a eficácia de um filtro de harmônicas existente, o qual tem como propósito a redução dos efeitos das distorções existentes e, além disso, obter um diagnóstico das condições do sistema elétrico e dos problemas oriundos de possíveis distorções elevadas. O segundo ponto é de interesse da concessionária, em função da manutenção da QEE entregue aos demais consumidores conectados na mesma rede de distribuição.

A correta identificação da origem das perturbações no sistema só é possível por meio de uma avaliação conjunta da tensão e da corrente no ponto avaliado. Tal avaliação pode ser realizada através de um analisador de grandezas elétricas que possui funções que fornecem os indicadores (fator de potência (FP), frequência, potência de distorção, taxa de distorção harmônica) utilizados para quantificar e avaliar o nível de harmônicas das ondas de tensão e corrente. É possível caracterizar, através da monitorização dos parâmetros do sistema elétrico da QEE, o desempenho do sistema e determinar possíveis ações corretivas para o mesmo.

1.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo realizar um estudo da QEE no sistema elétrico de uma indústria alimentícia, especificamente com relação à detecção de harmônicas geradas pelas cargas não lineares presentes na instalação, responsáveis pelos acionamentos de velocidade variável. Foi realizada a caracterização das cargas não lineares quanto à produção de componentes harmônicas e na sequência medições em campo com uso de um analisador de grandezas elétricas e uma câmera termográfica. A coleta de dados forneceu subsídios para o diagnóstico das questões relativas a QEE, além de analisar a eficácia do filtro existente perante essas cargas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para o estudo proposto os objetivos específicos são os mencionados a seguir:

- Estudar os limites e efeitos de harmônicas no sistema de distribuição próximo a indústria e em seu sistema elétrico segundo as principais normas nacionais e internacionais vigentes;
- Conhecer o processo produtivo e o plano de manutenção da indústria;
- Realizar o levantamento completo do sistema elétrico da indústria identificando os equipamentos que podem contribuir com as distorções harmônicas;
- Avaliar a qualidade de energia entregue pela concessionária local;
- Realizar medições de grandezas elétricas (tensão, corrente, potências, fator de potência e DHT) no nível da fonte de alimentação e do barramento do quadro de distribuição principal com o intuito de analisar o nível de DHT e examinar possíveis distúrbios;
- Verificar a conformidade de um filtro de harmônicas instalado anteriormente para redução dos efeitos das distorções harmônicas.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está organizado em capítulos com o intuito de abranger todo o conteúdo necessário da melhor forma possível e para uma descrição detalhada da análise dos objetivos propostos

Neste Capítulo 1 apresentou-se o trabalho e quais os objetivos que se pretende alcançar com o desenvolvimento do mesmo.

O Capítulo 2 apresenta a revisão teórica do assunto, neste capítulo são abordados todos os conhecimentos que se julgaram necessários para a elaboração do trabalho e para que a análise dos resultados seja feita com detalhamento necessário, além de facilitar a compreensão para o leitor.

No Capítulo 3 é feita a caracterização das instalações do Moinho de Trigo

Bolson Ltda, descrevendo o processo produtivo da empresa, abordando também os dados de consumo e demanda da mesma. Após, apresenta-se as cargas existentes na indústria e o diagrama elétrico.

Já no Capítulo 4 serão expostos os procedimentos adotados para a realização das medições propostas no presente trabalho, esclarecendo os locais e como os dados foram coletados nos equipamentos utilizados.

No Capítulo 5 serão apresentados os resultados e as avaliações dos dados coletados com o analisador de grandezas e a câmera termográfica.

No Capítulo 6 é apresentada a conclusão obtida com a análise dos resultados obtidos no decorrer do trabalho.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA

No Brasil, a primeira legislação que estabelecia indicadores para o controle desta qualidade, tornou-se vigente no ano de 1934 e durante muito tempo a preocupação com este assunto limitou-se à quantidade de desligamentos que o sistema elétrico era submetido, ou seja, quanto menor fosse o número desses eventos melhor era a qualidade da energia elétrica fornecida ao consumidor (ALVES, 2010).

O conceito de qualidade de energia tornou-se mais amplo e passou a englobar novos indicadores, como as distorções harmônicas e a cintilação luminosa (flicker), somente por volta de 1970 e 1980, mas ainda sem legislação específica para tratar do caso. No final da década de 1990, a ANEEL criou o Grupo de Trabalho Especial – Qualidade de Energia Elétrica, coordenado pelo ONS, para que fosse realizada a revisão da questão da qualidade da energia elétrica, com o intuito de elaborar um documento com caráter normativo para este caso (ALVES, 2010).

Atualmente a qualidade de energia elétrica pode ser definida como “a ausência relativa de variações nos níveis de tensão provocados pelo sistema da concessionária, incluindo a ausência de desligamentos, flutuações de tensão, transitórios e harmônicas medidas no ponto de entrega da energia” (GAMA; OLIVEIRA, 1999) que possam causar falha, má operação ou defeito em algum equipamento do consumidor.

Para Aldabó (2001), o conceito de qualidade de energia elétrica está relacionado com a busca por desenvolvimento de meios para erradicar ou minimizar problemas em dispositivos alimentados por fontes de energia elétrica. Do ponto de vista dos fabricantes de equipamentos elétricos a QEE é definida como sendo as características do fornecimento de energia que atendam aos requisitos necessários para que seus equipamentos operem satisfatoriamente (BRONZEADO, *et al.*, 1998).

Estas novas definições para a qualidade da energia elétrica, surgiram principalmente devido ao novo perfil de cargas utilizadas pelos consumidores, as não lineares, que são baseadas na eletrônica de potência. Estes equipamentos apresentam dois problemas para o sistema: o primeiro é o fato de serem

extremamente sensíveis a distúrbios de qualidade de energia, como por exemplo variações de tensão; e o segundo é o fato de que são os principais responsáveis pelo aumento dos níveis de correntes harmônicas no sistema. Pode-se ainda destacar um aumento na conscientização por parte dos consumidores quanto aos problemas na energia elétrica, fazendo crescer a demanda sobre informações relativas a esta questão (ALVES, 2010).

Para a concessionária, assegurar a qualidade de energia entregue no ponto de uso não é uma tarefa fácil, e não existe um procedimento que permita retirar da rede a energia que não atenda as especificações da cadeia de fornecimento ou que tenha sido rejeitada pelo consumidor (CHAPMAN, 2002a). Para o consumidor, principalmente os industriais, a garantia da qualidade de energia elétrica é de extrema importância, já que atualmente o nível de automação é elevado, e conseqüentemente o impacto de problemas com relação à qualidade de energia passa a ser muito maior, pois paradas de máquina e queima de equipamentos causam prejuízos financeiros enormes à indústria (MARTINHO, 2009).

Para garantir a otimização da qualidade da energia elétrica torna-se necessário que consumidores e concessionárias trabalhem em conjunto atendendo a indicadores específicos de QEE, de forma a beneficiarem-se do suprimento de uma energia elétrica de qualidade.

2.1.1 Distúrbios Associados à Qualidade da Energia Elétrica

Atualmente, o termo QEE tem sido empregado para englobar uma grande variedade de distúrbios nos sistemas elétricos, os quais sempre foram objeto de preocupação, tanto das concessionárias de energia quanto das indústrias brasileiras (BRONZEADO, *et al.*, 1998). Para Martinho (2009), um distúrbio elétrico é qualquer variação de amplitude, de frequência e/ou qualquer deformação da forma de onda das grandezas elétricas. Pode-se dizer que estes distúrbios aparecem no sistema devido a fatores externos e internos. Os fatores externos são os produzidos pelos subsistemas elétricos de geração, transmissão e distribuição (ALDABÓ, 2001). Já os fatores internos estão relacionados com a qualidade das instalações elétricas do consumidor e a carga instalada.

A classificação dos principais distúrbios eletromagnéticos associados à qualidade de energia é importante para analisar os resultados de medições e descrever os problemas de qualidade de energia elétrica (ALVES, 2010). É possível dividir estes distúrbios em transitórios, variações de tensão, desequilíbrio de tensão, distorção da forma de onda, flutuação de tensão e variação de frequência.

Os transitórios são classificados como impulsivos (sem alteração na frequência da tensão e corrente, sendo unidirecional), com duração entre 50ns e 1ms, e oscilatórios (com oscilações sem alteração na frequência da tensão e corrente, ocorrendo em valores positivos e negativos), com duração entre 5 μ s e 0,3ms. Esses transitórios são caracterizados, além da duração típica, por seus tempos de subida e decaimento e pela máxima amplitude alcançada (PIRES, 2010). Um exemplo de transitório é mostrado na Figura 1.

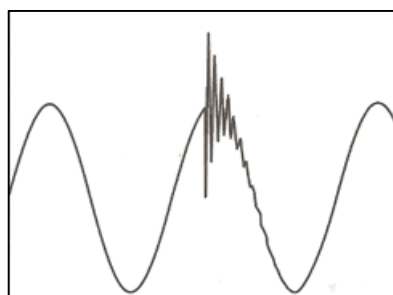


Figura 1 - Exemplo de Transitório
Fonte: MARTINHO (2009, p. 67)

As variações de tensão são alterações no valor médio quadrático da tensão, e são classificadas conforme sua duração e amplitude. Elas são divididas em variações de curta duração e as variações de longa duração.

As variações de curta duração podem ser divididas em interrupções, quando a tensão de alimentação está abaixo de 0,1pu por até um minuto; em reduções de tensão (*sag*), que variam entre 0,1pu e 0,9pu da tensão, durante um período de tempo compreendido entre 0,5 ciclo e um minuto; e aumento de tensão (*swell*), quando os valores variam entre 1,1pu e 1,8pu da tensão durante um tempo máximo de 2 segundos (PIRES, 2010). Na Figura 2 é possível observar as variações de tensão citadas.

Já as variações de longa duração são mais longas que um minuto, sendo que as sobretensões (swell) tem um aumento no valor eficaz da tensão em 10% ou mais, já as sobtensões (sag) ocorrem quando há decaimento no valor eficaz da tensão em 10% ou mais. Existe também a interrupção, que ocorre quando a tensão de alimentação permanece em zero por um período maior que um minuto (ALVES, 2010).

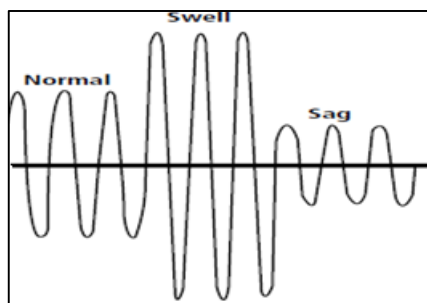


Figura 2 - Exemplo de Variações de Tensão
Fonte: STAROSTA (2006, p.53)

Em um sistema de potência trifásico, a diferença de fase entre tensões e a diferença de fase entre as correntes deve estar a 120° . O desequilíbrio de tensão nesse tipo de sistema é uma condição na qual as fases apresentam tensão com módulos diferentes entre si, ou defasagem angular entre as fases diferentes de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições simultaneamente (FREITAS; CORRÊA, 2007).

As rápidas alterações, são conhecidas como flutuações de tensão, onde a tensão normalmente não excede a faixa de 90% a 110%. Utiliza-se o termo cintilação (flicker) para se referir à flutuação de tensão, pois cintilação é o resultado do impacto da flutuação de tensão em cargas de iluminação (lâmpadas) que são perceptíveis ao olho humano (FREITAS; CORRÊA, 2007). Na Figura 3 tem-se um exemplo de flutuação de tensão.

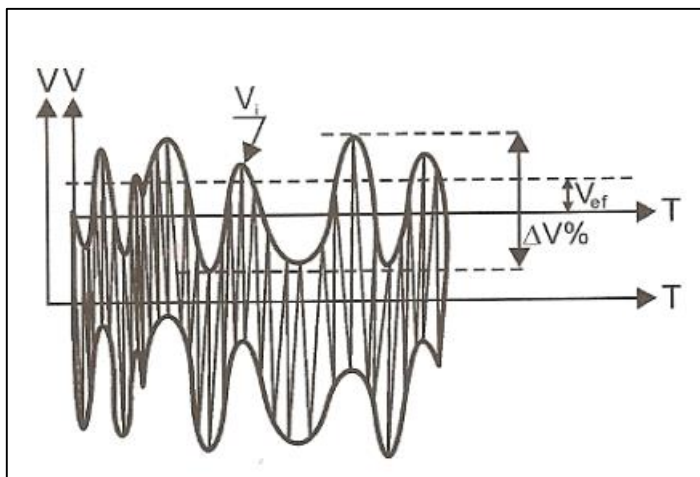


Figura 3 - Exemplo de Flutuação de Tensão
 Fonte: MARTINHO (2009, p. 61)

Em relação a variação de frequência, a ANEEL estabelece que as instalações em condições normais de operação e em regime permanente devem operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9Hz e 60,1Hz (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

Segundo Alves (2010), uma grande parte dos problemas de qualidade de energia elétrica pode ser devidamente coberta pelo estudo destas três categorias: transitórios, variações de tensão e as distorções harmônicas. Neste trabalho os distúrbios de harmônicas são o foco principal.

2.2 DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Com a necessidade de modernizar e efficientizar todo o setor elétrico, houve o crescimento acelerado do uso de equipamentos baseados na eletrônica de potência, fazendo com que surgisse um novo perfil de cargas, as chamadas cargas não lineares, as quais implicam na produção de distorções na forma de onda da corrente e da tensão, já que neste caso a relação tensão/corrente é não linear. Estas distorções são conhecidas como harmônicas e causam impacto direto na qualidade da energia elétrica.

As distorções harmônicas são caracterizadas por serem uma combinação de componentes de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da

frequência fundamental, no caso 60Hz. Desta forma, “pode-se dizer que um sinal periódico contém harmônicas quando ele é deformado em relação a um sinal puramente senoidal” (RODRIGUES, 2009). O grau de distorção harmônica pode ser quantificado matematicamente com base no estudo das ondas não senoidais periódicas, viabilizado por meio da série de Fourier.

O Teorema de Fourier indica que toda função periódica não senoidal pode ser representada sob a forma de uma soma de expressões (série) que é composta:

- Por uma expressão senoidal em frequência fundamental, neste caso, 60Hz.
- Por expressões senoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas).
- E ainda, por uma eventual componente contínua (SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE, 2003).

Desta forma, segundo (RODRIGUES, 2009), um sinal de corrente ou tensão periódico e distorcido pode ser expresso pelas equações (1) e (2):

$$v(\omega t) = V_0 + V_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_1) + V_{2m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(2\omega t + \varphi_2) + \dots + V_{hm\acute{a}x} \cdot \text{sen}(h\omega t + \varphi_h) \quad (1)$$

$$i(\omega t) = I_0 + I_{m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(\omega t + \varphi_1') + I_{2m\acute{a}x} \cdot \text{sen}(2\omega t + \varphi_2') + \dots + I_{hm\acute{a}x} \cdot \text{sen}(h\omega t + \varphi_h') \quad (2)$$

Onde,

V_0 - Componente contínua de tensão

I_0 - Componente contínua de corrente

$V_{m\acute{a}x}$ – Amplitude máxima do sinal de tensão de ordem n

$I_{m\acute{a}x}$ - Amplitude máxima do sinal de corrente de ordem n

ω – Frequência angular

φ – Defasagem da componente harmônica de ordem n

h – variável de número inteiro (1, 2, 3, ...)

A Figura 4 representa a decomposição da forma de onda da corrente, na componente fundamental e suas múltiplas:

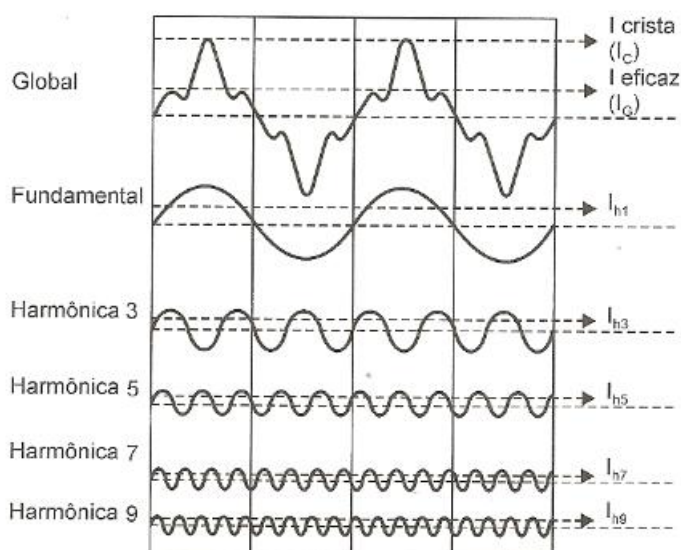


Figura 4 - Exemplo de Correntes Comportando Harmônicas, e Decomposição da Corrente Global em seus Componentes Harmônicas de Ordem 1 (Fundamental), 3, 5, 7 e 9.
Fonte: MARTINHO (2009, p.78)

Analisando o sinal da Figura 4, é possível observar que o sinal global é a soma ponto a ponto do sinal fundamental e dos sinais harmônicos formados por senoides perfeitas de amplitudes e frequências diferentes. Outro fato a ser observado é o de que, as componentes harmônicas possuem amplitude menor que a fundamental, entretanto seus efeitos são destrutivos (FREITAS; CORRÊA, 2007).

Além dos sinais das harmônicas serem classificadas quanto a sua ordem e frequência, também é possível classificá-las quanto a sua sequência que pode ser positiva, negativa ou zero. Na Tabela 1 é apresentada a ordem, frequência e sequência das harmônicas.

Tabela 1 - Ordem, Frequência e Sequência das Harmônicas

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

Fonte: Procobre (2001,p.12)

Harmônicas de sequência positiva e negativa consistem de três fasores, iguais em magnitude mas separados entre eles por uma fase de deslocamento de 120° . No caso da sequência positiva a sequência de fase dos fasores é a mesma da corrente fundamental, já para a sequência negativa é oposta. Harmônicas de sequência zero também consistem em três fasores iguais em magnitude mas com deslocamento de fase zero, sendo concorrentes em direção (SILVA, 2007).

As harmônicas de sequência positiva e negativa são as principais responsáveis por provocarem aquecimentos indesejados nos cabos e equipamentos do sistema elétrico. Já as harmônicas de sequência zero, somam-se no condutor neutro fazendo com que passe a circular uma corrente harmônica cuja amplitude é três vezes maior do que a corrente harmônica que percorre cada condutor (PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, 2001).

2.2.1 Indicadores de Harmônicas

As harmônicas causam diversos problemas para a qualidade de energia, e devido a isto surgiram normas internacionais e regulamentações nacionais preocupadas com esta questão. Tais normas determinam os níveis máximo de harmônicas que podem ser permitidos. Assim torna-se necessário a utilização de indicadores que permitam quantificar e avaliar os efeitos provocados pelo conteúdo harmônico nas ondas de tensão e corrente (TEIXEIRA, 2009). A seguir serão apresentados os principais indicadores de harmônicas utilizados.

2.2.1.1 Distorção Harmônica Total (DHT)

O DHT é provavelmente o principal indicador utilizado para quantificar a distorção harmônica de determinado ponto. O DHT é utilizado para contabilizar a quantidade de harmônicas presentes em uma onda, ou, em outras palavras, quão distorcida uma onda está em relação a uma onda puramente senoidal (PIRES, 2010). De uma forma genérica o DHT para um sinal y , pode ser expresso pela equação (3):

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} y_h^2}}{y_1} \quad (3)$$

Onde,

y_1 – valor do sinal fundamental

y_h – valor da componente harmônica de ordem n

A notação da equação 3 segue a norma IEC 61000-2-2. Segundo a norma é possível limitar h a 50. O índice de DHT é utilizado para a obtenção da distorção harmônica total de corrente (DHT_i) e de tensão (DHT_v) e é calculado com os valores de corrente e tensão fundamental no horário da medição. A DHT_v e a DHT_i são dadas pelas equações (4) e (5) (SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE, 2003):

$$DHT_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_1} \quad (4)$$

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_1} \quad (5)$$

Onde,

h – número inteiro (ordem harmônica)

V_h – valor rms da componente de tensão harmônica h

V_1 – valor rms de tensão fundamental

I_h – valor rms da componente de corrente harmônica h

I_1 - valor rms de corrente fundamental

Os índices de distorção harmônica total de tensão e corrente, são os indicadores mais utilizados pelas normas internacionais e nacionais para avaliar o nível de distorção de um determinado sinal em estudo.

2.2.1.2 Distorção Total de Demanda (DTD)

O índice de DTD é utilizado pela norma IEEE 519 e tem o objetivo de quantificar a distorção harmônica de corrente em relação à demanda de corrente da carga. O DTD é calculado em relação à corrente máxima da carga, esta é a principal diferença entre o DTD e o DHT (NUNES, 2007). A equação (7) determina o DTD:

$$DTD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_L} \quad (7)$$

Onde,

I_L – Corrente de demanda máxima da carga na frequência fundamental, medida no ponto de acoplamento comum entre a carga e o sistema.

I_h – Valor rms da componente de corrente harmônica h

2.2.1.3 Distorção Harmônica Individual (DHI)

A taxa de distorção harmônica individual pode ser expressa tanto para a tensão DHI_v quanto para a corrente DHI_i . É definida como sendo a porcentagem de harmônica de ordem h dividida pela fundamental (SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE, 2003). Desta forma a DHI para a corrente é dado pela equação (8):

$$DHI_i(\%) = \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (8)$$

Onde I_1 é a corrente eficaz da fundamental e I_h é a corrente eficaz de ordem h. E a DHI para a tensão é dada pela equação (9):

$$DHI_v(\%) = \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (9)$$

Onde V_1 é a tensão eficaz da fundamental e V_h é a tensão eficaz de ordem h.

Com os dados de DHl_v e DHl_i é possível elaborar o espectro harmônico do sinal distorcido, que proporciona uma visão geral de qual componente harmônica está sendo mais influente na distorção total do sinal.

2.2.1.4 Espectro Harmônico

Cada tipo de aparelho possui características próprias de correntes harmônicas, com amplitudes e defasagem diferentes. Estes valores, notadamente a amplitude para cada ordem de harmônica, são essenciais para análise. O chamado “espectro harmônico” permite decompor um sinal em suas componentes harmônicas e representá-lo na forma de um gráfico de barras ou histograma, onde cada barra representa uma harmônica com sua frequência, valor eficaz e defasagem (SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE, 2003). A Figura 5 apresenta a decomposição e um sinal em suas respectivas componentes harmônicas e a sua representação em forma de histograma.

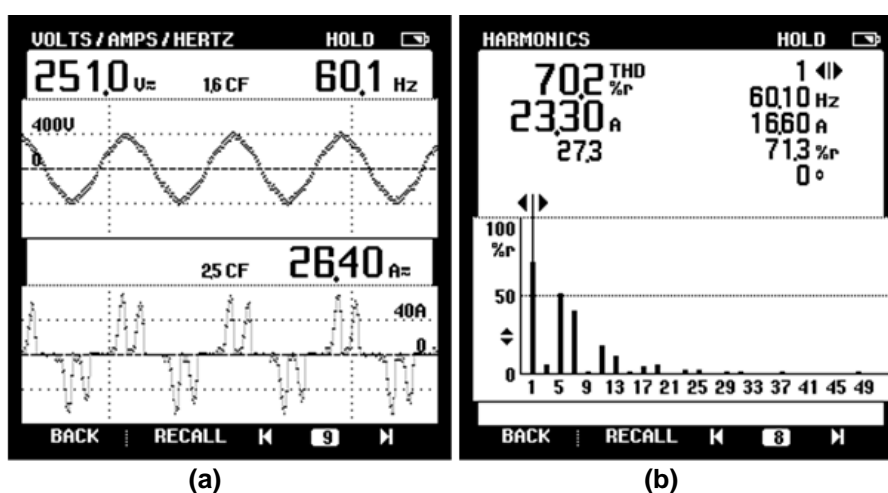


Figura 5 – Exemplo (a) de Forma de Onda e (b) Espectro de um Sinal Fortemente Distorcido
Fonte: Procobre (2001, p.15)

2.2.2 Origem das Harmônicas

A principal causa das distorções harmônicas são as diversas cargas não lineares que os sistemas elétricos atuais possuem. As cargas não lineares são aquelas cuja relação entre corrente e tensão num determinado componente não é descrita por uma equação linear, e portanto a carga absorve uma corrente não senoidal, ou seja, correntes harmônicas; mesmo quando é alimentada por uma tensão puramente senoidal (TAVARES, 2010).

Pode-se dizer que as principais cargas não lineares são os equipamentos baseados na eletrônica de potência, tais como os controladores de velocidade variável, pois utilizam dispositivos semicondutores que alternam entre os estados de corte e condução rapidamente, provocando cortes bruscos na condução de corrente ou uma drenagem de energia não compatível com o ciclo linear da energia absorvida (FREITAS; CORRÊA, 2007). Mas existem também outras cargas que se comportam de forma não linear e que não utilizam a eletrônica de potência, como é o caso dos fornos elétricos a arco.

A alimentação das cargas não lineares gera correntes harmônicas, circulando na rede. A tensão harmônica surge devido a circulação da corrente harmônica nas impedâncias dos circuitos de alimentação, como mostra a Figura 6.

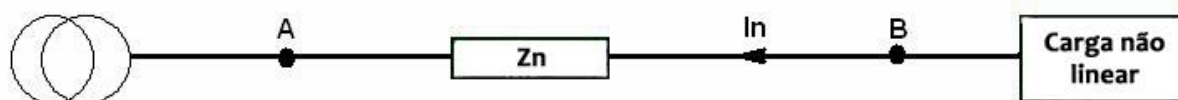


Figura 6 - Esquema Unifilar Representando a Impedância do Circuito de Alimentação
 Fonte: Schneider Electric (2003, p.5)

A impedância de um condutor aumenta em função da frequência da corrente que o percorre, sendo que para cada corrente harmônica de ordem n corresponde então uma impedância de circuito de alimentação Z_n . A corrente harmônica de ordem n circulando pela impedância Z_n gera uma tensão harmônica V_n . Portanto, a tensão em B é deformada. Todo aparelho alimentado a partir do ponto B receberá uma tensão com forma de onda distorcida. Na verdade, é como se as cargas não lineares

reinjetassem uma corrente harmônica na rede, em direção da fonte (SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE, 2003).

Neste contexto surge a necessidade de estudar com maior ênfase as cargas não lineares mais utilizadas atualmente na indústria, que devido a produção de distorções na forma de onda da tensão e da corrente são responsáveis por causar problemas tanto para equipamentos do próprio consumidor quanto para as redes de distribuição das concessionárias.

2.2.3 Principais Equipamentos Geradores de Harmônicas

O maior uso de equipamentos eletrônicos aumentou a presença das cargas não lineares no sistema elétrico. Dentre estas cargas estão os retificadores, as fontes de tensão chaveadas, os controladores de velocidade variável, fornos a arco, equipamentos de solda, iluminação fluorescente entre outros dispositivos encontrados nas plantas industriais (TEIXEIRA, 2009).

A seguir serão exemplificados os principais equipamentos responsáveis pela geração de harmônicas no sistema elétrico, com maior ênfase nos dispositivos utilizados em uma instalação industrial.

2.2.3.1 Dispositivos a Arco

Encontram-se nesta categoria os fornos a arco, máquinas de solda a arco, e as lâmpadas de descarga (fluorescente, vapor de sódio, vapor de mercúrio) que utilizam reatores magnéticos ou circuitos eletrônicos para serem acionadas. Todos estes equipamentos são produtores de harmônicas devido às características de tensão e corrente dos arcos elétricos serem não lineares (DIAS, 2002).

As lâmpadas fluorescentes são formadas por um tubo de vidro revestido de material a base de fósforo, preenchido com gás à baixa pressão. O processo de funcionamento baseia-se em descargas elétricas bruscas para a ionização do gás, formação do arco no ambiente gasoso e excitação do fósforo. Lâmpadas

fluorescentes tubulares necessitam de reatores magnéticos ou eletrônicos para seu acionamento, sendo que estes reatores são individualmente produtores de harmônicas. Já nas lâmpadas fluorescentes compactas as distorções harmônicas de corrente inseridas no sistema ocorrem devido aos chaveamentos dos circuitos eletrônicos (CHAPMAN, 2002b; LUCIANO, *et al.*, 2010).

No caso dos fornos a arco as harmônicas produzidas são imprevisíveis devido à variação aleatória do arco. A corrente do arco é não periódica e sua análise revela um espectro contínuo, onde as harmônicas predominantes são as inteiras entre a 2ª e a 7ª, sendo que sua amplitude decai com a ordem. Quando o forno atua no refino do material, a forma de onda se torna simétrica, desaparecendo as harmônicas pares. Na fase de fusão, as componentes harmônicas apresentam amplitude de até 8% da fundamental, enquanto no refino valores típicos são em torno de 2% (POMILIO, 1997).

2.2.3.2 Conversores Estáticos

Segundo (TEIXEIRA, 2009) os conversores estáticos controlados constituem uma das fontes mais expressivas de correntes harmônicas. Esses equipamentos podem ser divididos em três categorias:

- Conversores de alta potência, utilizados nos sistemas de transmissão e corrente contínua – HVDC e nos processos eletro-químicos;
- Conversores de média potência, usados no controle de motores em indústrias e tração ferroviária;
- Conversores de baixa potência (retificadores), que alimentam cargas monofásicas, como televisores e carregadores de bateria.

Este último grupo não será discutido nesse trabalho já que não é muito representativo para o setor industrial.

Conversores de alta potência

Conversores de alta potência (na faixa de MW) são normalmente providos com uma elevada indutância no lado de corrente contínua (CC). Devido a este fato a CC é razoavelmente constante e o conversor age como fonte de harmônicas de

tensão, no lado de CC, e harmônicas de corrente no lado de corrente alternada (CA) (TEIXEIRA, 2009).

De acordo (KIMBARK, 1971), um conversor com número p de pulsos gera, harmônicas de tensão de ordem $n = pK$, no lado de CC e harmônicas de corrente de ordem $n = pK \pm 1$ no lado de CA, sendo K um número inteiro (1, 2, 3, ...).

A teoria clássica segundo (BARBOSA, 1988) mostra a influência de diversos tipos de conversores na produção de harmônicas. Os conversores de 6 pulsos podem ser formados através da conexão série de dois conversores de 3 pulsos. Como mostra a Figura 7.

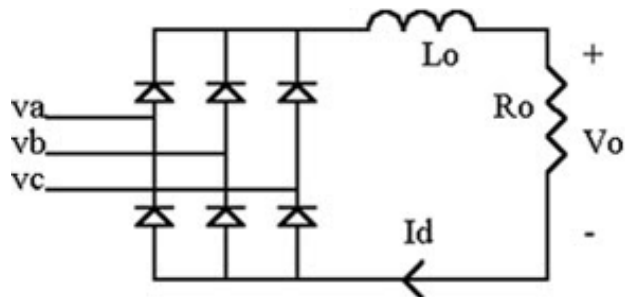


Figura 7 - Configuração do Conversor de 6 Pulsos.
Fonte: Teixeira (2009, p.22)

A sua série de Fourier é resultado da combinação das séries de Fourier correspondentes, para pulsos retangulares de corrente positiva e negativa, obtendo-se para o conversor da Figura 7, a equação (10) para a corrente i_a , em função de I_d :

$$i_a = \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) I_d \left[\cos \omega t - \left(\frac{1}{5}\right) \cos 5\omega t + \left(\frac{1}{7}\right) \cos 7\omega t - \left(\frac{1}{11}\right) \cos 11\omega t + \dots \right] \quad (10)$$

Da equação (10) podem ser feitas as seguintes observações:

- Ausência de harmônicas múltiplas de ordem 3;
- Presença de harmônicas de ordem $6K \pm 1$ para valores inteiros de K ;
- As harmônicas de ordens $6K + 1$ são de sequência positiva (7, 13, ...) e as harmônicas de ordens $6K - 1$ são de sequência negativa (5, 11, 17, ...);

- O valor eficaz da corrente, na frequência fundamental é dada pela equação (11) e o valor eficaz da corrente harmônica de ordem h é dada pela equação (12):

$$I_1 = \left(\frac{1}{\sqrt{2}}\right) \cdot \left(\frac{2\sqrt{3}}{\pi}\right) \cdot I_d = \left(\frac{\sqrt{6}}{\pi}\right) \cdot I_d \quad (11)$$

$$I_h = \left(\frac{I_1}{h}\right) \quad (12)$$

Para obtenção de conversores com mais pulsos bastam adicionar transformadores adequadamente defasados em paralelo. Por exemplo, para obter um conversor de 12 pulsos basta utilizar dois transformadores trifásicos em paralelo, com suas tensões fundamentais iguais e defasadas de 30°, para um conversor de 24 pulsos basta utilizar quatro transformadores defasados de 15° entre eles, e assim por diante. De uma forma geral, as correntes harmônicas teóricas são relacionadas ao número de pulsos p pela expressão geral $pK \pm 1$ e suas amplitudes decrescem na proporção inversa à ordem harmônica (BARBOSA, 1988).

Conversores de média potência

Os conversores de média potência são aqueles da ordem de centenas a dezenas de KW, muito utilizados em indústrias para acionar e controlar máquinas rotativas de corrente alternada, como os inversores de frequência e as soft-starters (TEIXEIRA, 2009).

a) *Soft-Starter*

A chave de partida suave ou comumente chamada soft-starter é uma chave de acionamento estático, projetada para acelerar, desacelerar e proteger motores de indução trifásicos, evitando altos conjugados de aceleração (RASHID, 1999). Seu princípio de funcionamento é baseado em componentes estáticos: os tiristores. O esquema genérico de um soft-starter é mostrado na Figura 8.

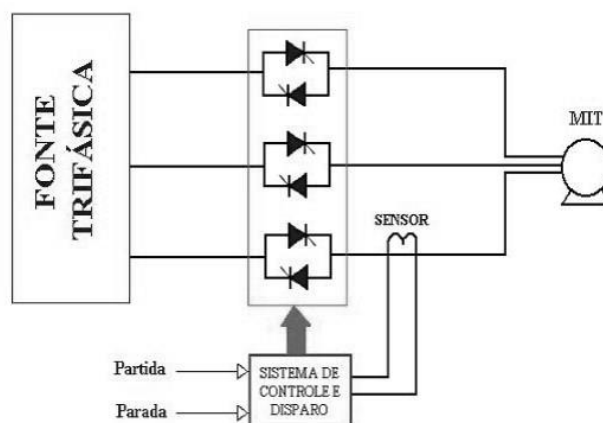


Figura 8 - Esquema de uma Soft-Starters Implementado com 6 Tiristores para Acionar um Motor de Indução Trifásico (MIT).
 Fonte: Rosa (2003, p.14)

O princípio de funcionamento da soft-starter baseia-se no ajuste do ângulo de disparo de tiristores para possibilitar o controle da tensão aplicada ao motor. Portanto, na partida a tensão é reduzida e deste modo os picos de corrente gerados pela inércia da carga mecânica são menores (ROSA, 2003).

Um dos requisitos da soft-starter é controlar a potência do motor, sem entretanto alterar sua frequência (velocidade de rotação). Para que isso ocorra, o controle de disparo dos tiristores deve temporizar os pulsos de disparo a partir do último valor de zero da forma de onda, tanto da tensão como da corrente (ROSA, 2003).

Em função da não linearidade dos tiristores que compõe a soft-starter, correntes harmônicas são geradas e com elas surgem as distorções na tensão da rede causando avarias e o funcionamento anormal de diversas outras cargas conectadas no mesmo ramal de alimentação. A medida que se aumenta o ângulo de disparo dos tiristores, menores são as distorções harmônicas na tensão de alimentação (FREITAS, *et al.*, 2012).

b) Inversor de Frequência

Os inversores de frequência são equipamentos versáteis e dinâmicos que permitem controlar a velocidade de motores de indução trifásicos. Estes dispositivos

são responsáveis por converter uma tensão de entrada CA em CC, em seguida a tensão de saída será novamente convertida em CA, simétrica com amplitude e frequência desejadas (RASHID, 1999).

