

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS**  
**COORDENAÇÃO DE INDÚSTRIA**

Celso Aurélio de Moraes Lima

**ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS**  
**Complexo Industrial: Raízen – Unidade Jataí**

Jataí  
2013

Celso Aurélio de Moraes Lima

**ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS**  
**Complexo Industrial: Raízen – Unidade Jataí**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado junto ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás como requisito parcial para obtenção do título superior de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Msc. Marcelo Semensato

Jataí

2013

Celso Aurélio de Moraes Lima

**ANÁLISE DE DISTORÇÃO HARMÔNICA EM INSTALAÇÕES INDUSTRIAIS**  
**Complexo Industrial: Raízen – Unidade Jataí**

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado pela banca examinadora em 25/04/2013, com conceito \_\_\_\_\_.

---

Msc. Marcelo Semensato  
**Orientador**

---

Dr. Fernando Silva Pereira  
**Membro da Banca Examinadora**

---

Dr. André Luiz Silva Pereira  
**Membro da Banca Examinadora**

## DEDICATÓRIAS

Primeiramente, dedico todos os esforços deste trabalho a Deus, por todas as bênçãos e por toda sustentação espiritual em minha vida. Não obstante, dedico ao meu guia espiritual e aos espíritos protetores que, com certeza, não mediram esforços nos últimos anos para que eu fosse persistente e vitorioso.

Dedico este trabalho aos meus pais, Celso e Silvânia, por toda dedicação, amor, paciência, atenção, ensinamentos e esforços ao longo de toda minha jornada, sendo minha principal base moral e ética.

Dedico aos meus irmãos, Sílvio e Alice, por serem ícones de bons filhos e boas condutas, sendo grandes exemplos de vida.

Dedico também a minha namorada, Bethânia, que, nesta reta final, tem me acompanhado com muita dedicação, paciência e carinho.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço imensamente a toda minha família, por sempre acreditarem em mim, me ajudando nos momentos mais difíceis. Tenho certeza que todas as minhas conquistas foram graças aos incentivos de vocês.

Agradeço aos meus grandes e verdadeiros amigos, pelas boas conversas, pelos bons momentos e principalmente pelo companheirismo recíproco nesses últimos anos.

Agradeço aos professores do IFG, já que, mesmo nas dificuldades encontradas nos últimos anos, dedicaram e ajudaram os jovens acadêmicos de engenharia. Os esforços e ensinamentos foram indispensáveis para nossa formação ética e profissional.

Agradeço também aos eletricitistas e instrumentistas da Raízen, Sales, Thiago, Cidinho, Jeferson, Donizete, Fabão, Juliano, Bernardino, Fernando, Denis, Nilsinho, Rogério, Leandro, Ilton, Juninho, Rafael, Laranjeira, Musa, Henrique, Danilo, entre outros, com os quais convivi nos últimos dois anos. Foram essenciais todos os ensinamentos e esforços, agregando inúmeros valores tanto técnicos quanto pessoais.

Em especial, agradeço ao eletricitista da Raízen, Paulinho, e ao supervisor da elétrica, Wender. Sem a intervenção e ajuda de vocês este trabalho não se concretizaria.

Muito obrigado a todos!

*“O progresso é a lei da história da humanidade, e o homem está em constante processo de evolução”*

**Augusto Comte**

*“O conhecimento deve ser compartilhado a todos que o buscam”*

**Bruno P. Ramos**

*"A felicidade só é real quando compartilhada"*

**Christopher McCandless**

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo executar uma análise de distorção harmônica nas instalações elétricas do complexo industrial Raízen – Unidade Jataí. Para isso, serão abordados em um primeiro momento, conceitos introdutórios sobre o termo ‘Harmônicos’, em uma visão dos setores de QEE (Qualidade de Energia Elétrica). No segundo momento, serão apresentados e discutidos os resultados que, de maneira concisa, expõe o conteúdo harmônico presente nas instalações em análise. Com isso, é possível avaliar e quantificar os impactos gerados pela poluição harmônica. Por fim, serão propostas possíveis soluções corretivas e mitigadoras, visando sempre o melhor desempenho do sistema elétrico em questão.

**Palavras-chave:** Qualidade de Energia Elétrica; Cargas Não Lineares; Distorção Harmônica; Efeitos Harmônicos; Filtros Harmônicos.

## **ABSTRACT**

This study aims to perform an analysis of harmonic distortion in the electrical installations in the industrial complex of Raizen – Unit Jataí. To do so, introductory concepts about the term 'Harmonics' will be discussed at first, giving a vision of the sectors of EPQ (Electric Power Quality). On the second point, the results which concisely expose the harmonic content present on the analysed installations will be presented and discussed. This makes it possible to assess and quantify the impacts generated by harmonic pollution. Finally, possible corrective and mitigative solutions will be proposed, always seeking the best performance of the electrical system in question.

**Key-words:** Electric Energy Quality; Non-linear Charges; Harmonic Distortion; Harmonic Effects; Harmonic Filters.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo .....	19
Figura 2.2 – Corrente e tensão na entrada do retificador .....	20
Figura 2.3 – Circuito Básico do Inversor de Frequência.....	20
Figura 2.4 – Corrente de entrada do inversor de freqüência a seis pulsos .....	21
Figura 2.5 – Tensão nos terminais do motor acionado por inversor de frequência .....	21
Figura 2.6 – Exemplo de decomposição por Série de Fourier.....	23
Figura 2.7 – Tensão triangular simétrica (a) e espectro harmônico (b) .....	25
Figura 2.8 – Corrente do RMMO com carga resistiva (a) e espectro harmônico (b) .....	25
Figura 3.1 – Diagrama fasorial trifásico. ....	26
Figura 3.2 – Vida útil dos transformadores em função da distorção da corrente .....	31
Figura 3.3 – Vida útil dos transformadores em função da distorção da tensão.....	31
Figura 5.1 – Diagrama unifilar simplificado: TF-1001 .....	42
Figura 5.2 – Diagrama unifilar simplificado: TF-DRV-2001 .....	44
Figura 5.3 – Diagrama unifilar simplificado: TF-DRV-2002 .....	45
Figura 5.4 – Diagrama unifilar simplificado: TF-6501 .....	47
Figura 5.5 – Diagrama unifilar simplificado: TF-6502.....	48
Figura 5.6 – Diagrama unifilar simplificado: TF-8001A e TF-8001B.....	50
Figura 5.7 – Diagrama unifilar simplificado: TF-8001C e TF-8001D.....	51
Figura 5.8 – Diagrama unifilar simplificado: TF-8501 .....	52
Figura 6.1 – Analisador de QEE – Fluke 435 .....	55
Figura 6.2.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 01 .....	56
Figura 6.2.2 – Espectro de frequência da tensão do Ponto 01 .....	57
Figura 6.2.3 – Espectro de frequência da corrente do Ponto 01 .....	58
Figura 6.2.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-1001 .....	61
Figura 6.3.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 02 .....	62
Figura 6.3.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 02 .....	63
Figura 6.3.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 02 .....	64
Figura 6.3.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-DRV-2001 .....	66
Figura 6.4.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 03 .....	67
Figura 6.4.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 03 .....	68
Figura 6.4.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 03 .....	69
Figura 6.4.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-DRV-2002 .....	71
Figura 6.5.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 04 .....	72
Figura 6.5.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 04 .....	73

Figura 6.5.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 04 .....	74
Figura 6.5.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-6501 .....	76
Figura 6.6.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 05 .....	77
Figura 6.6.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 05 .....	78
Figura 6.6.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 05 .....	78
Figura 6.6.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-6502 .....	80
Figura 6.7.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 06 .....	81
Figura 6.7.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 06 .....	82
Figura 6.7.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 06 .....	83
Figura 6.7.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8001A .....	85
Figura 6.8.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 07 .....	86
Figura 6.8.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 07 .....	87
Figura 6.8.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 07 .....	87
Figura 6.8.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8001B .....	90
Figura 6.9.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 08 .....	90
Figura 6.9.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 08 .....	91
Figura 6.9.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 08 .....	91
Figura 6.9.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8001C .....	94
Figura 6.10.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 09 .....	94
Figura 6.10.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 09 .....	95
Figura 6.10.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 09 .....	96
Figura 6.10.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8001D.....	98
Figura 6.11.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 10 .....	99
Figura 6.11.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 10 .....	100
Figura 6.11.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 10 .....	100
Figura 6.11.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8501 .....	102
Figura 6.12.1 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 03 .....	103
Figura 6.12.2 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 03 .....	103
Figura 7.1.1 – Filtro RLC Shunt.....	106
Figura 7.1.2 – Gráfico da impedância em relação a frequência do filtro RLC .....	106

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Amplitude percentual dos harmônicos de tensão e corrente, todas em relação a fundamental .....	22
Tabela 3.1 – Tensões de fase decompostas em série de Fourier.....	27
Tabela 3.2 – Associação das sequências harmônicas aos efeitos nos motores .....	29
Tabela 4.1 – Níveis para distorção harmônica individual de tensão em redes públicas de baixa tensão .....	35
Tabela 4.2 – Níveis de distorção harmônica total de tensão para redes industriais.....	35
Tabela 4.3 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos Classe A.....	36
Tabela 4.4 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos Classe C.....	36
Tabela 4.5 – Limites de corrente harmônicas para equipamentos Classe D.....	37
Tabela 4.6 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos com correntes entre 16 e 75 A.....	37
Tabela 4.7 – Máximo limite para componentes harmônicas ímpares em sistemas de distribuição em geral de 120 V até 69 kV .....	38
Tabela 4.8 – Limites percentuais de distorção da tensão de alimentação em relação a fundamental .....	38
Tabela 4.9 – Valor de referência global para distorção harmônica total de tensão .....	39
Tabela 4.10 – Valor global de referência para distorção harmônica individual de tensão.....	39
Tabela 5.1 – Características das Principais Cargas do TF-1001.....	42
Tabela 5.2 – Características das Principais Cargas do TF-2001.....	43
Tabela 5.3 – Características das Principais Cargas do TF-3001.....	46
Tabela 5.4 – Características das Principais Cargas do TF-6501.....	47
Tabela 5.5 – Características das Principais Cargas do TF-6502.....	48
Tabela 5.6 – Características das Principais Cargas do TF-8001A e TF-8001B .....	50
Tabela 5.7 – Características das Principais Cargas do TF-8001C e TF-8001D .....	51
Tabela 5.8 – Características das Principais Cargas do TF-8501.....	53
Tabela 6.2.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 01 .....	56
Tabela 6.2.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 01 .....	57
Tabela 6.3.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 02 .....	62
Tabela 6.3.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 02 .....	63
Tabela 6.4.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 03 .....	68
Tabela 6.4.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 03 .....	68
Tabela 6.5.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 04 .....	73
Tabela 6.5.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 04 .....	73

<b>Tabela 6.6.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 05 .....</b>	<b>77</b>
<b>Tabela 6.6.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 05 .....</b>	<b>77</b>
<b>Tabela 6.7.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 06 .....</b>	<b>81</b>
<b>Tabela 6.7.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 06 .....</b>	<b>82</b>
<b>Tabela 6.8.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 07 .....</b>	<b>86</b>
<b>Tabela 6.8.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 07 .....</b>	<b>87</b>
<b>Tabela 6.9.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 08 .....</b>	<b>90</b>
<b>Tabela 6.9.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 08 .....</b>	<b>91</b>
<b>Tabela 6.10.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 09 .....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 6.10.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 09 .....</b>	<b>95</b>
<b>Tabela 6.11.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 10 .....</b>	<b>99</b>
<b>Tabela 6.11.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 10 .....</b>	<b>99</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>16</b>
1.1	Qualidade de Energia Elétrica.....	16
1.2	Objetivos e Organização do Trabalho .....	17
<b>2</b>	<b>ABORDAGEM TEÓRICA.....</b>	<b>18</b>
2.1	Distorção Harmônica.....	18
2.2	Cargas Não Lineares .....	18
2.2.1	<i>Retificador Monofásico de Onda Completa Com Filtro Capacitivo .....</i>	<i>19</i>
2.2.2	<i>Inversor de Frequência.....</i>	<i>20</i>
2.3	Séries de Fourier.....	22
2.4	Espectros Harmônicos .....	24
<b>3</b>	<b>HARMÔNICOS NO SISTEMA DE ENERGIA.....</b>	<b>26</b>
3.1	Comportamento Harmônico nos Sistemas Trifásicos Equilibrados.....	26
3.2	Efeitos dos Harmônicos .....	27
3.2.1	<i>Efeitos nos Sistemas de Transmissão e Distribuição .....</i>	<i>28</i>
3.2.2	<i>Efeitos nas Instalações Elétricas dos Consumidores .....</i>	<i>28</i>
3.2.3	<i>Máquinas Elétricas .....</i>	<i>29</i>
3.2.4	<i>Transformadores .....</i>	<i>30</i>
<b>4</b>	<b>INDICADORES E NORMAS UTILIZADAS.....</b>	<b>32</b>
4.1	Indicadores.....	32
4.1.1	<i>Distorção Harmônica Total (DHT).....</i>	<i>32</i>
4.1.2	<i>Distorção Harmônica Individual (DHI).....</i>	<i>33</i>
4.2	Normas.....	34
4.2.1	<i>Norma IEC 61000.....</i>	<i>34</i>
4.2.2	<i>Recomendação IEEE std 519-1992 [4]:.....</i>	<i>37</i>
4.2.3	<i>PRODIST – Módulo 8 [7].....</i>	<i>38</i>
<b>5</b>	<b>DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL .....</b>	<b>40</b>
5.1	Descrição Geral .....	40
5.2	Subestação SA – 0001.....	41

5.2.1	Transformador TF – 0001.....	41
5.3	Subestação SA – 1001.....	41
5.3.1	Transformador TF – 1001 (Ponto 01).....	41
5.3.2	Transformador TF – 2001.....	43
5.3.3	Transformador TF – DRV – 2001 (Ponto 02).....	43
5.3.4	Transformador TF – DRV – 2002 (Ponto 03).....	44
5.4	Subestação SA – 3001.....	45
5.4.1	Transformador TF – 3001.....	45
5.5	Subestação SA – 6501.....	46
5.5.1	Transformador TF – 6501 (Ponto 04).....	46
5.5.2	Transformador TF – 6502 (Ponto 05).....	48
5.6	Subestação SA – 8001A e SA – 8001B.....	49
5.6.1	Transformadores TF – 8001A e TF – 8001B (Pontos 06 e 07).....	49
5.6.2	Transformador TF – 8001C e TF – 8001D (Pontos 08 e 09).....	50
5.7	Subestação SA – 8501.....	51
5.7.1	Transformador TF – 8501 (Ponto 10).....	52
5.8	Subestação SA – 9201.....	53
5.9	Complementos.....	54
<b>6</b>	<b>ANÁLISE E DISCUSSÃO DAS MEDIDAS OBTIDAS.....</b>	<b>54</b>
6.1	Analisador de Qualidade de Energia Elétrica.....	54
6.2	Ponto de Medição 01: TF – 1001.....	55
6.2.1	Análise da Tensão.....	58
6.2.2	Análise da Corrente.....	59
6.2.3	Breve Conclusão.....	60
6.3	Ponto de Medição 02: TF – DRV – 2001.....	61
6.3.1	Análise da Tensão.....	64
6.3.2	Análise de Corrente.....	65
6.3.3	Breve Conclusão.....	65
6.4	Ponto de Medição 03: TF – DRV – 2002.....	67
6.4.1	Análise da Tensão.....	69
6.4.2	Análise de Corrente.....	70
6.4.3	Breve Conclusão.....	70
6.5	Ponto de Medição 04: TF – 6501.....	72