Os inversores de frequência podem ser subdivididos em quatro componentes principais: o retificador, o circuito intermediário, o inversor e o circuito de controle, como apresentado na Figura 9.

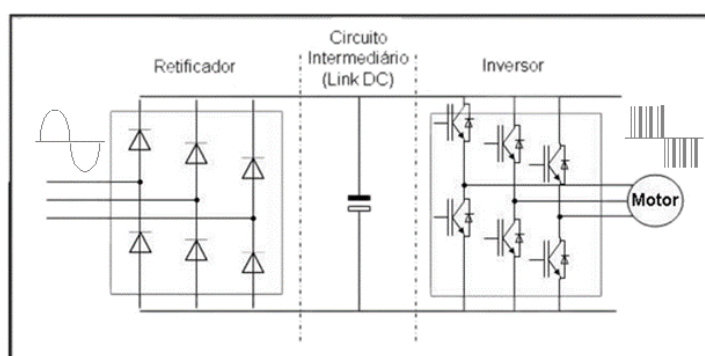


Figura 9 - Esquema Básico de um Inversor de Frequência
Fonte: TEIXEIRA (2009, p.27)

O circuito retificador é conectado a uma fonte de alimentação externa alternada e gera uma tensão contínua pulsante. O circuito intermediário pode funcionar de três formas, a primeira converte a tensão do retificador em corrente contínua, a segunda estabiliza ou alisa a tensão contínua e coloca-a à disposição do inversor e a terceira converte a tensão contínua do retificador em uma tensão alternada variável. É o circuito inversor que gera a tensão e a frequência para o motor. Por fim, o circuito de controle é responsável por transmitir e receber sinais do retificador, do circuito intermediário e do inversor, é ele quem envia sinais para que ocorra o chaveamento dos transistores de potência. Atuando sobre a taxa de variação do chaveamento dos transistores controla-se a frequência do sinal trifásico gerado e consequentemente a velocidade do motor (EJM ENGENHARIA, 2005).

Como é possível observar na Figura 9, o inversor de frequência é formado por vários componentes eletrônicos de potência, e devido a isto as formas de onda da tensão de saída dos inversores são não senoidais e contém certo conteúdo de harmônica que pode afetar as características dos motores de indução e seu rendimento (RASHID, 1999).

2.2.4 Efeitos Causados por Distorções Harmônicas em Componentes do Sistema Elétrico

O grau no qual as harmônicas podem ser tolerados é determinado pela susceptibilidade da carga à influência dessas. Se uma carga for considerada pouco susceptível a energia harmônica, pode-se dizer que esta carga é tolerável à existência de harmônicas. Cargas consideradas muito susceptíveis a harmônicas são aquelas que necessitam ter a forma de onda de alimentação perfeitamente senoidal. (PIRES, 2006).

Os principais efeitos observados em instalações e componentes submetidos à presença de harmônicas são: aquecimentos excessivos, disparos de dispositivos de proteção, ressonância, aumento da queda de tensão e redução do fator de potência bem como aumento do valor da tensão entre neutro e terra (PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, 2001).

2.2.4.1 Motores e Geradores

Em motores e geradores, as distorções harmônicas são responsáveis por provocarem aquecimentos elevados nas barras do rotor e nos enrolamentos do estator devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre, implicando em uma diminuição da eficiência e do torque disponível. É possível ainda que ocorra aumento do ruído audível quando comparado com alimentação puramente senoidal (POMILIO, 1997).

O sobreaquecimento que pode ser tolerado depende do tipo de rotor utilizado. Rotores bobinados são mais seriamente afetados do que os de gaiola. No caso dos motores de gaiola com barras profundas, onde a impedância do rotor aumenta com a frequência, podem surgir pontos quentes significativos para distorções harmônicas na tensão superiores a 10% (FOULADGAR; CHAUVEAU, 2005).

O efeito acumulativo do aumento das perdas reflete-se numa diminuição da eficiência e da vida útil da máquina. A redução na eficiência é de 5% a 10% dos valores obtidos com uma alimentação senoidal (POMILIO, 1997).

Algumas componentes harmônicas, ou pares de componentes podem instigar oscilações mecânicas em sistemas turbina-gerador ou motor-carga, devido a uma potencial excitação de ressonâncias mecânicas (POMILIO, 1997).

Outro fato interessante, é o de que a sequência da componente harmônica pode influenciar diretamente no funcionamento da máquina. As harmônicas de sequência positiva tendem a fazer o motor girar no mesmo sentido da componente fundamental, provocando uma sobrecorrente nos seus enrolamentos, já harmônicas de sequência negativa fariam o motor girar em sentido contrário ao giro produzido pela fundamental, provocando a frenagem do motor e causando aquecimentos. Harmônicas de sequência zero não provocam efeitos no sentido de rotação do motor, porém somam-se algebricamente no condutor neutro, causando problemas para outros equipamentos do sistema elétrico (PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, 2001).

2.2.4.2 Transformadores

Com a exceção de que harmônicas aplicadas em transformadores podem resultar em aumento do ruído audível, o principal problema causado por harmônicas é o aumento das perdas. Harmônicas na tensão aumentam as perdas no ferro, enquanto harmônicas na corrente elevam as perdas no cobre. O efeito global é um aumento no aquecimento do transformador, em comparação com alimentação puramente senoidal (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS, 1991)

Além disso, o efeito das reatâncias de dispersão é amplificado, uma vez que seu valor aumenta com a frequência. Associada à dispersão, existe ainda outro fator de perdas que se refere às correntes induzidas pelo fluxo disperso. Esta corrente manifesta-se nos enrolamentos, no núcleo, e nas peças metálicas adjacentes aos enrolamentos. Estas perdas crescem proporcionalmente ao quadrado da frequência e da corrente (POMILIO, 1997).

As harmônicas de sequência zero, somam-se no condutor neutro, quando este existe. Quando um transformador possui os enrolamentos em triângulo, as harmônicas de sequência zero circulam na malha fechada formada por esse triângulo,

provocando aumento das perdas no cobre. Se possuir os enrolamentos em estrela com neutro acessível, e desde que existam harmônicas de sequência zero, o condutor neutro será percorrido por uma corrente, mesmo que o sistema esteja equilibrado (FREITAS; CORRÊA, 2007). Apesar de haver aumento das perdas nos transformadores com enrolamento em triângulo, eles podem ser utilizados como transformadores de isolamento não deixando que harmônicas sejam distribuídas para a linha de alimentação (CHAPMAN, 2002b).

Para evitar a diminuição da vida útil dos transformadores que estão susceptíveis às harmônicas de corrente, é realizado seu superdimensionamento que é calculado a partir do fator K e é aconselhado para transformadores com distorção harmônica de corrente acima de 5% (TEIXEIRA, 2009).

2.2.4.3 Cabos de Alimentação

Em razão do efeito pelicular, que restringe a seção condutora para componentes de frequência elevada, os cabos de alimentação têm um aumento de perdas devido às correntes harmônicas. Além disso, o chamado “efeito de proximidade”, corresponde a um aumento na resistência do condutor, em função do efeito dos campos magnéticos produzidos pelos demais condutores colocados na vizinhança (ALVES, 2010).

Caso os cabos sejam longos e os sistemas conectados tenham suas ressonâncias excitadas pelas componentes harmônicas, podem aparecer elevadas sobretensões ao longo da linha, podendo danificar o cabo (POMILIO, 1997).

2.2.4.4 Sistemas de Comunicação

Os primeiros problemas atribuídos às harmônicas foram as interferências eletromagnéticas entre os sistemas de comunicação e os sistemas elétricos. As consequências geradas por essa interferência podem ser o ruído no sistema telefônico ou ainda nos casos mais graves, a perda de informações em sistemas de transferência de dados. Essa interferência é danosa devido à baixa potência dos sinais envolvidos nos sistemas de comunicação, ou seja, qualquer indução do sistema elétrico no sistema de comunicação pode causar níveis de ruídos inaceitáveis (TEIXEIRA, 2009).

2.2.4.5 Equipamentos de Proteção e Medição

Os relés utilizados para a proteção do sistema elétrico podem ser influenciados pela presença de harmônicas na rede e gerar atuação indevida. Além disso, outros fatores como o tempo de atuação, corrente de partida e conjugado do relé também podem ser influenciados pela presença de harmônicas (ANDREAS, 1982).

Relés eletromecânicos que dependem da passagem por zero ou pelo valor de pico da onda de tensão ou corrente no seu funcionamento podem atuar indevidamente, uma vez que a presença de harmônicas causa deformação da onda, podendo gerar mais passagens por zero em um ciclo ou variando o valor de pico da onda (TEIXEIRA, 2009).

As harmônicas podem influenciar não só em disparos indevidos de relés, mas também na atuação indevida de dispositivos de proteção termomagnéticos (disjuntores) e diferenciais (DR), isso ocorre porque as correntes harmônicas provocam aquecimento ou um campo magnético acima daquele que haveria sem sua presença (PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, 2001).

Quando se trata dos dispositivos de medição que operam com base no disco de indução, como medidores de energia, projetados para operarem apenas com correntes fundamentais, estes são muito sensíveis a componentes harmônicas, podendo apresentar erros nas medições que dependem da harmônica presente. Em geral a distorção deve ser elevada (>20%) para produzir erro significativo (POMILIO, 1997).

2.2.4.6 Sistemas de Iluminação

Quando se trata dos sistemas de iluminação as distorções harmônicas podem colaborar diretamente para a diminuição da vida útil das lâmpadas elétricas, gerando efeitos diferenciados para cada tipo de lâmpada. As lâmpadas incandescentes sofrem reduções sensíveis em sua vida útil média quando operam com tensões distorcidas e, fundamentalmente, quando o valor eficaz da tensão a elas aplicada encontra-se acima

do valor nominal. Nesta situação, a elevação da temperatura do filamento incandescente será o fator determinante das queimas prematuras (DIAS, 2002).

Para lâmpadas de descarga, o fenômeno mais conhecido devido as harmônicas é um ruído audível. Os capacitores agregados em reatores eletromagnéticos, corrigindo o fator de potência, geram uma ressonância. Esta ressonância é comum na faixa de 75-80Hz, não interagindo, portanto, com o sistema de alimentação. Lâmpadas com reatores eletrônicos são mais imunes as harmônicas quando comparadas às lâmpadas com reatores eletromagnéticos nos aspectos de potência, fator de potência, eficiência e luminosidade (INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERSY, 1993).

2.2.4.7 Fator de Potência com Harmônicas

O fator de potência que considera apenas a defasagem entre a corrente e a tensão na frequência fundamental, é conhecido como fator de potência de deslocamento (FPD), e é o mais utilizado para os estudos básicos quando há necessidade de sua correção. Em regime senoidal este fator representa o quanto da potência aparente é transformada em potência ativa (WEG AUTOMAÇÃO S.A). O triângulo de potências trifásico neste caso simplificado é o da Figura 10:

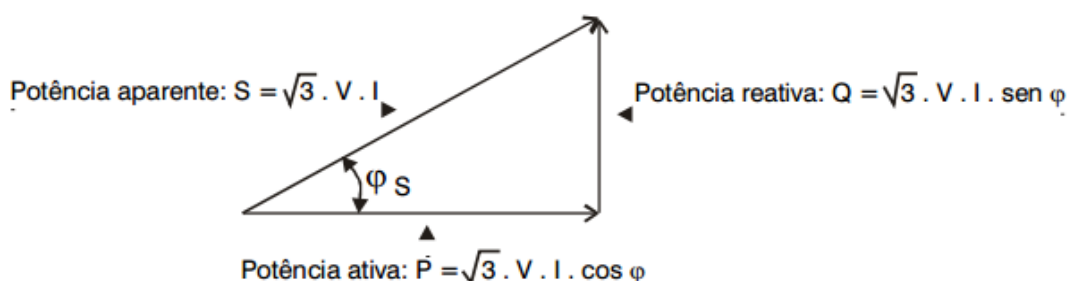


Figura 10 - Triângulo de Potência sem Distorções Harmônicas.
 Fonte: WEG Automação S.A (p.14)

Portanto, o fator de potência simplificado é dado pela equação (13):

$$FDP = \cos \phi = \frac{P}{S} \quad (13)$$

Onde P é a potência ativa e S a potência aparente.

Quando há presença de distorções harmônicas nas instalações elétricas o triângulo de potências recebe uma terceira dimensão que corresponde a potência aparente necessária para suprir a distorção da frequência fundamental (WEG AUTOMAÇÃO S.A). A Figura 11 mostra o triângulo de potência com distorções harmônicas.

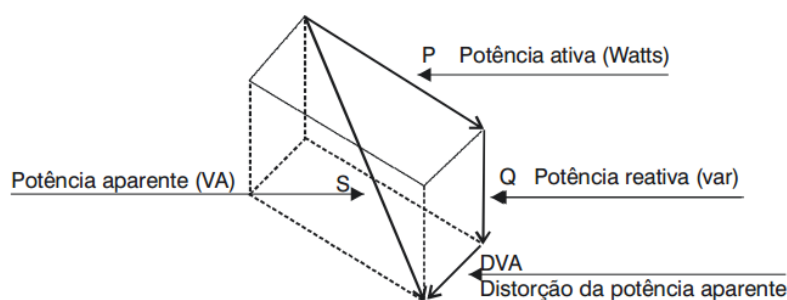


Figura 11 - Triângulo de Potência com Distorções Harmônicas.

Fonte: WEG Automação S.A (p.14)

O fator de potência real ou FP, leva em consideração além da defasagem entre a corrente e a tensão, os ângulos de defasagem de cada harmônica e a potência reativa para produzi-las. É importante salientar que seu valor é sempre menor que o fator de potência de deslocamento (WEG AUTOMAÇÃO S.A).

O cálculo do fator de potência real, realizado em (SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE, 2003), leva em consideração o índice de distorção harmônica total da corrente DHT_i e é representado pela equação (14).

$$FP = \frac{\cos \phi}{\sqrt{1 + DHT_i^2}} \quad (14)$$

A seguir, são apresentadas as deduções para o cálculo da nova dimensão que surge no triângulo de potências com harmônicas, a distorção da potência

aparente (DVA), que será baseado em (SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE, 2003). Considerando que quando as harmônicas são desprezadas a potência aparente é dada pelo produto entre a tensão eficaz pela corrente eficaz, na presença de harmônicas esta equação pode ser escrita através da equação (15):

$$S^2 = (\sum_{n=1}^{\infty} V_h^2) \cdot (\sum_{n=1}^{\infty} I_h^2) \quad (15)$$

Portanto, fica evidente que a relação $S^2 = P^2 + Q^2$ do triângulo de potências da figura 10 não é válida. Neste caso deve-se adotar que $S^2 = P^2 + Q^2 + DVA^2$. Isolando DVA encontra-se o valor da potência de distorção, dado pela equação (16):

$$DVA = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (16)$$

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

2.2.4.8 Bancos de Capacitores

Os bancos de capacitores utilizados para a correção do fator de potência são utilizados para obter uma corrente com ângulo de fase adiantado, para compensar correntes atrasadas produzidas por uma carga indutiva. Estes bancos são extremamente sensíveis aos efeitos provocados pelas harmônicas. Como a reatância capacitiva diminui com o aumento da frequência, os capacitores passam a absorver parte das elevadas correntes harmônicas para si. Essa passagem de corrente pode provocar aquecimentos, perda da via útil e nos casos mais severos a explosão dos mesmos devido ao efeito da ressonância (CHAPMAN, 2002b).

O efeito da ressonância pode ser classificado como série ou paralela. A ressonância série ocorre entre o transformador e o banco de capacitores ligados em um mesmo barramento. Neste caso, as reatâncias se cancelam entre si e a impedância do circuito se torna igual à resistência, a qual é um valor muito pequeno provocando sobrecorrentes que danificam os capacitores (WEG AUTOMAÇÃO S.A.).

A ressonância paralela ocorre quando as reatâncias dos bancos de capacitores e as reatâncias do sistema se equivalem em módulo em uma determinada frequência. Neste caso a tensão e a impedância resultante assumem valores muito elevados (WEG AUTOMAÇÃO S.A). O cálculo da frequência de ressonância paralela é dado pela equação (17).

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (17)$$

Onde,

L – indutância equivalente do sistema

C – capacitância do banco de capacitores

Em (NAVES, 2005) são mencionadas três principais consequências da circulação de harmônicas nas barras onde o banco de capacitor está instalado:

- Aumento da tensão eficaz – A presença de harmônicas de tensão pode gerar aumento da tensão eficaz da barra e o seu valor de pico. Este ocasiona descargas parciais e deterioração do isolamento dos capacitores;
- Aumento da corrente nominal – Harmônicas presentes na corrente podem gerar o aumento da corrente eficaz e o valor de pico da mesma. Este ocasiona sobre aquecimentos localizados e instabilidades no comportamento dielétrico dos capacitores;
- Efeito combinado entre tensão e corrente – O comportamento não senoidal da tensão e corrente com variações bruscas gera também variações bruscas no campo elétrico interno entre as placas. Esta variação gera a deterioração das características dielétricas do capacitor.

2.2.4.9 Sobreaquecimentos e Tensão Elevada entre Neutro e Terra

A circulação de correntes harmônicas pelo condutor neutro provoca uma queda de tensão entre esse condutor e a terra, uma vez que a impedância do cabo não é zero. Em alguns equipamentos eletrônicos, a presença de certa tensão entre

neutro e terra pode prejudicar a correta operação do mesmo (PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, 2001).

As harmônicas que são múltiplas ímpares do triplo da fundamental, as denominadas harmônicas “triple n”, somam-se no condutor neutro. Para um sistema trifásico onde as cargas são equilibradas não deve haver a presença de correntes circulando pelo condutor de neutro, porém com a presença de harmônicas essa corrente pode se tornar significativa. Caso o condutor do neutro não esteja corretamente dimensionado para suportar essa corrente, ele pode sobreaquecer acima da sua capacidade, causando perigo a instalação elétrica (CHAPMAN, 2002b).

2.3 NORMAS TÉCNICAS

O reconhecimento da existência de problemas devido às distorções harmônicas incentivou o desenvolvimento de normas específicas para tratar deste assunto. As principais normas internacionais envolvidas são o guia IEEE Std 519-1992 e a norma (IEC) da série 61000, sendo que cada uma delas tem como objetivo limitar o nível de distorção harmônica tanto nas tensões quanto nas correntes para instalações elétricas além de estabelecer limites quanto ao nível de harmônicas que os novos equipamentos podem introduzir na rede (FREITAS; CORRÊA, 2007).

No Brasil ainda não existem normas sobre distorção harmônica injetada pelo consumidor; a legislação vigente que trata da QEE como produto na distribuição é o módulo 8 do PRODIST elaborado pela ANEEL.

É possível destacar dois fatores importantes, que de certa forma, inibiram o desenvolvimento de normas especializadas em distorções harmônicas. O primeiro é a limitação dos instrumentos disponíveis para as medições e o segundo é o tratamento empírico das soluções adotadas para resolver os problemas com harmônicas (BARBOSA, 2014).

2.3.1 PRODIST – Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica

Os Procedimentos de Distribuição - PRODIST são documentos com caráter normativo elaborados pela ANEEL que tem como objetivo principal a padronização das atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. O PRODIST contém nove módulos, sendo que um deles é responsável por tratar das questões referentes à qualidade da energia elétrica – Módulo 8. Neste módulo é possível encontrar diretrizes para cada um dos distúrbios que interferem na QEE do sistema elétrico (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

No que se refere as harmônicas, o módulo 8 se limita a tratar das distorções harmônicas de tensão, indicando valores de referência para as distorções harmônicas totais (DHT_v) e individuais (DHI_v). Nada é abordado a respeito das distorções harmônicas de corrente.

Em se tratando de critérios para medição, é importante destacar o fato de que, para os sistemas elétricos trifásicos as medições devem ser feitas através das tensões fase-neutro para os sistemas estrela aterrada e fase-fase para as demais configurações.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores de referência da DHT_v e distorções harmônicas individuais, respectivamente.

Tabela 2 - Valores de Referência Globais das Distorções Harmônicas Totais (em Porcentagem da Tensão Fundamental)

Tensão Nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total e Tensão [%]
$V_N \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_N \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_N < 230\text{kV}$	3

Fonte: Módulo 8 - PRODIST (p.20)

Tabela 3 - Níveis de Referência Para Distorções Harmônicas Individuais de Tensão (em Porcentagem da Tensão Fundamental)

Ordem Harmônica	Distorção Harmônica Individual de Tensão				
	$V_N \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_N \leq 13.8\text{kV}$	$13.8\text{kV} < V_N \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_N < 230\text{kV}$	
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,5%	6%	4,5%	2,5%
	7	6,5%	5%	4%	2%
	11	4,5%	3,5%	3%	1,5%
	13	4%	3%	2,5%	1,5%
	17	2,5%	2%	1,5%	1%
	19	2%	1,5%	1,5%	1%
	23	2%	1,5%	1,5%	1%
	25	2%	1,5%	1,5%	1%
	>25	1,5%	1%	1%	0,5%
Ímpares múltiplas de 3	3	6,5%	5%	4%	2%
	9	2%	1,5%	1,5%	1%
	15	1%	0,5%	0,5%	0,5%
	21	1%	0,5%	0,5%	0,5%
	>21	1%	0,5%	0,5%	0,5%
Pares	2	2,5%	2%	1,5%	1%
	4	1,5%	1%	1%	0,5%
	6	1%	0,5%	0,5%	0,5%
	8	1%	0,5%	0,5%	0,5%
	10	1%	0,5%	0,5%	0,5%
	12	1%	0,5%	0,5%	0,5%
	>12	1%	0,5%	0,5%	0,5%

Fonte: Módulo 8 – PRODIST (p.21)

2.3.2 IEEE Std 519 – 1992

A filosofia desta norma baseia-se no fato de que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação (FREITAS; CORRÊA, 2007).

A norma aborda o conceito de responsabilidade compartilhada, ou seja, a concessionária se compromete a atender os limites de distorção da tensão, por sua vez, todos os consumidores ficam responsáveis pelo controle da injeção de correntes harmônicas dentro de limites estipulados. As recomendações oferecidas pela norma não se aplicam a equipamentos individuais, pois levam em conta apenas o nível global de distorção de uma instalação, medida no ponto de conexão do consumidor à rede de distribuição (PAC) (BARBOSA, 2014).

A norma determina os limites de distorção para os diferentes níveis de tensão nas redes elétricas, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Limites de Tensão Harmônica IEEE 519-1992

Tensão da Barra no PAC	Distorção de Tensão Individual [%]	Distorção de Tensão Total [%]
$V_N \leq 69\text{kV}$	3,0	5,0
$69\text{kV} < V_N \leq 161\text{kV}$	1,5	2,5
$V_N > 161\text{kV}$	1,0	1,5

Fonte: IEEE 519-1992 (p.85)

Com relação ao limite de distorção de corrente, a norma sugere valores máximos de harmônicas individuais em relação ao nível de tensão da carga. Para a obtenção dos limites de distorção individual na corrente, é estabelecida uma relação entre corrente de curto-circuito I_{cc} e a corrente de carga, de forma que quanto maior a corrente de curto-circuito em relação à corrente de carga, maior serão as distorções admissíveis no sistema, já que no PAC o efeito da distorção será menor. A norma utiliza o índice DTD para quantificar a distorção de corrente (SCOLARI; CERQUEIRA; KRAVETZ, 2013). A Tabela 5 apresenta os limites de distorções harmônicas de corrente para tensões de 120V até maiores que 161kV.

Tabela 5 - Limites de Distorção da Corrente Para Sistemas de Distribuição

Máxima Corrente Harmônica em % da Corrente de Carga							
I_{cc} – Máxima Corrente de Curto Circuito; I_L – Corrente de Carga							
Níveis de tensão	$\frac{I_{cc}}{I_L}$	< 11	$11 \leq n < 17$	$17 \leq n < 23$	$23 \leq n < 35$	$35 < n$	DTD
120V a 69kV	< 20	4%	2%	1,5%	0,6%	0,3%	7%
	20 < 50	7%	3,5%	2,5%	1%	0,5%	8%
	50 < 100	10%	4,5%	4%	1,5%	0,7%	12%
	100<1000	12%	5,5%	5%	2%	1%	15%
	> 1000	15%	7%	6%	2,5%	1,4%	20%
69kV a 161 kV	< 20	2%	1%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
	20 < 50	3,5%	1,75%	1,25%	0,5%	0,25%	4%
	50 < 100	5%	2,25%	2%	0,75%	0,35%	6%
	100<1000	6%	2,75%	2,5%	1%	0,5%	7,5%
	> 1000	7,5%	3,5%	3%	1,25%	0,7%	10%
>161kV	< 50	2%	1%	0,75%	0,3%	0,15%	2,5%
	≤ 50	3%	1,5%	1,15%	0,45%	0,22%	3,75%

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

Fonte: IEEE 519 – 1992 (p. 78 e 79)

2.3.3 IEC 61000 2-2

(MARTINS; COUTO; AFONSO, 2003) transcreve os limites das tensões harmônicas sugeridas pela norma IEC 61000-2-2 para redes de baixa-tensão, de acordo com a Tabela 6.

Tabela 6 - Níveis de Compatibilidade Para as Harmônicas de Tensão em Redes Públicas de BT.

Harmônicas Ímpares não Múltiplos de 3		Harmônicas Ímpares Múltiplos de 3		Harmônicas Pares	
Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)	Ordem n	Tensão harm. (%)
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	$0,2 + 0,5 \times 25/n$				

Fonte: MARTINS, COUTO, & AFONSO. (2003, p. 224)

2.3.4 IEC 61000 2-4

A IEC 61000 2-4, extraída de (MARTINS; COUTO; AFONSO, 2003), estabelece o nível de compatibilidade para redes industriais, mais especificamente o DHT_v. Definem-se 3 classes, com exigência de compatibilidade diferentes, em função dos ambientes eletromagnéticos possíveis:

Classe 1 – Aplica-se a redes protegidas e tem níveis de compatibilidade mais baixos do que o das redes públicas. Diz respeito à utilização de aparelhos muito sensíveis às perturbações da rede elétrica, como por exemplo: instrumentação de laboratórios tecnológicos, certos equipamentos de automação e de proteção, computadores, etc.

Classe 2 – Esta classe aplica-se aos PAC (Ponto de Acoplamento Comum à rede pública) e aos pontos de ligação interna nos ambientes industriais em geral. Os níveis de compatibilidade desta classe são idênticos aos das redes públicas, e os

equipamentos destinados à utilização nestas redes podem ser usados nesta classe de ambiente industrial.

Classe 3 – Esta classe aplica-se somente aos pontos de ligação interna dos ambientes industriais. Os níveis de compatibilidade são superiores aos da classe 2 para certas perturbações. Esta classe deve ser considerada, por exemplo, quando uma das seguintes condições é satisfeita: a maior parte das cargas são alimentadas através de conversores, existem máquinas de soldar, ocorrem partidas frequentes de motores de grande potência, as cargas variam rapidamente.

Na Tabela 7 é apresentado o nível de compatibilidade de distorção harmônica total da tensão para as classes citadas.

Tabela 7 - Níveis de Compatibilidade Para Harmônicas

	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Distorção Harmônica Total da Tensão (DHTv)	5%	8%	10%

Fonte: MARTINS, COUTO, & AFONSO. (2003, p.225)

2.3.5 IEC 61000 3-2

A norma IEC 61000 3-2, trata dos equipamentos de menor potência, que drenam até 16A por fase. A norma possui o objetivo de ajustar os limites máximos para emissão de harmônicos da corrente de entrada dos equipamentos em estudo.

Os limites estipulados pela norma são para equipamentos conectados em 220/380V, 230/400V e 240/415V operando em 50 ou 60 Hz. Sistemas com tensão nominal inferior a 220V (fase-neutro), ainda não possuem limites definidos. A norma não se aplica a equipamentos com potência nominal total maior ou igual a 1kW.

Nesta norma os equipamentos são classificados em quatro categorias:

Classe A - Equipamentos trifásicos equilibrados e qualquer outro equipamento não pertencente às classes B, C e D.

Classe B - Equipamentos portáteis

Classe C - Equipamentos de iluminação (incluindo “dimmerizados”)

Classe D - Equipamentos com potência ativa inferior a 600 W, computadores pessoais, monitores de computadores e receptores de televisão.

As Tabelas 8,9, e 10 apresentam os limites permitidos para os equipamentos das classes A, C e D. Os limites da classe B são iguais aos da classe A multiplicados por um fator de 1,5.

Tabela 8 - Limites Para Equipamentos da Classe A

Ordem Harmônica Ímpares	Máxima Corrente (A)	Ordem Harmônica Pares	Máxima Corrente (A)
3	2,30	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,30
9	0,40	8 ≤ n ≤ 40	0,23 x 8/n
11	0,33		
13	0,21		
15 ≤ n ≤ 39	0,15 x 15/n		

Fonte: Adaptado de International Standard. (2005 p.18)

Tabela 9 - Limites para Equipamentos da Classe C

Ordem Harmônica (n)	Máxima Corrente Harmônica em Percentual da Fundamental
2	2%
3	30% x fator de potência
5	10%
7	7%
9	5%
11 ≤ n ≤ 39 (apenas ímpares)	3%

Fonte: Adaptado de International Standard. (2005 p.18)

Tabela 10 - Limites para Equipamentos da Classe D

Ordem Harmônica (n)	Máxima Corrente	
	Por Watt (mA/W)	(A)
3	3,40	2,30
5	1,90	1,14
7	1,00	0,77
9	0,50	0,40
11	0,35	0,33
13 ≤ n ≤ 39 (apenas ímpares)	3,85/n	Ver tabela para classe A

Fonte: Adaptado de International Standard. (2005 p.18)

2.4 FILTROS PARA HARMÔNICAS

Os filtros são utilizados nas instalações elétricas com o intuito de eliminar a distorção harmônica causada pelas cargas não lineares presentes na instalação.

Possuem como função garantir uma baixa distorção harmônica de corrente (DHT_i) e obter valores de distorção harmônica de tensão (DHT_v) aceitáveis para que seja possível garantir que todas as cargas recebam uma alimentação o mais próximo possível do senoidal.

Para controlar a presença das correntes harmônicas presente nas instalações industriais são utilizados os filtros harmônicos. Esses filtros utilizam capacitores, indutores e resistores compondo um circuito capaz de desviar as correntes harmônicas para terra. Os filtros utilizados são os filtros passivos e filtros ativos, em alguns casos podem ser utilizados também os transformadores de isolamento (ALDABÓ, 2001).

2.4.1 Filtros Passivos

Os filtros passivos são utilizados em instalações industriais onde as cargas não lineares responsáveis pela geração de harmônicas possuem potência total superior a 200kVA, em instalações onde é necessário compensar a energia ativa e onde é necessário a redução da taxa de distorção em tensão e corrente para evitar eventuais problemas, além de aumentar o fator de potência da instalação (FREITAS; CORRÊA, 2007).

Esses filtros são utilizados para estabelecer um caminho com baixa impedância para as correntes harmônicas, fazendo com que essas correntes circulem pelo filtro e não pela fonte de alimentação, conforme pode-se observar na Figura 12 (SCOLARI; CERQUEIRA; KRAVETZ, 2013). Os filtros passivos são constituídos de um circuito LC, ou seja de um capacitor e um indutor em paralelo. É um filtro simples, confiável e apresenta desempenho satisfatório (PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, 2001).

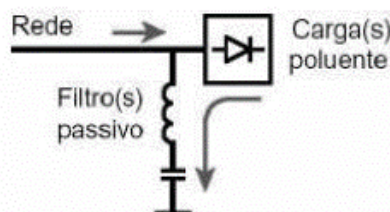


Figura 12 - Esquema de um Filtro Passivo.

Fonte: FREITAS; CORRÊA (2007) (p. 112)

Os filtros passivos eliminam apenas o sinal harmônico sintonizado e atenuam outras harmônicas próximas, mas não são eficazes para uma banda mais larga de sinais. Esse tipo de filtro é específico para uma determinada carga, ou conjunto de cargas. Caso a carga geradora de harmônicas sofra alterações durante o seu funcionamento normal, esse tipo de filtro não pode ser aplicado, e quando houver mudança de cargas na instalação também fará com que o filtro não seja mais eficiente (PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE, 2001; SCOLARI; CERQUEIRA; KRAVETZ, 2013).

2.4.2 Filtros Ativos

Os filtros ativos são utilizados em instalações comerciais onde as cargas não lineares possuem potência total inferior a 200kVA, esse tipo de filtro é utilizado quando há necessidade de redução de taxas de distorção em corrente com o intuito de evitar sobrecargas e para terem uma boa performance é necessário que o filtro tenha uma potência igual ou superior a carga não linear a ser filtrada (FREITAS; CORRÊA, 2007).

Esses filtros são usualmente ligados em paralelo entre a fonte e a carga não linear, conforme a Figura 13. O filtro pode também ser instalado junto às cargas que geram grandes quantidade de harmônicas garantindo assim a filtragem localmente e também juntos aos quadros de distribuição para realizar uma filtragem completa ou parcial, dependendo de onde se encontra o quadro (MARTINHO, 2009).

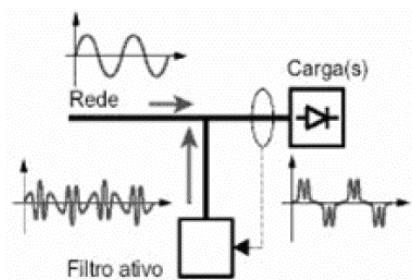


Figura 13 - Esquema de um Filtro Ativo.
Fonte: FREITAS;CORRÊA (2007) (p.115)

O funcionamento desse filtro consiste em um transformador de corrente que mede o conteúdo de harmônicas da corrente de carga e controla um gerador de corrente que produz uma réplica exata das harmônicas de sinal oposto, que é enviada à fonte de alimentação no ciclo seguinte, com isso apenas a corrente fundamental chega da fonte de alimentação. Desta forma esse modelo de filtro permite a filtragem das harmônicas sobre uma larga faixa de frequências adaptando-se em tempo real as necessidades de correção de harmônicas na instalação, porém o custo desse tipo de filtro se torna elevado (MARTINHO, 2009).

2.5 INSPEÇÃO TERMOGRÁFICA

A inspeção termográfica é uma ferramenta utilizada em larga escala em ações de manutenção preditiva e preventiva dos sistemas de energia e das máquinas elétricas. Como a temperatura é uma variável fácil de ser detectada através de irradiações infravermelhas, é utilizada a termografia para uma manutenção preditiva mais eficaz. Esse tipo de manutenção acompanha periodicamente os equipamentos baseando-se em análise de dados recolhidos através de monitorização ou inspeções no local, para localizar e quantificar os pontos quentes e os sobreaquecimentos (OLIVEIRA, 2012).

Trata-se de uma técnica que permite mapear um corpo ou região com diferentes temperaturas através da detecção da radiação infravermelha emitida pelo corpo, sendo que tal radiação é emitida por corpos com temperatura diferentes de zero absoluto (0 Kelvin ou -273.15°C). É um método de inspeção não destrutiva que

não necessita de contato físico, com isso não interfere na produção, ou seja, a verificação dos equipamentos pode ser feita com os mesmos em funcionamento utilizando como princípio o espectro infravermelho para retratar um perfil térmico de forma gráfica (PALUCHOWSKI, *et al.*; TESTO DO BRASIL, 2009; LOUVAIN; CABRAL; GOMES, 2010).

Esse método de inspeção é utilizado para monitorar equipamentos elétricos, como máquinas elétricas, quadros de comando e toda a instalação elétrica em si com o objetivo de detectar problemas térmicos no estado inicial, assim se torna possível planejar, de melhor forma, um período para a prevenção de defeitos (manutenção preventiva) evitando aquecimento acima do normal e possíveis falhas (FILHO; LOUVAIN; CABRAL; GOMES, 2010).

Para que a análise termográfica obtenha bons resultados é necessário que o sistema elétrico esteja operação. Para equipamentos colocados em operação, ou submetidos a grande variação de carga, recomenda-se registrar a temperatura, após o sistema atingir a estabilidade térmica. Recomenda-se que as inspeções sejam realizadas com carga máxima. Evitar inspecionar componentes que estejam operando com carga abaixo de 40 % do valor histórico (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

Para fazer o diagnóstico dos componentes elétricos deve-se levar em conta a sua Máxima Temperatura Admissível (MTA), sendo está a máxima temperatura que se permite que o componente opere. Alguns valores para a MTA são baseados em normas da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) NBR 5410, além de que se não for possível obter tais valores, recomenda-se a fixação de 90⁰ Celsius como valor de referência para conexões e componentes metálicos e de 70⁰ Celsius para cabos isolados em PVC (MECATRÔNICA ATUAL, 2004). Na Tabela 11 estão listados alguns dos valores de MTA relacionados aos equipamentos industriais que serão analisados no decorrer do trabalho.

Tabela 11 - Máxima Temperatura Admissível (MTA)

Componente Industrial	° C
Condutor encapado (Isolação de Cloreto de Polivinila (PVC))	70
Condutor encapado (Isolação de Borracha Etileno Propileno (EPR))	90
Régua de Bornes	70
Conexões e Barramentos de Baixa Tensão	90
Conexões Recobertas de Prata ou Níquel	90
Transformadores Secos	Ponto Mais Aquecido
Classe de Isolação 105	65
Classe de Isolação 130	90
Classe de Isolação 155	115
Classe de Isolação 180	140

Fonte: Adaptado de Brito, Filho e Alves (2005, p. 3)

Segundo Brito, Alves e Filho (2005), pode-se fazer a classificação do aquecimento do objeto em análise em três classes. Se enquadram na primeira classe falhas que afetam o fornecimento de energia de toda a unidade gerando uma parada de produção com custo muito elevado. Já na segunda classe são as falhas que param apenas algumas partes da produção e na classe três são as falhas que podem ser controladas através de manobras sem causar danos a produção. (BRITO; FILHO; ALVES, 2005).

2.5.1 Emissividade

O espectro da radiação infravermelha de um corpo não depende apenas da temperatura dele, mas também do material que o corpo é constituído. Quando a radiação atinge um corpo podem ocorrer três tipos diferentes de comportamento, sendo eles a absorção (α), reflexão (ρ) e transmissão (τ) que podem ser analisados na Figura 14 (ÁLVARES, 2008).

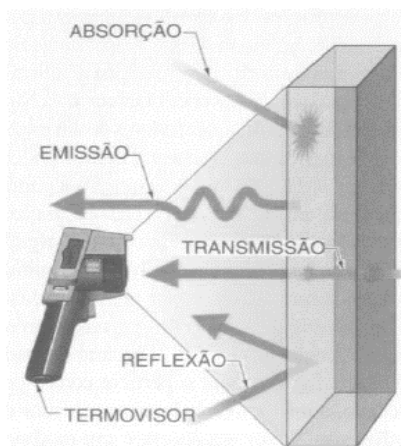


Figura 14 - Absorção (α), Reflexão (ρ) e Transmissão (τ).
 Fonte: Fluke Corporation (2009, p. 24)

Um corpo capaz de absorver totalmente a radiação que incide sobre ele qualquer comprimento de onda é considerado um corpo negro e apresenta reflexibilidade e transmissão igual a zero porém a emissividade é máxima, ou seja, igual a 1 (AFONSO, 2010). Porém, quando se trata de corpos reais as superfícies só emitem uma determinada parte da energia, uma parcela dessa energia é absorvida e o restante é refletido ou transmitido. Essas parcelas dependem do comprimento de onda e sua soma é sempre igual a um (MARIO, 2011).

O parâmetro que determina a capacidade de um corpo de emitir energia é a emissividade (ϵ), sendo que a emissividade é a eficiência com qual um dado material emite radiação infravermelha, porém segundo SPAMER “a emissividade de um material não é um valor fixo e absoluto, sendo afetada por alguns fatores, tais como, temperatura, textura superficial, tratamento superficial e atenuação atmosférica”. A emissividade é o parâmetro com grande influência nos resultados das medições termográficas por isso sua configuração deve ser feita com grande cuidado, pois valores ajustados de forma errada acarretam valores errados na leitura da temperatura do corpo principalmente quando se trata de corpos com baixos valores de emissividade (FLUKE CORPORATION, 2009; SPAMER, 2009).

Objetos com emissividade alta, maior que 0.8, tem baixa refletância e com isso sua temperatura pode ser medida com facilidade com a câmera termográfica, já objetos com emissividade média, entre 0.6 e 0.8, possui refletância média e ainda é possível medir com facilidade pelo termovisor. Os objetos com emissividade baixa, ou seja, menor que 0.6 possui alta refletância e com isso as medidas de temperatura com

o termovisor devem ser analisadas cuidadosamente (FLUKE CORPORATION, 2009). Na Tabela 12 é apresentado o nível de emissividade para alguns materiais que são utilizados em sistemas elétricos.

Tabela 12 - Nível de Emissividade

Nível de Emissividade	
Material	Emissividade
Alumínio, polido	0,05
Alumínio, superfície rugosa	0,07
Ferro fundido, fundição rugosa	0,81
Cobre, oxidado	0,65
Fita isoladora, plástico preto	0,95
Esmalte	0,90
Vidro	0,92
Ferro, oxidado	0,74
Cerâmica	0,92
Porcelana	0,92
Borracha	0,93
Aço, superfície rugosa	0,96

Fonte: Adaptado de Fluke Corporation (2007)

Como tais medições analisam a radiação infravermelha emitida pelo objeto deve-se limitar as perdas entre o objeto e a câmera, pois quanto maior a distância entre os dois maior será a absorção atmosférica e maior será o efeito sobre a medição (SPAMER, 2009).

Segundo o projeto de revisão da ABNT NBR 15572 o ângulo entre o termovisor e o ponto inspecionado deve ser o mais perpendicular possível, de modo a evitar a redução na emissividade em função de ângulos de observação inadequados (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2012).

3 INDÚSTRIA EM ESTUDO

Neste capítulo será realizada a caracterização das instalações do Moinho de Trigo Bolson. Inicialmente será feita uma breve descrição da indústria, em seguida será apresentada a instalação elétrica do local, incluindo a descrição da entrada de energia, instalações internas, histórico de consumo e demanda e características do filtro de harmônicas instalado anteriormente. Por fim, será descrito como funcionam as manutenções elétricas da indústria e o processo de produção da farinha e do farelo de trigo.

3.1 DESCRIÇÃO GERAL DA INDÚSTRIA

O moinho de Trigo Bolson está localizado na Avenida Tupi, número 4759, no Bairro Cristo Rei, na cidade de Pato Branco – PR, sua principal atividade é a produção de farinha e farelo de trigo com uma média mensal de produção de aproximadamente 45 toneladas. A indústria iniciou suas atividades em dezembro de 1981 e atualmente possui 18 colaboradores que trabalham de segunda-feira à sexta-feira em turno único.

A planta da indústria é composta por um edifício de cinco andares, onde acontece o processo de moagem do trigo, dois barracões utilizados para estoque e também para o empacotamento do produto final, além de quatro silos para armazenagem do trigo.

3.2 INSTALAÇÃO ELÉTRICA

O moinho é atendido pela Companhia Paranaense de Energia - COPEL, na classe A4, que corresponde à tensão de 13,8kV. A medição da unidade consumidora é realizada na média tensão, sendo a proteção em tensão primária de distribuição realizada através de chaves fusíveis de distribuição instaladas na derivação da concessionária de energia elétrica.

A cabine de medição e proteção possui entrada de energia subterrânea e é composta por dois módulos: o módulo de medição e o módulo de seccionamento e proteção da média tensão.

O módulo de medição é composto pelos TCs e TPs utilizados para fornecer sinal de tensão e corrente aos equipamentos de medição da concessionária. Já o módulo de seccionamento e proteção é composto por uma chave seccionadora tripolar de uso interno, um disjuntor tripolar de média tensão, três TCs e um TP utilizados para fornecer sinal de tensão e corrente aos relés de proteção 50/51 e 50N/51N. A cabine ainda conta com intertravamento mecânico (bloqueio Kirk) entre a manopla do disjuntor e a manopla da chave seccionadora.

A Figura 15 mostra o diagrama unifilar da entrada de serviço com ramal de entrada subterrâneo e medição em média tensão.

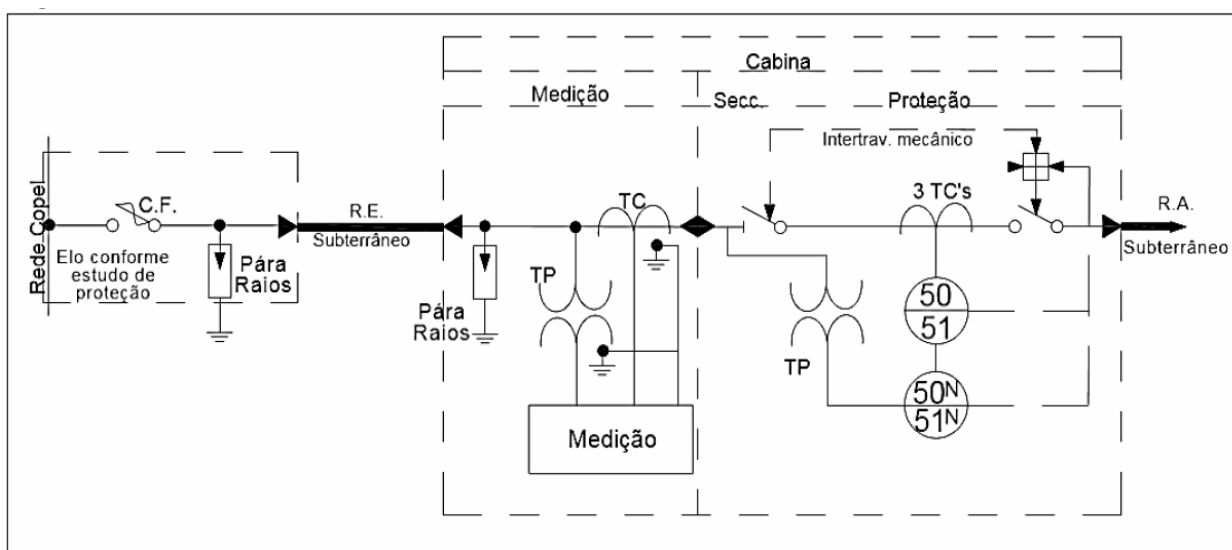


Figura 15 - Diagrama Unifilar da Entrada de Serviço
Fonte: COPEL

A Figura 16 ilustra os componentes que fazem parte da entrada de serviço, bem como a topologia da ligação utilizada.

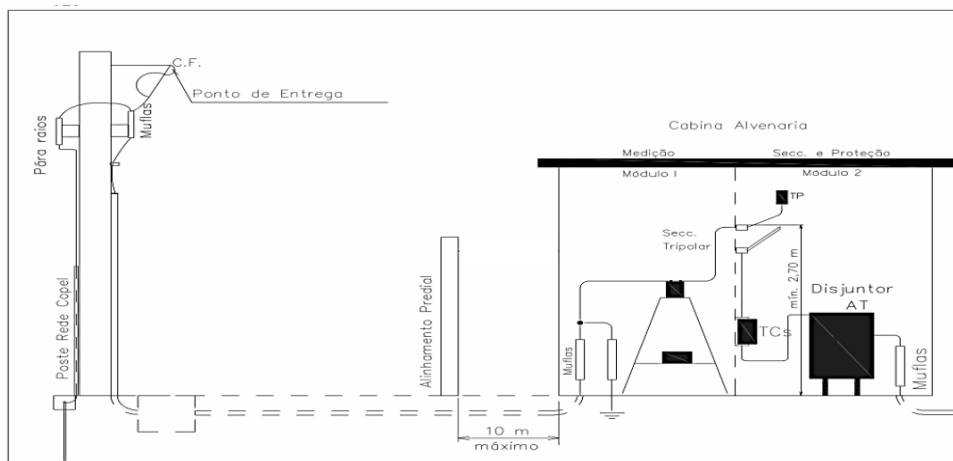


Figura 16 – Exemplo de Componentes da Entrada de Serviço
Fonte: COPEL

Após a cabine de medição, seccionamento e proteção, os condutores seguem para o 1º pavimento onde está localizado um cubículo composto por um transformador à seco de 500kVA – 13,8KV/380-220V com ligação delta-estrela aterrado e uma chave seccionadora tripolar localizada no lado da média tensão, como pode ser observado pela Figura 17.



Figura 17 - Cubículo do Transformador de 500kVA
Fonte: Autoria Própria

A partir do secundário do transformador, os condutores seguem para o quadro de distribuição geral da indústria que também encontra-se no 1º pavimento, composto por um disjuntor termomagnético tripolar de 800A para a proteção geral no lado da baixa tensão. Neste mesmo painel, há um banco de capacitores de 142,5kVAr com tensão nominal de 380V e um controlador automático do fator de potência.

A partir do disjuntor geral, são derivados os circuitos principais. Por questão de simplificação os circuitos de iluminação serão dispensados. O diagrama unifilar completo da instalação encontra-se no Anexo A.

No diagrama unifilar completo, mostrado no Anexo A é possível observar que existem vários quadros de cargas onde estão localizados os acionamentos do motores. Nos casos onde há necessidade de controle de velocidade dos motores são utilizados inversores de frequência, já para os motores de maior potência o acionamento ocorre por uma soft starter. As Tabelas 13 e 14 apresentam as características de cada inversor de frequência e da soft-starter.

Tabela 13 - Relação dos Inversores de Frequência Instalados na Indústria

Inversor	Marca	Modelo	Motor
1	WEG	CFW – 08	Exaustor do Pó do Sessor – 12,5 CV
2	Telemecanique	ATV31HU15M3	Rosca da Descarga Farinha – 2 CV
3	WEG	CFW – 08	Máquina Pré Mix – 5 CV
4	Delta	VFD037EL43A	Máquina Embalagem 5Kg 1 – 5 CV
5	WEG	CFW – 08	Máquina Embalagem 1Kg 1 – 1 CV
6	Delta	VFD037EL43A	Máquina Embalagem 1Kg 2 – 5 CV
7	Delta	VFD007EL43A	Máquina Embalagem 1Kg 2 – 1 CV

Fonte: Autoria Própria

Tabela 14 - Informações da Soft-Starter Utilizada para Acionamento de Dois Motores

Soft Starter	Marca	Modelo	Motor
1	Schneider	Altistart 48	Transmissão 1 – 100 CV Transmissão 2 – 75 CV

Fonte: Autoria Própria

3.2.1 Histórico de Consumo e Demanda da Indústria

Com o intuito de obter-se um panorama a respeito do consumo de energia elétrica e demanda utilizados pela indústria, foi consultada a página da concessionária

que se destina ao consumidor, no site da COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (COPEL). Nesta página é possível obter dados a respeito do histórico de consumo e demanda, faturamentos, gráficos de energia ativa e reativa e fator de potência.

Para este trabalho serão utilizados apenas os dados de consumo e demanda de um período de doze meses, como mostra a Tabela 15.

Tabela 15 - Histórico de Demanda e Consumo

MÊS	Consumo (kWh)		Demanda Contratada (kW)	Demanda Registrada (kW)
	Ponta	F Ponta	Total	Total
06/2013	201,00	44.192,00	310,00	302,40
07/2013	136,00	46.525,00	310,00	320,83
08/2013	198,00	46.552,00	310,00	305,85
09/2013	293,00	43.607,00	310,00	307,58
10/2013	171,00	48.668,00	310,00	296,06
11/2013	213,00	54.088,00	310,00	320,83
12/2013	372,00	68.345,00	310,00	324,86
01/2014	239,00	45.227,00	310,00	316,22
02/2014	546,00	66.130,00	310,00	328,32
03/2014	645,00	49.570,00	310,00	334,65
04/2014	217,00	62.295,00	310,00	326,01
05/2014	162,00	55.371,00	320,00	330,62
06/2014	159,00	48.072,00	320,00	312,19

Fonte: Adaptado de COPEL (2014)

O gráfico apresentado na Figura 18 foi obtido através dos dados da Tabela 15. Observa-se que em alguns meses a demanda registrada pela concessionária ultrapassou a contratada, incidindo em cobrança de demanda de ultrapassagem quando o valor medido for maior do que 5% do valor contratado, deste modo até o mês de Abril de 2014 esse valor aceitável era de 325,5kW. Portanto nos meses de Fevereiro, Março e Abril de 2014 o consumidor teve de pagar pela demanda excedente.

Nos meses seguintes a demanda da indústria continuou acima dos 310kW e então tornou – se necessário solicitar junto a concessionária o aumento para 320kW, sendo que, agora a demanda pode chegar até 336kW.

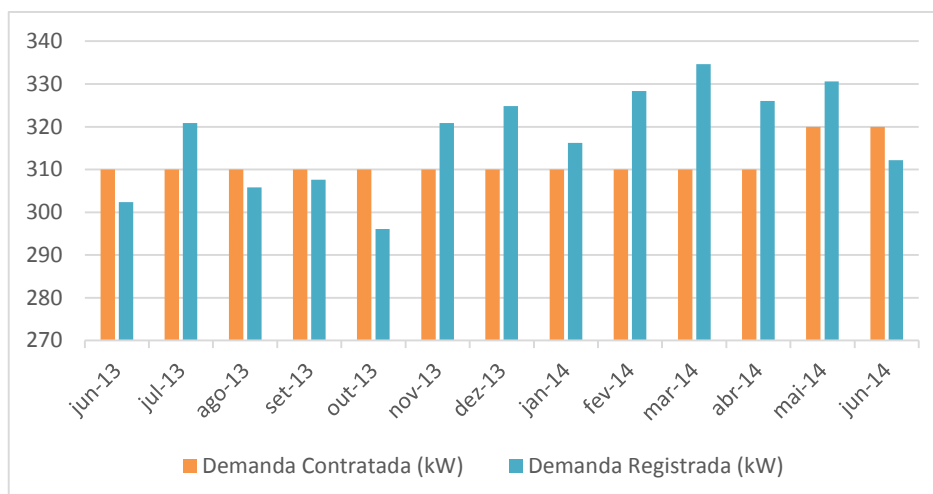


Figura 18 - Demanda Contratada e Medida
Fonte: Autoria Própria

3.2.2 Filtro de Harmônicas

A indústria possui um filtro de energia elétrica da marca REDUMAX®, modelo RX 2000, trifásico, 380V com capacidade de descarga de 40kA.

O filtro passivo é denominado como passa faixa e é composto por três placas: uma capacitiva, uma indutiva e uma resistiva, além de uma placa de para-raios interno de rede, que ao se unirem de forma tecnicamente correta, é capaz de criar um curto circuito à terra e uma resistência de zero Ohms entre a rede e o aterramento, eliminando todas as frequências diferentes de 60 Hz e portanto, eliminando as distorções harmônicas e outros distúrbios relacionados a qualidade de energia, como por exemplo, os pico gerados por motores, interferências externas e internas, as variações de tensão e descargas atmosféricas. O fabricante ainda informa que o filtro corrige as distorções harmônicas até a 50° ordem (REDUMAX ENERGIA).

A fotografia da Figura 19 apresenta o filtro instalado no quadro de distribuição 2, localizado no segundo pavimento da indústria.



Figura 19 - Filtro de Energia Elétrica Redumax - RX2000
Fonte: Autoria Própria

3.3 MANUTENÇÃO ELÉTRICA

A indústria não conta com um plano de manutenções preventivas ou preditivas, ou seja, manutenções são realizadas quando há falha ou defeito em algum dos equipamentos elétricos.

3.4 PROCESSO PRODUTIVO

A fabricação da farinha e do farelo de trigo acontece em basicamente quatro etapas, desde a recepção do trigo até o empacotamento do produto final. Independente do produto final, ou seja, farinha ou farelo de trigo, as etapas de produção são as mesmas, o que mais influência no ciclo de trabalho e no consumo de energia da indústria é a demanda do produto pelo mercado. O fluxograma da Figura 20 apresenta as principais etapas do processo produtivo.

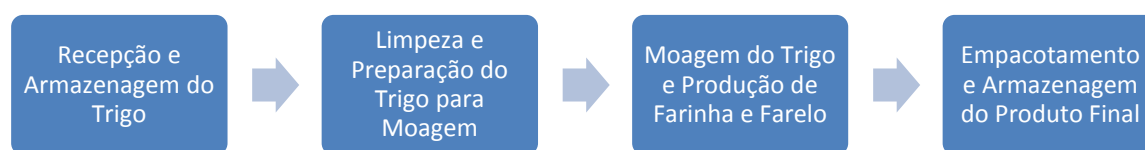


Figura 20 - Fluxograma do Processo Produtivo
Fonte: Autoria Própria

- Recepção e Armazenagem do Trigo

A recepção dos grãos de trigo acontece nas moegas, e logo em seguida os grãos são encaminhados para as máquinas da pré-limpeza para que sejam retiradas impurezas maiores. Após este processo os grãos são selecionados de acordo com seu tipo e qualidade e em seguida enviados aos silos de armazenagem que possuem controle de temperatura e aeração. Lá os grãos permanecem até que ocorra a próxima etapa do processo.

- Limpeza e Preparação o Trigo para Moagem

Após definir as qualidades e as quantidades de cada trigo que serão utilizadas, os grãos são puxados dos silos e transportados por uma rosca até o elevador de canecas, e voltam para as máquinas da pré limpeza, mas desta vez o processo de limpeza é rigoroso para que ocorra a eliminação de quaisquer impurezas que estejam no grão.

Após a limpeza, o trigo sofre um processo chamado de acondicionamento. Este processo baseia-se em umidificar o grão com água e mantê-lo por um período de descanso de 24h00m, para depois ser encaminhado para a moagem propriamente dita.

- Moagem do Trigo e Produção da Farinha e Farelo

Nesta etapa o objetivo do processo é separar o endosperma para ser moído e convertido em farinha não contaminada por gérmen ou farelo. Primeiramente acontece a rotura que consiste na abertura do grão de trigo ao meio, expondo assim

o endosperma. Este trabalho é realizado por cilindros estriados que trabalham em pares e giram em velocidades distintas.

Em seguida, o endosperma é separado dos grãos, por meio das peneiras oscilantes e plansifter. Desta etapa obtém-se diferentes graduações de partículas, as grossas e as finas.

Por fim, as partículas são enviadas aos sassores para extrair o máximo possível do farelo do trigo. Os produtos classificados e purificados, variando do endosperma mais puro aos que possuem partículas de farelo, são finalmente transformados em farinha através da compressão.

- Empacotamento e Armazenagem do Produto Final

Após o processo de moagem as farinhas e farelos são encaminhados para silos, separados de acordo com sua qualidade. Logo em seguida ocorre o empacotamento. A farinha é envasada em embalagens de 1Kg, 5Kg e 25Kg, e o farelo apenas em embalagens de 25Kg. O produto final é então armazenado em um barracão até sair para a expedição.

4 METODOLOGIA

Para (ALDABÓ, 2001), os passos básicos para realizar o procedimento de inspeção na qualidade de energia são:

- Planejar e preparar a inspeção;
- Inspecionar a instalação elétrica e os equipamentos produtores de distorções harmônicas;
- Monitorar a energia elétrica;
- Analisar os dados coletados com os equipamentos utilizados nas medições;
- Elaborar um diagnóstico da situação do sistema elétrico.

As ferramentas mais comuns para o diagnóstico de distúrbios elétricos são o analisador de grandezas, osciloscópio, multímetro e a câmera termográfica (ALDABÓ, 2001).

Para o estudo realizado foram utilizados o analisador de grandezas e a câmera termográfica. Nos itens a seguir, serão descritos os procedimentos adotados para a realização das medições com o analisador de grandezas e a coleta de imagens térmicas com a câmera termográfica, também serão apresentados os locais de medições e como foram coletadas as informações registradas pelos equipamentos.

4.1 MEDIÇÕES COM ANALISADOR DE GRANDEZAS ELÉTRICAS

As medições das grandezas elétricas foram realizadas utilizando o analisador de Qualidade de Potência da marca FLUKE, modelo 435. O equipamento é capaz de registrar potências ativas, reativas e aparentes, níveis de tensão, variações e desequilíbrios, corrente, fator de potência, frequência, distorções harmônicas totais e individuais, espectro de frequência de distorções harmônicas tanto para tensão quanto para corrente, além de possuir outras diversas funções.

Para a obtenção do diagnóstico do sistema elétrico em questão, foram medidos os valores referentes a tensão, corrente, potência ativa, fator de potência,

distorções harmônicas totais e individuais de corrente e tensão, além de fenômenos relacionados à qualidade da energia elétrica.

Inicialmente as medidas ocorreram no quadro de distribuição principal, de modo a obter dados a respeito de todo o sistema elétrico e dos distúrbios da QEE. Em seguida, o analisador de grandezas foi instalado na entrada de determinados inversores de frequência, para obter-se informações sobre a produção de distorções harmônicas destes equipamentos operando na condição de carga à rede elétrica. Além das medidas, também obteve-se as formas de onda de tensão e corrente dos inversores.

Após realizadas as medições e coletados os dados, através de um cabo óptico com conexão interface USB e o software *Power Log* fornecido junto com o equipamento, os registros foram transferidos para planilhas do Excel, onde foram manipulados e construídos os gráficos utilizados no trabalho.

A Figura 21 apresenta o analisador de grandezas instalado no barramento do quadro de distribuição geral da baixa tensão, no circuito secundário associado ao transformador de 500 kVA, antes do disjuntor geral de 800A.



Figura 21 - Conexão do Analisador de Grandezas ao QD Principal
Fonte: Autoria Própria

A Figura 22 apresenta o inversor de frequência número 01 responsável pelo acionamento e controle do motor denominado Exaustor do Pó do Sessor, onde foram obtidos dados a respeito das distorções harmônicas de tensão e corrente produzidas por este equipamento.



Figura 22 - Inversor de Frequência Responsável Pelo Acionamento e Controle do Motor – Exaustor do Pó do Sessor.

Fonte: Autoria Própria

4.1.1 Parâmetros de Medição Utilizados para o Analisador de Grandezas

As medições realizadas junto ao quadro de distribuição principal ocorreram em três dias. No primeiro dia (11 de Abril de 2014) com o filtro de harmônicas ligado e no segundo dia (14 de Abril de 2014) com o filtro de harmônicas desligado. Em ambos os dias, as medidas foram realizadas durante um dia normal de trabalho na indústria, por um período de 11h00m. As medições de qualidade de energia aconteceram em um terceiro dia (06 de Junho de 2014), onde mediu - se transientes, flicker, desequilíbrio, reduções e aumentos (Dips & Swells). Cada um dos fenômenos foi medido separadamente utilizando o tempo mínimo de medição para obtenção dos dados.

Antes de serem iniciadas as medidas, fez-se as configurações necessárias no analisador para o sistema elétrico em questão. A tensão ajustada foi de 400 V, as correntes em 1150 A, a frequência em 60Hz, taxa de amostragem de 30s e a configuração do sistema do tipo estrela com neutro aterrado.

A coleta de dados nos inversores de frequência ocorreu durante a operação em regime da indústria. Foram realizadas medidas nos inversores 01 e 05, responsáveis pelo acionamento e controle dos motores denominados Exaustor do Pó do Sabor e Máquina Embalagem 1Kg - 1. As medições compreenderam o registro de um período de 5 minutos para o inversor 01 e 3 minutos para o inversor 05.

No momento em que ocorreram as medições apenas os inversores 01, 02, 04 e 05 estavam em funcionamento. Devido à dificuldade em realizar a conexão do analisador nos inversores 02 e 04 os mesmos não foram medidos. É importante mencionar que não foram realizadas medidas na soft starter já que ela opera apenas no acionamento das máquinas da transmissão e logo em seguida é desligada, portanto não introduzindo harmônicos com o sistema operando em regime.

Antes de conectar o analisador aos inversores, foram feitas as configurações necessárias para medir principalmente as distorções harmônicas de tensão e corrente. A tensão foi ajustada em 398 V, as correntes em 50 A, a frequência em 60Hz, taxa de amostragem de 0,5s e a configuração do sistema do tipo delta.

4.2 INSPEÇÃO COM A CÂMERA DE TERMOGRAFIA

As medições referentes à termografia foram realizadas utilizando a câmera infravermelha InfraCAM da marca FLIR SYSTEMS, sendo que esta câmera é capaz de medir e reproduzir em imagem a radiação de infravermelhos emitida por um objeto.

Este equipamento detecta anomalias térmicas, sendo essas uma elevação na temperatura do componente em análise ou até mesmo temperaturas inferiores ao esperado, como no caso de falha de refrigeração em um transformador.

As inspeções termográficas foram realizadas junto ao quadro de distribuição principal com o intuito de verificar possíveis sobreaquecimentos nos barramentos, e no transformador, com a finalidade de verificar a temperatura das buchas da baixa

tensão. As medidas foram feitas no período de maior demanda da indústria, quando os pontos com sobreaquecimento do sistema tornam-se mais evidentes.

4.2.1 Parâmetros de Medição Utilizados para o Câmera Termográfica

As medições utilizando a câmera termográfica foram realizadas instantaneamente entre as 12h45m e 13h00m, sendo este um horário que o moinho estava funcionando normalmente.

Os ensaios foram realizados em ambiente fechado, ou seja, não existe influência atmosférica (radiação solar a incidir no objeto e a ausência de vento). Considerou-se a reflexão constante em 20°C, pois as superfícies foram consideradas como lisas por se tratarem de objetos de grande dimensão

Para o funcionamento correto da câmera é necessária a parametrização da emissividade. A emissividade é ajustada na câmera antes de coletar a imagem térmica conforme o material do objeto em análise, pois sabe-se que a temperatura varia conforme o material.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo irá apresentar uma síntese dos resultados e avaliações dos dados coletados com o analisador de grandezas e a câmera termográfica. A primeira parte apresenta as grandezas elétricas coletadas com o analisador de Qualidade de Potência instalado no quadro de distribuição principal em duas situações: com filtro de componentes harmônicas ligado e desligado. Ainda nesse contexto será apresentada a análise da qualidade de energia.

A segunda parte irá mostrar as distorções harmônicas medidas na entrada dos inversores de frequência e a terceira parte irá contemplar um diagnóstico das imagens térmicas obtidas com a câmera termográfica.

5.1 MEDIÇÕES REALIZADAS COM O FILTRO LIGADO

5.1.1 Tensão e Corrente nas Fases

As Figuras 23 e 24 apresentam uma mostra do perfil da tensão e da corrente em cada uma das fases.

A tensão nominal do barramento do quadro de distribuição geral é de 380 V entre fases e 220 V entre fase e neutro. Analisando os valores registrados, é possível observar que os valores de tensão para as três fases apresentam praticamente o mesmo comportamento, com pequenas variações entre 218 V e 227 V. Às 17h00m quando as máquinas são desligadas a tensão aumenta, tendo seu valor máximo na fase L2 em aproximadamente 229,5 V.

Comparando os resultados obtidos com os parâmetros recomendados pelo módulo 8 do PRODIST para a variação de tensão, pode-se verificar que a tensão medida na indústria situa-se dentro da faixa considerada normal e adequada, já que esta norma determina que a tensão deve permanecer entre 201 V e 231 V em torno da tensão nominal, ou seja, 220 V.

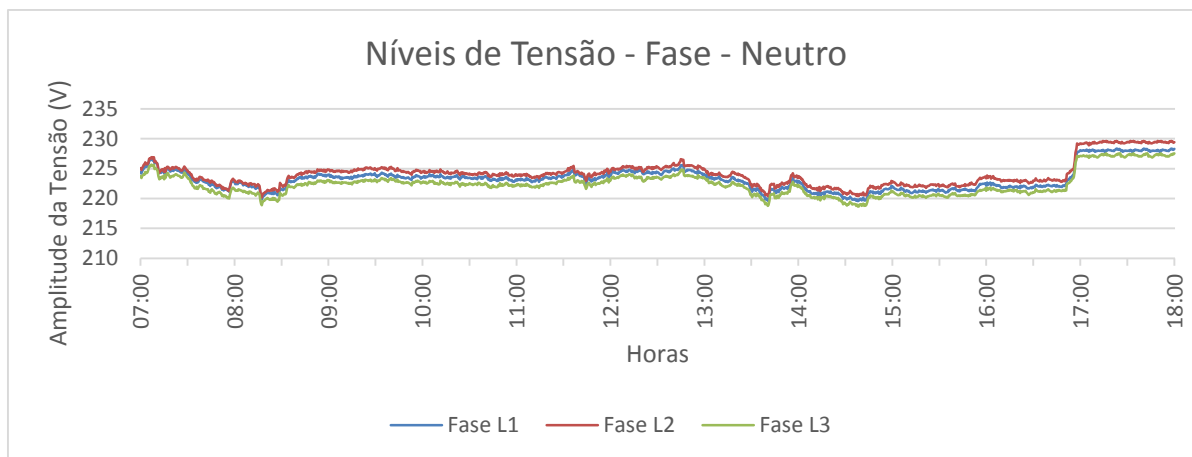


Figura 23 - Gráfico de Tendência do Nível de Tensão Medido no Quadro de Distribuição Geral
Fonte: Autoria Própria

A análise da corrente pode ser feita através do gráfico representado pela Figura 24.

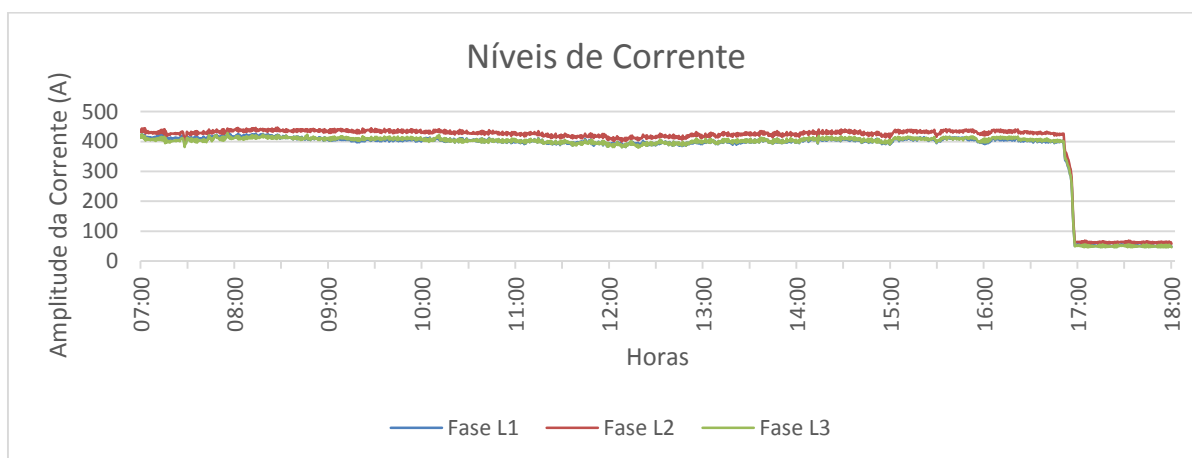


Figura 24 - Gráfico de Tendência da Corrente Medida no Quadro de Distribuição Geral
Fonte: Autoria Própria

O disjuntor do quadro de distribuição geral é de 800 A. Observando o resultado das medições da corrente apresentado na Figura 24, é possível verificar que a instalação está operando com aproximadamente 50% da capacidade nominal, já que a corrente registrada nesse dia típico de trabalho permanece na maior parte do tempo, em torno de 390A a 440A. É possível notar que a fase L2 possui nível de corrente mais elevado quando comparado com as fases L1 e L3.

Durante todo o ciclo de trabalho percebe-se que a corrente é bastante estável, isto é, demanda constante até 17h00m quando ocorre saída de carga do sistema, fazendo com que a corrente permaneça em torno de 55 A ao final do dia.