6.5.1	<i>Análise de Tensão</i> .....	74
6.5.2	<i>Análise de Corrente</i> .....	75
6.5.3	<i>Breve Conclusão</i> .....	75
6.6	Ponto de Medição 05: TF – 6502.....	76
6.6.1	<i>Análise de Tensão</i> .....	78
6.6.2	<i>Análise de Corrente</i> .....	79
6.6.3	<i>Breve Conclusão</i> .....	80
6.7	Ponto de Medição 06: TF – 8001A.....	81
6.7.1	<i>Análise da Tensão</i> .....	83
6.7.2	<i>Análise da Corrente</i> .....	84
6.7.3	<i>Breve conclusão</i> .....	84
6.8	Ponto de Medição 07: TF – 8001B.....	86
6.8.1	<i>Análise de Tensão</i> .....	88
6.8.2	<i>Análise de Corrente</i> .....	88
6.8.3	<i>Breve Conclusão</i> .....	89
6.9	Ponto de Medição 08: TF – 8001C.....	90
6.9.1	<i>Análise de Tensão</i> .....	92
6.9.2	<i>Análise da Corrente</i> .....	92
6.9.3	<i>Breve conclusão</i> .....	93
6.10	Ponto de Medição 09: TF – 8001D.....	94
6.10.1	<i>Análise de Tensão</i> .....	96
6.10.2	<i>Análise da Corrente</i> .....	96
6.10.3	<i>Breve Conclusão</i> .....	97
6.11	Ponto de Medição 10: TF – 8501.....	98
6.11.1	<i>Análise de Tensão</i> .....	100
6.11.2	<i>Análise da Corrente</i> .....	101
6.11.3	<i>Breve Conclusão</i> .....	102
6.12	<i>Análise dos Neutros</i> .....	102
<b>7</b>	<b>POSSIVEIS CORREÇÕES E MELHORIAS</b> .....	<b>104</b>
7.1	Filtros Harmônicos.....	104
7.1.1	<i>Filtros Ativos</i> .....	104
7.1.2	<i>Filtros Passivos</i> .....	105
7.1.3	<i>Filtro Utilizado</i> .....	105

7.2	Solução para o Ponto 01: TF – 1001 .....	107
7.3	Solução para o Ponto 02: TF – DRV – 2001 .....	108
7.4	Solução para o Ponto 03: TF – DRV – 2002 .....	109
7.5	Solução para o Ponto 04: TF – 6501 .....	109
7.6	Solução para o Ponto 05: TF – 6502 .....	110
7.7	Solução para o Ponto 06: TF – 8001A .....	110
7.8	Solução para o Ponto 07: TF – 8001B .....	111
7.9	Solução para o Ponto 08: TF – 8001C .....	111
7.10	Solução para o Ponto 09: TF – 8001D .....	112
7.11	Solução para o Ponto 10: TF – 8501 .....	112
<b>8</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>113</b>
<b>9</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>115</b>
	<b>ANEXO I.....</b>	<b>Erro! Indicador não definido.</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, em decorrência dos grandes avanços alcançados na área da EP (Eletrônica de Potência), os aparelhos eletroeletrônicos vêm surgindo cada vez mais sofisticados e eficientes, trazendo mais conforto e um melhor condicionamento de energia elétrica. Tornaram-se assim, equipamentos com ótimo custo-benefício, sendo uma escolha eficaz e acessível ao consumidor.

Todas as vantagens oferecidas por esses aparelhos fizeram com que a demanda crescesse em grande escala a cada ano. Hoje é comum encontrar nas residências e empresas, um grande número de equipamentos eletroeletrônicos. Surge então uma grande preocupação com QEE (Qualidade de Energia Elétrica), pois apesar de todos os benefícios, esses equipamentos constituem, na sua maioria, cargas não lineares, as quais são fontes de distorção harmônica nas instalações elétricas.

### 1.1 Qualidade de Energia Elétrica

A energia elétrica representa, hoje, o maior indicativo de desenvolvimento das populações e suas atividades. Um produto utilizado nos mais diversos seguimentos que, no contexto geral, esta presente no cotidiano de milhares de pessoas. Portanto, assim como de outros produtos legalmente comercializados, é preciso definir padrões técnicos de qualidade para os mesmos. Esses padrões são considerados desejáveis tanto para operação segura, tanto do sistema supridor quanto das cargas elétricas. Para a energia elétrica, os principais temas estudados pelos setores de QEE são:

- **Flutuação de Tensão**
- **Variações de Tensão de Curta Duração**
- **Desequilíbrio de Sistemas Trifásicos**
- **Distorção Harmônica**

QEE está relacionado com qualquer desvio de níveis e/ou formas originais, que possa ocorrer com a tensão e/ou corrente. O tema mais abordado atualmente, por parte dos setores de QEE, é a distorção harmônica, a qual é o enfoque deste trabalho.

## 1.2 Objetivos e Organização do Trabalho

As usinas de etanol, para atender suas metas de produções, necessitam de um eficiente controle de velocidade dos motores. Para isso são utilizados inversores de frequência que geralmente são aplicados no acionamento de esteiras, bombas, moendas, pontes rolantes, guindastes e outros. Como colocado posteriormente no subtópico 2.2.2, os inversores são grandes geradores de conteúdo harmônico e, nestas usinas, são as principais cargas poluidoras.

De modo sucinto, além dos inversores, as usinas contêm em altas quantidades, equipamentos eletrônicos como fontes chaveadas, reatores eletrônicos, computadores, instrumentos e outros, que constituem na sua maioria uma carga não linear. Logo, estão presentes no sistema dessas usinas, grandes injetores de correntes harmônicas, as quais provocam distorções harmônicas de tensão.

Surge então a preocupação das usinas em relação à QEE, na tentativa de reduzir os grandes efeitos causados pelas harmônicas, porque apesar de gerarem a própria energia, também cogeram. Assim, fica evidente que os efeitos e perturbações podem afetar, além do sistema elétrico interno, os sistemas de transmissão oriundos das usinas.

O objetivo deste trabalho é realizar uma análise de distorção harmônica na usina de etanol e energia Raízen – Unidade Jataí, a fim de explicitar e quantificar as principais influências harmônicas sobre suas instalações. O trabalho foi organizado basicamente em cinco momentos:

- **Primeiro:** abordar conceitos teóricos a respeito das distorções harmônicas, os quais nos possibilitam ter uma visão analítica sobre o tema em discussão;
- **Segundo:** apresentar e comentar normas e indicadores que serão utilizados no decorrer desta análise;
- **Terceiro:** descrever o sistema elétrico em estudo, selecionando pontos de medição, de acordo com as necessidades e conveniências técnicas, onde serão coletados os dados através do analisador de energia;
- **Quarto:** apresentar e discutir os dados obtidos nos pontos de medição, debatendo e apontando as principais influências das distorções sobre o sistema elétrico em estudo;

- **Quinto:** sugerir filtros para amenizar os impactos negativos das distorções sobre as instalações e equipamentos.

## **2 ABORDAGEM TEÓRICA**

### **2.1 Distorção Harmônica**

Chamamos por distorção todo erro agregado a um sinal alternado quando este é submetido a qualquer tipo de condicionamento, podendo ser uma amplificação, retificação, chaveamento, etc. Após o processamento, o sinal resultante é a soma do sinal de entrada com as componentes de erro que podem ser lineares, quando não apresentam frequências além da fundamental, ou não lineares conhecidas como distorções harmônicas [1].

A distorção se classifica não linear ou harmônica quando se manifesta em um sinal periódico, gerando distorções semelhantes a cada ciclo. Nessas condições, a forma de onda, seja de corrente ou tensão, passa a conter em seu espectro além da frequência fundamental, outras frequências que são múltiplos inteiros da fundamental [2].

Essa distorção tem como principal fonte as cargas não lineares que em grandes números podem prejudicar a QEE, trazendo diversos problemas para os sistemas elétricos.

### **2.2 Cargas Não Lineares**

Compreende-se por carga não linear o equipamento que ao ser alimentado por uma tensão com forma de onda senoidal perfeita, produz uma corrente resultante de forma de onda não senoidal, constituindo uma relação não linear entre tensão e corrente [3].

Antigamente, as distorções harmônicas nos sistemas elétricos eram de baixa relevância pelo fato de estarem relacionadas somente a transformadores e máquinas rotativas, por exemplo, os geradores elétricos em alguns casos, por conveniência prática e econômica, eram construídos de modo a gerar uma onda senoidal imperfeita, caracterizando uma fonte de harmônicos. Já os transformadores eram os maiores causadores de harmônicos por sua corrente de magnetização [4].

É importante observar que esses equipamentos trazem uma relação não linear quando projetados ou operados em condições anormais, do contrário são irrelevantes como geradores de harmônicos.

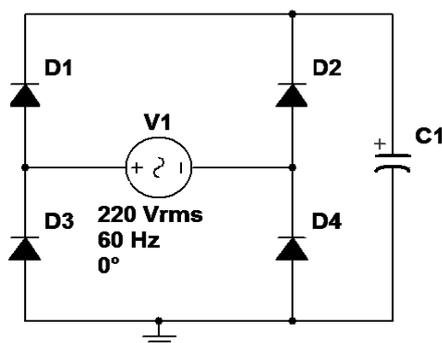
Atualmente os principais equipamentos injetores de correntes harmônicas são as cargas não lineares compostas por semicondutores, as quais deformam a onda de corrente gerando uma relação não linear. Televisores, micro-ondas, computadores, reatores eletrônicos, fontes chaveadas, inversores de frequência e conversores, são alguns dos inúmeros equipamentos geradores de harmônicos encontrados nas residências e indústrias. Esses constituem uma pequena parcela da enorme lista de cargas poluentes que trazem em sua construção interna diodos, tiristores e transistores.

Em funcionamento, os elementos semicondutores, como tiristores e transistores, comutam entre estado de condução e interrupção em altíssimas frequências, provocando grandes cortes na forma de onda da corrente interrompendo por sua vez o ciclo linear

da alimentação. Segue abaixo uma abordagem sobre alguns circuitos poluidores comumente encontrados, os conversores estáticos (retificadores e inversores).

### **2.2.1 Retificador Monofásico de Onda Completa Com Filtro Capacitivo**

Em um sistema elétrico monofásico é possível encontrar, praticamente em todos os eletroeletrônicos, um circuito retificador na entrada. A tipologia mais utilizada para as baixas potências é o retificador monofásico de onda completa (RMMO) com filtro capacitivo, representado na Figura 2.1. Esse retificador tem uma corrente de entrada com alta distorção harmônica [2].



**Figura 2.1 – Retificador monofásico de onda completa com filtro capacitivo**

Notamos abaixo, na Figura 2.2, obtida por simulação no software Multisim, que a corrente de entrada do retificador é impulsiva e foge totalmente da forma senoidal. Ao percorrer a linha de alimentação, a corrente distorcida exigida pelo retificador, provocará uma deformação na onda de tensão, através da queda de tensão não linear. Assim, serão constatadas taxas de distorção de tensão e corrente.

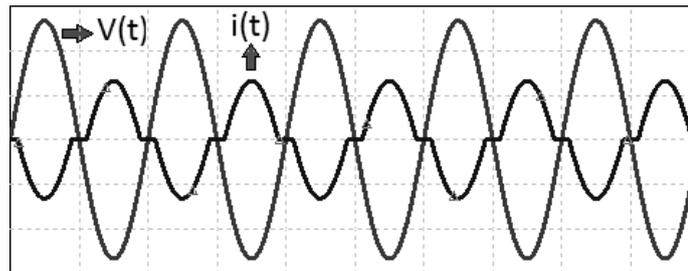


Figura 2.2 – Corrente e tensão na entrada do retificador

### 2.2.2 Inversor de Frequência

Os inversores são muito utilizados na indústria por fornecer um eficiente controle de velocidade para os motores de corrente alternada. Seu invento foi considerado um dos maiores avanços dos tempos atuais, principalmente por ser muito eficaz em termos de acionamentos. Seu circuito básico, Figura 2.3, é formado por um retificador de entrada (conversor CA-CC) e um inversor na saída (conversor CC-CA) que fornece ao motor acionado, uma tensão senoidal distorcida com frequência controlada.

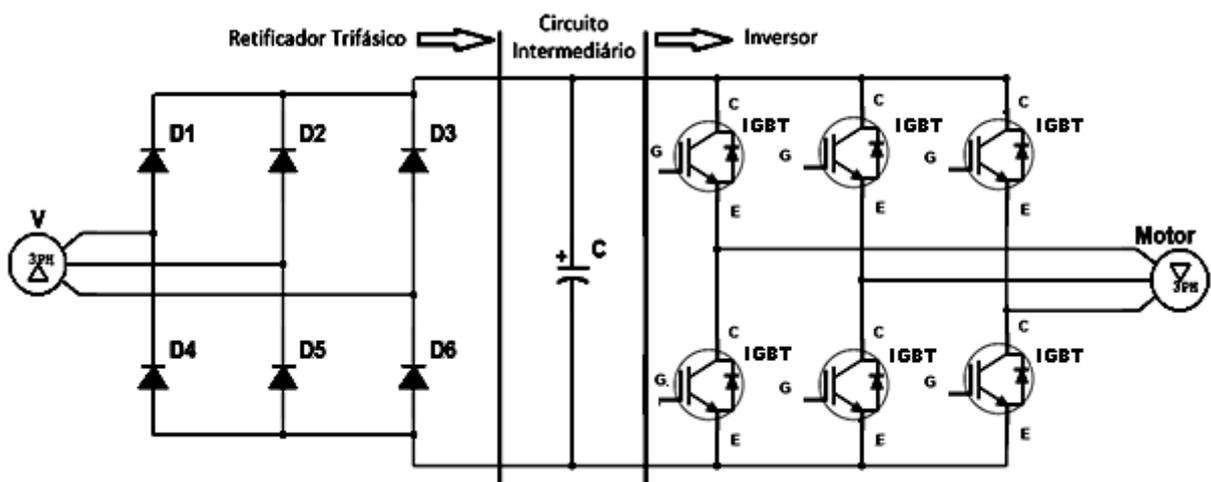
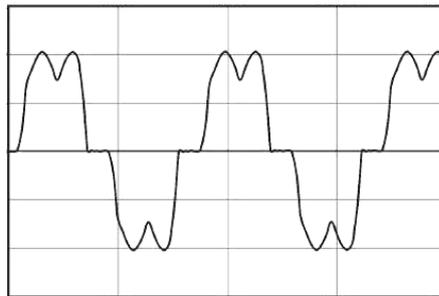


Figura 2.3 – Circuito Básico do Inversor de Frequência

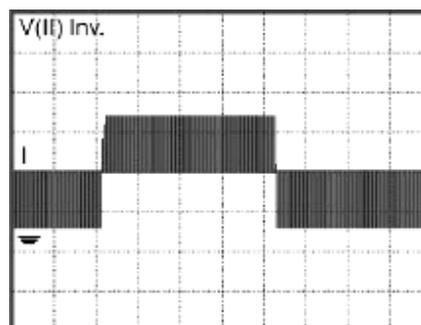
Os inversores têm sido desenvolvidos com retificadores de entrada a 6, 12, 18, 24 e até mais pulsos. Os de seis pulsos são os mais usuais, sendo eles geradores de elevadas correntes harmônicas e, se a forma de onda for decomposta em série de Fourier, veremos que no caso desses inversores, as componentes de 5ª e 7ª ordem são as mais prejudiciais. Segundo [5], existem algumas maneiras de reduzir o conteúdo harmônico gerado pelos inversores, que são basicamente a instalação de uma indutância no link DC (circuito intermediário) e/ou a instalação de uma reatância de rede na entrada do inversor. Essas medidas amenizam as o conteúdo harmônico gerado pelos inversores, porém, sobretudo, devem ser estudadas e instaladas particularmente para cada tipo de caso.