A respeito da tensão e da corrente no condutor neutro apresentadas nas Figuras 25 e 26, é possível verificar que a tensão aumenta gradativamente até às 8h00m, mas permanece entre valores pequenos de 0,18 V e 0,22 V, podendo até mesmo ser considerada zero. Já a corrente permanece entre 13 A e 14 A na maior parte do tempo. Desta forma pode-se dizer que o circuito encontra-se praticamente equilibrado já que não há circulação significativa de corrente pelo neutro.

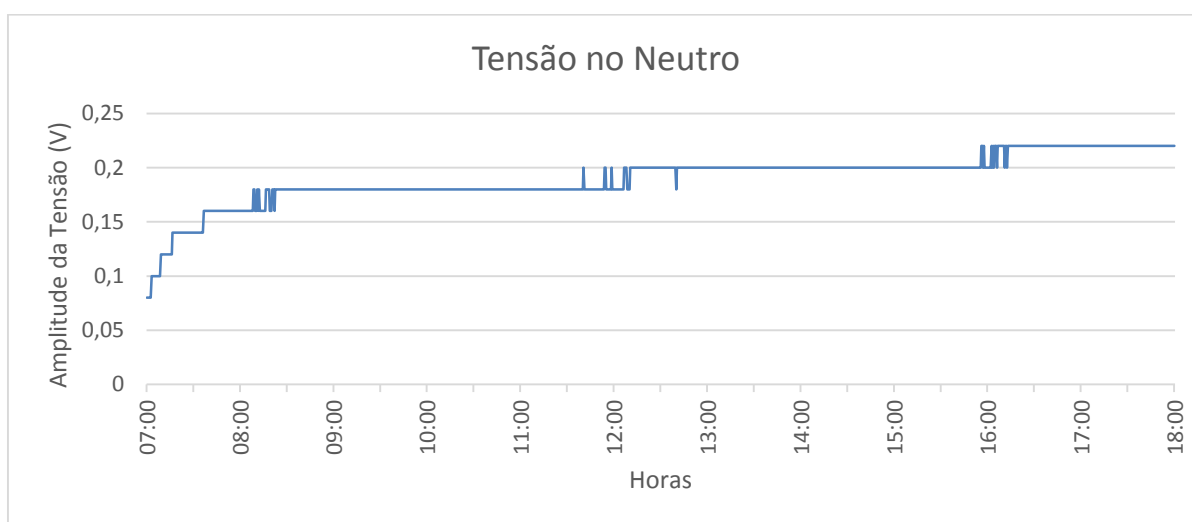


Figura 25 - Gráfico de Tendência da Tensão do Condutor de Neutro Medida no Quadro de Distribuição Geral

Fonte: Autoria Própria

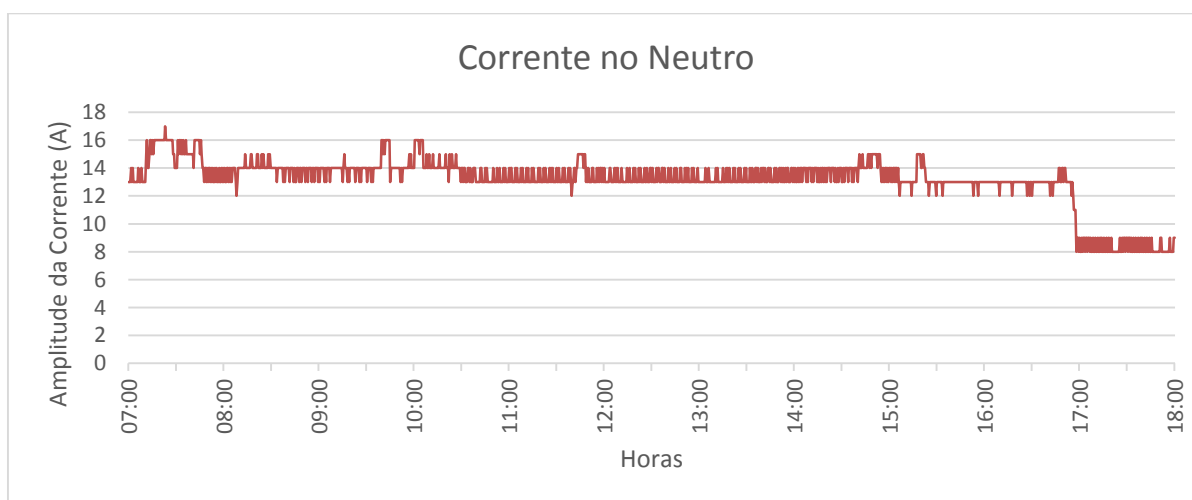


Figura 26 - Gráfico de Tendência da Corrente do Condutor de Neutro Medida no Quadro de Distribuição Geral

Fonte: Autoria Própria

5.1.2 Potência Ativa e Fator de Potência

Os resultados obtidos para as medições de potência ativa, podem ser observados na Figura 27, onde é possível verificar que na maior parte do tempo a potência ativa absorvida pelo circuito principal permanece estável e próxima a 250kW, bem abaixo dos 320kW de demanda contratada pela indústria. Já no fim do dia, quando a maior parte das máquinas são desligadas, ela diminui para 34kW, pois apenas pequenas cargas permanecem funcionando.

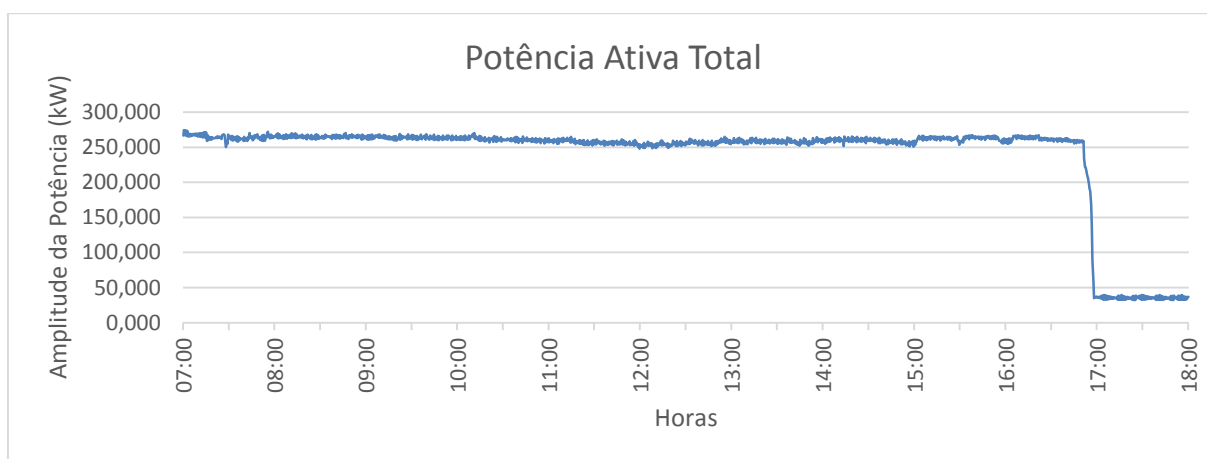


Figura 27 - Gráfico Referente a Potência Ativa Medida em um Dia Típico de Produção
Fonte: Autoria Própria

Os valores medidos para o fator de potência real e para o fator de potência de deslocamento, também conhecidos como FP e FPD, são mostrados na Figura 28.

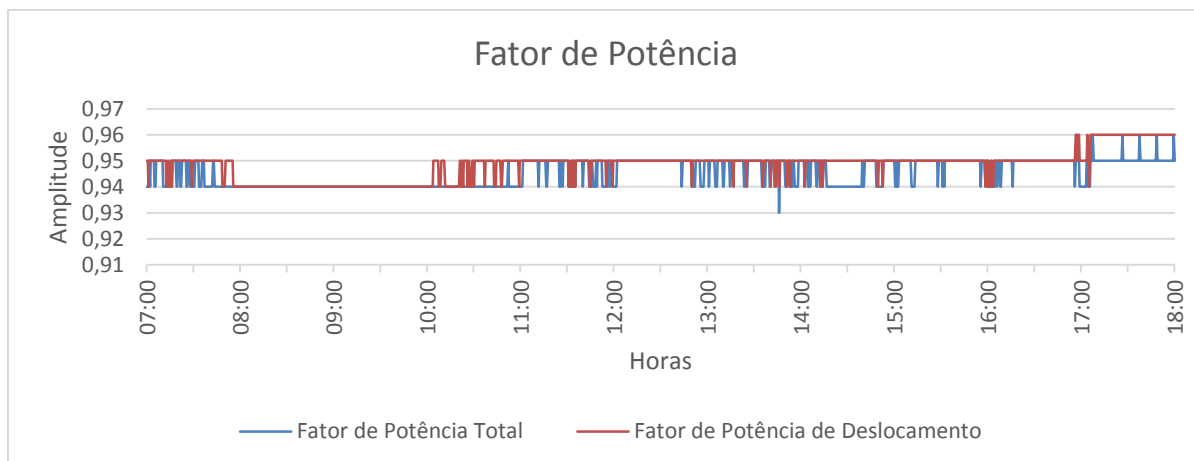


Figura 28 - Curvas do Fator de Potência Real e de Deslocamento em um Dia Típico de Produção
Fonte: Autoria Própria

O fator de potência de deslocamento (FPD) considera apenas a defasagem entre a corrente e a tensão na frequência fundamental, já o fator de potência real (FP) leva em consideração além da defasagem entre a corrente e a tensão, os ângulos de defasagem de cada harmônica. Analisando as curvas do FPD e do FP total é possível verificar que ambos permanecem na maior parte do tempo entre 0,94 e 0,95.

Outro fato a ser observado é o de que, em alguns momentos do dia tanto o FPD quanto o FP possuem os mesmos valores. Nos momentos onde FPD e FP são diferentes, verifica-se que o fator de potência real é sempre menor que o fator de potência de deslocamento.

Às 17h00m quando as máquinas de maior porte são desligadas, o FP permanece em torno de 0,95, já o FPD permanece em 0,96. Portanto, para este dia a compensação de reativos proporcionada pelo banco de capacitores de 142,5Kvar com controlador automático foi eficiente. O fator de potência da instalação manteve-se de acordo com a norma da concessionária, que determina que o FP mínimo deve ser de 0,92 evitando a cobrança de reativos excedentes.

5.1.3 Avaliação das Distorções Harmônicas

As imagens das formas de onda da tensão e da corrente capturadas instantaneamente pelo analisador de grandezas são mostradas na Figura 29.

Através da Figura 29 é possível verificar que há distorções harmônicas tanto na tensão quanto na corrente, sendo que na corrente as distorções são mais proeminentes. Isto pode ser atribuído principalmente aos inversores de frequência usados para acionar e controlar a velocidade dos diversos motores de indução da indústria, e ao sistema de iluminação.

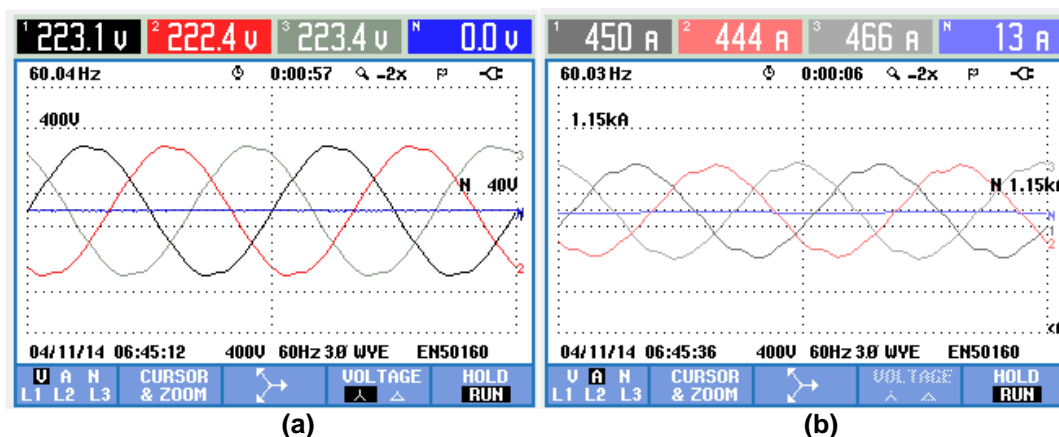


Figura 29 - Ondas de (a) Tensão e (b) Corrente Obtidas no Barramento do Quadro de Distribuição Geral

Fonte: Autoria Própria

A seguir serão apresentados os resultados das medições realizadas no local, para as distorções harmônicas de tensão e corrente. As medições foram feitas seguindo as recomendações do PRODIST, que determina que em sistemas elétricos trifásicos do tipo estrela aterrada devem ser realizadas através das tensões fase-neutro (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, 2012).

Os resultados apresentados para as distorções harmônicas de tensão e corrente não contemplam as harmônicas acima da 25ª ordem e as harmônicas pares, pois apresentam valores muito baixos podendo ser desconsiderados.

Para a apresentação dos resultados das distorções percentuais de tensão - $DHT_v\%$, e corrente - $DHT_i\%$, empregou-se como grandeza base as próprias grandezas fundamentais de tensão e corrente determinadas a cada instante de medição.

5.1.3.1 Distorções Harmônicas de Corrente

O gráfico de tendência da Figura 30 mostra o nível de distorção harmônica total de corrente medido em cada uma das fases, onde pode-se observar que na maior parte do tempo as três seguem praticamente o mesmo padrão, com valores baixos que não ultrapassam os 5% de distorção. Quando a fábrica encerra o processo de produção, neste caso às 17h00m, as distorções de corrente aumentam consideravelmente chegando ao valor máximo de 12,98% na fase L3, com aumento visível também para as outras fases.

Comparando o gráfico da Figura 30 com o gráfico da Figura 24, é possível notar que o DHT_i é inversamente proporcional ao valor da corrente fundamental, ou seja, à medida que a corrente diminui o índice DHT_i aumenta consideravelmente, e quando ocorre um aumento da corrente o DHT_i diminui.

Esta correlação pode ser explicada da seguinte forma: quando a indústria encontra-se em pleno funcionamento a corrente eficaz da instalação é elevada permanecendo em torno de 450A a 500A, diante disto a corrente de alimentação das cargas não lineares, constituídas principalmente por inversores de frequência e o sistema de iluminação, é considerada muito baixa e portanto as distorções harmônicas produzidas por estas cargas afetaram menos o nível do DHT_i , já que a corrente eficaz fundamental é elevada. Porém, quando o processo produtivo da indústria chega ao fim, as 17h00m, a corrente total do sistema diminui e então a corrente de alimentação das cargas não lineares se sobressai, já que após este horário são as principais cargas da instalação, fazendo com que o conteúdo harmônico por elas produzido aumente de forma significativa o valor percentual do DHT_i .

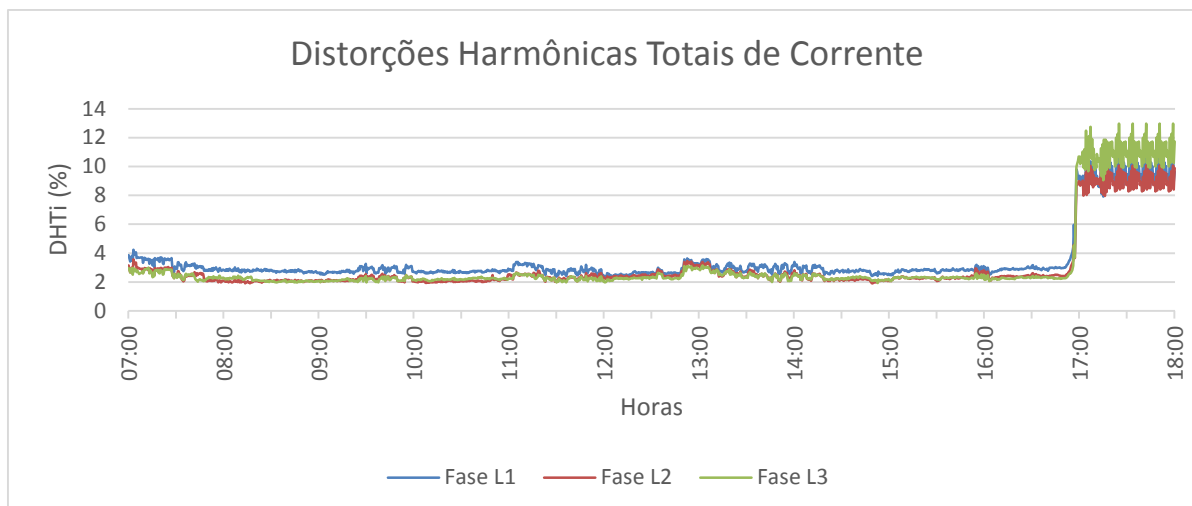


Figura 30 - Gráfico das Distorções Totais de Corrente em cada fase
Fonte: Autoria Própria

Ao contrário das distorções de tensão, as normas regulamentadoras para as distorções de corrente são reduzidas. Desta forma, a única comparação a ser feita será com a IEEE 519, como mostra a Tabela 16. A norma da IEEE não especifica exatamente o nível de DHT_i aceitável, mas sim o nível da distorção total de demanda (DTD).

Para encontrar o valor percentual do DTD que será comparado com as medidas obtidas é preciso encontrar a razão entre a máxima corrente de curto circuito e a corrente total demandada no PAC. Considerando o nível máximo de curto circuito como sendo 16.913A, obtido do projeto elétrico do relé de proteção da instalação, e a corrente demandada total a corrente nominal do disjuntor geral de 800A referenciada ao primário do transformador, obtém-se a razão de 734,39.

A Tabela 16 apresenta os valores máximos, mínimos e médios para a distorção na corrente em cada uma das fases. Comparando os resultados obtidos com o valor recomendado pela IEEE, é possível verificar que os níveis de distorções harmônicas de corrente médio, mínimo e máximo estão em conformidade com a norma, já que permanecem abaixo de 15%.

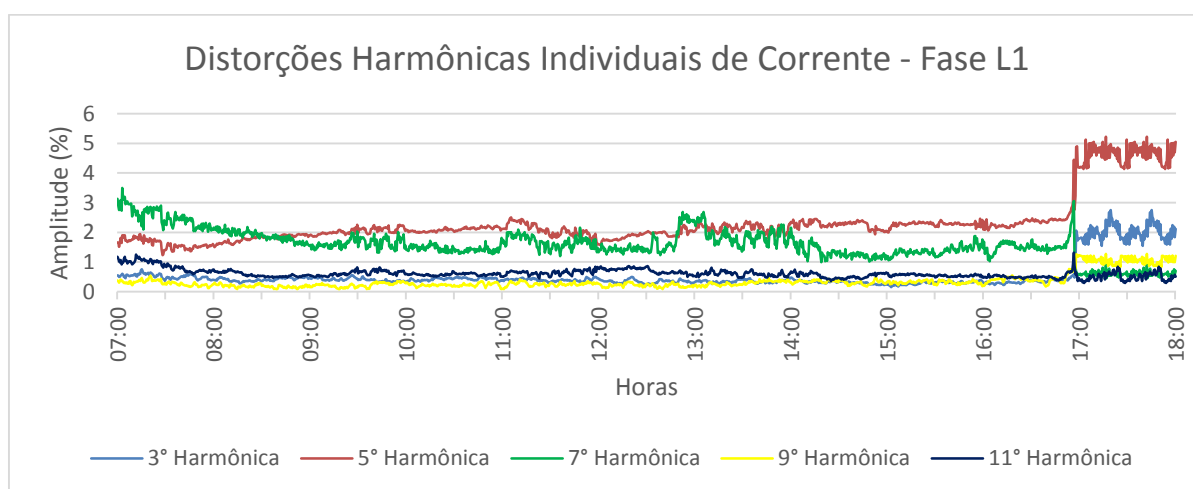
Tabela 16 - Comparação dos Valores da DHTi Medida com os Valores da Norma IEEE 519

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – DTD				
Valores Medidos			Valores Normativos	
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	IEEE 519
Máximo	11,16%	10,07%	12,98%	15,0%
Mínimo	2,36%	1,90%	1,92%	
Média	3,17%	2,65%	2,69%	

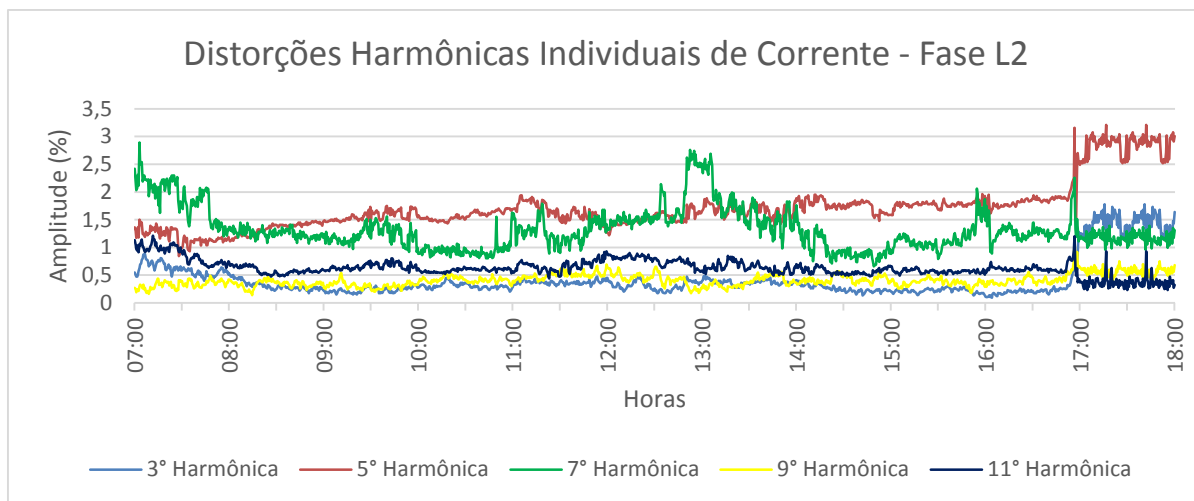
Fonte: Autoria Própria

A Figura 31 apresenta o gráfico temporal das principais componentes harmônicas de corrente, contemplando a 3°, 5°, 7°, 9° e a 11° harmônica.

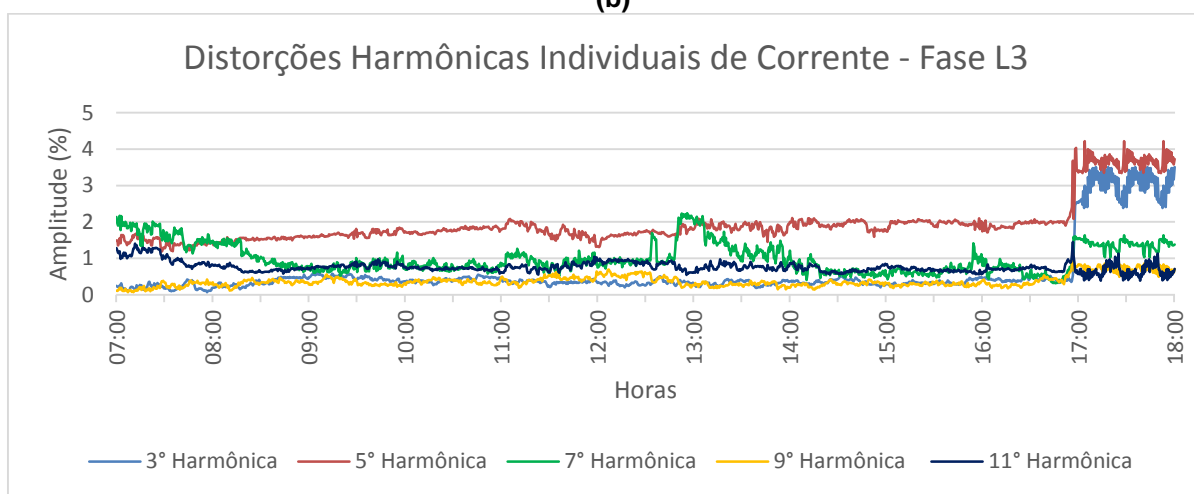
Analisando o gráfico verifica-se que as harmônicas de 5° e 7° ordem são as mais significativas, na maior parte do período, seguida pela harmônica de 11° ordem. A partir das 17h00m, os valores das distorções harmônicas de corrente de 3° e 5° ordem aumentam consideravelmente. Suas amplitudes ficam acima de 4,5%, para a 5° harmônica presente na fase L1, e acima de 3% para a 3° harmônica presente na fase L3. Já a harmônica de 7° ordem reduz a um valor máximo de 1,5% na fase L3. Este aumento nas harmônicas de 3° e 5° ordem ocorre porque, após este horário as cargas monofásicas são mais significativas, como por exemplo a iluminação.



(a)



(b)



(c)

Figura 31 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Corrente de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 17 apresenta a comparação entre os valores de todas as componentes harmônicas ímpares até a 25°, obtidas no período de monitoração e os valores recomendados pelo IEEE. Para a construção da Tabela 17 foram considerados apenas os valores máximos de cada ordem harmônica.

Comparando os valores encontrados na medição com as normas, é possível verificar que todas as componentes harmônicas de corrente encontram-se dentro dos valores recomendados, exceto a componente de 17° ordem que apresenta valores bem maiores do que a norma recomenda.

Tabela 17 - Comparação das Componentes Harmônicas de Corrente até a 25° Ordem com a Norma IEEE 519

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – Harmônicas Individuais				
Ordem da Harmônica	Valores Medidos			Valores Normativos
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	IEEE 519
3°	2,75%	1,78%	3,56%	12,0%
5°	5,22%	3,21%	4,22%	12,0%
7°	3,50%	2,89%	2,24%	12,0%
9°	1,27%	1,15%	1,13%	12,0%
11°	1,31%	1,21%	1,45%	5,5%
13°	3,19%	2,95%	1,87%	5,5%
15°	3,64%	2,75%	2,00%	5,5%
17°	8,41%	8,36%	11,66%	5,0%
19°	2,04%	2,72%	2,14%	5,0%
21°	0,95%	0,56%	0,84%	5,0%
23°	0,38%	0,29%	0,54%	2,0%
25°	0,34%	0,20%	0,22%	2,0%

Fonte: Autoria Própria

Utilizando o espectro de frequência é possível analisar qual a ordem e a amplitude das componentes harmônicas de corrente que mais influenciam na DHT_i, sendo possível avaliar de forma mais detalhada as distorções harmônicas individuais presentes na corrente. Os resultados são apresentados na forma de histograma pela Figura 32.

As componentes harmônicas de maior intensidade são caracterizadas pelas harmônicas até a 19° ordem, com grande destaque para a componente de 17° ordem que possui valores bem elevados, atingindo aproximadamente 12% de amplitude para a fase L3. Devido ao fato da indústria possuir equipamentos que utilizam retificador de seis pulsos, como os inversores de frequência, que são responsáveis por injetar componentes harmônicas de corrente de ordem $6n \pm 1$, onde n é um número inteiro, fica visível no histograma que as harmônicas de corrente mais elevadas são as que atendem este quesito, como por exemplo, componentes de 5°, 7°, 11°, 13° ordem e assim sucessivamente.

As componentes de 3° e 15° ordem também devem ser destacadas por serem mais elevadas, chegando a valores máximos de 3,56% e 3,64%, respectivamente. Este fato pode ser observado logo após o horário que se encerra a produção, já que neste momento apenas o sistema de iluminação, os equipamentos do escritório e as máquinas de empacotamento estão em funcionamento.

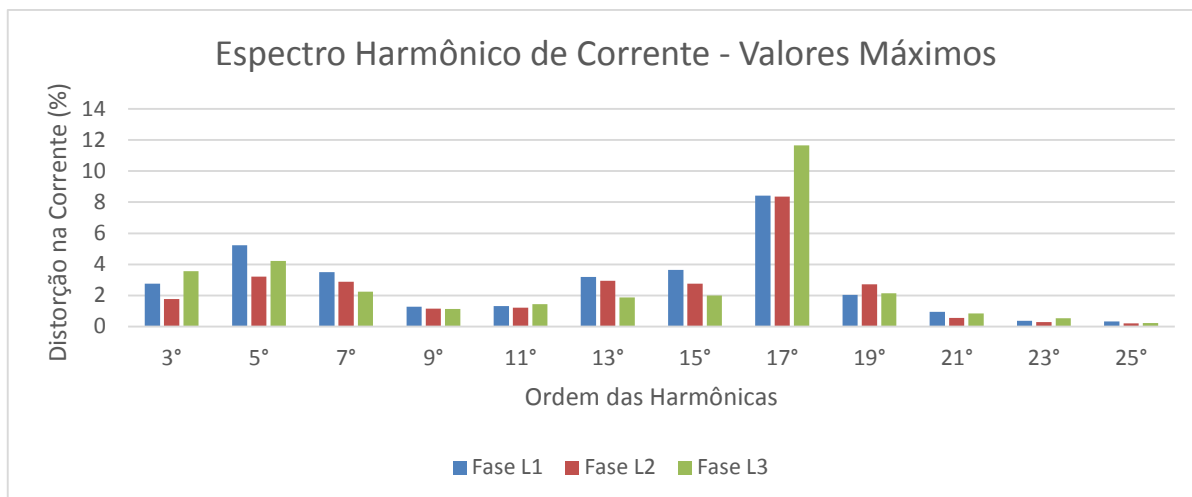


Figura 32 - Espectro de Frequência da Corrente - Valores Máximos
Fonte: Autoria Própria

5.1.3.2 Distorções Harmônicas de Tensão

As medidas coletadas para a distorção harmônica total de tensão (DHT_v) em cada uma das fases, podem ser observadas através do gráfico temporal apresentado pela Figura 33.

O gráfico apresenta uma visão ampla das distorções harmônicas na tensão de todo o sistema. Verifica-se que a DHT_v é mais reduzida até as 8h00m, aumentando gradativamente ao longo do tempo. Para o período da tarde os valores são maiores, permanecendo acima de 1,6% mas não ultrapassando 2,5%. Comparando-se as distorções harmônicas em cada fase, observa-se que as três seguem praticamente o mesmo padrão, embora as fases L1 e L3 possuam na maioria do tempo um nível de distorção mais elevado do que a fase L2.

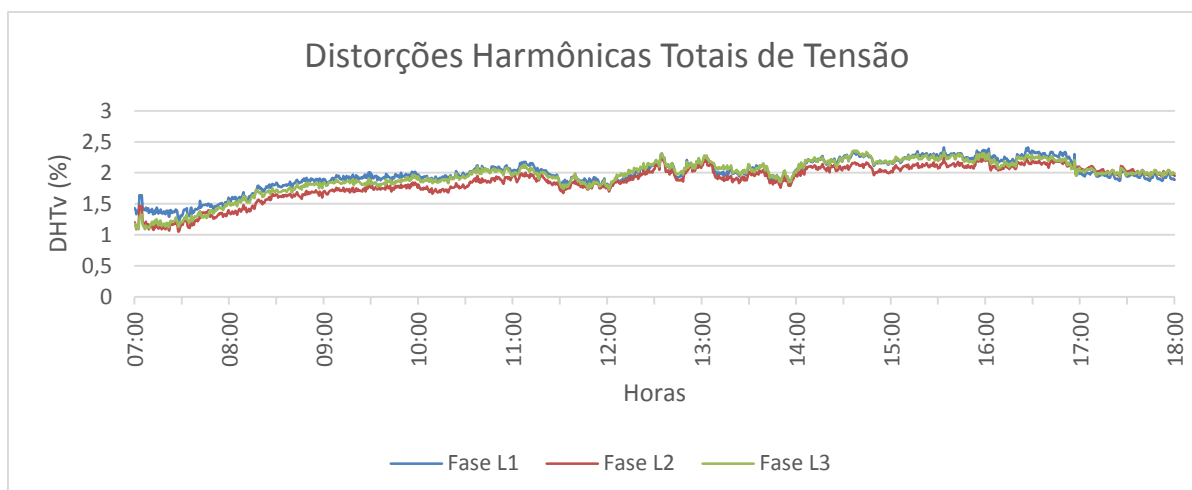


Figura 33 - Gráficos das Distorções Totais de Tensão em Cada Fase
Fonte: Autoria Própria

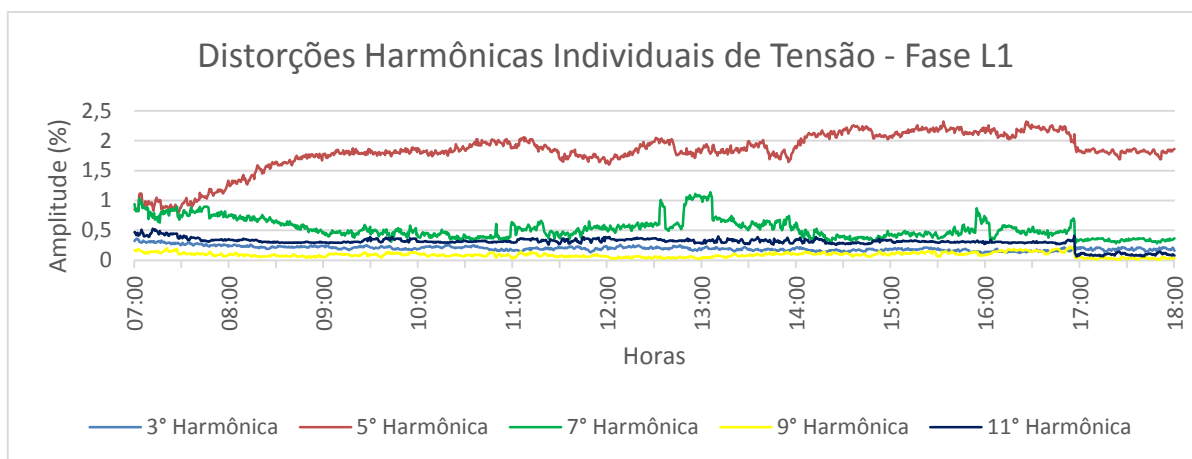
A Tabela 18 apresenta a comparação entre os valores obtidos no período de monitoração e os valores recomendados pelas principais normas nacionais e internacionais. Nas três normas que tratam do assunto, os valores máximos medidos estão dentro dos limites estipulados. Também é possível constatar que o DHT_v médio não ultrapassa os 2%.

Tabela 18 - Comparação da DHT_v Medida com as Principais Normas Nacionais e Internacionais Vigentes

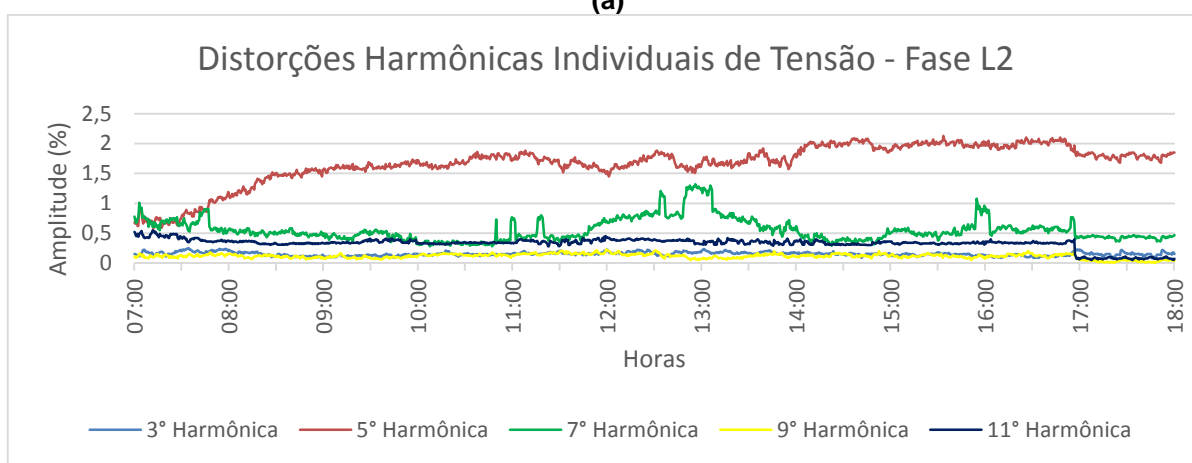
RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO - DHT_v						
Valores Medidos				Valores Normativos		
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	PRODIST - Módulo 8	IEEE 519	IEC 61000 – 2.4
Máximo	2,41%	2,31%	2,36%	8,0%	5,0%	8,0%
Mínimo	1,20%	1,05%	1,07%			
Média	1,97%	1,84%	1,93%			

Fonte: Autoria Própria

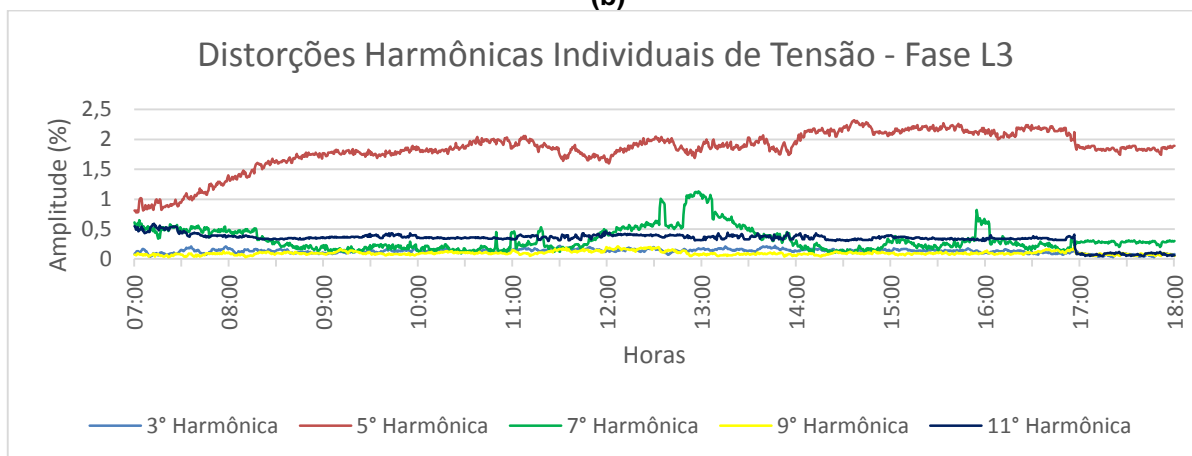
A Figura 34 apresenta o gráfico temporal das principais componentes harmônicas de tensão, contemplando a 3^o, 5^o, 7^o, 9^o e a 11^o harmônica. Analisando o gráfico pode-se notar que a harmônica de 5^o ordem é a mais significativa, seguida pelas harmônicas de 7^o e 11^o ordem, sendo que nenhuma delas ultrapassa o valor de 2,5%.



(a)



(b)



(c)

Figura 34 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 19 apresenta a comparação entre os valores de todas as componentes harmônicas ímpares até a 25ª obtidos no período de monitoração e os valores recomendados pelas principais normas nacionais e internacionais vigentes.

Para a construção da Tabela 19 foram considerados apenas os valores máximos de cada ordem harmônica.

Comparando os valores encontrados na medição com as normas, é possível verificar que todas as componentes harmônicas de tensão encontram-se dentro dos valores recomendados.

Tabela 19 - Comparação da Componentes Harmônicas de Tensão até a 25° Ordem com as Principais Normas Vigentes

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – Harmônicas Individuais de Tensão						
Ordem da Harmônica	Valores Medidos			Valores Normativos		
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	PRODIST - Módulo 8	IEEE 519	IEC 61000 – 2.2
3°	0,36%	0,25%	0,22%	5,0%	3,0%	5,0%
5°	2,32%	2,13%	2,32%	6,0%		6,0%
7°	1,14%	1,32%	1,13%	5,0%		5,0%
9°	0,23%	0,23%	0,21%	1,5%		1,5%
11°	0,53%	0,55%	0,59%	3,5%		3,5%
13°	0,34%	0,39%	0,24%	3,0%		3,0%
15°	0,27%	0,27%	0,17%	0,5%		0,3%
17°	0,63%	0,81%	0,82%	2,0%		2,0%
19°	0,17%	0,04%	0,14%	1,5%		1,5%
21°	0,08%	0,07%	0,05%	0,5%		0,2%
23°	0,04%	0,05%	0,06%	1,5%		1,5%
25°	0,05%	0,03%	0,04%	1,5%		1,5%

Fonte: Autoria Própria

A Figura 35 apresenta o espectro de frequência da tensão para as fases L1, L2 e L3, obtido com os valores referentes à Tabela 19.

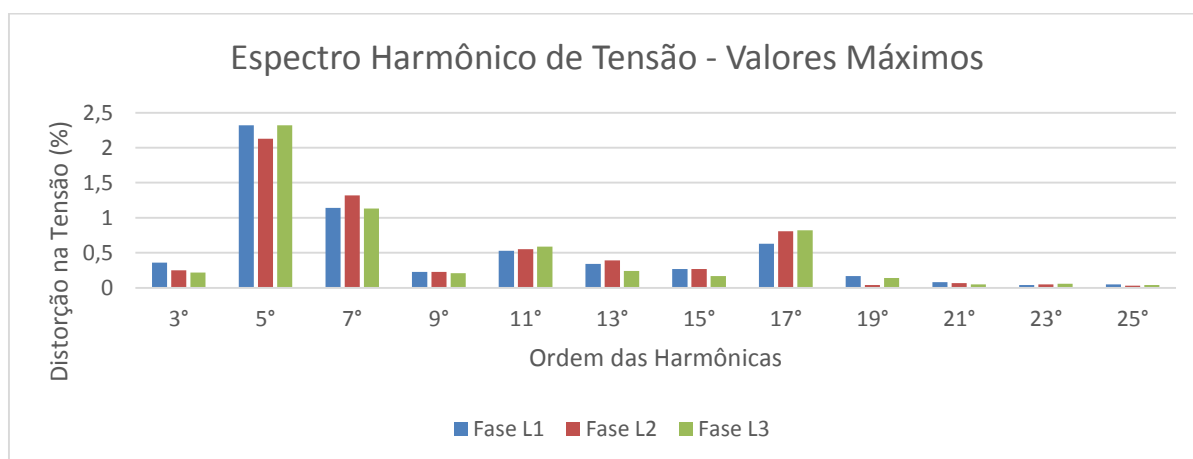


Figura 35 - Espectro de Frequência da Tensão - Valores Máximos

Fonte: Autoria Própria

Observando o histograma da Figura 35, é possível verificar que as componentes harmônicas que mais influenciam no DHT_v são as de 5° e 7° ordem, respectivamente. Também pode-se constatar que a componente de 17° ordem é mais elevada quando comparada com as demais, fato que não pode ser verificado apenas com o gráfico da Figura 34.

5.2 MEDIÇÕES REALIZADAS COM O FILTRO DESLIGADO

5.2.1 Tensão e Corrente nas Fases

As Figuras 36 e 37 apresentam uma amostra do perfil da tensão e da corrente em cada uma das fases. É possível perceber que as três fases possuem praticamente o mesmo perfil de tensão ao longo do dia, permanecendo entre 218V e 228V, com algumas variações devido à saída e a entrada de carga no sistema.

Comparando os valores eficazes de tensão medidos no período, com os parâmetros recomendados pelo módulo 8 do PRODIST para a variação de tensão, constatou-se que a mesma permanece dentro dos limites estabelecidos, entre 201V e 231V.

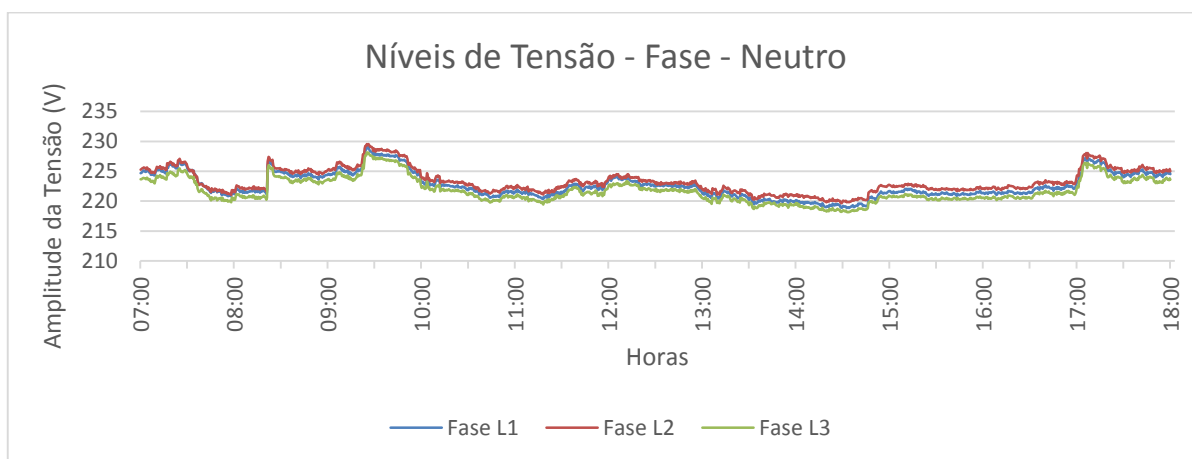


Figura 36 - Gráfico de Tendência do Nível de Tensão Medido no Quadro de Distribuição Geral
Fonte: Autoria Própria

A análise para a corrente pode ser realizada através do gráfico apresentado pela Figura 37.

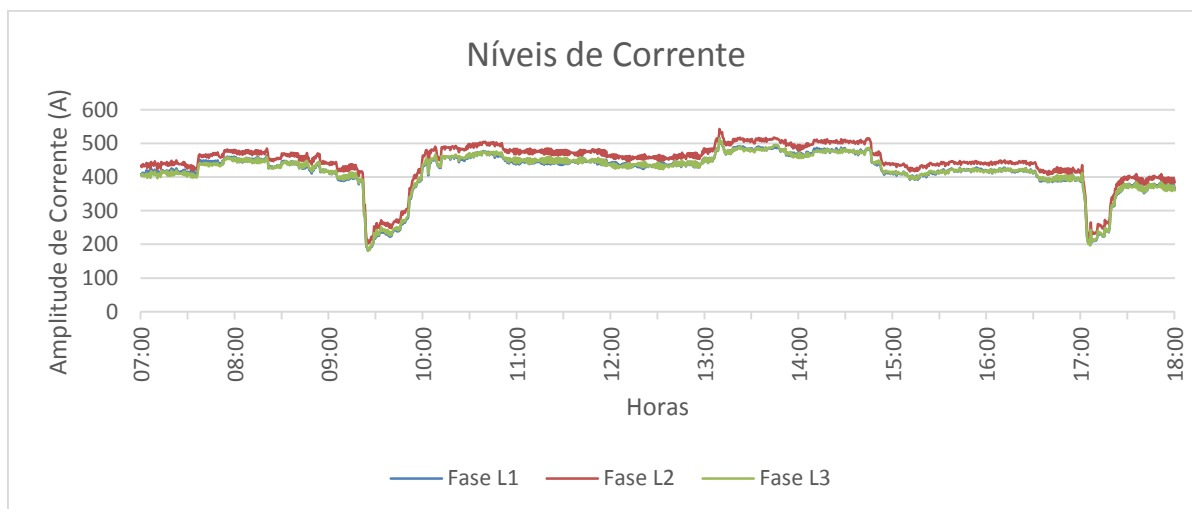


Figura 37 - Gráfico de Tendência da Corrente Medida no Quadro de Distribuição Geral
Fonte: Autoria Própria

Na maior parte do tempo a corrente permanece entre 400A e 450A, apresentando valores similares aos obtidos na medição anterior, quando o filtro encontrava-se ligado.

Através do gráfico da Figura 37 observa-se que a corrente nas fases L1 e L3 é a mesma, já a fase L2 possui nível de corrente um pouco mais elevado. Nas três fases os valores de amplitude seguem um mesmo padrão de comportamento, evidenciando uma boa distribuição de cargas na instalação.

Em dois momentos do dia é possível perceber queda na corrente, no período da manhã entre as 9h00m e as 10h00m, atingindo um valor próximo a 200A e no período da tarde, após as 17h00m com um valor de 198A. Esta queda na corrente deve ter ocorrido devido a retirada de cargas significativas na indústria que após certo tempo voltaram a ser utilizadas. Durante o dia é registrado apenas um pico significativo de corrente logo após as 13h00m, que ultrapassa os 500A.

As Figuras 38 e 39 apresentam o comportamento da tensão e da corrente no condutor neutro. O valor de corrente encontra-se em boa parte do tempo abaixo dos 13A, apresentando uma baixa circulação de corrente pelo condutor neutro. Após as 14h00m é possível verificar consideráveis variações na corrente do neutro chegando

ao valor máximo de 19 A. Já a tensão chega a um valor máximo de 0,2V e um valor mínimo de 0,02V, podendo ser considerado praticamente zero.

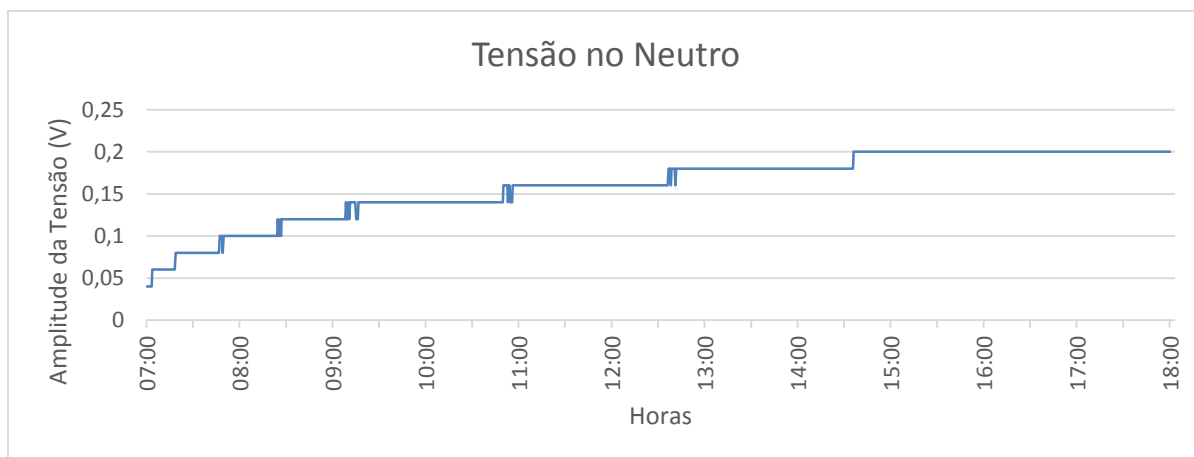


Figura 38 - Gráfico de Tendência da Tensão do Condutor Neutro Medida no Quadro de Distribuição Geral

Fonte: Aatoria Própria

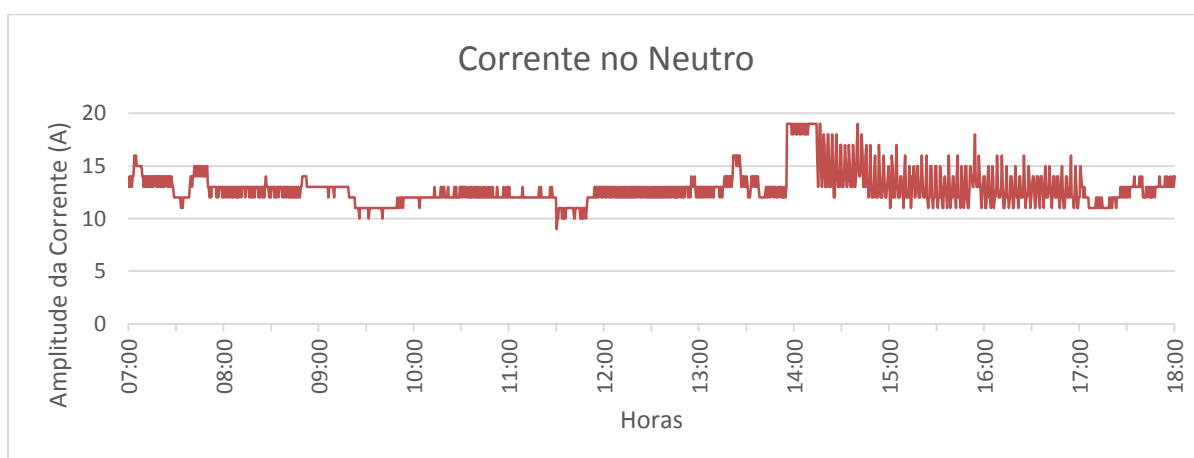


Figura 39 - Gráfico de Tendência da Corrente do Condutor Neutro Medida no Quadro de Distribuição Geral

Fonte: Aatoria Própria

5.2.2 Potência Ativa e Fator de Potência

A Figura 40 apresenta a curva registrada para a potência ativa. A variação da potência observada nesta imagem obedece ao comportamento da corrente, evidenciando as duas quedas que chegam a valores menores que 144kW. Na maior

parte do tempo é possível observar que a potência utilizada permanece acima dos 272kW. Somente após as 15h00m a potência solicitada pelas cargas começa a diminuir.

A demanda ativa para este dia não ultrapassa o valor da demanda contratada pela indústria de 320kW, o valor mais próximo a este acontece apenas uma vez durante o dia, logo após as 13h00m, quando a demanda solicitada tem um pico de 314kW.

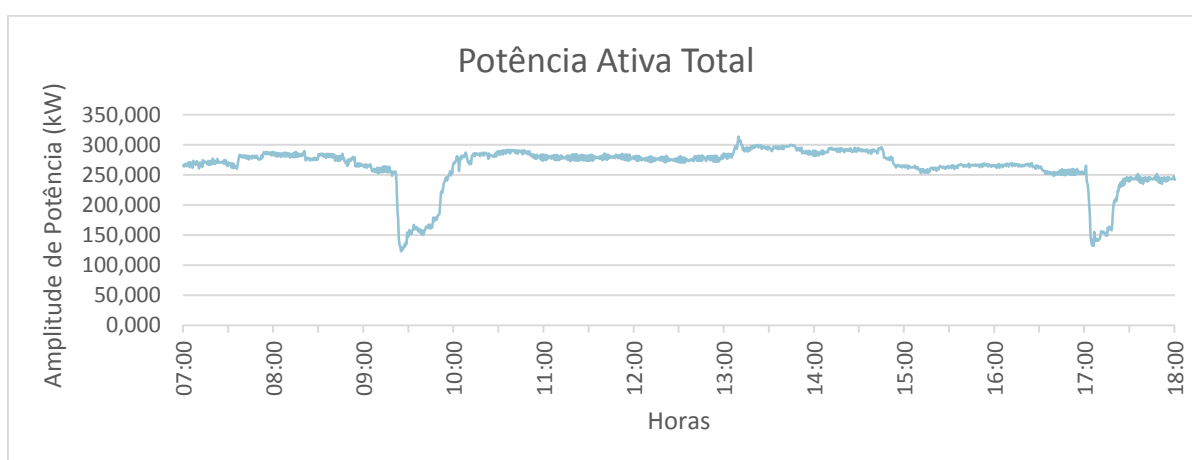


Figura 40 - Gráfico Referente a Potência Ativa Medida em um Dia Típico de Produção
Fonte: Autoria Própria

O gráfico do fator de potência real e do fator de potência de deslocamento, também conhecidos como FP e FPD, é mostrado a seguir pela Figura 41. A partir das 10h00m até as 15h00m houve momentos em que tanto o FP quanto o FPD permanecem em 0,91 e 0,90, e portanto abaixo do recomendado pela concessionária, ou seja, 0,92.

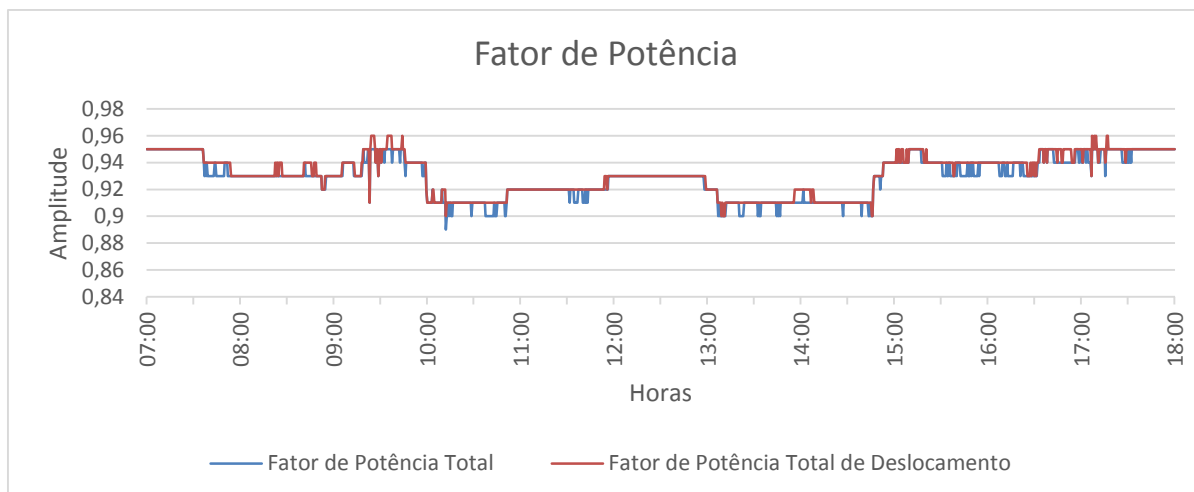


Figura 41 - Curvas do Fator de Potência Real e de Deslocamento em um Dia Típico de Produção
 Fonte: Autoria Própria

O gráfico obtido através do analisador de grandezas não especifica se o valor do fator de potência é capacitivo ou indutivo, pois caso fosse capacitivo não há cobrança de excedentes reativos neste horário. Deste modo, tornou-se necessário comparar o gráfico do fator de potência obtido com as medidas do fator de potência fornecidas pela concessionária neste mesmo dia.

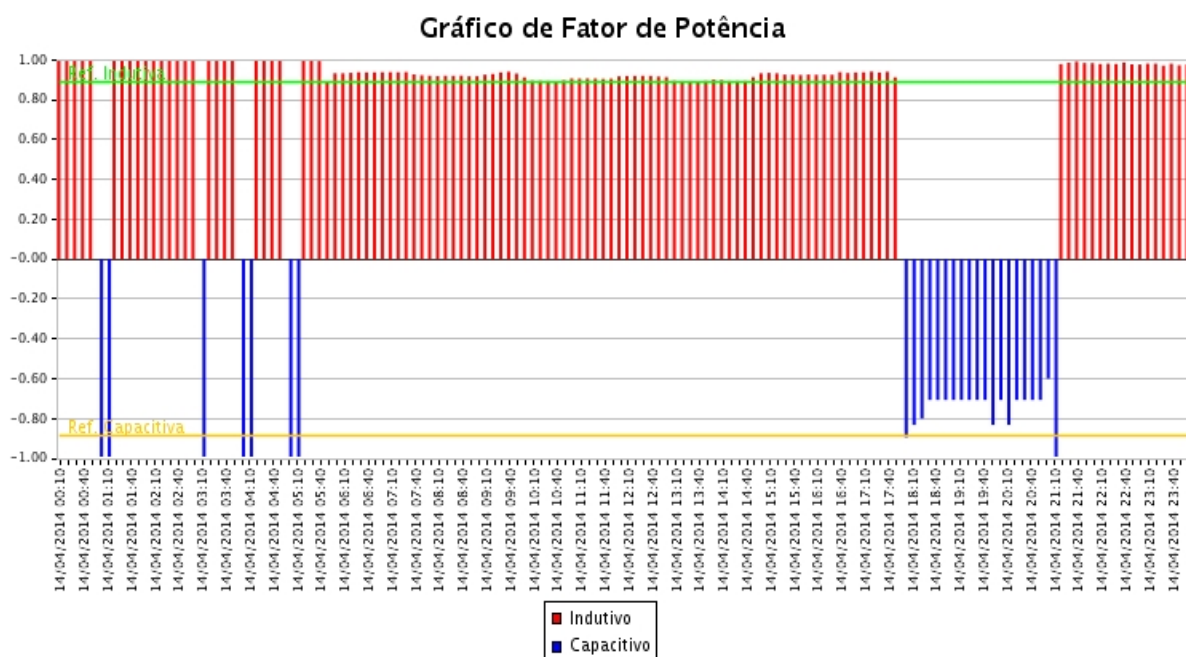


Figura 42 - Fator de Potência Referente ao Dia 14 de Abril de 2014
 Fonte: COMPANHIA PARANAENSE DE ENERGIA (2014)

Analisando o gráfico da concessionária na Figura 42, é possível verificar que nestes momentos o fator de potência medido realmente estava abaixo do esperado e era indutivo, e desta forma o consumidor será cobrado pelos reativos excedentes. Portanto, neste horário a compensação do banco de capacitores não foi suficiente, isto pode ter ocorrido devido a algum dos motores estar momentaneamente subcarregado fazendo com que o fator de potência da instalação seja reduzido, somado a isto pode-se considerar que algum capacitor esteja queimado ou ainda o fato do controlador automático não ter encontrado uma combinação adequada de capacitores dentre as opções disponíveis no banco para realizar a compensação.

5.2.3 Avaliação das Distorções Harmônicas

A Figura 43 apresenta as formas de onda para a tensão e a corrente obtidas no barramento do quadro principal com o filtro desligado. Observando as formas de onda, é possível verificar que estão distorcidas, sendo a distorção na corrente bem considerável. Estas distorções eram esperadas já que o filtro foi desligado e as cargas não lineares ainda estão em pleno funcionamento.

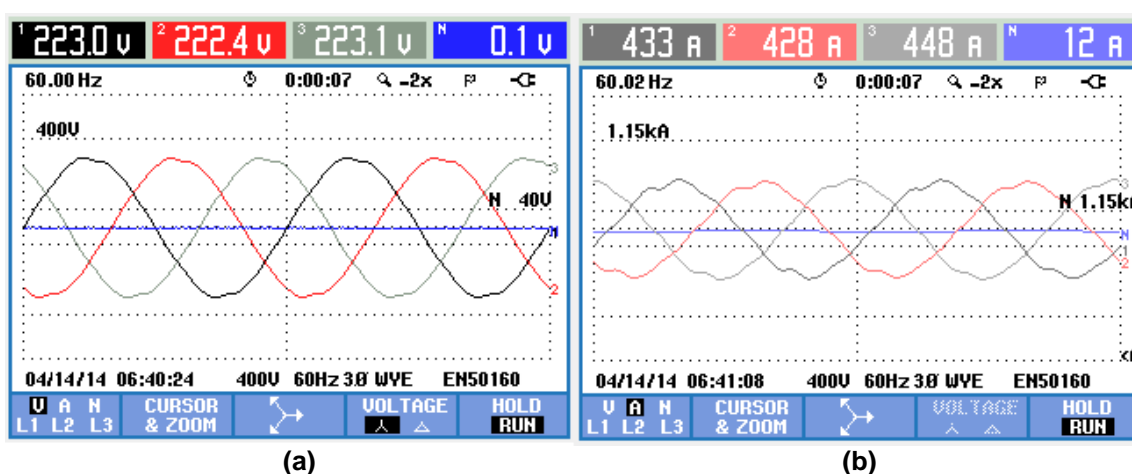


Figura 43 - Ondas de Tensão (a) e Corrente (b) Obtidas no Barramento do Quadro de Distribuição Geral
 Fonte: Autoria Própria

As medições para as distorções harmônicas de tensão e corrente com o filtro desligado são mostradas a seguir, sendo que todas elas foram realizadas seguindo as recomendações do PRODIST, que determina que em sistemas elétricos trifásicos do tipo estrela aterrada devem ser feitas através das tensões fase – neutro.

Os resultados apresentados para as distorções harmônicas de tensão e corrente não contemplam as harmônicas acima da 25ª ordem e as harmônicas pares, pois apresentam valores muito baixos podendo ser desconsiderados.

Para a apresentação dos resultados das distorções percentuais de tensão - $DHT_v\%$, e corrente - $DHT_i\%$, empregou-se como grandeza base as próprias grandezas fundamentais de tensão e corrente determinadas a cada instante de medição.

5.2.3.1 Distorções Harmônicas de Corrente

O gráfico de tendência da Figura 44 mostra os níveis de distorções harmônicas totais de corrente medidos em cada uma das fases. Através do gráfico é possível ter uma visão geral do nível da distorção harmônica na corrente de todo o sistema com o filtro desligado.

Comparando-se as distorções harmônicas presentes nas fases, observa-se que as três seguem praticamente o mesmo padrão, e que na maior parte do tempo o DHT_i não ultrapassa os 4%. É possível notar que durante o dia ocorrem dois picos de distorção na corrente, que chegam a valores máximos bem próximos de 7,7%, 5,48% e 6,56% para as fases L1, L2 e L3, respectivamente.

Ao comparar este gráfico com o da Figura 37, que representa a corrente, novamente é possível afirmar que o DHT de corrente é inversamente proporcional ao valor da corrente fundamental, ou seja, à medida que a corrente eficaz diminuiu o índice DHT de corrente aumentou consideravelmente, como pode-se notar as 09h30m e logo após as 17h00m.

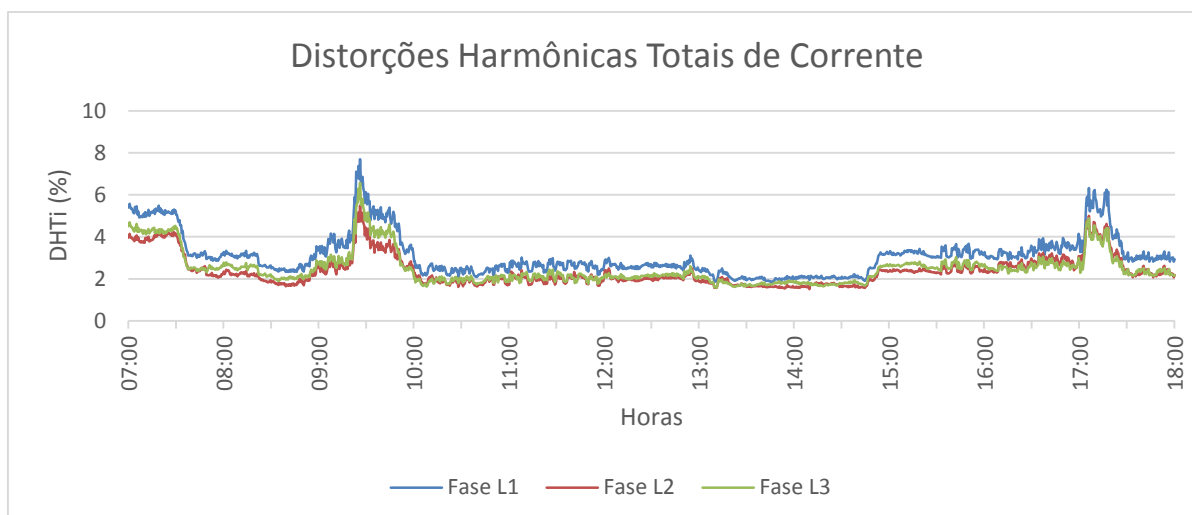


Figura 44 - Gráfico das Distorções Totais de Corrente em Cada Fase
Fonte: Autoria Própria

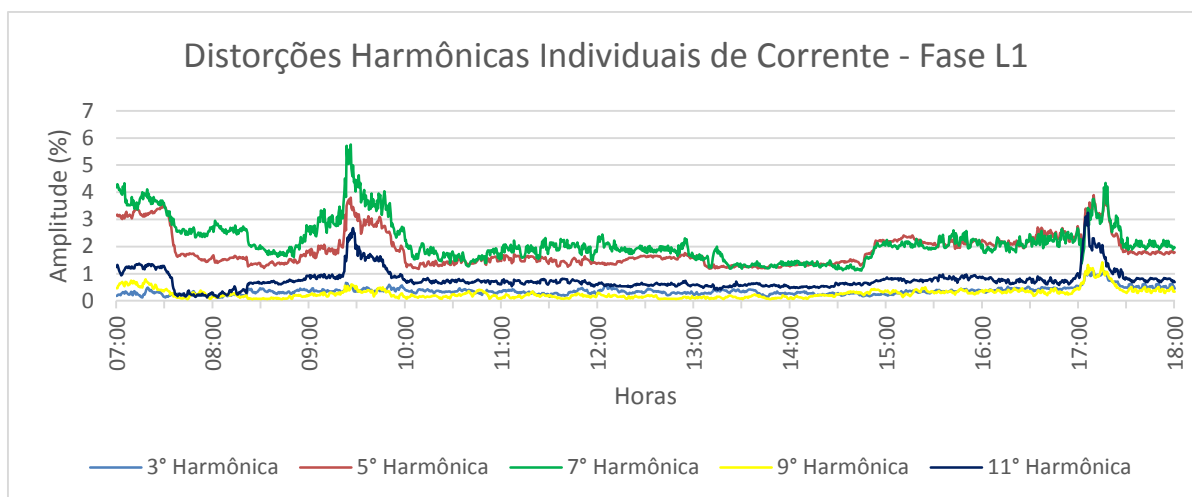
A Tabela 20 apresenta os valores máximos, mínimos e médios para a distorção na corrente em cada uma das fases. Comparando os valores medidos com a norma IEEE – 519, é possível verificar que os níveis de distorções harmônicas de corrente mesmo sem o filtro estar ligado não violam os limites da norma, sendo que os valores máximos encontrados não ultrapassam 8%.

Tabela 20 - Comparação dos Valores da DHTi Medida com os Valores da Norma IEEE 519

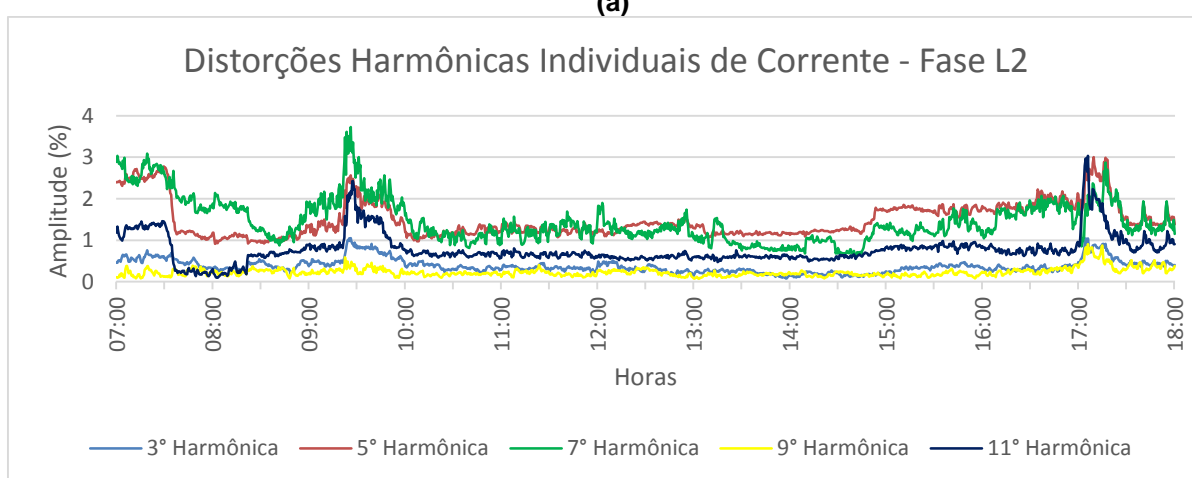
RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – DTD				
Valores Medidos				Valores Normativos
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	IEEE 519
Máximo	7,70%	5,48%	6,56%	15,0%
Mínimo	1,86%	1,51%	1,57%	
Média	3,16%	2,43%	2,56%	

Fonte: Autoria Própria

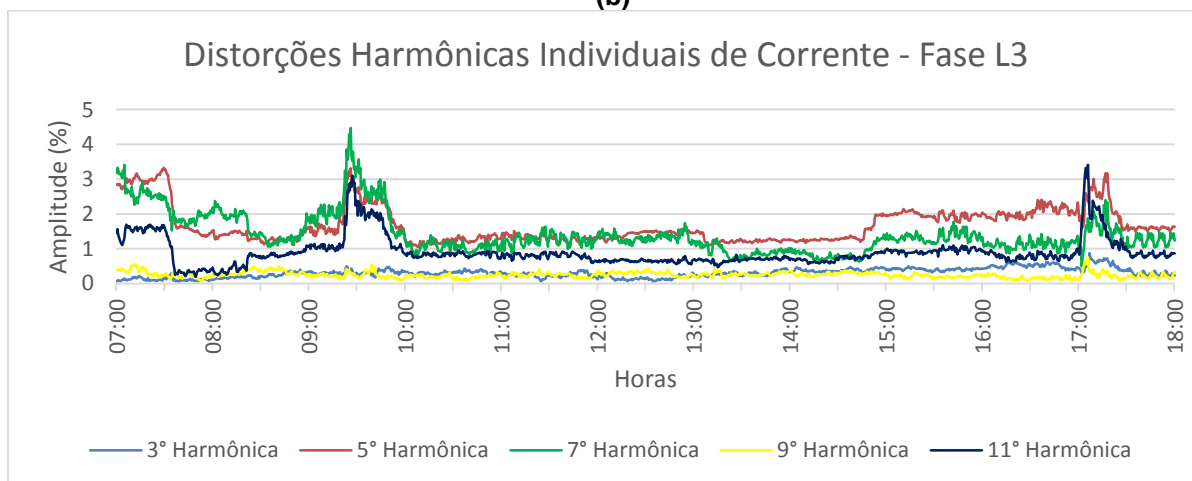
A Figura 45 apresenta o gráfico temporal das principais componentes harmônicas de corrente, contemplando a 3^o, 5^o, 7^o, 9^o e a 11^o harmônica.