A Figura 2.4 apresenta a corrente harmônica injetada pelos inversores com retificadores de entrada a seis pulsos. Nota-se que a forma de onda foge muito da senoidal, o que implica em grandes índices de distorção.



**Figura 2.4 – Corrente de entrada do inversor de frequência a seis pulsos**

Os problemas harmônicos dos inversores não se limitam apenas na poluição do sistema elétrico onde ficam acoplados, eles também agem na interação inversor - motor. Conforme [5] a tensão de saída do inversor é PWM e chega aos terminais com alta deformação, como exhibe a Figura 2.5. Isso acarreta uma série de problemas ao motor.



**Figura 2.5 – Tensão nos terminais do motor acionado por inversor de frequência**

A Tabela 2.1, retirada de [4], expõe, em valores percentuais, as amplitudes correspondentes a cada componente harmônica de tensão e corrente nos terminais de um motor acionado por inversor de frequência a 6 pulsos.

Grandezas	Ordem Harmônica (h)								
	1 <sup>a</sup>	5 <sup>a</sup>	7 <sup>a</sup>	11 <sup>a</sup>	13 <sup>a</sup>	17 <sup>a</sup>	19 <sup>a</sup>	23 <sup>a</sup>	25 <sup>a</sup>
Vf (%)	100	20	14,3	9,1	7,7	5,9	5,3	4,3	4
If (%)	100	40	2	0,8	6,6	0,4	0,3	0,2	0,2

**Tabela 2.1 – Amplitude percentual dos harmônicos de tensão e corrente, todas em relação a fundamental**

### 2.3 Séries de Fourier

O teorema de Fourier conclui que qualquer função periódica, com forma de onda distorcida, pode ser definida pela soma das expressões que a compõe. As componentes da onda não senoidal são: primeiro, uma onda senoidal perfeita com frequência fundamental; segundo, são ondas senoidais com frequência múltipla da fundamental; e, por ultimo, uma possível componente contínua [6].

Para que funções periódicas possam ser decompostas em séries (soma das componentes), como descrito anteriormente, a função deve dispor de números finitos para positivos e negativos, para valor médio por período e para o número de descontinuidades por período [3]. Seguida as especificações, temos que uma função periódica qualquer  $f(t)$  pode ser decomposta pela eq.(2.1) em uma série de Fourier.

$$f(t) = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \left[ a_h \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot t}{T}\right) + b_h \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot t}{T}\right) \right] \quad (2.1)$$

Conforme [3], após a decomposição de  $f(t)$  em uma série de Fourier, o vetor da componente harmônica é representado na eq.(2.2), onde a amplitude ( $A_h$ ) se dá pela eq.(2.3) e a defasagem ( $\theta_h$ ) pela eq.(2.4), respectivamente:

$$\hat{A}_h = A_h \angle \theta_h = a_h + j \cdot b_h \quad (2.2)$$

$$A_h = \sqrt{a_h^2 + b_h^2} \quad (2.3)$$

$$\theta_h = \tan^{-1} \left( \frac{b_h}{a_h} \right) \quad (2.4)$$

Quase sempre a corrente distorcida, produzida pelos semicondutores, permanece periódica na frequência fundamental, assim, ela pode ser decomposta em uma série de Fourier. Por esse método, a corrente será decomposta em uma série de ondas senoidais e, em alguns casos, surgirão correntes de sub-harmônico e de inter-harmônico, as quais possuem frequência diferente da fundamental e diferente das múltiplas inteiro da fundamental. Nesse trabalho serão desprezadas as componentes de sub-harmônico e inter-harmônico, analisando somente as correntes harmônicas. A Figura 2.6, obtida em simulação de Matlab®, exemplifica uma decomposição em série de Fourier, em que são somadas três ondas senoidais, com amplitudes e frequências diferentes, formando uma onda distorcida resultante.

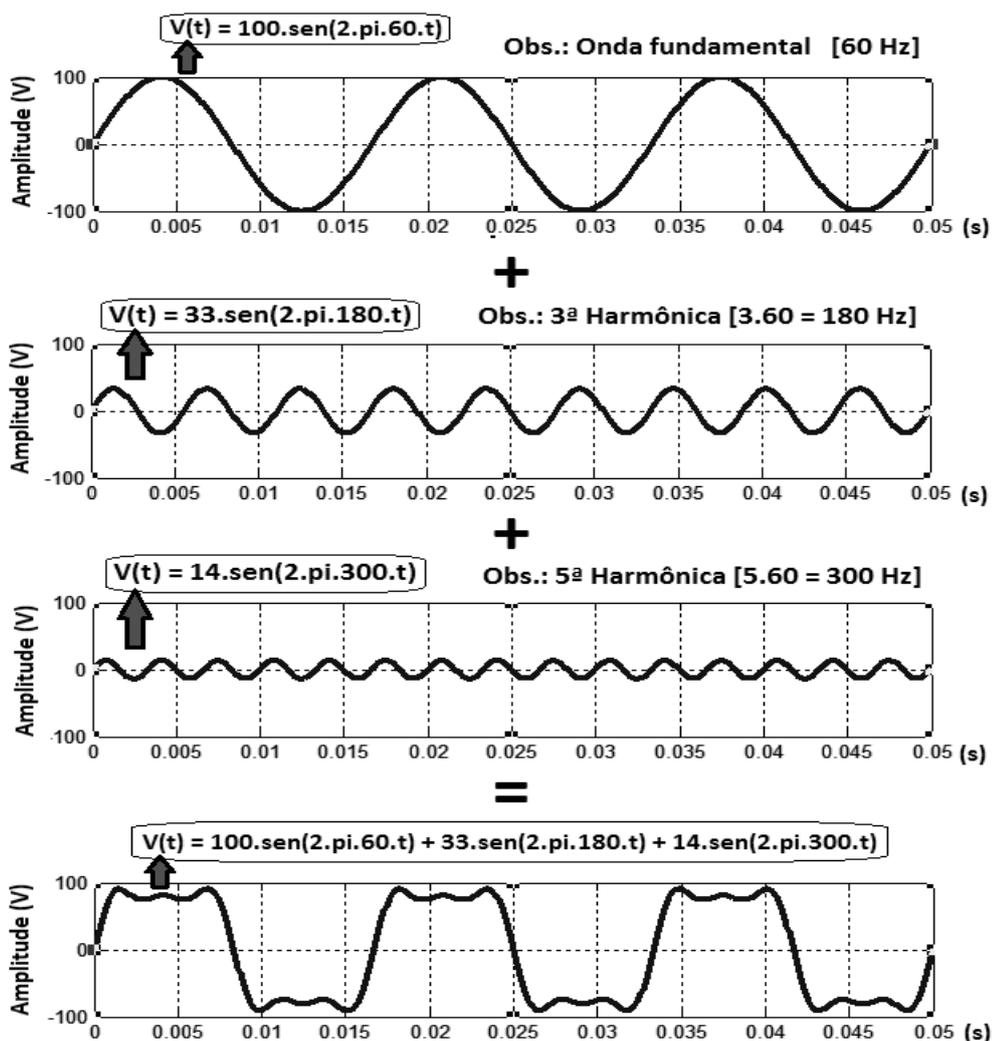


Figura 2.6 – Exemplo de decomposição por Série de Fourier

Após a decomposição de uma onda distorcida em série de Fourier, as componentes (funções individuais) que a compõe, são representadas em espectros harmônicos, nos informando amplitude e frequência de cada componente.

## **2.4 Espectros Harmônicos**

O espectro é uma representação gráfica em forma de histograma, o qual traz a amplitude em função da frequência para cada componente da onda analisada [1].

Sabemos que cada carga não linear produz uma corrente distorcida própria, com frequências e amplitudes diferentes. De acordo com [1], o espectro harmônico quantifica graficamente as amplitudes e frequências de cada harmônico. Esses valores são expressos em forma de barras, sendo cada barra uma harmônica. Geralmente, são consideradas em análises espectrais, as harmônicas com até 40ª ordem, visto que as demais têm amplitudes e efeitos insignificantes para o sistema.

Para as análises de QEE os espectros harmônicos são de grande relevância, pois permitem visualizar e analisar quais são as harmônicas mais influentes no sistema. Os aparelhos mais indicados para obtenção dos espectros harmônicos são os analisadores de energia elétrica, por exemplo, o Fluke 434/435.

Através dos histogramas, nota-se que, as ondas simétricas geram componentes harmônicos de ordem ímpar, e, as ondas assimétricas de ordem par. A Figura 2.7 traz uma análise espectral de uma onda triangular simétrica (a) e seu espectro harmônico (b) contendo apenas componentes ímpares.

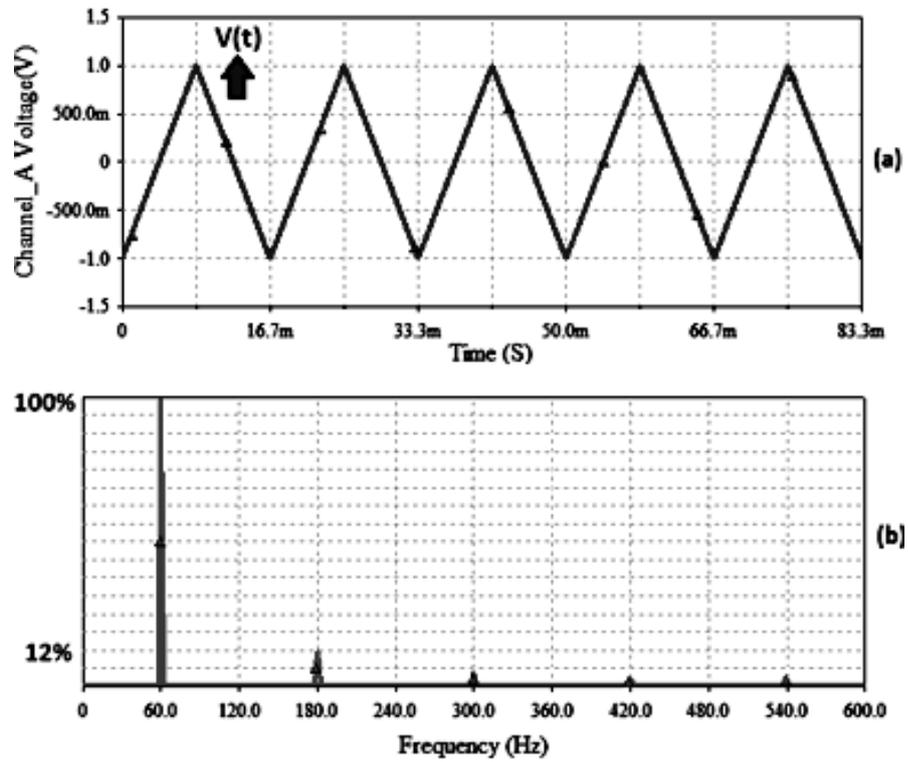


Figura 2.7 – Tensão triangular simétrica (a) e espectro harmônico (b)

A Figura 2.8 exibe uma análise espectral sobre um RMMO com carga resistiva. A corrente produzida (a) é assimétrica e seu espectro harmônico (b) confirma a existência apenas de componentes de ordem par.

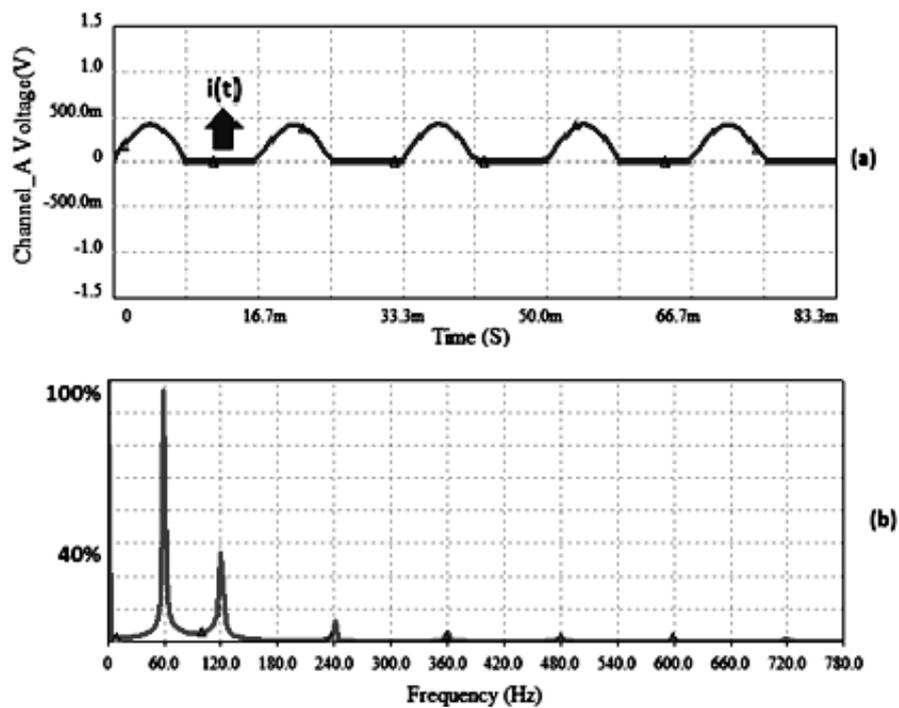


Figura 2.8 – Corrente do RMMO com carga resistiva (a) e espectro harmônico (b)

### 3 HARMÔNICOS NO SISTEMA DE ENERGIA

De modo abrangente, as distorções harmônicas em elevadas amplitudes prejudicam todos os sistemas de energia, implicando em danos aos sistemas de transmissão e distribuição e as instalações elétricas dos consumidores.

Como dito no subitem 2.2, a injeção de correntes harmônicas nos sistemas elétricos, se dá pela alimentação de cargas não lineares. No entanto, a maior preocupação por parte dos setores de QEE refere-se à distorção da tensão, a qual surge por meio da queda de tensão não linear, proveniente da interação entre impedâncias de linha e correntes harmônicas. Os efeitos da tensão distorcida podem obter grandes magnitudes, chegando a atingir extensos circuitos, como bairros e cidades, provocando diversos efeitos nocivos.