(a)



(b)



(c)

Figura 45 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Corrente de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3

Fonte: Autoria Própria

Através do gráfico da Figura 45 é possível constatar que com o filtro desligado a harmônica 7° ordem apresenta-se como a mais intensa, atingindo um pico com

amplitude maior que 5% na fase L1. Deve-se destacar ainda, as harmônicas de 5° e 11° ordem já que na maior parte do tempo apresentam valores mais significativos do que as harmônicas de 3° e 9°. Outro fato verificado é o de que às 17h00m ocorre um pico das harmônicas de 5° e 11° ordem, com amplitudes que ultrapassam a harmônica de 7° ordem nas fases L2 e L3.

A Tabela 21 apresenta a comparação entre as componentes harmônicas ímpares até a 25°, obtidas no período de monitoração e os valores recomendados pelo IEEE. Para a construção da Tabela 21 foram considerados apenas os valores máximos de cada ordem harmônica.

Comparando os valores encontrados na medição com as normas, é possível verificar que todas as componentes harmônicas de corrente encontram-se dentro dos valores recomendados.

Tabela 21 - Comparação das Componentes Harmônicas de Corrente até a 25° Ordem com a Norma IEEE 519

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – Harmônicas Individuais				
Ordem da Harmônica	Valores Medidos			Valores Normativos
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	IEEE 519
3°	1,23%	1,05%	0,87%	12,0%
5°	3,90%	3,00%	3,33%	12,0%
7°	5,76%	3,73%	4,47%	12,0%
9°	1,42%	0,90%	0,75%	12,0%
11°	3,25%	3,03%	3,41%	5,5%
13°	1,66%	1,49%	1,18%	5,5%
15°	0,24%	0,09%	0,21%	5,5%
17°	0,42%	0,31%	0,52%	5,0%
19°	0,29%	0,28%	0,37%	5,0%
21°	0,06%	0,11%	0,06%	5,0%
23°	0,09%	0,09%	0,09%	2,0%
25°	0,11%	0,07%	0,05%	2,0%

Fonte: Autoria Própria

A Figura 46 apresenta o espectro de frequência obtido com as medições. Através dele fica mais evidente quais as componentes harmônicas de corrente que mais influenciam na DHT_i.

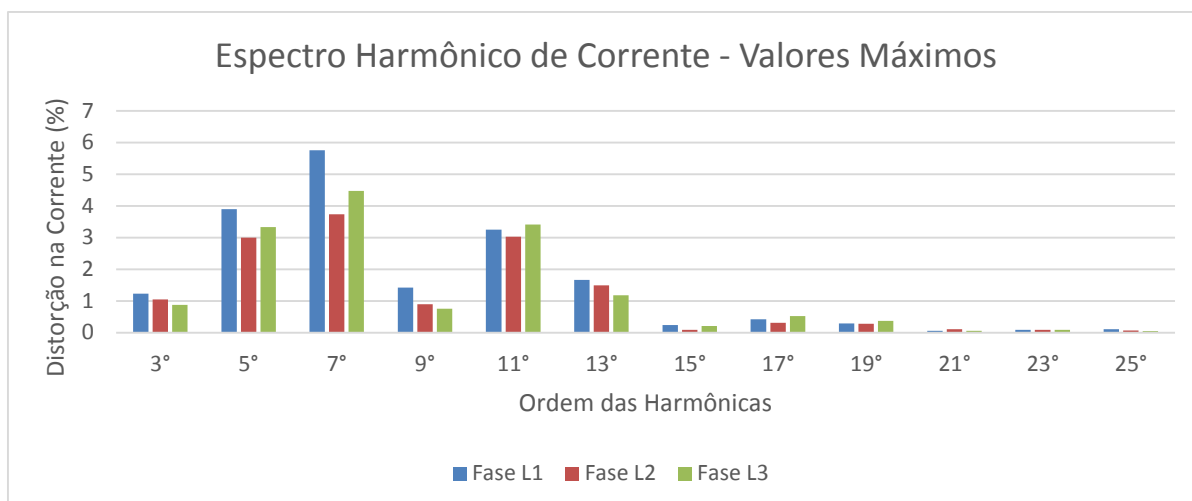


Figura 46 - Espectro de Frequência da Corrente - Valores Máximos

Fonte: Autoria Própria

De modo similar às medições realizadas com o filtro ligado, as componentes harmônicas de maior intensidade são caracterizadas pelas harmônicas até a 19ª ordem, dando maior destaque para as harmônicas produzidas pelos retificadores de seis pulsos, encontrados nos inversores de frequência. Como é possível observar a harmônica de 7ª ordem é a mais elevada quando o filtro está desligado, seguida pelas de 5ª, 11ª e 13ª ordem com valores de 3,90%, 3,25% e 1,66% respectivamente para a fase L1.

5.2.3.2 Distorções Harmônicas de Tensão

A Figura 47 mostra a distorção harmônica de tensão do sistema através do gráfico obtido ao longo do dia. Através deste gráfico temporal é possível ter uma visão geral do nível de DHT_v da instalação.

É possível perceber que em boa parte do tempo o nível de DHT_v para a fase L3 é mais elevado, se comparado com as outras duas. Fazendo uma comparação entre as fases, nota-se que L1 e L3 possuem nível de distorção bastante similar, permanecendo na parte da manhã entre 1,6% e 2,3%, já a fase L2 possui níveis menores de distorção que não ultrapassam os 2,3% durante todo o dia. Outra

observação a ser feita é que o nível de distorção aumenta gradativamente durante o dia, sendo no período da tarde mais elevado.

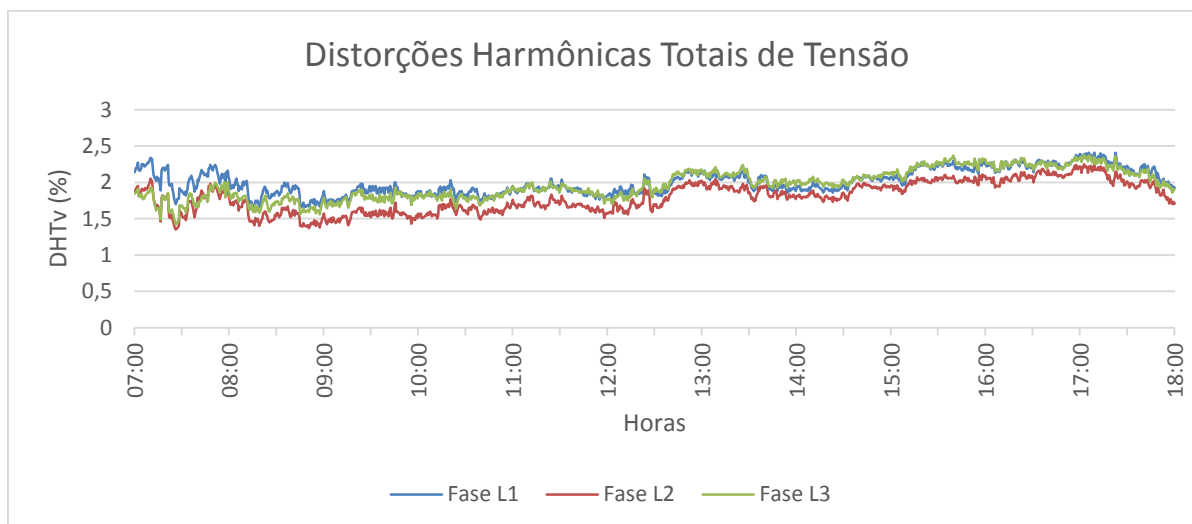


Figura 47 - Gráficos das Distorções Totais de Tensão em Cada Fase
Fonte: Autoria Própria

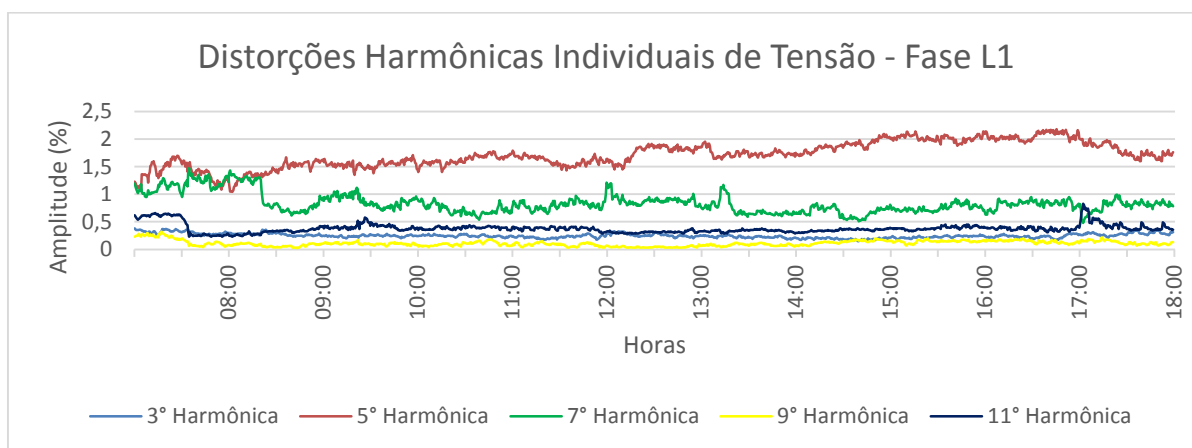
A Tabela 22 apresenta a comparação entre os valores obtidos no período de medições e os valores recomendados pelas principais normas nacionais e internacionais. Observando os valores DHT_v encontrados pode-se concluir que mesmo com o filtro inativo as distorções na tensão encontram-se bem abaixo dos valores estipulados pelas normas. Também é possível constatar que o DHT_v médio não ultrapassa os 2%.

Tabela 22 - Comparação da DHT_v Medida com as Principais Normas Nacionais e Internacionais Vigentes

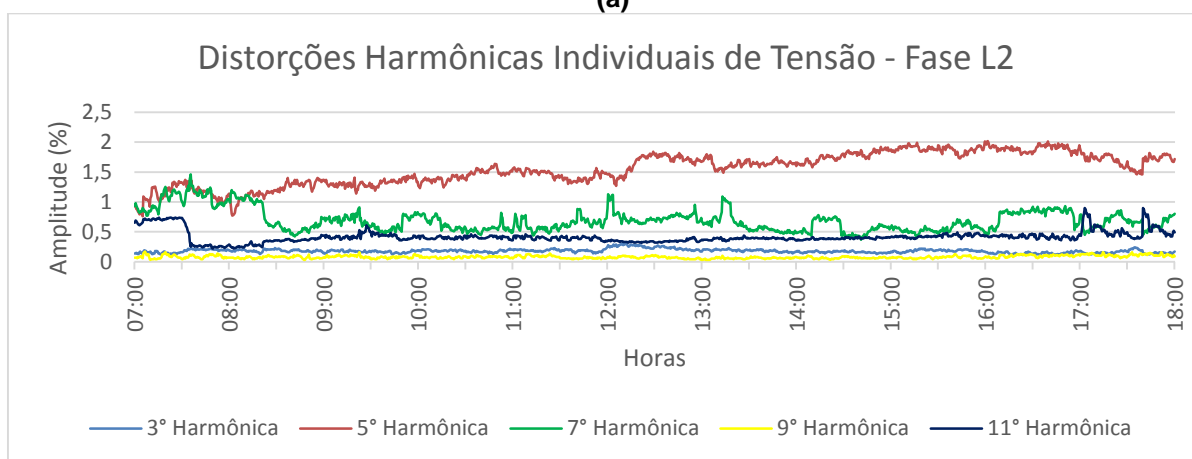
RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO - DHT_v						
Valores Medidos			Valores Normativos (%)			
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	PRODIST - Módulo 8	IEEE 519	IEC 61000- 2.4
Máximo	2,41%	2,25%	2,38%	8,0%	5,0%	8,0%
Mínimo	1,66%	1,35%	1,42%			
Média	2,00%	1,80%	1,97%			

Fonte: Autoria Própria

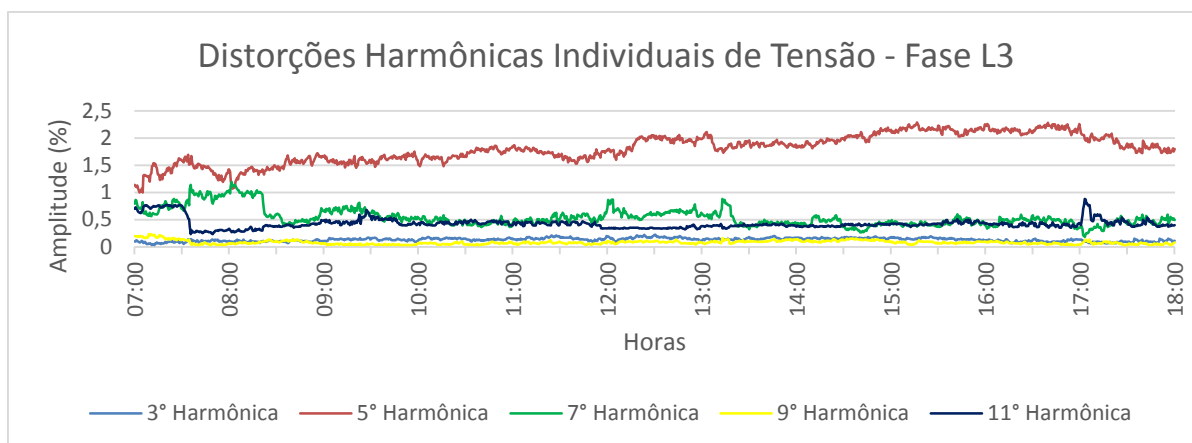
A Figura 48 apresenta o gráfico temporal das principais componentes harmônicas de tensão, contemplando a 3°, 5°, 7°, 9° e a 11° harmônica. Analisando o gráfico é possível observar que a harmônica de 5° ordem é a mais influente na distorção harmônica total do sistema, seguida pelas harmônicas de 7° e 11° ordem. A harmônica de 5° ordem aumenta gradativamente ao longo do dia, já as de 7° e 11° ordem possuem valores maiores no início da manhã e para o período da tarde os valores diminuem e não ultrapassam 1,5%. Outro fato observado no gráfico da harmônica de 11° ordem é a presença de um degrau logo após as 07h00m, e então permanece com um valor de distorção praticamente constante durante todo o resto do dia.



(a)



(b)



(c)

Figura 48 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 23 apresenta a comparação entre os valores de todas as componentes harmônicas ímpares até a 25°, obtidos no período de monitoração e os valores recomendados pelas principais normas nacionais e internacionais vigentes. Para a construção da Tabela 23 foram considerados apenas os valores máximos de cada ordem harmônica.

Comparando os valores encontrados na medição com as normas, é possível verificar que todas as componentes harmônicas de tensão encontram-se dentro dos valores recomendados, ou seja, mesmo com o filtro desligado as distorções individuais estão adequadas.

Tabela 23 - Comparação da Componentes Harmônicas de Tensão até a 25° Ordem com as Principais Normas Vigentes

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – Harmônicas Individuais de Tensão						
Ordem da Harmônica	Valores Medidos			Valores Normativos		
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	PRODIST - Módulo 8	IEEE 519	IEC 61000 – 2.2
3°	0,42%	0,31%	0,22%	5,0%	3,0%	5,0%
5°	2,18%	2,02%	2,29%	6,0%		6,0%
7°	1,47%	1,46%	1,19%	5,0%		5,0%
9°	0,32%	0,17%	0,23%	1,5%		1,5%
11°	0,83%	0,90%	0,88%	3,5%		3,5%
13°	0,42%	0,40%	0,30%	3,0%		3,0%
15°	0,07%	0,04%	0,05%	0,5%		0,3%
17°	0,12%	0,12%	0,12%	2,0%		2,0%
19°	0,08%	0,08%	0,09%	1,5%		1,5%
21°	0,03%	0,04%	0,03%	0,5%		0,2%
23°	0,05%	0,06%	0,08%	1,5%		1,5%
25°	0,07%	0,05%	0,05%	1,5%		1,5%
15°	0,07%	0,04%	0,05%	0,5%		0,3%

Fonte: Autoria Própria

A Figura 49 apresenta o espectro de frequência da tensão para as fases L1, L2 e L3, obtido com os valores referentes à Tabela 23. A caracterização do espectro harmônico torna os resultados obtidos mais visíveis e permite a realização de uma avaliação a respeito de quais componentes harmônicas mais contribuem para a distorção harmônica total.

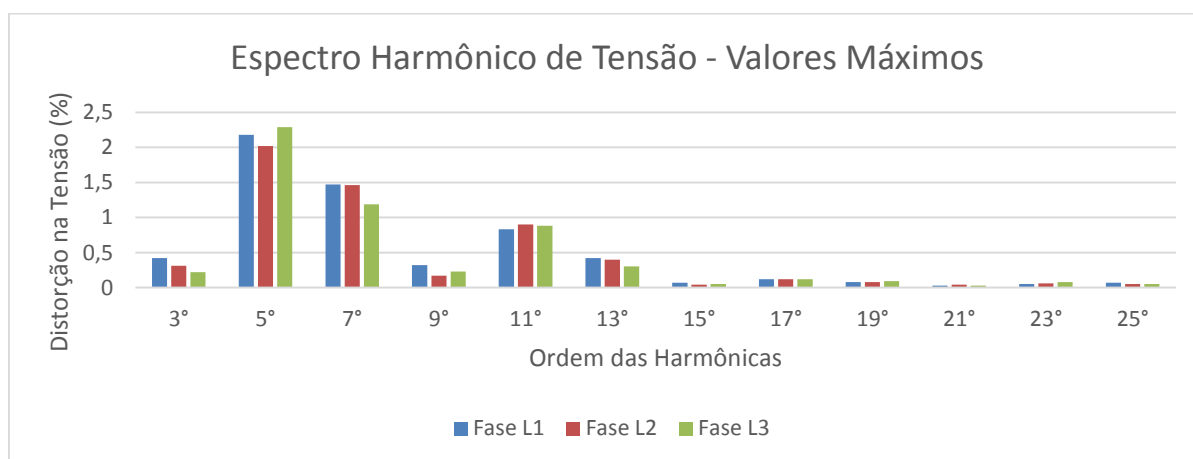


Figura 49 - Espectro de Frequência da Tensão - Valores Máximos

Fonte: Autoria Própria

Observando o histograma da Figura 49, é possível verificar que as componentes harmônicas que mais influenciam no DHT_v são as de 5°, 7° e 11° ordem. Também pode-se constatar que a componente de 13° ordem é mais elevada quando comparada com as demais, fato que não pode ser verificado apenas com o gráfico da Figura 48.

5.3 COMPARAÇÃO DAS MEDIÇÕES REALIZADAS COM O FILTRO DE HARMÔNICAS LIGADO E DESLIGADO

A seguir será realizada a comparação das medições de distorções harmônicas de tensão e corrente com o filtro de harmônicas ligado e desligado. Com base nos resultados obtidos no processo de análise de tensões, correntes e potência ativa, foram definidos dois intervalos de tempo para a comparação, onde o consumo de corrente, e por consequência de potência, apresentam valores estáveis e praticamente equivalentes de modo a não comprometerem significativamente as comparações realizadas.

Nesse sentido, foi adotado um intervalo de 30 minutos no início da manhã de cada dia de medição entre as 07h00m e 07h30m. Durante este período foram registradas correntes médias de 413,2A para fase L1, 428,6A para fase L2 e 405,7A para fase L3 com o filtro ativo e de 414,7A para fase L1, 432,5A para fase L2 e 409,3A para fase L3 com o filtro inativo. As Tabelas 24 e 25 apresentam os valores médios encontrados para as distorções harmônicas na tensão e na corrente, respectivamente.

Tabela 24 - Comparação dos Níveis de Distorções Harmônicas de Tensão

PARÂMETROS	FILTRO LIGADO			FILTRO DESLIGADO		
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	Fase L1	Fase L2	Fase L3
DHT _v	1,38%	1,16%	1,18%	2,00%	1,69%	1,73%
3° Harmônico	0,30%	0,17%	0,09%	0,37%	0,20%	0,10%
5° Harmônico	0,92%	0,70%	0,89%	1,44%	1,11%	1,35%
7° Harmônico	0,81%	0,71%	0,51%	1,11%	0,99%	0,71%
9° Harmônico	0,15%	0,11%	0,06%	0,24%	0,14%	0,17%
11° Harmônico	0,44%	0,47%	0,50%	0,62%	0,70%	0,73%

Fonte: Autoria Própria

Tabela 25 - Comparação dos Níveis de Distorções Harmônicas de Corrente

PARÂMETROS	FILTRO LIGADO			FILTRO DESLIGADO		
	Fase L1	Fase L2	Fase L3	Fase L1	Fase L2	Fase L3
DHT _i	3,53%	2,86%	2,72%	5,18%	3,98%	4,32%
3° Harmônico	0,56%	0,67%	0,21%	0,28%	0,58%	0,12%
5° Harmônico	1,71%	1,26%	1,49%	3,24%	2,54%	2,98%
7° Harmônico	2,74%	2,13%	1,84%	3,75%	2,68%	2,67%
9° Harmônico	0,35%	0,30%	0,16%	0,57%	0,27%	0,35%
11° Harmônico	1,02%	1,00%	1,18%	1,24%	1,30%	1,53%

Fonte: Autoria Própria

Como é possível observar nas tabelas 24 e 25, quando ocorre a ligação do filtro de harmônicas na instalação os índices de distorções harmônicas totais de corrente e tensão, DHT_v e DHT_i, são reduzidos. Quando o filtro de harmônicas está em operação, a redução do valor percentual do DHT_i para as fases L1 e L3 é de 1,65% e 1,6% respectivamente, já para a fase L2 esta redução é de 1,12%. As reduções observadas no DHT_v são menores do que as do DHT_i, ficando abaixo de 1% em cada fase.

As distorções harmônicas de 5° e 7° ordem são as que possuem maior amplitude percentual e representatividade no sistema, seguidas pela harmônica de 11° ordem. Além disto, são as que possuem maior nível de redução quando o filtro está ativo.

De um modo geral, pode-se constatar que o filtro para redução das distorções harmônicas da instalação funciona de forma satisfatória, proporcionando a redução dos harmônicos de tensão e corrente presentes na instalação.

5.4 AVALIAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS NOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA

5.4.1 Inversor 01

O inversor número 01 responsável pelo acionamento e controle do motor de 12,5CV, denominado Exaustor do Pó do Sessor, é fabricado pela WEG, modelo CFW-08. A Figura 50 apresenta as formas de onda obtidas para a tensão e a corrente na

entrada do inversor, onde é possível observar que a forma de onda da corrente é bastante deformada, não tendo o aspecto de uma senóide. Durante as medições foram registradas correntes médias de 8,98A, 10,65A e 9,82A para as fases L1, L2 e L3, respectivamente. As tensões médias em cada fase foram de 386,5V, 386,9V e 384,7V para as fases L12, L23 e L31, respectivamente.

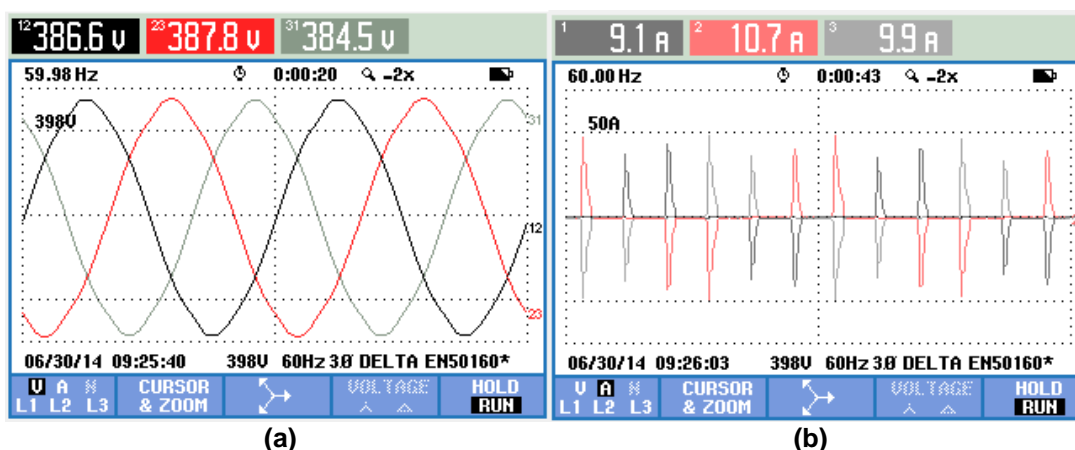
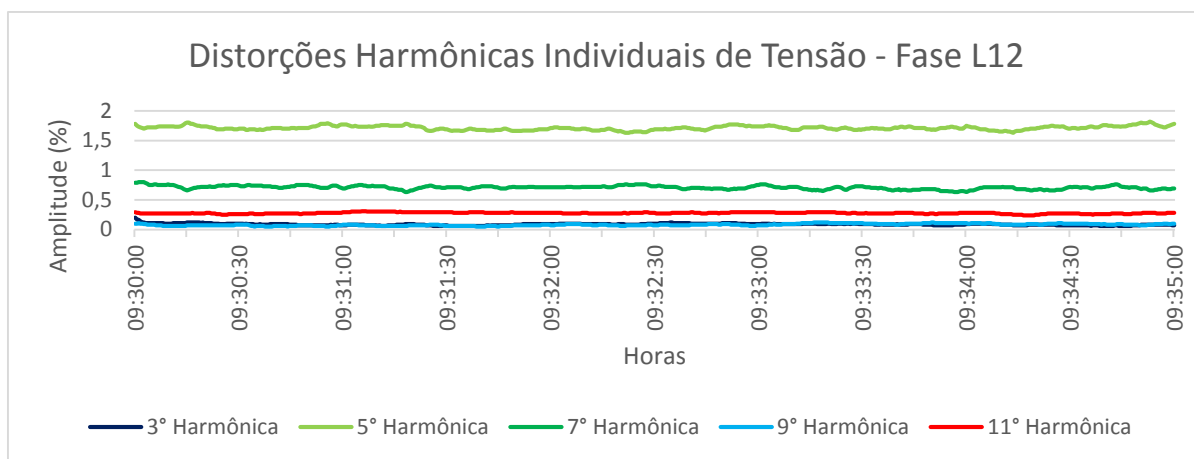


Figura 50 - Ondas de Tensão (a) e Corrente (b) do Inversor 01
Fonte: Autoria Própria

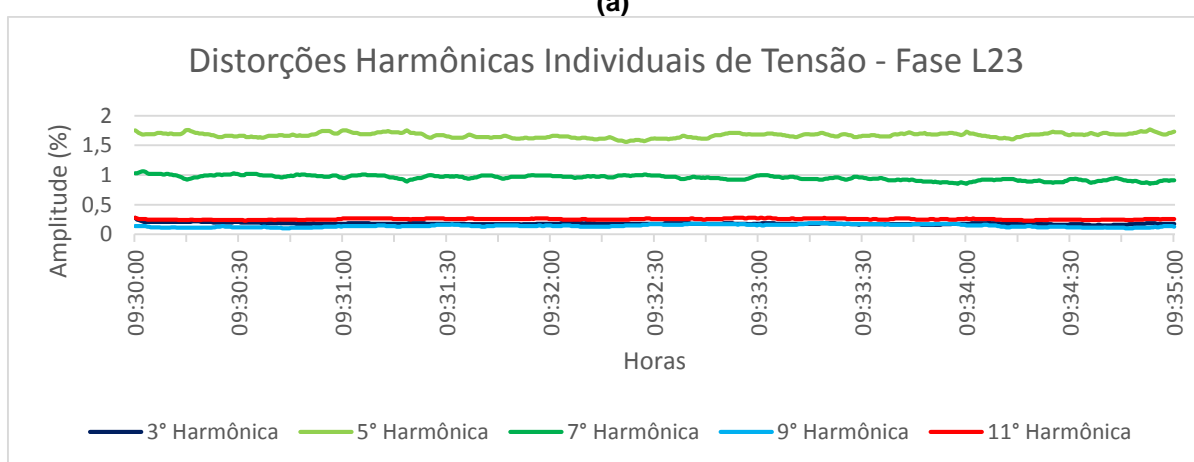
5.4.1.1 Distorções Harmônicas de Tensão

O índice DHTv médio registrado foi de 1,89% na fase L12, 1,97% na fase L23 e 2,07% para a fase L31.

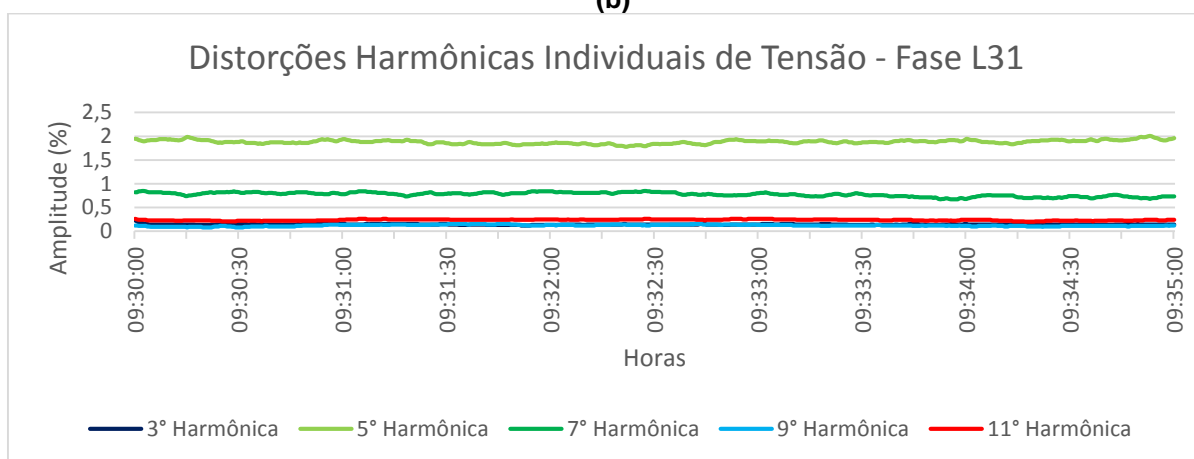
A Figura 51 apresenta o gráfico das harmônicas de tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° ordem. É possível observar que as harmônicas individuais de tensão apresentam valores baixos, não ultrapassando 2% de amplitude. As harmônicas mais significativas são as de ordem 5 e 7, respectivamente. As demais ordens apresentam valores em torno de 0,3% podendo ser consideradas desprezíveis.



(a)



(b)



(c)

Figura 51 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L12; (b) Fase L23 e (c) Fase L31- Inversor 01

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 26 apresenta os valores médios de todas as componentes harmônicas ímpares até a 25ª obtidos no período de monitoração.

Tabela 26 – Valores Percentuais Médios das Componentes Harmônicas de Tensão

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – Harmônicas Individuais			
Ordem da Harmônica	Fase L12	Fase L23	Fase L31
3°	0,08%	0,18%	0,14%
5°	1,71%	1,67%	1,88%
7°	0,70%	0,95%	0,77%
9°	0,08%	0,14%	0,12%
11°	0,28%	0,26%	0,24%
13°	0,20%	0,23%	0,21%
15°	0,02%	0,02%	0,02%
17°	0,07%	0,06%	0,05%
19°	0,05%	0,05%	0,05%
21°	0,00%	0,01%	0,01%
23°	0,02%	0,02%	0,01%
25°	0,02%	0,01%	0,02%

Fonte: Autoria Própria

A Figura 52 apresenta o espectro de frequência da tensão para as fases L12, L23 e L31, obtido com os valores referentes à Tabela 26. É possível observar que as harmônicas acima da 19° ordem apresentam valores insignificantes, podendo ser desprezadas. Já as harmônicas de 5° e 7° ordem são realmente as mais influentes no DHT_v.