#### 3.1 Comportamento Harmônico nos Sistemas Trifásicos Equilibrados

Nesses circuitos o comportamento harmônico é sequencial, sempre na ordem positiva, negativa e zero. A Figura 3.1 apresenta o diagrama fasorial, o qual influencia no sequencial harmônico. Em seguida, a Tabela 3.1 apresenta as tensões trifásicas decompostas em série de Fourier e a sequência de cada componente harmônica.

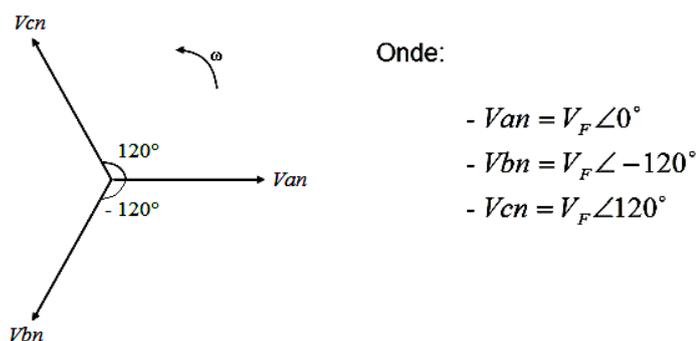


Figura 3.1 – Diagrama fasorial trifásico.

<b>Fase A</b>	$V_a = V_1 \cos(\omega_1 t) +$	$V_2 \cos(2 \omega_1 t) +$	$V_3 \cos(3 \omega_1 t) +$	$V_4 \cos(4 \omega_1 t) +$	...
<b>Fase B</b>	$V_b = V_1 \cos(\omega_1 t - 120^\circ) +$	$V_2 \cos(2 \omega_1 t - 240^\circ) +$	$V_3 \cos(3 \omega_1 t - 360^\circ) +$	$V_4 \cos(4 \omega_1 t - 480^\circ) +$	...
<b>Fase C</b>	$V_c = V_1 \cos(\omega_1 t + 120^\circ) +$	$V_2 \cos(2 \omega_1 t + 240^\circ) +$	$V_3 \cos(3 \omega_1 t + 360^\circ) +$	$V_4 \cos(4 \omega_1 t + 480^\circ) +$	...
	↓	↓	↓	↓	
<b>Ordem Harmônica</b>	1 <sup>a</sup>	2 <sup>a</sup>	3 <sup>a</sup>	4 <sup>a</sup>	...
<b>Frequência (Hz)</b>	60	2.60 = 120	3.60 = 180	4.60 = 240	...
<b>Sequência</b>	Positiva	Negativa	Zero	Positiva	...

**Tabela 3.1 – Tensões de fase decompostas em série de Fourier**

Os efeitos dos harmônicos estão diretamente relacionados à sequência das componentes harmônicas. O tipo de sequência, em uma análise mais profunda, dita quais ordens harmônicas têm maiores influências nocivas ao sistema. Muito importante lembrar que cada componente, seja positiva, negativa ou zero, provoca um efeito diferente no circuito.

### 3.2 Efeitos dos Harmônicos

Os efeitos causados nos circuitos elétricos, devido deformações na tensão e corrente, podem ser os mais variados. Destaca-se entre outros, os efeitos de maiores danos, como:

- Erros em instrumentos de medição, como por exemplo, os medidores de energia elétrica;
- Má atuação de dispositivos de proteção, como relés, disjuntores e fusíveis;
- Redução da vida útil dos capacitores e motores, podendo levar a queima;
- Aumento das perdas em cabos, transformadores e motores;
- Mau funcionamento de equipamentos sensíveis;
- Sobreaquecimento do condutor neutro.

Nos próximos subitens serão abordados casos relativos a alguns tipos de circuitos e equipamentos.

### **3.2.1 Efeitos nos Sistemas de Transmissão e Distribuição**

Para esses sistemas, as correntes harmônicas são causadoras de grandes prejuízos. Elas sobrecarregam os transformadores amarrados ao circuito, diminuindo sua vida útil, sejam eles elevadores, abaixadores ou de distribuição. Nas subestações, os bancos de capacitores podem entrar em ressonância com os harmônicos, levando a queima dos mesmos. Os dispositivos de proteção como disjuntores, relés e fusíveis, podem atuar de maneira indevida, levando ao seccionamento de grandes circuitos. As linhas de transmissão e distribuição podem sofrer aquecimento devido ao aumento das perdas por efeito Skin.

Nos sistemas de Transmissão, segundo [3], os grandes índices de distorção harmônica podem limitar a transmissão de potência para o SIN. As correntes distorcidas sobrecarregam os filtros de harmônicos conectados ao circuito de transmissão, restringindo o fluxo de potência principalmente nas transmissões em corrente contínua.

Nas redes de distribuição, a circulação de harmônicos gera grande preocupação, visto que a tensão distorcida nesse circuito afeta todos os consumidores conectados. Os problemas nesse sistema são similares ao de transmissão, sendo que a distribuição de potência fica limitada, devido, principalmente, à sobrecarga dos transformadores de distribuição. Particularmente, os circuitos secundários de distribuição, sofrem grande aquecimento nos neutros devido as componentes harmônicas de sequência zero.

### **3.2.2 Efeitos nas Instalações Elétricas dos Consumidores**

Simplificadamente, os consumidores são divididos em dois grupos, os residenciais e industriais. Nas residências, geralmente, existem apenas cargas monofásicas e, nas indústrias, cargas monofásicas e trifásicas. Os problemas existentes no primeiro grupo, também são encontrados no segundo que, além desses, apresentam outros inúmeros prejuízos advindos das harmônicas.

Um dos problemas comum aos dois consumidores é o comprometimento da precisão dos medidores de energia, provocando alterações errôneas nas contas de energia elétrica. Outro problema é o mau dimensionamento do condutor neutro, feito no projeto. Normalmente não são considerados os efeitos

harmônicos, assim, os cabos são vítimas de sobreaquecimento, visto que as harmônicas de sequência zero levam correntes ao neutro.

Nas indústrias, as altas taxas de harmônicos significam grandes impactos econômicos, diminuindo a produção e danificando equipamentos. Diferentemente da maioria das residências, os circuitos elétricos apresentam em suas plantas, inúmeras máquinas elétricas, transformadores, banco de capacitores e instrumentos, os quais sofrem muitas influências harmônicas.

### **3.2.3 Máquinas Elétricas**

Os motores e geradores sofrem bastante com a presença de distorção harmônica. Segundo [4], as tensões distorcidas nos terminais de ligação das máquinas dão origem a fluxos harmônicos, os quais induzem correntes harmônicas no rotor. Esses fatores levam as máquinas a perda de rendimento, aumento da temperatura, vibração e barulho.

Dentre os problemas, o de maior prejuízo é o aumento das perdas no motor, acrescidas pelas perdas no cobre e no ferro. Não distante, um efeito nocivo e muitas vezes de difícil identificação é o surgimento de torque pulsante, ou seja, o torque contrário que diminui o rendimento. Segundo [4], diz que esse torque é proporcional a corrente harmônica. Exemplificando, uma corrente harmônica de amplitude 5% da fundamental produz um torque pulsante com 5% do nominal. A Tabela 3.2, retirada de [1] traz a associação das sequências harmônicas aos efeitos causados nos motores.

<b>Sequência</b>	<b>Rotação</b>	<b>Efeito</b>
Positiva	Direta	Sobreaquecimento
Negativa	Inversa	Sobreaquecimento e menor rendimento
Zero	-	Somam-se ao condutor neutro

**Tabela 3.2 – Associação das sequências harmônicas aos efeitos nos motores**

Em sua dissertação, [4] cita o estudo, feito pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico) em relação aos isolamentos dos motores elétricos, que são colocados a testes com harmônicos e desbalanceamentos. O estudo conclui que as distorções harmônicas diminuem o tempo de vida útil das isolações. Em um dos casos, foi utilizada uma tensão de alimentação com distorção total de

7,4%, com desbalanceamento de fases de 3%, a redução da vida útil do isolamento dessa máquina foi de 24,3%.

Todos os efeitos sofridos pelos motores surgem por serem alimentados com tensão distorcida, logo, os motores acionados por inversor de frequência compartilham dos mesmos problemas. Como dito no subitem 2.2.2, o inversor fornece uma tensão PWM repleta de distorções, prejudicando o isolamento, aumentando as perdas e diminuindo o rendimento dos motores.

### **3.2.4 Transformadores**

Segundo [4], ultimamente os transformadores têm operado com tensões e correntes distorcidas, trabalhando com grandezas fora dos padrões. Em decorrência surgem vários problemas que vão de um simples aumento de ruído e vibração a grandes perdas nos enrolamentos, provocando sobreaquecimento e diminuição da vida útil.

Conforme [1], os aumentos das perdas no ferro têm relação com harmônicos de tensão, já as perdas no cobre com os harmônicos de corrente. Com a circulação de correntes de altas frequências nos enrolamentos, a temperatura sobe por meio do efeito pelicular, sendo que, quanto maior a frequência da corrente, menor a seção real de condução e maior a perda.

As componentes harmônicas de sequência zero, quando presentes em um transformador amarrado em triângulo, circulam do circulam a malha fechada provocando aquecimento. Já no transformador estrela, mesmo com sistema equilibrado, elas vão ao neutro [1].

Em estudo, citado por [4], foi exposto um gráfico correlacionando a magnitude das distorções harmônicas com a vida útil dos transformadores. As Figuras 3.2 e 3.3 fornecem a visualização da vida útil dos transformadores em função das harmônicas de corrente e tensão, possibilitando quantificar os prejuízos.

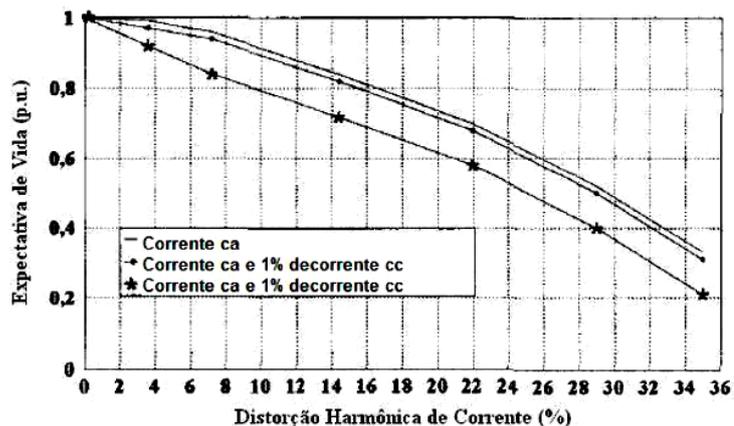


Figura 3.2 – Vida útil dos transformadores em função da distorção da corrente

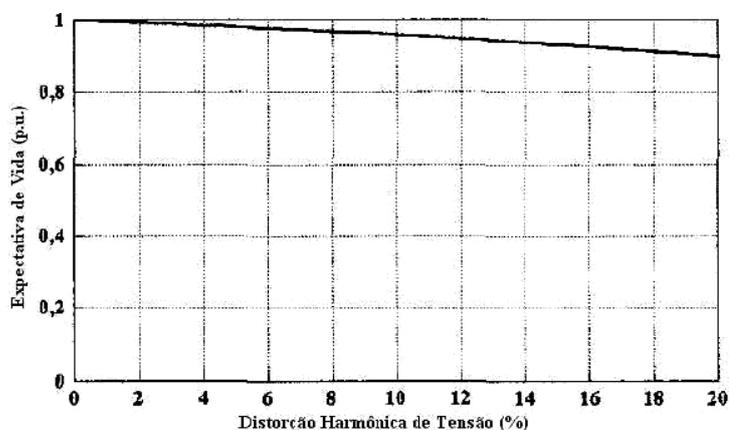


Figura 3.3 – Vida útil dos transformadores em função da distorção da tensão

Contudo, fica clara a relevância de se monitorar os sistemas elétricos com relação às injeções de correntes harmônicas. Alguns circuitos podem conter índices de distorção harmônica de até 30%, levando rapidamente os transformadores a deterioração.

## 4 INDICADORES E NORMAS UTILIZADAS

Este capítulo aborda os indicadores e as normas utilizadas nos próximos capítulos. Durante a análise realizada neste trabalho, os indicadores nos apresentam a quantificação do conteúdo harmônico, permitindo tirar conclusões a respeito da influência harmônica no sistema e as normas determinam os níveis máximos para estes indicadores.

### 4.1 Indicadores

Os indicadores são índices calculados com finalidade de quantificar as distorções harmônicas, possibilitando analisar como e quanto o conteúdo harmônico influencia no sistema em questão. Existem vários indicadores, os mais comuns, utilizados neste trabalho, são o DHT (distorção harmônica total) e o DHI (distorção harmônica individual).

#### 4.1.1 *Distorção Harmônica Total (DHT)*

O DHT é um dos principais medidores de QEE. Quantifica o grau de distorção de uma onda em relação a fundamental. Este indicador, utilizado na maioria das fontes e normas, apresenta algumas vantagens e desvantagens:

- **Vantagens:**
  - Pode ser calculado facilmente;
  - É o índice mais comum na área de QEE;
  - Possibilita uma rápida visão do grau de distorção de um sistema.
- **Desvantagens:**
  - A informação do espectro é desprezada;
  - Não aborda individualmente cada frequência das componentes.

O fato de tratar todas as frequências igualmente deixa este indicador incompleto, não permitindo uma análise profunda da influência harmônica sobre o sistema.

Utilizando as equações 4.1 e 4.2, pode-se calcular o DHT para tensão e corrente, respectivamente:

$$DHTv = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n \text{ máx}} Vn^2}}{V1} \times 100 \quad (4.1)$$

$$DHTi = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n \text{ máx}} In^2}}{I1} \times 100 \quad (4.2)$$

Sendo:

$n$  = Número de ordem harmônica (Inteiro);

$Vn$  = Valor eficaz das componentes harmônicas de tensão;

$V1$  = Valor eficaz da tensão fundamental;

$In$  = Valor eficaz das componentes Harmônicas de corrente;

$I1$  = Valor eficaz da corrente fundamental.

#### 4.1.2 Distorção Harmônica Individual (DHI)

Com este indicador é possível calcular a porcentagem da componente harmônica de ordem  $n$  em relação à fundamental. As equações 4.3 e 4.4 apresentam como pode ser encontrado o DHlv (Distorção Harmônica Individual de Tensão) e o DHli (Distorção Harmônica Individual de Corrente), respectivamente:

$$DHlv = \frac{Vn}{V1} \times 100 \quad (4.3)$$

$$DHli = \frac{In}{I1} \times 100 \quad (4.4)$$

Sendo:

$n$  = Número de ordem harmônica (Inteiro);

$Vn$  = Valor eficaz das componentes harmônicas de tensão;

$V1$  = Valor eficaz da tensão fundamental;

$In$  = Valor eficaz das componentes Harmônicas de corrente;

$I1$  = Valor eficaz da corrente fundamental.

## 4.2 Normas

Os países industrializados são os maiores alimentadores de cargas não lineares, sofrendo por isso recorrentes problemas com qualidade de energia elétrica e, esta margem de problemas, tende sempre a aumentar no decorrer dos anos.

Como medida mitigadora desse aumento desordenado da poluição harmônica nas redes, organizações como IEC (International Electrotechnical Commission) e IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) tem criado normas determinando limites para distorções harmônicas nos sistemas de energia.

O IEC é um órgão que estabelece padrões internacionais. Com relação as harmônicas, são definidos valores máximos de distorção harmônica para equipamentos individuais. Nos países onde esta norma é vigente, os equipamentos devem obedecer à risca, os limites estabelecidos [4].

O IEEE é a maior sociedade profissional e técnica existente. Foi criado nos Estados Unidos, em 1884 e, hoje, é constituído por inúmeros profissionais de todo o mundo. Estabelece limites de injeção harmônica, os quais servem de referência para todos os países.

No Brasil, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) criou recomendações definindo valores que servem apenas como referência. Esses valores são encontrados no Módulo 8 do Procedimento de Distribuição, o qual trata de QEE.

### 4.2.1 Norma IEC 61000

As normas IEC da serie 61000 dizem respeito a compatibilidade eletromagnética. São divididas em várias pautas, sendo as principais:

- **IEC 61000-2-2 [4]:** Esta pauta apresenta níveis aceitáveis para harmônicos de tensão em redes de baixa tensão monofásica e trifásica. A Tabela 4.1 apresenta os limites para harmônicas individuais de tensão.

Harmônicos Ímpares não Múltiplos de 3		Harmônicos Ímpares Múltiplos de 3		Harmônicos Pares	
Ordem (N)	Tensão Harmônica (%)	Ordem (N)	Tensão Harmônica (%)	Ordem (N)	Tensão Harmônica (%)
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				
25	1,5				
>25	$0,2+0,5 \times 25/N$				

**Tabela 4.1 – Níveis para distorção harmônica individual de tensão em redes públicas de baixa tensão**

- **IEC 61000-2-4 [1]:** Nesta norma estão definidos níveis de distorção harmônica total de tensão para redes industriais de acordo com os diferentes ambientes eletromagnéticos possíveis. As classes são:

- **Classe 1:** Representa as redes com maior sensibilidade, portanto tem menores tolerâncias com níveis de distorção. Aplica-se para equipamentos de instrumentação, laboratórios, dentre outros;

- **Classe 2:** Aplica-se ao pontos de ligação comum à rede pública e também em pontos comum de ligação internas nos setores industriais;

- **Classe 3:** Esta classe encaixa os pontos de ligação interna de uma indústria. Os sistemas que se enquadram nesta classe, devem ter a maioria de suas cargas definidas como não lineares, ou causadoras de poluição harmônica.

A Tabela 4.2 apresenta os níveis de DHT de tensão para cada classe.

Distorção Harmônica Total	Classe 1	Classe 2	Classe 3
	5%	8%	10%

**Tabela 4.2 – Níveis de distorção harmônica total de tensão para redes industriais**

- **IEC 61000-3-2 e IEC 61000-3-4 [4]:** Complementando as normas anteriores, estas duas normas determinam valores máximos de correntes harmônicas dos equipamentos alimentadas pela rede de distribuição em baixa

tensão. Tem a finalidade de assegurar que os limites estabelecidos pela norma IEC 61000-2-2 para sistemas públicos de energia.

A norma IEC 61000-3-2 especifica limites para equipamentos com até 16A por fase. A IEC 61000-3-4 aborda os equipamentos com amperagem maior que 16A e menor que 75A.

Para a norma IEC 61000-3-2, os valores são determinados de acordo com o tipo de equipamento, sendo esses classificados em:

- **Classe A:** Equipamentos trifásicos equilibrados e qualquer outro equipamento que não seja da Classe B, C e D;
- **Classe B:** Equipamentos portáteis;
- **Classe C:** Equipamentos de iluminação;
- **Classe D:** Equipamentos que exigem uma corrente de entrada com formato irregular e tenha potência de até 600 W.

Os limites de correntes harmônicas estabelecidos pela norma IEC 61000-3-2 para as Classes A, C e D estão apresentados nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, respectivamente. Os valores limitantes para a Classe B de equipamentos são iguais os valores da Tabela 3.3 multiplicados por 1,5.

Ordem (N)	Máxima Corrente (A)	Ordem (N)	Máxima Corrente (A)
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	8-40	0,23x8/N
11	0,33		
13	0,21		
15-39	0,15x15/N		

**Tabela 4.3 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos Classe A**

Ordem (N)	Máxima Corrente (%)
2	2
3	30% x fator de potência
5	10
7	7
9	5
11-39	3
Obs.: Percentual em relação a corrente	

**Tabela 4.4 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos Classe C**

Ordem (N)	Máxima Corrente	
	Por Watt (mA/W)	(A)
2	3,40	2,3
5	1,90	1,14
7	1,00	0,77
9	0,50	0,40
11	0,35	0,33
13	0,30	0,21
15-39	3,86/N	2,25/N

**Tabela 4.5 – Limites de corrente harmônicas para equipamentos Classe D**

A Tabela 4.6 apresenta os limites definidos para equipamentos de maior potência,  $16A < I_n < 75^a$ .

Ordem (N)	Máxima Corrente (%)	Ordem (N)	Máxima Corrente (%)
3	21,6	19	1,1
5	10,7	21	0,6
7	7,2	23	0,9
9	3,8	25	0,8
11	3,1	27	0,6
13	2,0	29	0,7
15	0,7	31	0,7
17	1,2	33	0,6

**Tabela 4.6 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos com correntes entre 16 e 75 A**

#### **4.2.2 Recomendação IEEE std 519-1992 [4]:**

Esta recomendação se atem em atribuir valores máximos de distorção harmônica de tensão fornecida pela concessionária e de corrente de entrada do consumidor, ambas medidas no PAC (ponto de acoplamento do consumidor). Portanto, este padrão não se aplica a cargas individuais, apenas a para taxas que englobem instalações no seu todo.

A Tabela 4.7 traz os limites (em percentual da fundamental) para as harmônicas de corrente em sistemas com tensão menor que 69 kV. Para as componentes de ordem par, os valores são os mesmos da Tabela 4.7, multiplicados por 0,25.

Isc/IL	N<11	11≤N<17	17≤N<23	23≤N<35	35≤N	TDH
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 - 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 -100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 - 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

**Tabela 4.7 – Máximo limite para componentes harmônicas ímpares em sistemas de distribuição em geral de 120 V até 69 kV**

A relação  $I_{sc}/I_L$  dis respeito a corrente de curto-circuito no PAC, dividida pela média das correntes máximas de demanda, sendo necessário observar os últimos 12 meses.

O maior diferencial da IEEE é que ela atribui a concessionária de energia, a responsabilidade de manter seu sistema dentro dos limites recomendados e, não obstante, designa ao consumidor a responsabilidade de limitar sua interferência não linear no sistema de distribuição.

Esta recomendação também traz o limite máximo de poluição harmônica de tensão de acordo com o nível de tensão do PAC, como mostra a Tabela 4.8.

Tensão no PAC	Harmônicas Individuais	TDHv
Tensão ≤ 69 kV	3,0 %	5,0 %
69 kV >Tensão ≤ 161 kV	1,5 %	2,5 %
> 161 kV	1,0 %	1,5 %

**Tabela 4.8 – Limites percentuais de distorção da tensão de alimentação em relação a fundamental**

#### **4.2.3 PRODIST – Módulo 8 [7]**

Como recomendação a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), no documento PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Nacional), criou e estabeleceu os procedimentos relativos a QEE, abordando qualidade do produto e do serviço de fornecimento. Em relação a qualidade do produto, o documento define valores de referência para as distorções harmônicas de tensão.

As Tabelas 4.9 e 4.10 trazem os valores de DHTv e DHI de tensão que devem ser levados em conta, em termos de QEE, no planejamento de sistemas elétricos.

Tensão Nominal do Barramento	DHTv (%)
$V_n \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_n \leq 230\text{kV}$	3

Tabela 4.9 – Valor de referência global para distorção harmônica total de tensão

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

Tabela 4.10 – Valor global de referência para distorção harmônica individual de tensão

## 5 DESCRIÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO INDUSTRIAL

### 5.1 Descrição Geral

O sistema elétrico em análise, Anexo I, tem grande complexidade de arranjo, abrangendo desde a parte de geração até a distribuição de energia por todos os setores do complexo agroindustrial.

Dentro do complexo agroindustrial existem várias divisões de áreas de acordo com as funcionalidades dos setores, ou seja, dentro da indústria existem vários setores com denominações diferentes, todos alimentados pelo mesmo sistema elétrico de geração interna da usina.

Simplificadamente, o sistema elétrico inicia no setor industrial denominado Casa de Força (Área 85), onde estão operando os três grupos geradores constituídos pelas turbinas Siemens ® e os geradores Weg ®. A potência de cada gerador é de 35 MW e a tensão gerada é de 13,8 kV.

Os geradores alimentam o barramento de uma subestação, dentro da Casa de Força, denominada SE Distribuição 13,8 kV. Desse barramento, seguem ramificações de distribuição de energia para todo o sistema elétrico em questão, como mostra a Anexo I. Cada ramo de derivação, ainda na casa de força, passa por um disjuntor a vácuo de uso interno da ABB ® e, daí em diante, segue para os respectivos setores dentro do complexo.

Cada setor industrial alimentado pelo sistema elétrico, contem em sua área uma subestação abrigada SA com função de abaixar o nível de tensão para alimentar as cargas e dos Centros de Controle de Motores CCM's.

Existem apenas quatro ramificações da SE Distribuição 13,8 kV que não seguem para SA's: duas, alimentam em partida direta os terminais dos motores de média tensão e, as outras duas, alimentam a subestação elevadora 13,8/138 kV utilizada para exportar energia elétrica para o sistema interligado nacional SIN.

Conforme apresenta a Anexo I, as subestações abrigadas SA, em cada setor, contem um transformador abaixador de 13,8/0,48 kV e/ou 13,8/0,69 kV, chegando as tensões nominais, 480 V e 690 V, estabelecidas para as instalações. Notamos que as SA's estão nomeadas por códigos, representando a área industrial respectiva da subestação.

A seguir, com base na metodologia utilizada por [8], serão descritos todas as especificações das cargas e transformadores respectivos de cada subestação SA apresentada no sistema elétrica em estudo, Anexo I.

## **5.2 Subestação SA – 0001**

A subestação SA – 0001 tem a menor potência dentre as outras, contendo apenas um transformador, TF – 0001. Está localizada na área administrativa e atende aos setores da administração, refeitório, pátio, espera e portaria.

### **5.2.1 Transformador TF – 0001**

O transformador TF – 0001, com primário em delta e secundário em estrela, tem a potência nominal de 500 kVA e alimenta um carga total de 290 kW [9], sendo suas principais cargas: painéis, tomadas, iluminação predial e viária.

Em função da baixa relevância em aspectos quantitativos e qualitativos, dos impactos harmônicos gerados por esse pequeno grupo de cargas diante do grande sistema elétrico em estudo, o transformador TF – 0001 não foi considerado neste trabalho.

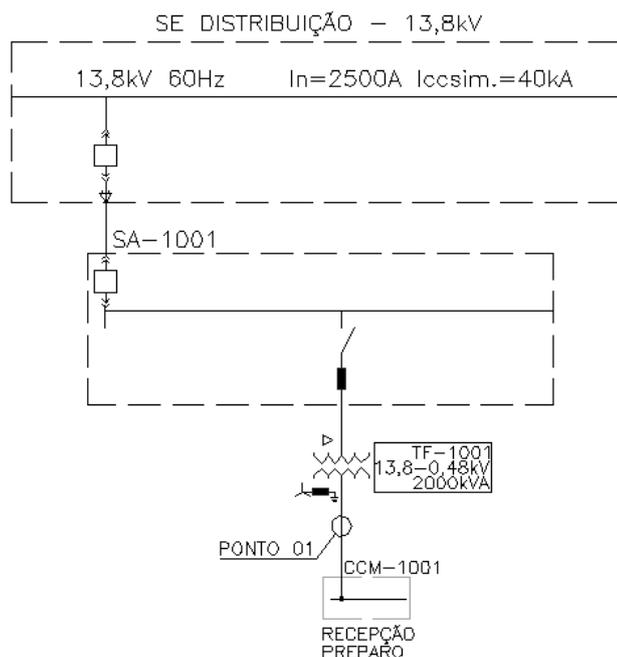
## **5.3 Subestação SA – 1001**

A subestação SA – 1001 tem grande potência, contendo quatro transformadores, TF – 1001, TF – 2001, TF-DRV-2001 e TF-DRV-2002. É a subestação alimentadora de toda a parte de recepção, preparo, extração e da cana-de-açúcar. A SA – 1001 alimenta o primeiro setor a usina, contendo grande carga já que essa parte do processo industrial necessita de grandes esforços mecânicos conseguidos por acionamentos de motores de alta potência.

### **5.3.1 Transformador TF – 1001 (Ponto 01)**

O transformador TF – 1001, delta-estrela, tem a potência nominal de 2000 kVA, alimenta o CCM – 1001 cuja potência máxima de demanda é de 1496,68 kW [9], onde está a alimentação e acionamento dos motores da área de

recepção e preparo. Na recepção temos dois guindastes (ilos), os quais tombam a cana da caçamba dos caminhões na mesa e esteira metálica, seguindo dali por diante em inúmeras esteiras, metálicas e emborrachadas, passando por setores onde a cana é picada, desfibrada (preparada) e entregue para o próximo processo. Na Figura 5.1 segue o diagrama unifilar simplificado desse circuito e na Tabela 5.1 segue as características das principais cargas desse processo.



**Figura 5.1 – Diagrama unifilar simplificado: TF-1001**

<b>Características das Principais Cargas</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Tipos</b>	<b>Acionamentos Mais Encontrados</b>	<b>Grau de Relevância</b>
Esteiras Metálicas e Emborrachadas	Motor 3Ø de Indução	Inversor de Frequência	Alto
Guindastes Tombadores (Ilos)	Motor 3Ø de Indução	Inversor de Frequência	Alto
Bombas	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Médio
Ventiladores	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Baixo
Painéis	Iluminação e Tomadas	Acionamento Direto	Baixo
Obs.: O grau de relevância expressa a proporção da potência do tipo de carga em relação a potência da carga total do transformador			

**Tabela 5.1 – Características das Principais Cargas do TF-1001**

Como as cargas acionadas por inversores de frequência (cargas não lineares) têm alta relevância, no secundário do transformador TF – 1001 foi definido um ponto de medição (Ponto 01) para a análise de distorção harmônica.

### 5.3.2 Transformador TF – 2001

O transformador TF – 2001, delta-estrela, tem a potência nominal de 2000 kVA e alimenta o CCM – 2001 com carga total de 1791,00 kW [9], onde está localizado o difusor, dispositivo que executa a extração das propriedades da cana-de-açúcar necessárias ao processo. Em operação, o difusor tem grande movimentação e exige alto esforço mecânico para movimentar o colchão de bagaço e para extrair e enviar o caldo ao próximo setor de produção. A seguir, na Tabela 5.2, estão as características das cargas alimentadas pelo TF – 2001.