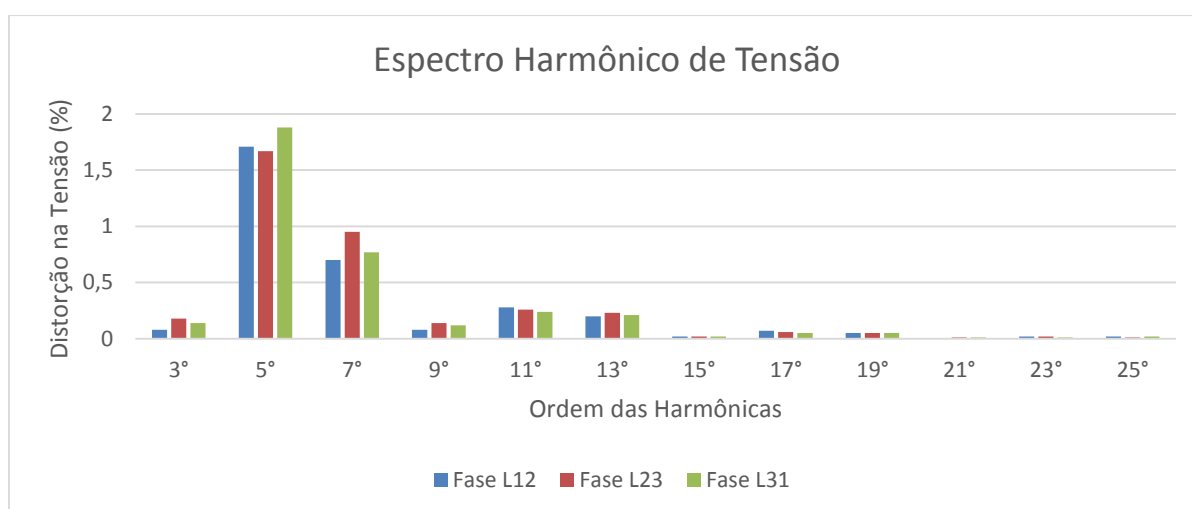


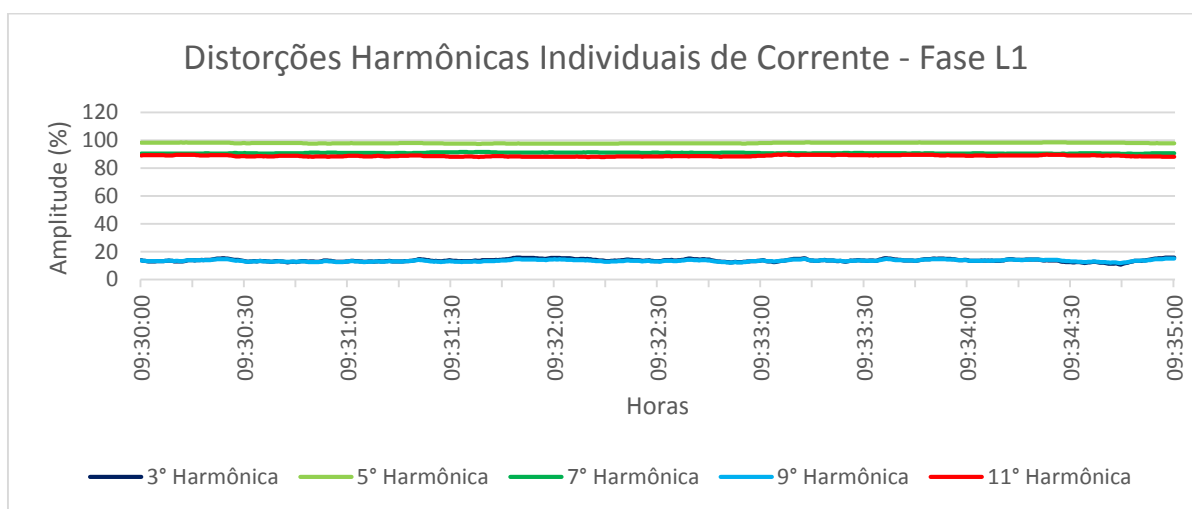
Figura 52 - Espectro de Frequência da Tensão - Valores Máximos

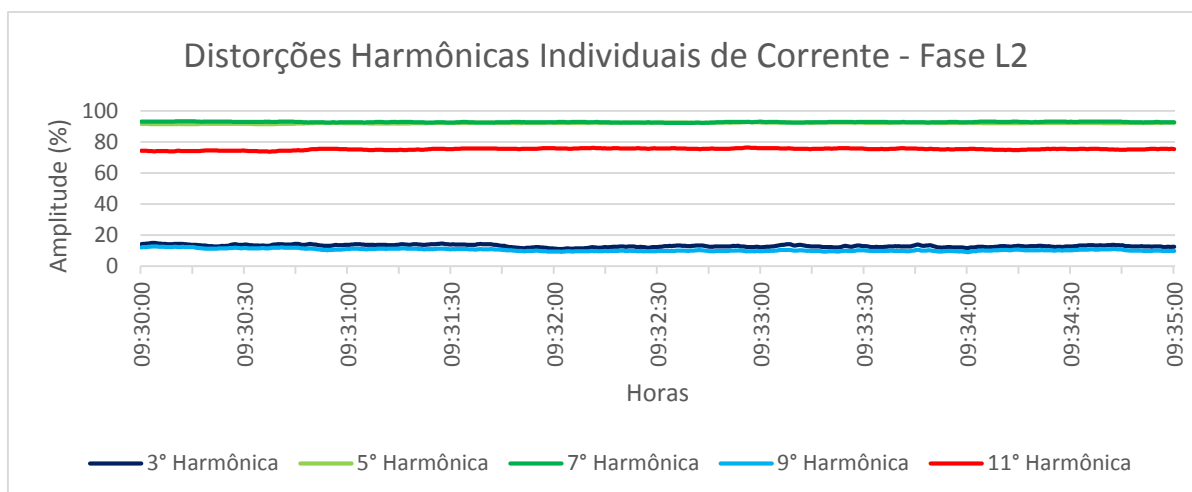
Fonte: Autoria Própria

5.4.1.2 Distorções Harmônicas de Corrente

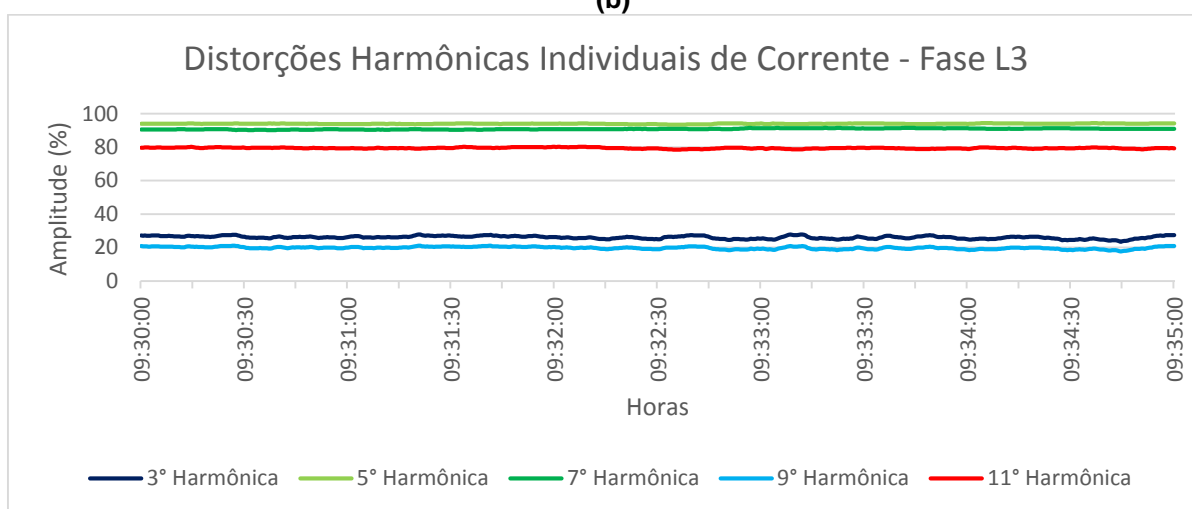
Durante as medições realizadas em regime permanente, o índice DHT_i médio apresentou valores bastante elevados, que permaneceram em torno de 225,61%, 205,05% e 208,46% para as fases L1, L2 e L3 respectivamente.

Através do gráfico da Figura 53, pode-se constatar que as distorções em todas as fases apresentam um comportamento praticamente constante. As harmônicas de ordem 5 e 7 foram as mais influentes, com valores próximos a 100%. As harmônicas de 11° ordem também foram significativas, com amplitudes próximas a 80% nas fases L2 e L3, e a 90% para a fase L1. Já as harmônicas de 3° e 9° ordem apresentam valores praticamente idênticos para a fase L1 e L2, permanecendo abaixo dos 20%. Já para fase L3 a 3° harmônica possui valor médio de 30%, enquanto a 9° harmônica permanece por volta de 20%.





(b)



(c)

Figura 53 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Corrente de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3 – Inversor 01
Fonte: Autoria Própria

A Tabela 27 mostra os valores médios de todas as componentes harmônicas ímpares até a 25ª obtidos no período de monitoração. Os valores não foram comparados com a norma IEC 61000 3-2 devido ao fato de se limitar a equipamentos com potência nominal abaixo de 1kW.

Tabela 27 - Valores Percentuais Médios das Componentes Harmônicas de Corrente

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – Harmônicas Individuais						
Valores Medidos						
Ordem Harmônica	Fase L1	Fase L1 (A)	Fase L2	Fase L2 (A)	Fase L3	Fase L3 (A)
3°	13,71%	1,23	12,96%	0,21	26,05%	2,56
5°	97,93%	8,79	92,14%	9,81	93,98%	9,23
7°	90,73%	8,15	92,75%	9,88	90,87%	8,92
9°	13,47%	1,21	10,38%	1,10	19,76%	1,94
11°	88,73%	7,97	75,26%	8,02	79,44%	7,80
13°	76,08%	6,83	77,26%	8,23	73,10%	7,18
15°	12,64%	1,14	9,92%	1,06	10,63%	1,04
17°	73,92%	6,64	53,32%	5,68	61,29%	6,02
19°	59,06%	5,30	58,96%	6,28	51,70%	5,08
21°	11,25%	1,01	13,94%	1,48	6,98%	0,69
23°	57,74%	5,19	32,97%	3,51	46,60%	4,58
25°	43,58%	3,91	44,37%	4,73	33,80%	3,32

Fonte: Autoria Própria

Observando o espectro em frequência da Figura 54 é possível comprovar que retificadores de seis pulsos presentes em inversores de frequência, produzem principalmente componentes harmônicas de ordem $6n \pm 1$, onde n é um número inteiro. O espectro harmônico deixa muito claro que as harmônicas que atendem a este quesito apresentam valores elevadíssimos, como é o caso dos pares de harmônicas de 5° e 7° ordem, 11° e 13° ordem, 17° e 19° ordem e 23° e 25° ordem. Mas, as harmônicas mais significativas são ainda as de 5° e 7° ordem com valores que ultrapassam os 90% de amplitude.

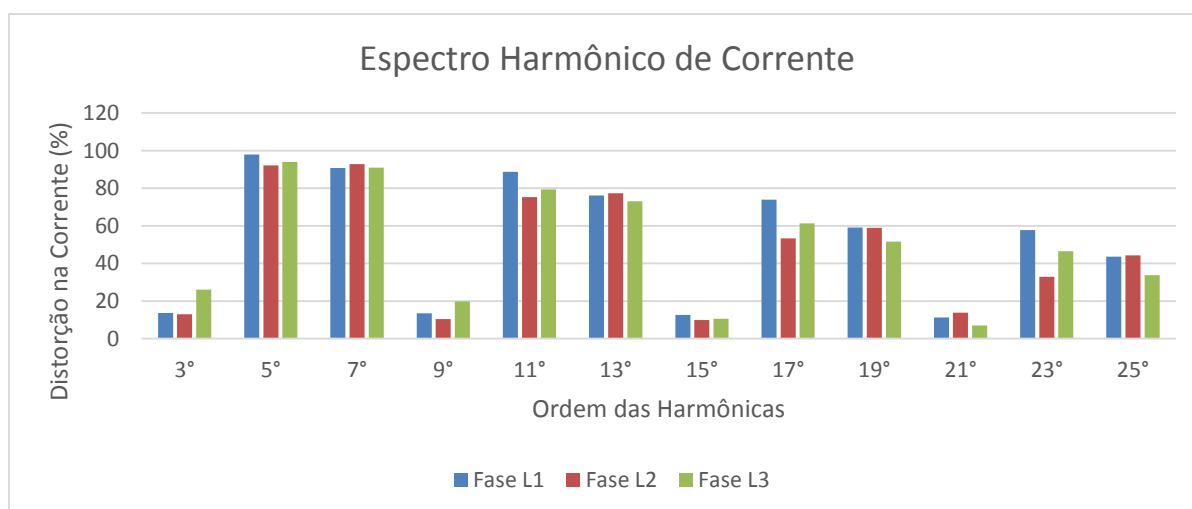


Figura 54 - Espectro de Frequência da Corrente - Valores Máximos

Fonte: Autoria Própria

5.4.2 Inversor 05

O inversor número 05 é responsável pelo acionamento e controle do motor de 1CV, denominado Máquina Embalagem 1Kg 1, é fabricado pela WEG, modelo CFW-08. A Figura 55 apresenta as formas de onda obtidas para a tensão e a corrente na entrada do inversor. As correntes médias registradas para este inversor foram de 1,59A, 1,43A e 0,75A para as fases L1, L2 e L3, respectivamente. As tensões médias em cada fase foram de 386,5V para a fase L12, 386,9V para a fase L23 e 384,7V para a fase L31.

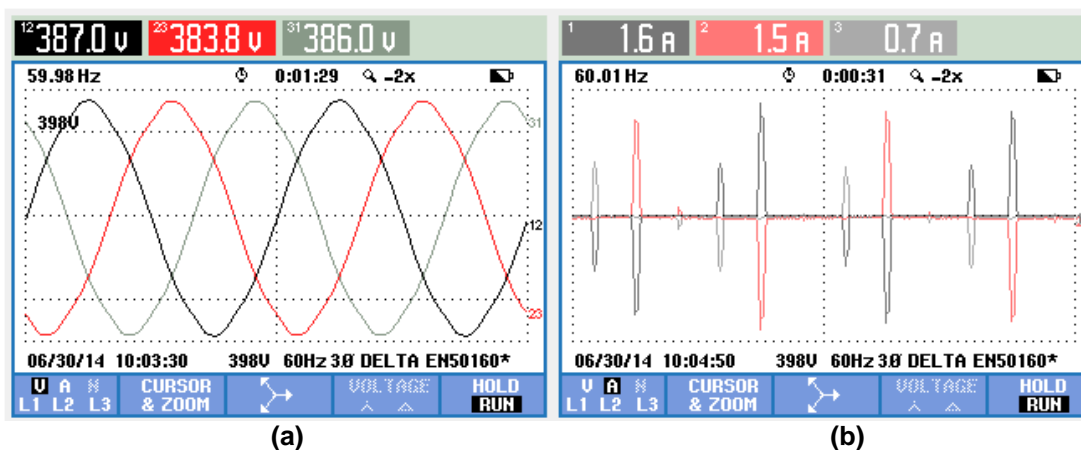
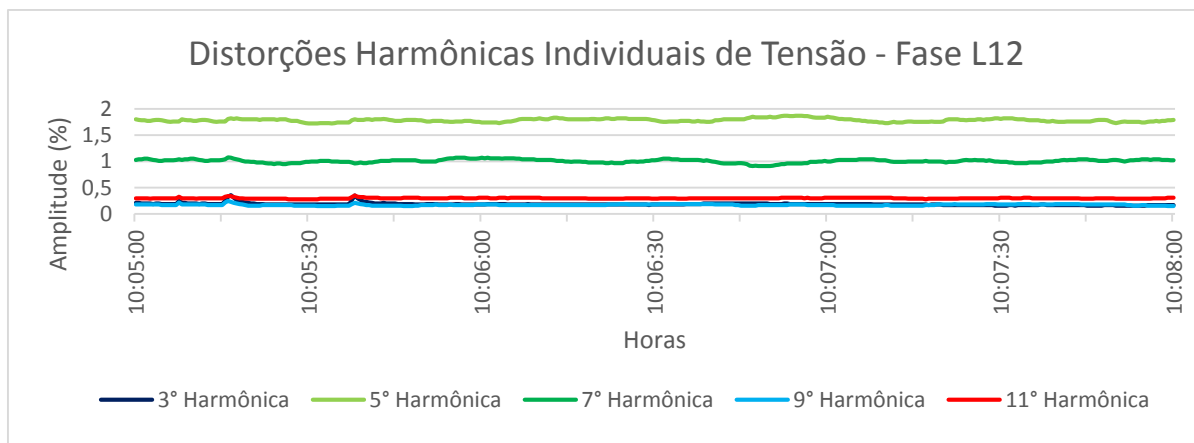


Figura 55 - Ondas de Tensão (a) e (b) Corrente do Inversor 05
Fonte: Autoria Própria

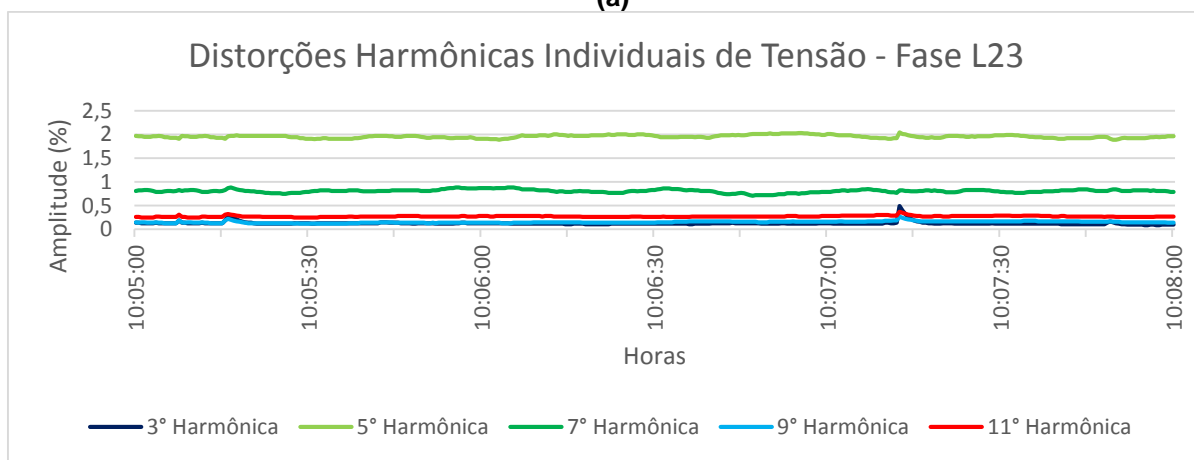
5.4.2.1 Distorções Harmônicas de Tensão

Os valores médios para o índice DHT_v obtidos no inversor 05, foram de 2,11%, 2,16% e 2,04% para as fases L12, L23 e L31, respectivamente.

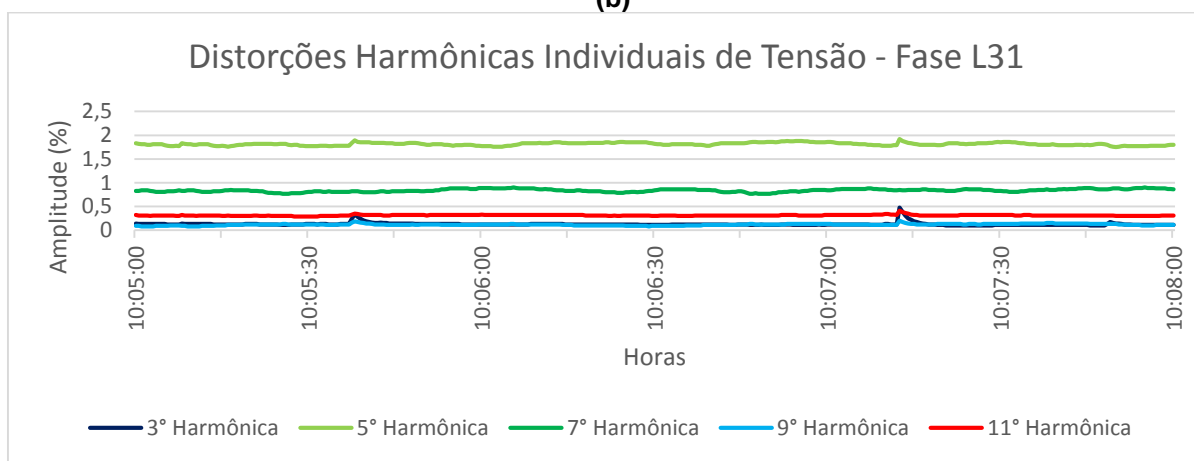
A Figura 56 apresenta o gráfico das harmônicas individuais de tensão mais significativos, onde é possível perceber que todas as fases seguem praticamente o mesmo padrão de distorção e assim como para o inversor 1, as harmônicas mais influentes na tensão são as de 5º ordem com valores muito próximos a 2%, e de 7º ordem, com valores próximos a 1%. As demais componentes apresentam amplitudes abaixo de 0,5%.



(a)



(b)



(c)

Figura 56 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Tensão de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem – (a) Fase L12; (b) Fase L23 e (c) Fase L31– Inversor 05

Fonte: Autoria Própria

A Tabela 28 mostra os valores médios de todas as componentes harmônicas ímpares até a 25ª obtidos no período de monitoração.

Tabela 28 - Valores Percentuais Médios das Componentes Harmônicas de Tensão

RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – Harmônicas Individuais			
Valores Medidos			
Ordem da Harmônica	Fase L12	Fase L23	Fase L31
3°	0,19%	0,13%	0,12%
5°	1,78%	1,95%	1,81%
7°	1,00%	0,81%	0,84%
9°	0,17%	0,15%	0,12%
11°	0,30%	0,27%	0,31%
13°	0,28%	0,24%	0,22%
15°	0,03%	0,02%	0,03%
17°	0,09%	0,08%	0,10%
19°	0,08%	0,08%	0,06%
21°	0,02%	0,02%	0,02%
23°	0,05%	0,04%	0,05%
25°	0,05%	0,05%	0,03%

Fonte: Autoria Própria

A Figura 57 apresenta o espectro de frequência da tensão para as fases L12, L23 e L31, obtido com os valores referentes à Tabela 28. É possível verificar que exceto as harmônicas de 5° e 7° ordem, as demais possuem valores muito pequenos abaixo de 0,5%.

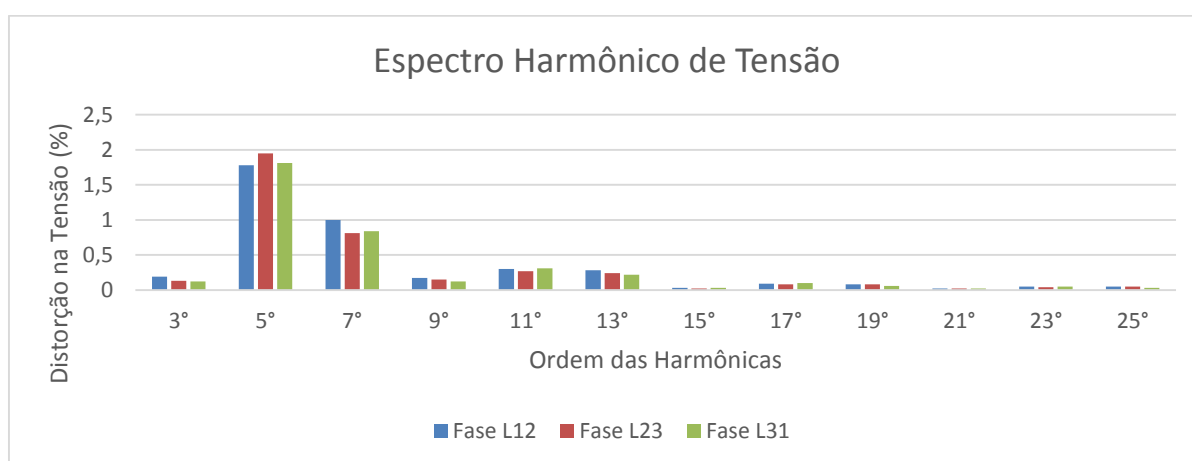


Figura 57 - Espectro de Frequência da Tensão - Valores Máximos

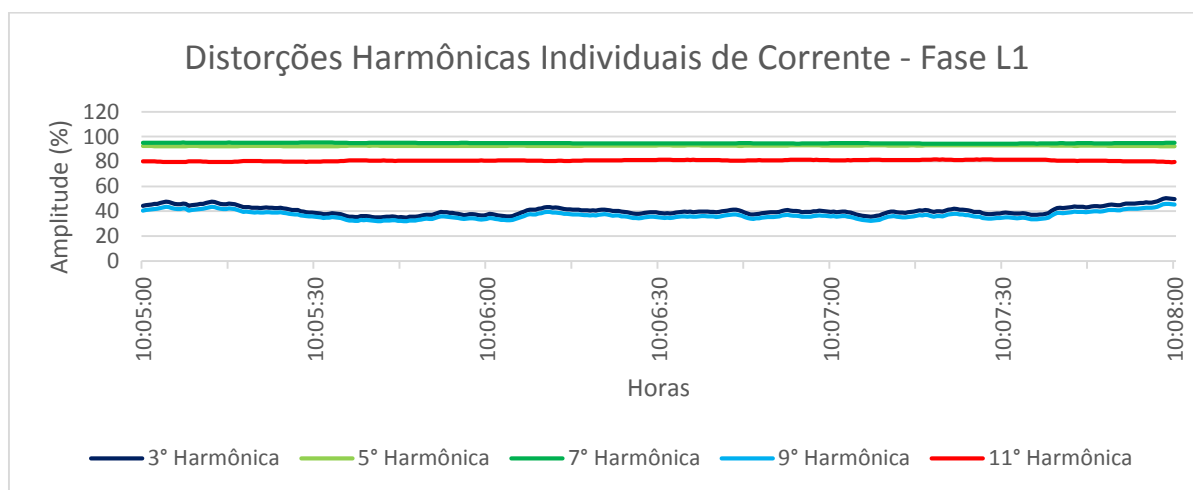
Fonte: Autoria Própria

5.4.2.2 Distorções Harmônicas de Corrente

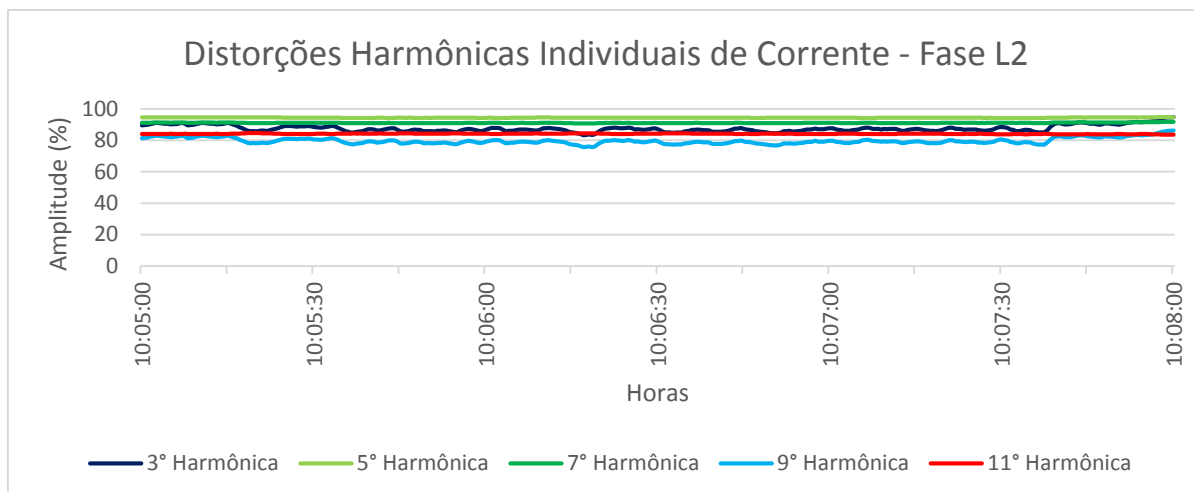
O índice DHTi médio registrado para o inversor 2 foi de 228,34% para a fase L1, 260,1% para a fase L2 e 277,78% para a fase L3. Estes valores são bastante expressivos quando comparados com a distorção na tensão, já que neste caso o índice DHTv não ultrapassa os 2,5%.

O gráfico temporal apresentado pela Figura 58 permite visualizar os níveis de distorção harmônica individual em cada uma das fases. É possível verificar que harmônicas de ordem 5, 7 e 11 apresentam estabilidade com valores bem elevados, o que já era de se esperar.

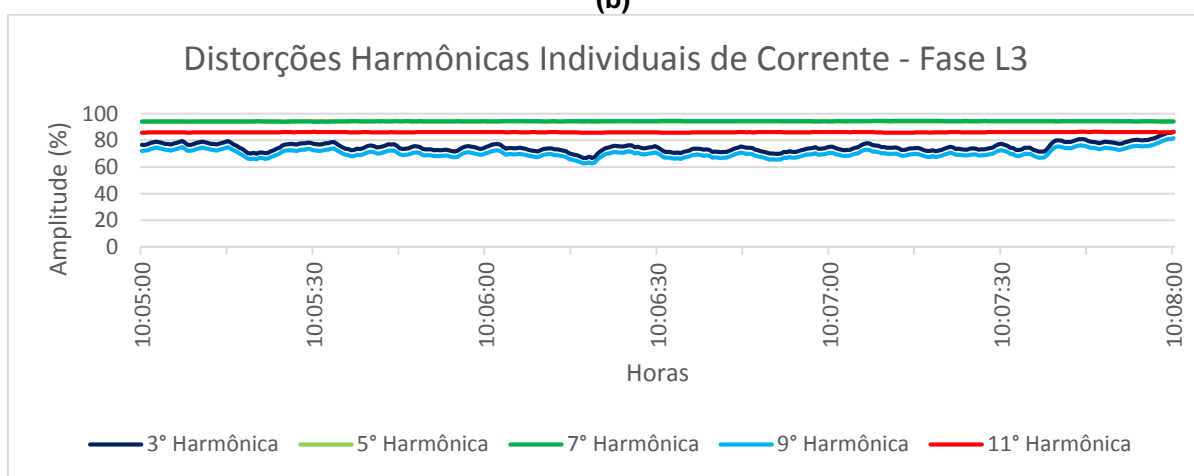
Destaca-se nesse inversor em específico, valores elevados das distorções de 3° e 9° ordem. O gráfico mostra um comportamento bastante oscilatório para estas componentes, com valores que chegam muito próximos aos das componentes de ordem 5, 7 e 11. Para as fase L1, as amplitudes das componentes de 3 e 9 ordem possuem níveis menores, em torno de 45%, mas ainda são considerados elevados.



(a)



(b)



(c)

Figura 58 - Gráficos das Distorções Harmônicas Individuais de Corrente de 3°, 5°, 7°, 9° e 11° Ordem (a) Fase L1; (b) Fase L2 e (c) Fase L3 – Inversor 01

Fonte: Autoria Própria

Na Tabela 29 é apresentado um resumo das distorções harmônicas individuais de corrente médias até a 25ª ordem. Comparando os valores medidos da Tabela 29 com a norma IEC 61000 3-2, pode-se concluir que este equipamento não está de acordo com a norma, já que a maioria das componentes harmônicas apresenta valores bem acima dos recomendados.

Tabela 29 - Comparação das Componentes Harmônicas de Corrente com Norma IEC 61000 3-2
RESUMO GERAL DO PERÍODO DE MONITORAÇÃO – Harmônicas Individuais

Ordem Harmônica	Valores Medidos						Valores Normativos
	Fase L1	Fase L1 (A)	Fase L2	Fase L2 (A)	Fase L3	Fase L3 (A)	IEC 61000 3-2
3°	40,46%	0,64	87,52%	1,25	74,86%	0,56	2,30A
5°	92,63%	1,47	94,39%	1,35	94,27%	0,71	1,14A
7°	94,72%	1,51	91,05%	1,30	94,32%	0,71	0,77A
9°	36,78%	0,58	79,65%	1,14	70,36%	0,53	0,40A
11°	80,72%	1,28	84,10%	1,20	86,07%	0,65	0,33A
13°	84,50%	1,34	77,92%	1,11	86,36%	0,65	0,21A
15°	30,44%	0,48	66,20%	0,95	62,01%	0,47	0,15A
17°	64,54%	1,03	68,93%	0,99	74,94%	0,56	0,13A
19°	69,09%	1,10	60,42%	0,86	74,18%	0,56	0,12A
21°	22,78%	0,36	49,64%	0,71	51,19%	0,38	0,11A
23°	46,59%	0,74	51,15%	0,73	61,11%	0,49	0,10A
25°	51,40%	0,82	41,83%	0,60	60,16%	0,45	0,09A

Fonte: Autoria Própria

Através do espectro harmônico de corrente da Figura 59, obtido com os valores da Tabela 29, fica visível que todas as harmônicas apresentam intensidade significativa. Este fato não era esperado, já que inversores de frequência possuem a característica de produzir componentes elevadas de ordens $6n \pm 1$. É possível ainda observar, que as componentes de ordem 3, 9, 15 e 21 apresentam um valor bem menor na fase L1 quando comparadas com as fases L2 e L3.

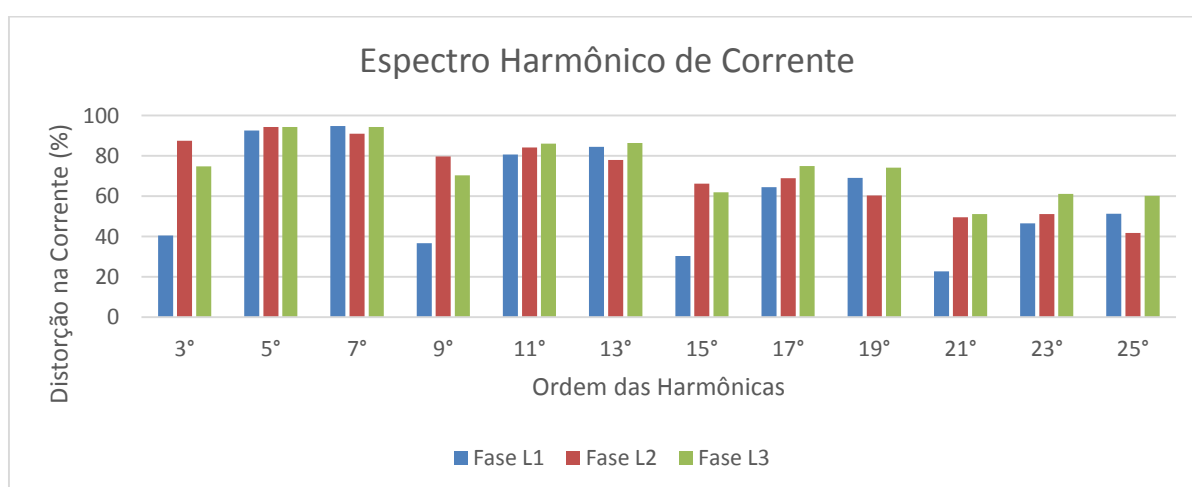


Figura 59 - Espectro e Frequência da Corrente - Valores Máximos

Fonte: Autoria Própria

5.5 ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA

5.5.1 Função Transiente

Na função transiente o analisador mostra as formas de onda de tensão e corrente no momento preciso do distúrbio. O tempo de medição para esta função foi de 9h00m. Na Figura 60 são apresentados os transientes que ocorrem no período de medição.

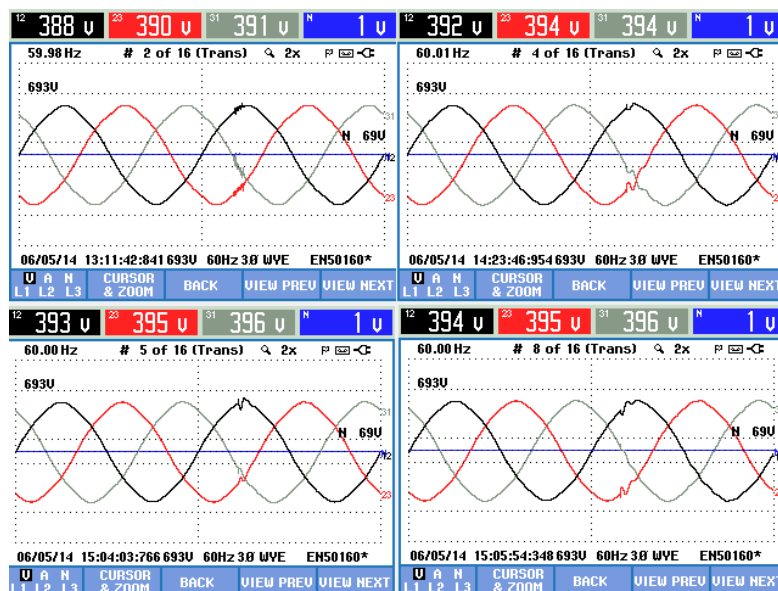


Figura 60 – Transientes
Fonte: Autoria Própria

No dia que foram feitas as medidas ocorreram 16 transientes, nas imagens é possível observar os principais, sendo que os mesmos ocorrem próximo ao pico nominal na forma de onda. A causa mais frequente desse tipo de distúrbio é a energização de bancos de capacitores, as oscilações de tensão para este caso possuem frequência entre 300 e 900Hz, com magnitude máxima por volta de 2,0 pu, com uma duração entre 0,5 e 3 ciclos dependendo das características de amortecimento do sistema (UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA).

5.5.2 Função de Oscilação (Flicker)

Nesta função o analisador quantifica a flutuação do fluxo luminoso das lâmpadas causada por variações de tensão de alimentação. A medição na função de oscilação durou 4h00m. Entre as causas do fenômeno são citadas cargas com ciclo variável, cuja frequência de operação produz uma modulação da magnitude da tensão da rede na faixa de 0 a 30 Hz e também pode ser provocado pela simples variação do conteúdo harmônico de uma carga do tipo não-linear.