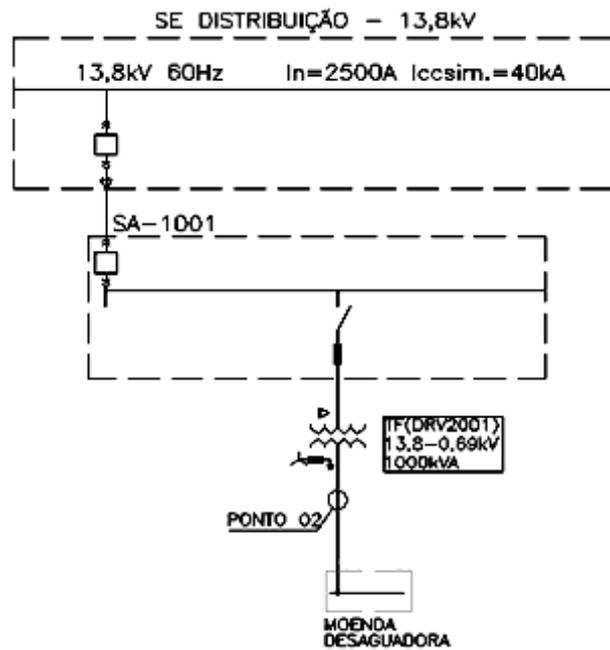
<b>Características das Principais Cargas</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Tipos</b>	<b>Acionamentos Mais Encontrados</b>	<b>Grau de Relevância</b>
Bombas	Motor 3Ø de Indução	Inversor de Frequência	Alto
Rocas Girantes	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Médio
Obs.: O grau de relevância expressa a proporção da potência de um tipo de carga em relação a potência da carga total do transformador			

**Tabela 5.2 – Características das Principais Cargas do TF-2001**

Como as cargas acionadas por inversores de frequência (cargas não lineares) tem alta relevância, o transformador TF – 2001 foi definido como ponto de medição para a análise de distorção harmônica. Porém, devido a inviabilidade de acesso ao ponto de coleta no secundário do transformador, visto que não foi autorizada a desenergização da planta (parada do setor) para possibilitar a coleta, não foi possível analisar o TF – 2001.

### 5.3.3 Transformador TF – DRV – 2001 (Ponto 02)

O transformador TF – DRV – 2001, delta-estrela, tem a potência nominal de 1000 kVA e alimenta a moenda desaguadora com carga total de 443,40 kW [9]. Essa moenda tem a finalidade de retirar a primeira levada de caldo do bagaço que sai do difusor. A Figura 5.2 traz o diagrama unifilar simplificado deste circuito.

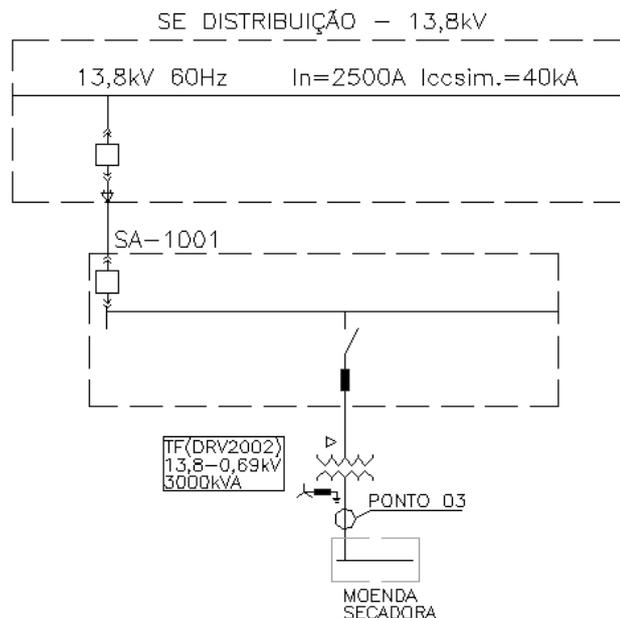


**Figura 5.2 – Diagrama unifilar simplificado: TF-DRV-2001**

Este transformador tem finalidade exclusiva de alimentar o motor da moenda, o qual é acionado por inversor de frequência Weg ®. Como a carga do transformador é inteira e unicamente não linear, foi definido neste transformador um ponto (Ponto 02) de medição para análise de distorção harmônica.

#### **5.3.4 Transformador TF – DRV – 2002 (Ponto 03)**

O transformador TF – DRV – 2002, delta-estrela, tem alta potência nominal de 3000 kVA e alimenta a moenda secadora com carga total de 1478,00 kW [9]. Essa moenda tem a finalidade de extrair a máxima umidade do bagaço da cana, por isso, a necessidade de alta potência mecânica para prensar o bagaço. Dali em diante o bagaço segue para a queima na Caldeira, no processo de geração de vapor. A Figura 5.3 apresenta o diagrama unifilar deste circuito.



**Figura 5.3 – Diagrama unifilar simplificado: TF-DRV-2002**

Este transformador tem finalidade exclusiva de alimentar o motor da moenda secadora, o qual é acionado por inversor de frequência Weg®. Como a carga do transformador é inteira e unicamente não linear, foi definido neste transformador um ponto (Ponto 03) de medição para análise de distorção harmônica.

#### **5.4 Subestação SA – 3001**

A subestação SA – 3001 tem baixa potência, contendo apenas um transformador, TF – 3001. Esta SA alimenta a área de Tratamento de Caldo, que recebe, trata e controla os parâmetros de qualidade do caldo advindo da área de recepção, preparo, extração e moagem.

##### **5.4.1 Transformador TF – 3001**

O TF – 3001, delta-estrela, tem potência de 2000 kVA e alimenta CCM – 3001 com carga total de 1,610.77 kW [9]. Abaixo, Tabela 5.3, segue uma descrição das cargas alimentadas pelo transformador.

<b>Características das Principais Cargas</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Tipos</b>	<b>Acionamentos Mais Encontrados</b>	<b>Grau de Relevância</b>
Bombas	Motor 3Ø de Indução	Inversor de Frequência	Médio
Bombas	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Médio
Agitadores	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Baixo
Painéis	Iluminação/Tomadas	Acionamento Direto	Baixo
Obs.: O grau de relevância expressa a proporção da potência do tipo de carga em relação a potência da carga total do transformador			

**Tabela 5.3 – Características das Principais Cargas do TF-3001**

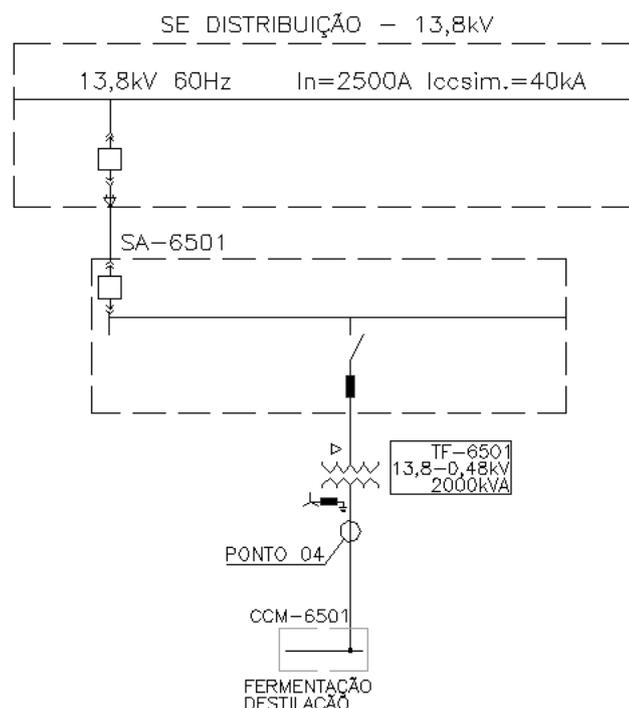
Devido à pequena influência, quando observado aspectos quantitativos e qualitativos, dos impactos harmônicos gerados por esse grupo de cargas não lineares (bombas alimentadas por inversores de frequência), diante do grande sistema elétrico em estudo, o transformador TF – 3001 não foi considerado nesta análise.

## **5.5 Subestação SA – 6501**

A subestação SA – 6501 contém dois transformadores, TF – 6501 e TF - 6502. Consiste em uma subestação abrigada de médio porte, a qual está localizada na área da Fermentação. Na Fermentação, o caldo, proveniente do Tratamento de Caldo, é misturado ao fermento, e bombeado para recipientes onde ocorre a fermentação e, após o processo, o fermento é separado do caldo por meio de inúmeras centrífugas.

### **5.5.1 Transformador TF – 6501 (Ponto 04)**

Este transformador, delta-estrela, tem potência nominal de 2000 kVA. Alimenta o barramento do CCM – 6501, o qual alimenta uma carga instalada de 1435,14 kW [9]. Suas principais cargas são as bombas de resfriamento das dornas (recipiente onde ocorre a fermentação) e as centrífugas. A Figura 5.4 apresenta o diagrama unifilar deste circuito e na Tabela 5.4, podemos ver a descrição e o grau de relevância das principais cargas instaladas.



**Figura 5.4 – Diagrama unifilar simplificado: TF-6501**

<b>Características das Principais Cargas</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Tipos</b>	<b>Acionamentos Mais Encontrados</b>	<b>Grau de Relevância</b>
Bombas de Resfriamento das Dornas	Motor 3Ø de Indução	Soft - Starter	Alto
Centrífugas	Motor 3Ø de Indução	Inversor de Frequência	Alto
Painéis	Iluminação/Tomadas	Acionamento Direto	Baixo
Obs.: O grau de relevância expressa a proporção da potência do tipo de carga em relação a potência da carga total do transformador.			

**Tabela 5.4 – Características das Principais Cargas do TF-6501**

Este transformador alimenta inúmeras soft-stars e inversores de grande potência. A soft-starter, na partida suave de seu acionamento, constitui uma carga não linear, porém é caracterizada uma carga linear devido, após o período de rampa, se tornar um acionamento direto. Já o inversor, como já discutido, é o maior problema nesta parte do sistema.

Como a relevância das cargas não lineares é alta, foi estabelecido neste transformador o ponto de medição (Ponto 04) para a análise deste trabalho.

### 5.5.2 Transformador TF – 6502 (Ponto 05)

O TF – 6502, delta-estrela, com potência nominal de 2000 kVA, alimenta o CCM – 6502 com carga total de 1,023.55 kW [9]. Este CCM é responsável por alimentar todos os agitadores e, principalmente todas as bombas utilizadas nesta parte do processo, exceto aquelas alimentadas pelo TF – 6501. São mais de quarenta bombas. A Figura 5.5 apresenta o diagrama unifilar deste circuito e a Tabela 5.5 traz a descrição das principais cargas.

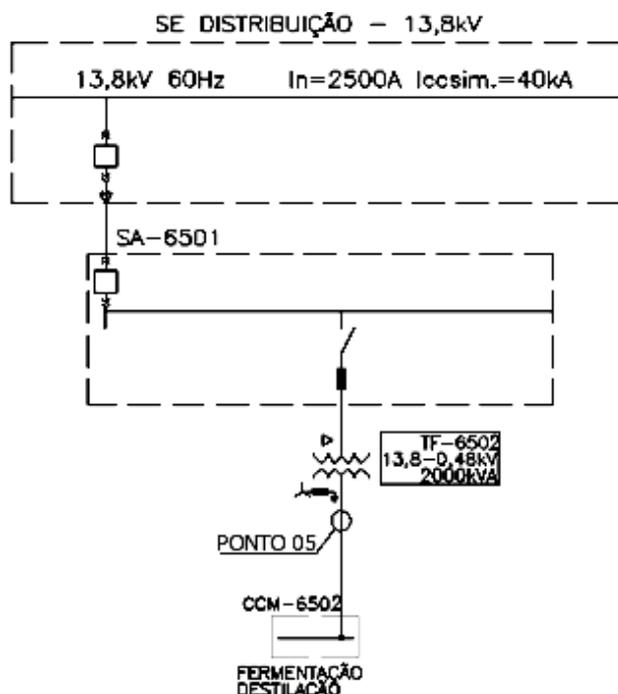


Figura 5.5 – Diagrama unifilar simplificado: TF-6502

Características das Principais Cargas			
Descrição	Tipos	Acionamentos Mais Encontrados	Grau de Relevância
Bombas	Motor 3Ø de Indução	Inversores de Frequência	Alto
Bombas	Motor 3Ø de Indução	Soft-Starter	Alto
Bombas	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Baixo
Agitadores	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Baixo

Obs.: O grau de relevância expressa a proporção da potência do tipo de carga em relação a potência da carga total do transformador.

Tabela 5.5 – Características das Principais Cargas do TF-6502

Neste transformador foi definido o ponto de medição (Ponto 05), completando a análise na subestação SA – 6501.

## **5.6 Subestação SA – 8001A e SA – 8001B**

Estas duas subestações estão localizadas na mesma área, dividindo o espaço da mesma edificação. São elas que alimentam as Caldeira A e B (geradoras de vapor). Em termos de potência, consistem nas duas maiores subestações abrigadas do sistema elétrico em estudo, sendo que cada uma alimenta dois transformadores abaixadores, sendo o TF – 8001A e TF – 8001C, alimentado pela SA – 8001A e, o TF – 8001B e TF – 8001D, pela SA – 8001B.

No funcionamento de uma Caldeira, são queimadas toneladas de bagaço de cana-de-açúcar e, para efetuar e controlar a combustão, são utilizados inúmeros ventiladores e exaustores de alta potência que são acionados no CCM's alimentados pelos transformadores já citados.

### **5.6.1 Transformadores TF – 8001A e TF – 8001B (Pontos 06 e 07)**

Estes transformadores, delta-estrela, potência nominal de 750 kVA e alimentam o CCM – 8001A e o CCM – 8001B, cada um alimentando uma carga de 782,00 kW [9]. Os dois transformadores, apesar de estarem em subestações distintas, alimentam em comum, um terceiro centro de controle de motores, CCM – 8002, onde saem os alimentadores da estação de tratamento de água proveniente da lavagem de gases (ETAL). As cargas alimentadas pelos transformadores são semelhantes, sendo é claro, cada uma de sua respectiva Caldeira.

Abaixo, a Figura 5.6 apresenta o diagrama unifilar simplificado destes circuitos e na Tabela 5.6, estão descritas as principais cargas alimentadas pelos transformadores TF – 8001A e TF – 8001B.

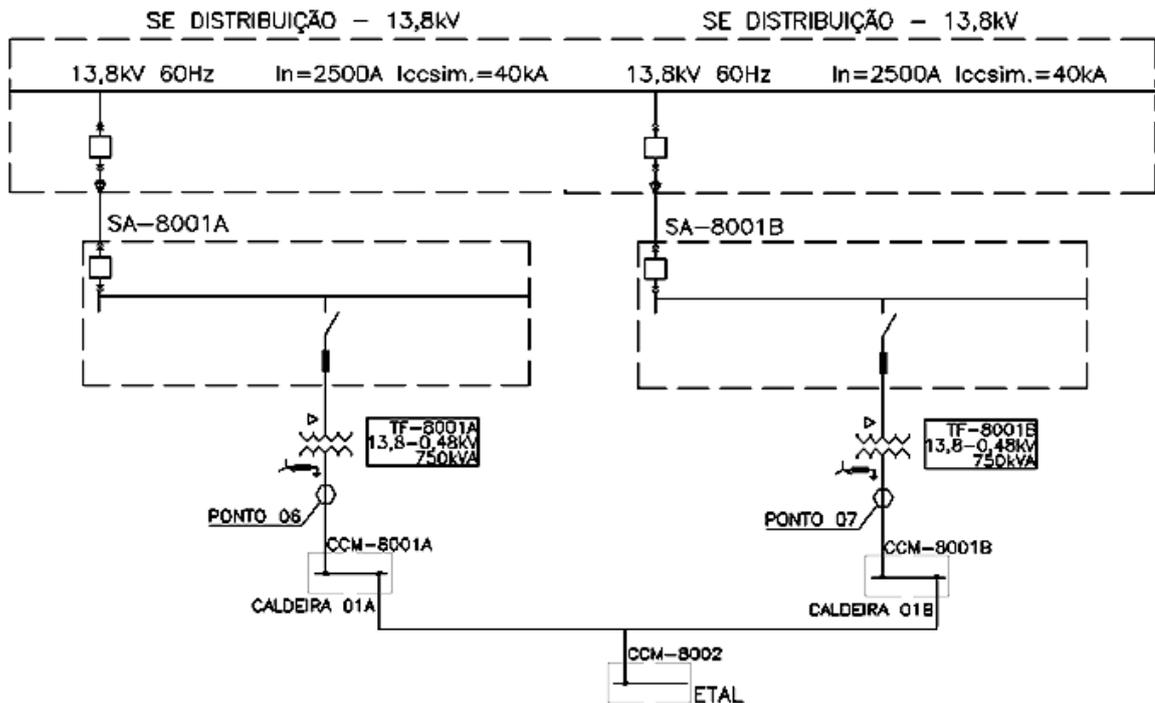


Figura 5.6 – Diagrama unifilar simplificado: TF-8001A e TF-8001B

Características das Principais Cargas			
Descrição	Tipos	Acionamentos Mais Encontrados	Grau de Relevância
Esteiras	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Médio
Bombas	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Médio
Alimentadores	Motor 3Ø de Indução	Inversores de Frequência	Médio
Ventilador	Motor 3Ø de Indução	Inversores de Frequência	Médio
Painéis	Iluminação e Tomadas	Acionamento Direto	Baixo

Obs.: O grau de relevância expressa a proporção da potência do tipo de carga em relação a potência da carga total do transformador.

Tabela 5.6 – Características das Principais Cargas do TF-8001A e TF-8001B

Nestes transformadores, TF – 8001A e TF – 8001B, foram definidos os pontos de medições (Ponto 06 e Ponto 07), respectivamente.

### 5.6.2 Transformador TF – 8001C e TF – 8001D (Pontos 08 e 09)

Estes transformadores tem cargas iguais, sendo o TF – 8001C da Caldeira A e o TF – 8001D da Caldeira B. A potência nominal dos transformadores é de 4400 kVA. Alimentam o CCM – 8001C e CCM – 8001D, tendo cada, potência total da carga de 2,917.79 kW [9].

Esses CCM's alimentam em 690V os principais motores das caldeiras, os ventiladores de alta potência. A seguir, a Figura 5.7 apresenta o diagrama simplificado deste circuito e a Tabela 5.7 mostra uma relação das características das cargas alimentadas pelos transformadores.

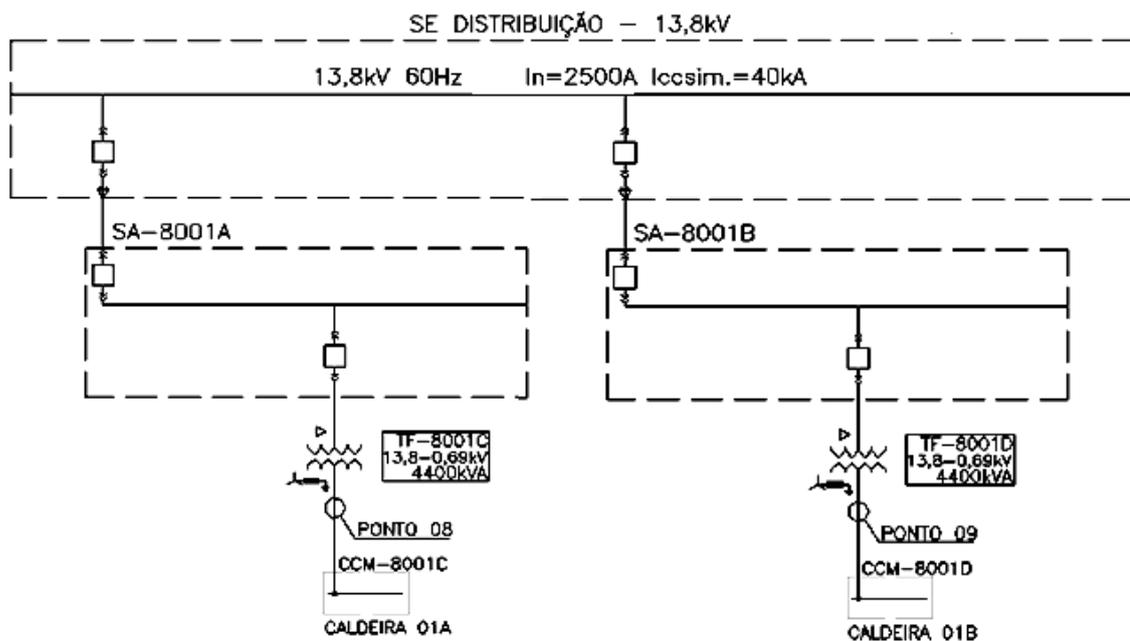


Figura 5.7 – Diagrama unifilar simplificado: TF-8001C e TF-8001D

Características das Principais Cargas			
Descrição	Tipos	Acionamentos Mais Encontrados	Grau de Relevância
Ventiladores de Alta Potência	Motor 3Ø de Indução	Inversores de Frequência	Alto
Bombas de Alta Potência	Motor 3Ø de Indução	Soft-Starter	Médio
Obs.: O grau de relevância expressa a proporção da potência do tipo de carga em relação a potência da carga total do transformador.			

Tabela 5.7 – Características das Principais Cargas do TF-8001C e TF-8001D

Nesses dois transformadores, em virtude das cargas não lineares de alta potência, foram estabelecidos pontos de medição (Ponto 08 e Ponto 09).

## 5.7 Subestação SA – 8501

Esta subestação está localizada dentro da casa de força, onde se inicia nosso sistema elétrico com os turbogeradores. A subestação alimenta um transformador, TF – 8501.

### 5.7.1 Transformador TF – 8501 (Ponto 10)

O TF – 8501, delta-estrela, tem uma grande responsabilidade na indústria, alimentando o CCM – 8501 com carga total de 1225,45 kW [9], englobado as instalações do Centro de Operações Integradas (COI), das oficinas elétricas e mecânicas e das iluminações. Nas oficinas existem computadores, iluminações à reatores, inversores de frequência, máquinas de solda, dentre outras cargas não lineares. Essas cargas são alimentadas por transformadores locais que rebaixam a tensão de 480 V para 380/220/110 V, de acordo com o local e necessidade. Portanto o TF – 8501 alimenta vários outros transformadores locais que não entrarão (individualmente) neste trabalho.

Além desses, alimenta um transformador TF – 8502, o qual supre todas as cargas essenciais, como o Sistema de Energia Ininterrupta UPS, iluminações e computadores do COI.

A Figura 5.8 apresenta um diagrama simplificado deste circuito e a tabela 5.8 estão descritas as principais cargas amarradas ao TF – 8501.

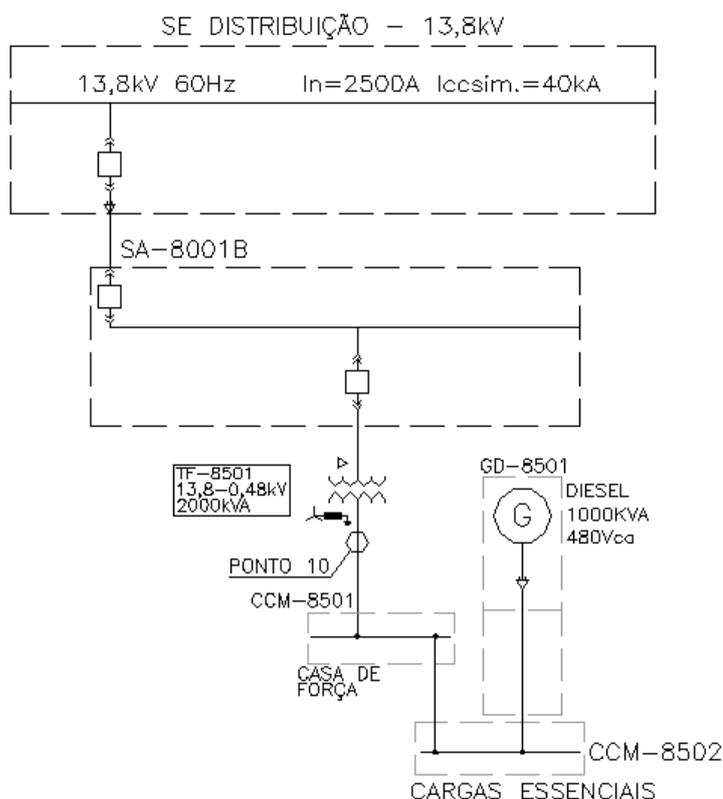


Figura 5.8 – Diagrama unifilar simplificado: TF-8501

<b>Características das Principais Cargas</b>			
<b>Descrição</b>	<b>Tipos</b>	<b>Acionamentos Mais Encontrados</b>	<b>Grau de Relevância</b>
Sistemas Auxiliares dos Turbogeneradores	Motor 3Ø de Indução	Acionamento Direto	Médio
Transformadores Locais	Quadros de Iluminação e Tomadas	Acionamento Direto	Médio
Tomadas Trifásicas	Pontes Rolantes e Máquinas de Solda	Inversores de Frequência e Acionamento Direto	Médio
Cargas Essenciais	UPS's, Bombas, Iluminações	Acionamento Direto	Médio
Obs.: O grau de relevância expressa a proporção da potência do tipo de carga em relação a potência da carga total do transformador.			

**Tabela 5.8 – Características das Principais Cargas do TF-8501**

Apesar do grau de relevância, de todos os tipos de cargas, ser médio, existem inúmeras cargas não lineares alimentadas nessas instalações, como fontes chaveadas, reatores eletrônicos, máquinas de solda, carregadores de média potência para baterias de UPS's, e outras cargas eletrônicas. Diante dessas inúmeras cargas não lineares, foi definido sobre o secundário do TF – 8501 o ponto de medição (Ponto 10).

## **5.8 Subestação SA – 9201**

A SA – 9201 alimenta os setores de Captação de Água, Estação de Tratamento de Água e Torres de Resfriamento de Água. As cargas são divididas em três transformadores, o TF – 9201 de 750 kVA, TF – 9201A de 2000 kVA e o TF – 9201B de 4000 kVA, respectivamente. Cada transformador alimenta um CCM que, por sua vez, aciona os motores do seu setor específico. As principais cargas desses CCM's, praticamente na totalidade, são bombas e ventiladores de alta potência, os quais são acionados diretamente ou via soft-starter. Sendo assim, esta subestação não entra neste estudo, pois alimenta apenas cargas lineares, não geradoras de conteúdo harmônico.

## 5.9 Complementos

As **potências totais**, utilizadas nas descrições dos tópicos anteriores, foram retiradas de [9]. Ressaltando que, nos cálculos dos valores utilizados, foram levados em conta Fator de Demanda (FD) dos equipamentos.

O grau de relevância (GR), utilizado nas tabelas de descrição de cargas, apresentadas anteriormente, é a razão entre a potência específica de um determinado grupo de cargas (PE) e a potência total instalada no transformador (PT). A Equação 5.1 representa o grau de relevância em percentual.

$$GR = \frac{PE}{PT} \times 100\% \quad [5.1]$$

- Para  $GR > 40\%$  = Alto
- Para  $10\% \leq GR \leq 40\%$  = Médio
- Para  $GR < 10\%$  = Baixo

## 6 ANÁLISE E DISCUSSÃO DAS MEDIDAS OBTIDAS

Neste Capítulo serão apresentados todos os dados coletados na usina de etanol e energia Raízen – Unidade Jataí. A coleta foi realizada com a ajuda de técnicos eletricitistas, utilizando o analisador citado no Tópico 6.1. Para cada transformador, onde foram definidos os pontos de medição, será feita uma discussão abordando o respectivo conteúdo harmônico e sua influência para o sistema. As horas e datas das medições estão descritas

### 6.1 Analisador de Qualidade de Energia Elétrica

Para as medições foi utilizado o Analisador de Energia Fluke 435, Figura 6.6.1. O aparelho é capaz de analisar a potência trifásica em vários aspectos, observando inúmeros índices de QEE.



**Figura 6.1 – Analisador de QEE – Fluke 435**

Dentre muitas funcionalidades, as principais funções [10] que permitem analisar a qualidade de energia são:

- Forma de Onda e Fasor de Perfil;
- Voltagem/Amperagem/Hz;
- Dips e Swells;
- Harmônicos;
- Potência e Energia;
- Flicker;
- Desequilíbrio;
- Transientes;
- Inrush.

Para a realização deste trabalho foram utilizadas quatro funções: Forma de Onda e Fasor de Perfil, Voltagem/Amperagem/Hz, Potência e Energia, e Harmônicos. Estas funções possibilitam visualizar as formas de onda da tensão e corrente, bem como todos os valores relacionados a potência, tensão, corrente, fator de potência, entre outros. Além disso, a função Harmônicos traz para cada fase, o espectro da tensão e corrente, juntamente com o DHTv e DHTi. Os dados coletados em campo foram analisados através do software FlukeView®.

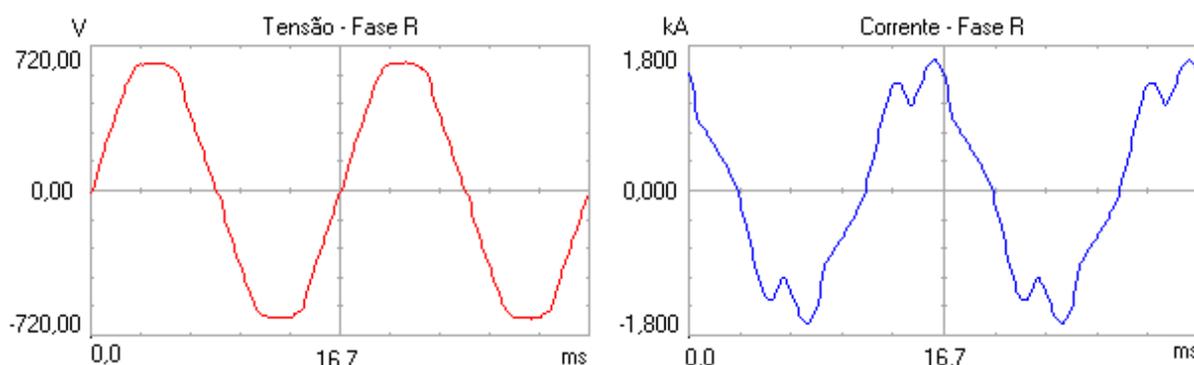
## **6.2 Ponto de Medição 01: TF – 1001**

As medições realizadas neste ponto ocorreram aproximadamente as 21h12min do dia 27/09/2012. O presente conjunto de resultados retrata os valores eficazes das variáveis elétricas, bem como das respectivas distorções harmônicas,

todas expressadas em valores instantâneos. Assim sendo, os dados listados na sequência a seguir, sintetizam os registros coletados em campo, permitindo, assim, uma análise geral do comportamento destes parâmetros elétricos.