Na Figura 61 é mostrada a tela da função Flicker, onde se tem as severidades de curto prazo (Pst) para medições em um período contínuo de 10 minutos. Nesse período é possível detectar a interferência de uma única origem com um ciclo de trabalho longo, e as severidade de longo prazo (Plt) para medições em um período contínuo de 2 horas, esse tipo de medição é útil quando pode haver mais de uma origem de interferência com ciclos de trabalhos irregulares.

Flicker			
	L1	L2	L3
Pst(1min)	0.14	0.14	0.14
Pst	0.26	0.26	0.26
Plt	0.30	0.30	0.29
Dc(%)	0.0	0.0	0.0
Dmax(%)	0.0	0.0	0.0
TD<(s)	0.000	0.000	0.000
06/06/14 16:03:50 230V 60Hz 3Ø WYE EN50160*			
	MAX-D VALUES	PF5	TREND HOLD RUN

Figura 61 - Tela da Função Flicker
Fonte: Autoria Própria

Segundo o Modulo 8 do PRODIST a severidade Pst deve ser menor que 1 e a severidade Plt deve ser menor que 0,8. Observando a Figura 61 é possível ver que os valores estão dentro do estabelecido pela norma, ou seja, mesmo ocorrendo tal fenômeno, o impacto pode ser desprezado. Na figura 62 é possível ver as severidades durante todo o período de medição em uma das fases, as outras duas fases não estão sendo representadas pois apresentam comportamento semelhante.

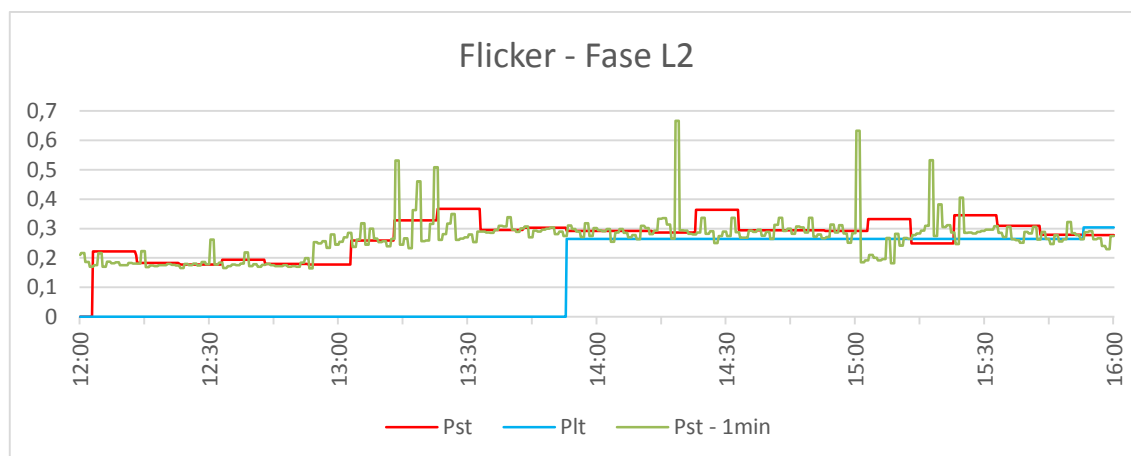


Figura 62 - Flicker
Fonte: Autoria Própria
 5.5.3 Função Desequilíbrio

Para a medição na função de desequilíbrio utilizou-se o tempo de medição de 00h15m.

Na Figura 63 é mostrado o modo de desequilíbrio na tela do medidor. Essa tela exibe todos os valores numéricos pertinentes: percentual de desequilíbrio de tensão negativa, percentual de desequilíbrio de tensão de sequência zero, percentual de desequilíbrio de corrente negativa, percentual de desequilíbrio de corrente de sequência zero, tensão de fase fundamental, frequência, corrente de fase fundamental, ângulo entre tensão de fase neutra relativas à fase de referência A/L1 e ângulos entre tensão e corrente de cada fase.

O desequilíbrio pode ser causado pela presença de cargas trifásicas desequilibradas conectadas a um sistema trifásico, por cargas monofásicas em circuitos trifásicos ou resultado do desligamento de fusíveis de fase de um banco de capacitores trifásico. Segundo módulo 8 do PRODIST, o componente de tensão negativa não deve exceder 2% e desequilíbrio de corrente não deve exceder 10%. Na Figura 63 é possível observar que os valores obtidos com as medições estão dentro do especificado pela norma.

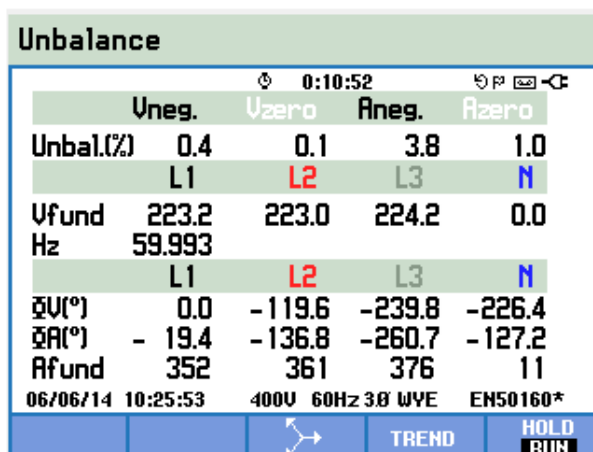


Figura 63 - Tela da Função Desequilíbrio
Fonte: Autoria Própria

A Figura 64 mostra a relação de fase entre tensão e corrente em um diagrama vetorial dividido em seções de 30 graus, onde é possível, além do diagrama, visualizar os valores numéricos de tensão negativa ou desequilíbrio de corrente, tensão de sequência zero ou desequilíbrio de corrente, tensão ou corrente de fase fundamental, frequência e ângulos de fase.

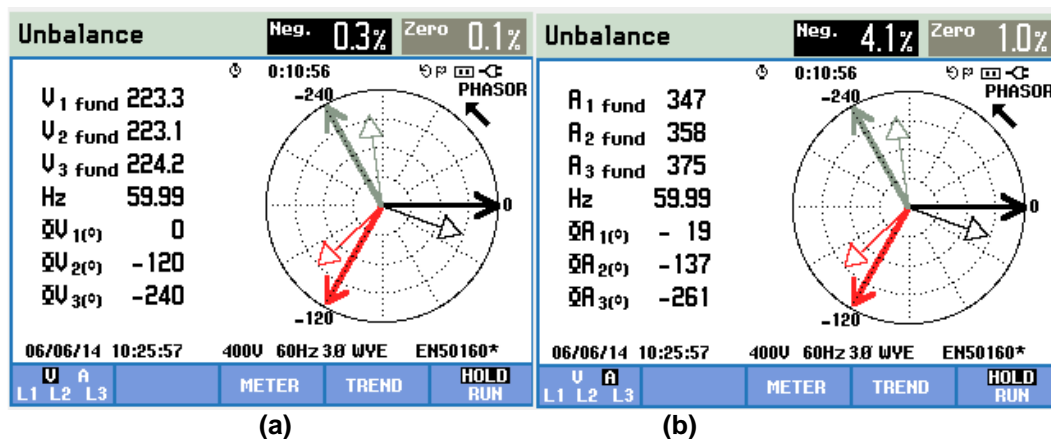


Figura 64 - Fasor de Desequilíbrio de (a) Tensão e (b) de Corrente
Fonte: Autoria Própria

5.5.4 Função de Reduções e Aumentos de Tensão (Dips & Swells)

Para a medição na função de reduções e aumentos de tensão o analisador ficou conectado durante 7h00m. A função de reduções e aumentos registra reduções (dips), interrupções (interruptions), alterações rápidas (rapid voltage changes) e aumentos de tensão (swells). Essa função mostra uma tabela de eventos que lista todas as possíveis ocorrências de tensão de fase, e são listadas as principais características de evento: tempo de início, duração e magnitude da tensão. A Tabela 30 mostra as abreviações de cada evento que o analisador pode detectar.

Tabela 30 - Abreviações dos Eventos do Analisador

Abreviação	Descrição
CHG	Alteração rápida de tensão
DIP	Redução de tensão
INT	Interrupção de tensão
SWL	Aumento de tensão

Fonte: Autoria Própria

Na Figura 65 é apresentada a tabela que o analisador fornece, onde são mostrados os eventos que ocorreram durante o período de medição. O Modulo 8 do PRODIST determina que quando ocorre redução de tensão a duração dessa variação deve ser inferior a três segundos, e a amplitude da tensão em relação a referência pode ser superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u. Na Figura 65 é possível observar que ocorreram dois eventos de redução de tensão, um logo após o outro, com diferença de milissegundos entre uma fase e outra e com duração também de milissegundos. Comparado com a norma a variação se encontra dentro nos níveis aceitáveis.

DIPS & SWELLS EVENTS				
START 06/09/14 09:04:08			EVENT 2 / 2	
			7:48:45	
DATE	TIME	TYPE	LEVEL	DURATION
06/09/14	14:41:50:769	L2 DIP	11.1 U	0:00:00:734
06/09/14	14:41:53:483	L3 DIP	48.8 U	0:00:00:636
06/09/14 16:52:54 230V 60Hz 3Ø WYE EN50160*				
		NORMAL DETAIL	BACK	TREND

Figura 65 - Tabela de Eventos
Fonte: Autoria Própria

5.5.5 Frequência

A variação da frequência foi analisada durante um período de 00h11m.

Segundo o Módulo 8 do PRODIST todas as instalações conectadas a rede devem apresentar condições normais de operação em regime permanente, operar dentro dos limites de frequência situados entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Quando a frequência extrapolar essa faixa, a mesma tem um prazo de 30 segundos para retornar para a faixa de valores estabelecida.

A frequência é um importante parâmetro a ser monitorado, pois os aparelhos eletroeletrônicos utilizados na indústria em geral tem funcionamento vinculado a uma frequência de 60Hz. Na figura 66 é apresentada a variação de frequência medida durante o período de 11 minutos, é possível observar que durante todo o período a frequência varia dentro dos limites estabelecidos pela norma.

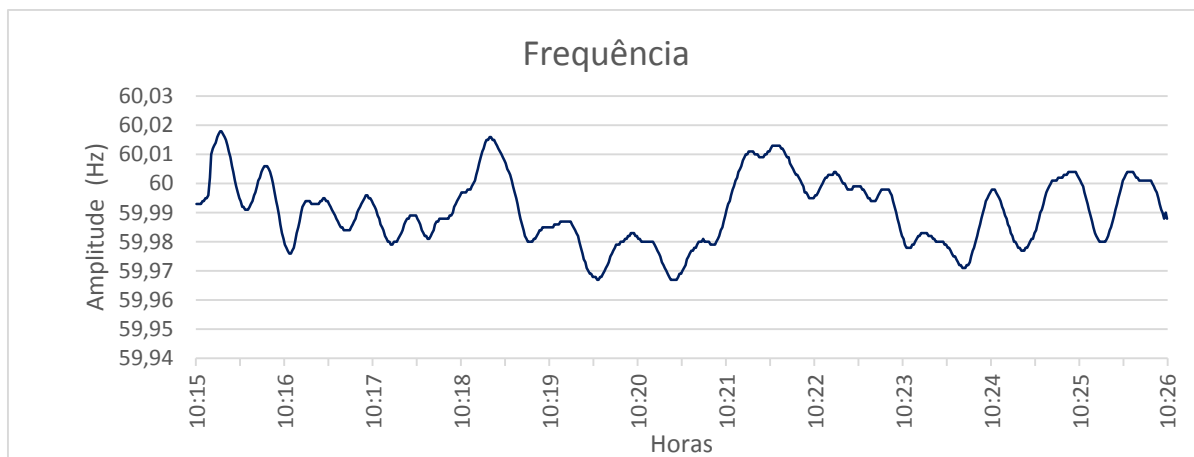


Figura 66 - Variação da Frequência
Fonte: Autoria Própria

5.6 TERMOGRAFIA

5.6.1 Transformador de Alimentação

Como citado anteriormente o transformador está localizado em um cubículo onde o acesso não é permitido. Devido à falta de acessibilidade, a realização das coletas dos termogramas necessariamente foram feitas do lado de fora do cubículo.

Na Figura 67 é mostrada uma vista superior do transformador a seco existente na instalação. Observando a imagem, é possível ver que existem cabos da baixa tensão (BT) com isolamento térmico (revestido com borracha) e conexões de cobre dos condutores da BT e terminais. As medidas foram feitas nesses dois pontos citados, e como se trata de materiais diferentes, a emissividade da câmera termográfica foi configurada individualmente para cada material.



Figura 67 - Vista Superior do Transformador de Alimentação
Fonte: Autoria Própria

Nas figuras 68 e 69 são apresentadas as imagens infravermelhas juntamente com as respectivas imagens feitas com câmera fotográfica. Para o termograma da Figura 68 inicialmente foi ajustado o valor da emissividade para 0,65, valor da emissividade do cobre, e após coletada a imagem.

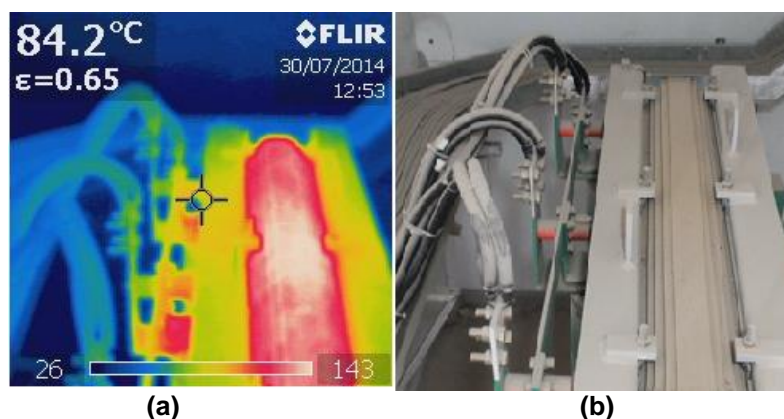


Figura 68 – (a)Termograma do Transformador e (b) Foto do Transformador Referente a Parte de Cobre.
Fonte: Autoria Própria

No termograma do transformador, quando analisado a região das conexões de cobre pode-se observar que no ponto central a temperatura atingiu $84,2^{\circ}\text{C}$. A máxima temperatura admissível (MTA) para transformador a seco com classe de isolamento 130°C é de 180°C . Não se verifica anomalia nessas conexões, pois a temperatura medida está abaixo do limite permitido.

Na Figura 69 o valor da emissividade foi ajustada para 0,93, sendo este o valor da emissividade da borracha, material utilizado para isolar os cabos que derivam da BT do transformador.

A temperatura máxima admissível para condutor encapado com isolamento de borracha é de 90°C . No ponto medido a temperatura foi de $31,1^{\circ}\text{C}$, mostrando então que não existe nenhuma anomalia quando se trata dos cabos isolados que saem da baixa tensão do transformador para o quadro de distribuição geral.

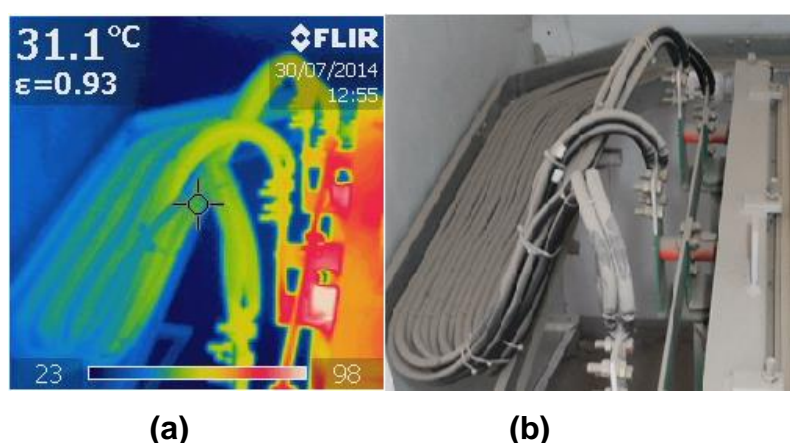


Figura 69 - (a)Termograma do Transformador e (b) Foto do Transformador Referente a Parte de Borracha
Fonte: Aatoria Própria

5.6.2 Quadro de Distribuição Geral

Na Figura 70 tem-se uma visão geral do quadro de distribuição para ilustrar os locais de coleta dos termogramas referente a esta parte do estudo.

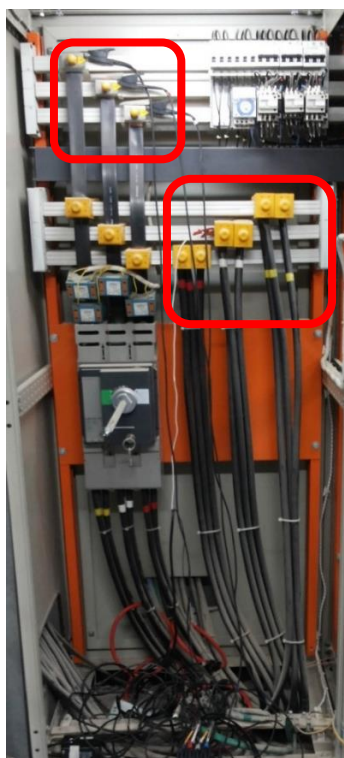


Figura 70 - Pontos de Coleta dos Termogramas no Quadro de Distribuição Geral
Fonte: Autoria Própria

Observando a Figura 70 nota-se que os barramentos de cobre do quadro são inacessíveis, pois são isolados com materiais termoplásticos e acrílico. O ponto encontrado para medição foram as conexões dos barramentos que são de cobre. Ajustou-se o valor da emissividade para 0,65. Na Figura 71 segue o termograma e a imagem real referente ao local citado.

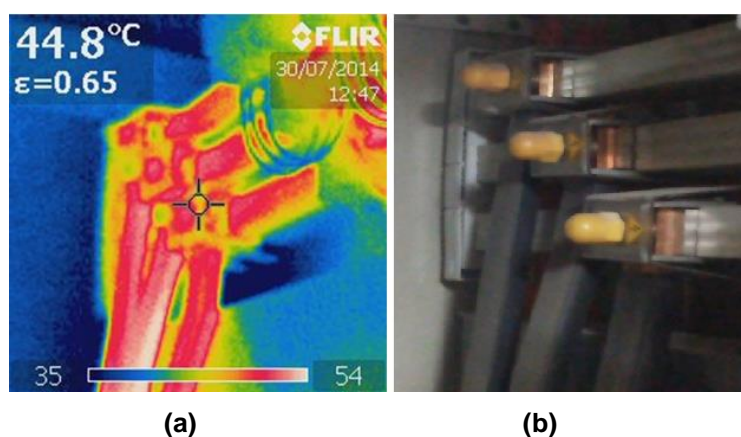


Figura 71 – (a) Termograma e (b) Imagem Real das Conexões do Quadro Geral de Distribuição.
Fonte: Autoria Própria

Quando se trata de conexões e barramentos de baixa tensão a máxima temperatura admissível é de 90^oC. Observa-se na Figura 71 que a temperatura no ponto central foi de 44,8^oC, ou seja, não apresenta nem uma anomalia pois a temperatura está dentro do limite aceitável.

Para coleta das imagens nos condutores a emissividade foi ajustada para 0,93, referente a borracha que reveste os mesmos. A máxima temperatura admissível para condutor encapado com isolamento de borracha é de 90^oC. Na Figura 72 observa-se que no ponto central a temperatura chegou a 43,4^oC, valor dentro da faixa aceitável.

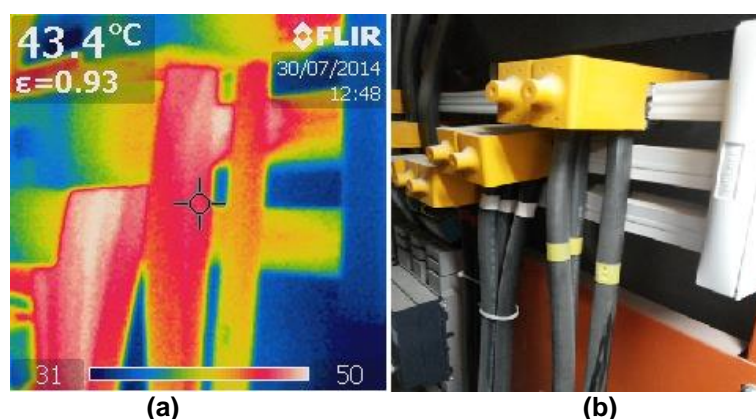


Figura 72 – (a) Termograma e (b) Imagem Real dos Condutores do Quadro Geral de Distribuição.
Fonte: Autoria Própria.

6 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo realizar um estudo referente à qualidade da energia elétrica em uma indústria alimentícia, com ênfase na detecção de harmônicas geradas pelas cargas não lineares presentes na instalação. Desta forma, utilizando o analisador de grandezas, foram realizadas medições das grandezas elétricas no quadro principal da instalação, com o intuito de verificar a eficiência do filtro de harmônicas existente na instalação. As medições foram realizadas com o filtro ligado e desligado, de modo a obter um diagnóstico do funcionamento deste equipamento. Além disto, foram medidas as distorções harmônicas provocadas na rede por inversores de frequência já que estes equipamentos são as principais cargas não lineares da instalação. O trabalho ainda contemplou um estudo de termografia dos barramentos do quadro principal e do transformador de alimentação a fim de inspecionar possíveis sobreaquecimentos nos equipamentos.

Em relação à qualidade de energia elétrica, constatou-se que a tensão variou entre 218V e 226V quando o filtro estava ligado, já quando o filtro estava desligado a tensão variou entre 218V e 228V. Apesar destas variações, os valores de tensão mantiveram-se na faixa recomendada pelo módulo 8 do PRODIST, que é entre 201V e 231V. Pode-se também observar alguns transientes no dia que foram feitas as medições, porém foram transientes pequenos quando comparados com a forma de onda total, não afetando a qualidade de energia da indústria. Quanto às outras medidas, como o flicker, desequilíbrio e aumento/redução de tensão, houveram alguns distúrbios porém todos dentro da faixa permitida pelas normas. A frequência do sistema também sofreu variação entre 59,96Hz e 60,02Hz sendo esta faixa permitida pelo Módulo 8 do PRODIST.

Analisando separadamente as distorções harmônicas de tensão e corrente, verificou-se que o nível de DHT_v , tanto para a condição do filtro ligado quanto para a condição do filtro desligado, permaneceu abaixo de 2,5% e que as harmônicas individuais de tensão que mais contribuíram para a formação deste índice, foram as de 5° e 7° ordem, respectivamente. Comparando os níveis medidos com as normas técnicas adotadas para distorção na tensão, é possível concluir que o índice DHT_v e suas componentes harmônicas individuais encontram-se dentro dos limites

estabelecidos e portanto não podem ser consideradas um distúrbio grave na qualidade de energia.

As distorções harmônicas de corrente por sua vez, apresentaram níveis mais elevados quando comparadas com as distorções na tensão. No período em que a indústria encontra-se em pleno funcionamento, o índice DHT_i apresenta valores baixos e que condizem com a norma IEEE 519. No entanto, quando a fábrica encerra seu processo de produção e a corrente de carga diminui, o nível DHT_i sofre um aumento considerável chegando a quase 13%, mas ainda se enquadrando com os estilado normativo.

Esta correlação entre a corrente eficaz fundamental e o nível de distorção harmônica total de corrente verificada durante o estudo, pode ser explicada da seguinte forma: quando a indústria está a plena carga a corrente da instalação é elevada, diante disto a corrente de alimentação das cargas não lineares é considerada pequena e portanto as distorções harmônicas por elas produzidas afetaram menos o nível da DHT_i , já que o valor da corrente eficaz fundamental é elevado. No entanto, quando o processo produtivo da indústria chega ao fim, o sistema já não se encontra a plena carga e então a corrente de alimentação das cargas não lineares se sobressai fazendo com que o conteúdo harmônico por elas produzido aumente de forma significativa o valor percentual da DHT_i .

Como os níveis de DHT_i mais elevados acontecem após ser encerrado o processo produtivo da empresa, ou seja, quando apenas o empacotamento está funcionando e é onde se tem maior concentração de cargas não lineares (inversores de frequência), pode-se sugerir que sejam instalados filtros de harmônicas junto a essas cargas para garantir uma filtragem local.

Com relação às distorções harmônicas individuais de corrente, é possível verificar que as componentes que apresentam nível mais elevado até o fim do processo produtivo são as produzidas principalmente pelos inversores de frequência, de ordem $6n \pm 1$. Quando o processo produtivo da indústria chega ao fim, as componentes de maior intensidade são principalmente as de 3° e 5° ordem. Comparando as distorções individuais de corrente com a norma IEEE 519, constatou-se que tanto para o filtro ligado quanto para o filtro desligado, todas as componentes encontram-se dentro dos limites estipulados, exceto a componente de 17° ordem que especificamente no dia em que o filtro estava ligado apresentou valores acima dos recomendados.

Para os inversores de frequência operando na condição de carga a rede, pode-se dizer de uma forma geral que ambos apresentaram níveis de DHT_i elevados, acima de 200%, e que são equipamentos que afetam de forma prejudicial a qualidade da energia elétrica.

Ambos os inversores de frequência produziram elevadas componentes harmônicas de ordem $6n \pm 1$, sendo que para o inversor 5 todas as componentes harmônicas apresentaram valores elevados. Com relação a comparação das medidas realizadas no inversor 5 com a norma IEC 61000 3-2, pode-se concluir que o mesmo não está de acordo com a norma já que praticamente todas as componentes harmônicas apresentaram valores superiores ao estipulado.

Com relação a eficiência do filtro de harmônicas instalado no local, é possível concluir que o mesmo funciona de forma adequada como mostram as Tabelas comparativas 24 e 25, obtidas dos valores médios encontrados nas medidas de um período de 00h30m. Mas, como observado no gráfico da Figura 30, que apresenta o nível DHT_i com o filtro ligado, é possível concluir que para a instalação em questão o filtro não é suficiente para a supressão total das harmônicas da instalação, já que quando o consumo de corrente diminui as distorções na corrente apresentam valores acima do recomendado pelas normas. Também deve-se destacar que no dia em que as medições aconteceram com o filtro desligado os limites para as distorções harmônicas determinados pelas normas não foram violados.

O analisador de grandezas elétricas é a ferramenta mais indicada para a detecção de harmônicas, porém não consegue detectar todos os efeitos provocados pelas mesmas nos elementos de uma instalação elétrica. Como complemento para a manutenção preditiva é utilizada a técnica da termografia, na busca de identificar componentes com temperaturas de funcionamento significativamente superiores às temperaturas especificadas pelos fabricantes. Os resultados dessa técnica são apresentados instantaneamente, durante a inspeção, na forma de termogramas. Em relação aos termogramas coletados, pode-se concluir que os pontos em análise, quadro de distribuição e o lado da baixa tensão do transformador, não apresentaram nenhuma anomalia, ou seja, indicam que os mesmos se encontram em boas condições, pois todas as temperaturas máximas estão dentro da faixa permitida para cada tipo de componente em questão.

REFERÊNCIAS

- AFONSO, João. **Termografia - Teoria, Procedimentos e Vantagens**. 2010. ITEAG - Instalações Técnicas Especiais, 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica**. 2012. 72pp.[s.n.], Brasília, 2012.
- ALDABÓ, Ricardo. **Qualidade na energia elétrica**. São Paulo: Altliber, 2001.
- ÁLVARES, Ricardo C. **Diagnóstico de Falha em Pára-Raios Utilizando Termografia**. 2008.[s.n.], Belo Horizonte, 2008.
- ALVES, Mário F. **QEE - Qualidade de Energia Elétrica**. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte, p. 110. 2010.
- ANDREAS, J. C. **Energy - Efficient Electric Motors: Selection and Application**. [S.l.]: GOULD - Electronics & Electrical Products, 1982. 176 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410: Instalações Elétricas de Baixa Tensão**. 1997.[s.n.], Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de Revisão da ABNT NBR 15572**. 2012. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2012.
- BARBOSA, Marcelo. Análise comparativa entre as normas IEEE e IEC. **Eletricidade Moderna**, p. 68-74, 2014.
- BARBOSA, Marcelo A. **Distorções harmônicas em sistemas elétricos industriais**. Dissertação de Mestrado. ed. Belo Horizonte: Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, 1988. 146 p.
- BRITO, Jorge N.; FILHO, Paulo C. M. L.; ALVES, Pedro A. S. **Implantação do Programa de Manutenção Preditiva de Painéis Elétricos Através da Análise Termoelétrica**. 2005.[s.n.], São Paulo, 2005.
- BRONZEADO, H.S et al. Uma proposta de nomenclatura de termos e definições associados a qualidade da energia elétrica. **Eletricidade Moderna**, v. 26, n. 288, p. 50-55, 1998.
- CHAPMAN, David. Introdução. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**, p. 8, Abril 2002a.
- CHAPMAN, David. Harmônicas - Causas e Efeitos. **Guia de Aplicação de Qualidade de Energia**, Julho 2002b.

DIAS, Guilherme A. D. **Harmônicas em Sistemas Industriais**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2002.

EJM ENGENHARIA. **Conversores de Frequência e Soft-Starters - Manual de Orientação**. 2005. 33p.[s.n.], Cuiabá, 2005.

FILHO, Ozório R. C. Aplicações Termográficas na Manutenção Onde Normalmente Erramos! **Nova Manutenção y Qualidade**, Rio de Janeiro, v. 62, p. 28-32.

FLUKE CORPORATION. **Emissivity Values of Common Materials. Fluke corporation**. Disponível em:
<<http://www.frigidn.com/resources/EmissivityTable.pdf>>. Acesso em: 19 abr. 2014.

FLUKE CORPORATION. **Introdução aos Princípios de Termografia**. [S.l.]: Fluke Corporation, 2009.

FOULADGAR, J.; CHAUVEAU, E. **The Influence of the harmonics on the temperature of Electrical Machines**. 2005. 5 - IEEE Transactions on Magnetics, 2005.

FREITAS, Gilberto E. R.; CORRÊA, Rodrigo J. D. F. **Análise de Distúrbios Harmônicos em Componentes do Sistema Elétrico**. 2007. 102p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Pará, Belém, 2007.

FREITAS, Stefani C. L. et al. Estudo de Harmônicas de Corrente Geradas na Partida Suave de Motores de Indução Trifásicos. **IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos**, p. 1-5, 2012.

GAMA, P. H. R. P.; OLIVEIRA, A. **Conservação de Energia e sua Relação com a Qualidade de Energia Elétrica**. XV SNPTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Foz do Iguaçu: [s.n.]. 1999.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. **Std. 519-1992 - Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems**. 1991.[s.n.], 1991.

INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERSY. **Transactions on Power Deliver - Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment**. 1993. 2 - [s.n.], 1993.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000- 2-2. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment - Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems**. 2001.[s.n.], 2001.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-2-4. **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-4: Environment - Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances**. 2001.[s.n.], 2001.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - IEC 61000-3-2.
Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3: Limits - Section 2: Limits for Harmonic Current Emissions (Equipment input current >

KIMBARK, Edward W. **Direct Current Transmission**. [S.l.]: John Wiley & Sons, v. vol. 1, 1971.

LOUVAIN, Lélis C.; CABRAL, Lucas G.; GOMES, Klerio R. Aplicação da Termografia na Manutenção Preditiva, Rio de Janeiro, v. 1, 2010.

LUCIANO, Benedito A. et al. Lâmpadas fluorescentes e distorções harmônicas: eficiência energética e qualidade de energia. **O Setor Elétrico**, n. 49, 2010.

MARIO, Mauro. **Uso da Termografia Como Ferramenta Não Destrutiva Para Avaliação de Manifestações Patológicas Ocultas**. 2011.UFRS, Porto Alegre, 2011.

MARTINHO, Edson. **Distúrbios da Energia Elétrica**. 2. ed. São Paulo: Érica, 2009.

MARTINS, Júlio S.; COUTO, Carlos; AFONSO, João L. Qualidade de energia elétrica. **3º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia**, Maputo, p. 219-231, Agosto 2003.

MECATRÔNICA ATUAL. Termografia – Aplicações em Sistemas Elétricos, São Paulo - SP, v. Nº14, 2004.

NAVES, A. C. . G. F. R. Efeitos Harmônicos da Aplicação de Bancos de Capacitores em Indústrias Eletrointensivas sobre a Rede Elétrica de Alta Tensão – Casos. **VI Seminário Brasileiro sobre Qualidade de Energia Elétrica - SBQEE**, Belém, 21-24 Agosto 2005.

NUNES, Renato V. **Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP**. 2007. 150p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

OLIVEIRA, Tiago M. D. **Análise de Sistemas de Energia e Máquinas Elétricas com Recurso a Termografia**. 2012.[s.n.], 2012.

PALUCHOWSKI, Cristian et al. Bases Teóricas de Inspeção Termográfica Para Aplicação em Componentes Elétricos. **Semana Internacional das Engenharias da FAHOR**, p. 12.

PIRES, Igor A. **Caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletro-eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de distribuição de energia**. 2006. 157p. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

PIRES, Igor A. Conceitos iniciais: qualidade de energia e harmônicos. **O Setor Elétrico**, p. 6, 2010.

POMILIO, José A. Efeitos e Causas de Harmônicas no Sistema de Energia Elétrica. **DSCE - FEE - Unicamp**, 1997. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html>>. Acesso em: 09 out. 2013.

PROCOBRE - INSTITUTO BRASILEIRO DO COBRE. **Harmônicas nas Instalações Elétricas**. 2001. 65p. PROCOBRE, São Paulo, 2001.

RAMALHETE, Marina P.; SIMONETTI, Domingos S. L. Aspectos de Qualidade de Energia Elétrica e Eficiência Energética em Motores de Indução Trifásicos, Vitória, p. 5, 2009.

RASHID, M. H. **Eletrônica de Potência**: circuitos, dispositivos e aplicações. São Paulo: Makron, 1999. 828 p.

REDUMAX ENERGIA. **Conceito Técnico REDUMAX**. Redumax Energia. Balneário Camboriu, p. 6.

RODRIGUES, Augusto M. **Influência da Distorção Harmônica e de Desequilíbrios em Medidores de Energia Elétrica Ativa**. 2009. 11p. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.

ROSA, Alex. **Simulação de um soft-starter para acionamento de motores de indução**. 2003. 67p. Trabalho de Conclusão de Curso - TCC - Escola de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2003.

SCHNEIDER ELECTRIC; PROCOBRE. **Workshop Instalação Elétrica de Baixa Tensão - Qualidade de Energia - Harmônicas**. SCHNEIDER Electric. São Paulo, p. 19. 2003.

SCOLARI, Bruno S.; CERQUEIRA, Fernando B.; KRAVETZ, Peterson L. **Caracterização dos Problemas Relativos à Qualidade de Energia Elétrica Causados por um Forno de Aquecimento a Indução**. 2013. 118p. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

SILVA, Marina M. D. **Análise de filtros passivos de harmônicos de conversores CA/CC de seis pulsos**. 2007. 131p. Dissertação de Mestrado - Programas de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

SPAMER, Fernanda R. **Técnicas Preditivas de Manutenção de Máquinas Rotativas**. 2009.[s.n.], Rio de Janeiro, 2009.

STAROSTA, Jose. Qualidade da Energia nos Processos Industriais e Produtividade. **O Setor Elétrico**, p. 52-55, Novembro 2006.

TAVARES, Paulo H. Harmônicos em instalações elétricas. **ENGEMATEC**, p. 9, 2010.

TEIXEIRA, Douglas Â. **Análise das Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de um Sistema Industrial**. 2009. 127p. Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.

TESTO DO BRASIL. **Guia de Bolso Testo para Termografia**. 2009. Testo, Campinas, SP, 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Qualidade de Energia Elétrica: Definição e Análise dos Itens de Qualidade**. 70p.[s.n.].

VASCONCELLOS, A. B. D. et al. Eficiência energética e Qualidade de Energia com a Automação de Condicionadores de Ar. **O Setor Elétrico**, São Paulo, n. 65, p. 6, 2011.

WEG AUTOMAÇÃO S.A. **Manual para correção do Fator de Potência**. [s.n.], Jaraguá do Sul.

ANEXO A