Os dados deste ponto foram coletados sobre o secundário (estrela) do transformador TF – 1001. Este circuito possui tensão nominal de 480 V e alimenta principalmente esteiras, guindastes, bombas, ventiladores e painéis.

Como as cargas são equilibradas, as fases são balanceadas e as formas de ondas de tensões e correntes são semelhantes em todas as fases. A Figura 6.2.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha da fase R.



**Figura 6.2.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 01**

A Tabela 6.2.1 apresenta os valores eficazes instantâneos das tensões e correntes de linhas, bem como seus respectivos fatores de potência e DHT.

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	cos $\phi$
R	470	1121	3,7	16,0	0,84	0,86
S	470	1190	3,9	15,6	0,84	0,85
T	468	1144	4,1	16,3	0,82	0,83

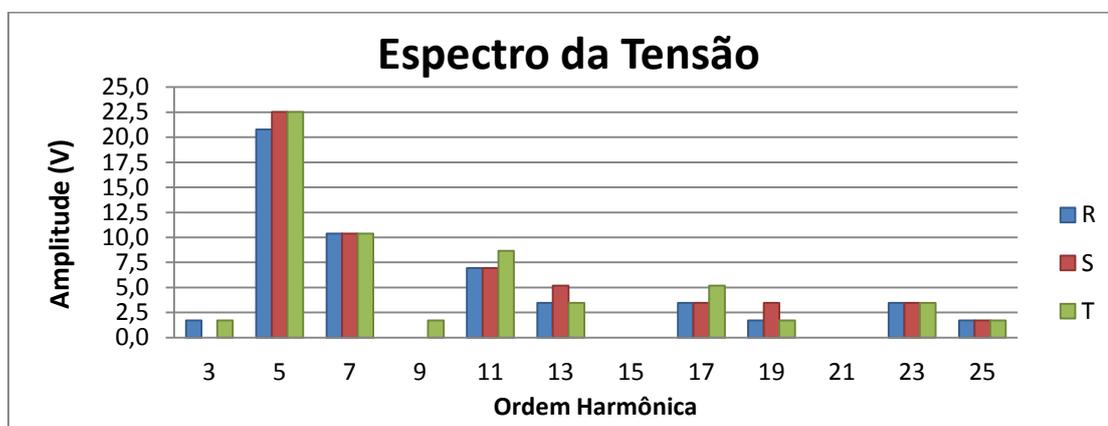
**Tabela 6.2.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 01**

A Tabela 6.2.2 apresenta valores da DHlv e DHli de cada fase, sendo considerado apenas as principais componentes harmônicas levantadas neste ponto de medição. Como observação, serão destacados na Tabela os três maiores valores de DHlv e DHli.

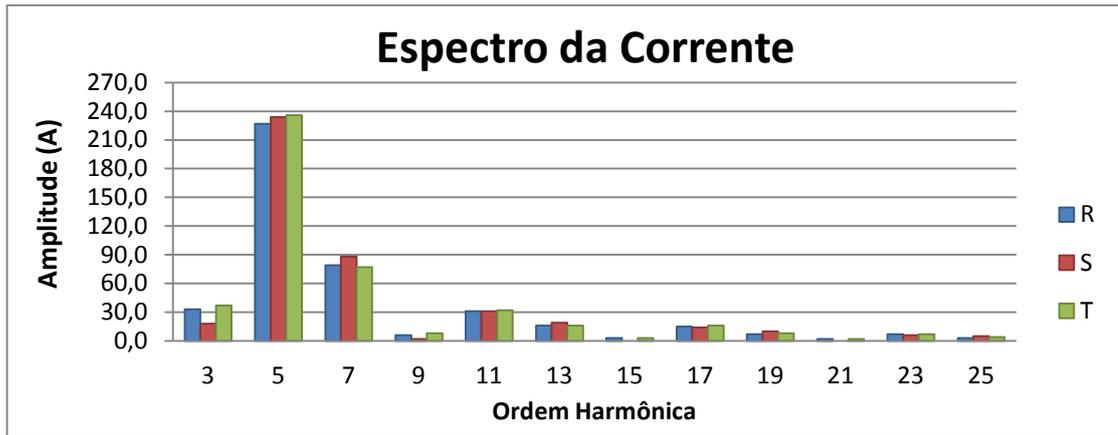
Ordem Harmônica	Sequência	DHIv (%)			DHIi (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,2	0,1	0,3	2,2	1,1	2,5
5	-	3,1	3,3	3,5	15,1	14,7	15,5
7	+	1,6	1,7	1,7	5,2	5,6	5,1
9	0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	0,5
11	-	1,1	1,0	1,2	2,0	1,9	2,1
13	+	0,6	0,7	0,6	1,1	1,2	1,0
15	0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,0	0,2
17	-	0,6	0,6	0,7	1,0	0,9	1,0
19	+	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	0,5
21	0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1
23	-	0,5	0,4	0,5	0,5	0,4	0,5
25	+	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,3

**Tabela 6.2.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 01**

Na sequência, as Figuras 6.2.2 e 6.2.3 trazem os espectros de frequência da tensão e corrente para cada fase, sendo considerado até a 25ª componente harmônica. Estes espectros facilitam a interpretação quantitativa da interferência de cada componente harmônica.



**Figura 6.2.2 – Espectro de frequência da tensão do Ponto 01**



**Figura 6.2.3 – Espectro de frequência da corrente do Ponto 01**

### 6.2.1 Análise da Tensão

Neste subtópico, os valores respectivos da tensão, apresentados anteriormente, serão comparados com algumas das normas citadas no Capítulo 5, como segue abaixo:

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Analisando os valores de DHIv coletados neste ponto, Tabela 6.2.2, verificou-se que neste ponto de medição não existem valores superiores aos limites estabelecidos pela Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

Para esta norma, classificamos a carga alimentada pelo transformador em questão como Classe 2 (ponto de ligação comum em ambiente industrial). A Tabela 4.2, define DHTv máximo de 8% para cargas Classe 2. Comparando os dados coletados, Tabela 6.2.1, notamos que o maior valor de DHTv entre as três fases medidas é de 4,1%, seguindo portanto, o limite definido.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

Para a tensão, o IEEE estabelece na Tabela 4.8, valores limites para o DHIv e para DHTv, sendo, neste caso, 3% e 5%, respectivamente. Comparando as Tabelas 6.2.1 e 6.2.3, notamos que o DHTv das fases esta dentro do estabelecido, já o DHIv da componente de 5ª ordem ultrapassou o permitido, chegando até 3,5%.

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Todos os valores de DHTv de DHLv, coletados neste transformador, estão abaixo dos limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### **6.2.2 Análise da Corrente**

Para a análise da corrente, os dados levantados em campo foram comparados com a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

Para encontrarmos a relação utilizada nesta norma é necessário conhecer a corrente de curto circuito do ponto e a corrente máxima de demanda. As correntes de curto circuito nos pontos de medição são aproximadamente 40 kA [11]. Esta norma determina que a corrente máxima de demanda seja encontrada utilizando as últimas doze contagens, porém, no nosso caso de um sistema particular de energia, não é possível obter essa informação. Então, para fins práticos, utilizaremos a corrente calculada através da potência máxima de demanda:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.2.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.2.2)$$

$$I_l = \frac{1496680,0}{\sqrt{3} \cdot 480 \cdot 0,8} \quad (6.2.3)$$

$$I_l = 2250,28 \text{ A} \quad (6.2.4)$$

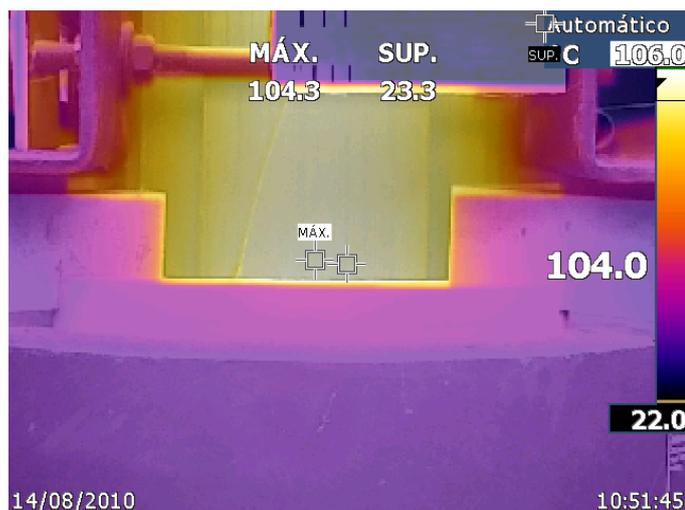
Com essa corrente, a relação entre corrente de curto-circuito e corrente máxima de demanda ficou igual a 17,8. Para relação menor que 20, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 5,0%. Como mostra a Tabela 6.2.1, os DHTi superam os 15%, ou seja, estão bem acima do limite. A Tabela 4.7 traz também os valores máximos para DHLi e, comparando com nossos resultados, constatamos que as componentes de 5ª ordem estão próximas de 15% e, as de 7ª ordem, estão próximas de 5%, estando bem acima do valor de 4% estipulado pela norma para essas frequências.

### **6.2.3 Breve Conclusão**

A distorção harmônica de tensão neste transformador tem baixa proporção. A queda de tensão, desde a geração até este ponto, é baixa, conservando as propriedades originais da forma de onda. Os valores de DHTv e DHLv estão, quase na totalidade, em conformidade com as normas, exceto o DHLv da componente de 5ª ordem que, em todas as fases, excedeu o valor definido na IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8). Esta componente tem sequência negativa e causa torque pulsante, reduzindo o rendimento e a vida útil dos motores elétricos ligados a este ponto, principalmente aos acionados diretamente. Como são inúmeros motores alimentados diretamente, essa componente pode acarretar prejuízos consideráveis.

Com relação a distorção harmônica de corrente, os dados coletados nos mostram um alto índice de DHTi para todas as fases. As componentes harmônicas responsáveis pelo alto DHTi são as de 5ª e 7ª ordem. A 5ª é de sequência negativa e, percorrendo o sistema, provoca através da queda de tensão, o surgimento de componentes harmônicas de tensão de 5ª ordem. Como vimos no subtópico anterior, as únicas harmônicas de tensão que ultrapassam as normas, são as de 5ª ordem, as quais provocam torque pulsante e redução de rendimento dos motores elétricos.

Um dos principais problemas do alto DHTi, principalmente para grandes correntes como é o caso deste ponto, é o sobreaquecimento do transformadores, reduzindo consideravelmente sua vida útil. Em 2010, durante a análise termográfica das instalações elétricas na usina, constatou-se que muitos dos transformadores estão operando em altas temperaturas. A Figura 6.2.4 mostra a temperatura do núcleo do TF – 1001 que esta próxima de 115°C, máximo estabelecido pelo manual para operação segura desses transformadores [manual Siemens]. O alto DHTi também aumenta o aquecimento dos condutores pela presença de altas frequências, diminuindo a capacidade de alimentação dos mesmo.



**Figura 6.2.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-1001**

Além disso, as 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup> harmônicas tem amplitudes aproximadas de 230 A e 80 A, como mostra a Figura 6.2.3. Estes altos valores aumentam a corrente eficaz, reduzindo consideravelmente o fluxo de potência no transformador TF – 1001. Elas aumentam o DHTi, reduzindo a possibilidade de aumento da carga, devido ao aumento da corrente eficaz.

Analisando o fator de potência, percebemos que seu valor é menor que o  $\cos\phi$ , isso demonstra que a potência está distorcida. Este trabalho não entra no mérito desta discussão, porém pode-se concluir que o fator de potência neste caso não é igual ao  $\cos\phi$  devido à presença de harmônicos, ele é menor, logo, as distorções harmônicas provocam sobrecargas dos geradores, já que aumenta a potência reativa.

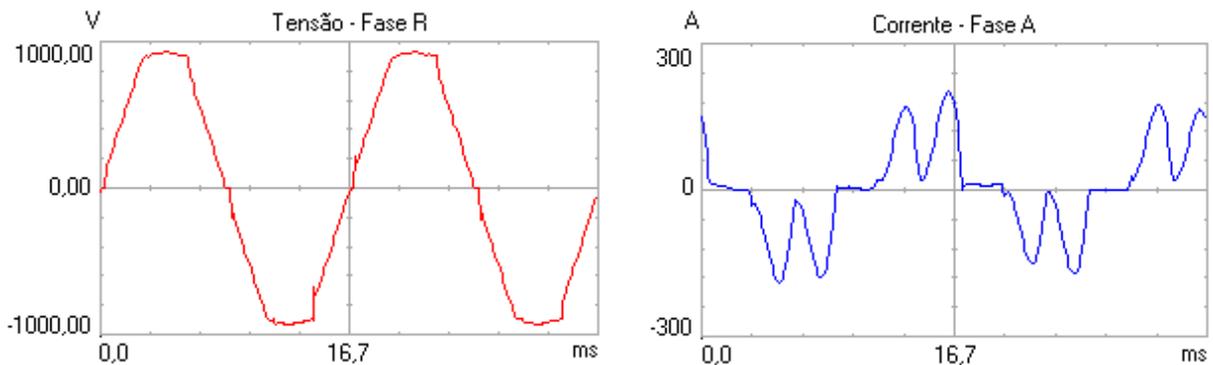
### **6.3 Ponto de Medição 02: TF – DRV – 2001**

A coleta de dados neste ponto foi realizada aproximadamente às 20h52min do dia 27/09/2012. Como no tópico anterior, segue abaixo um descritivo, com figuras e tabelas, expondo todo o conteúdo harmônico levantado.

Os dados deste ponto foram coletados sobre o secundário (estrela) do transformador TF – DRV – 2001. Este circuito possui tensão nominal de 690 V e alimenta apenas um inversor de frequência Weg®, o qual aciona o motor da moenda desaguadora.

Como o inversor alimentado representa uma carga trifásica equilibrada, não existe desbalanceamento de fases e as formas de ondas de

tensões e correntes são semelhantes em todas as fases. A Figura 6.3.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha da fase R.



**Figura 6.3.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 02**

A Tabela 6.3.1 apresenta os valores eficazes instantâneos das tensões e correntes de linhas no Ponto 02, bem como seus respectivos fatores de potência e DHT.

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	cos $\phi$
R	687	134	4,3	56,6	0,86	0,98
S	686	137	4,5	53,8	0,86	0,97
T	685	130	4,5	57,7	0,84	0,96

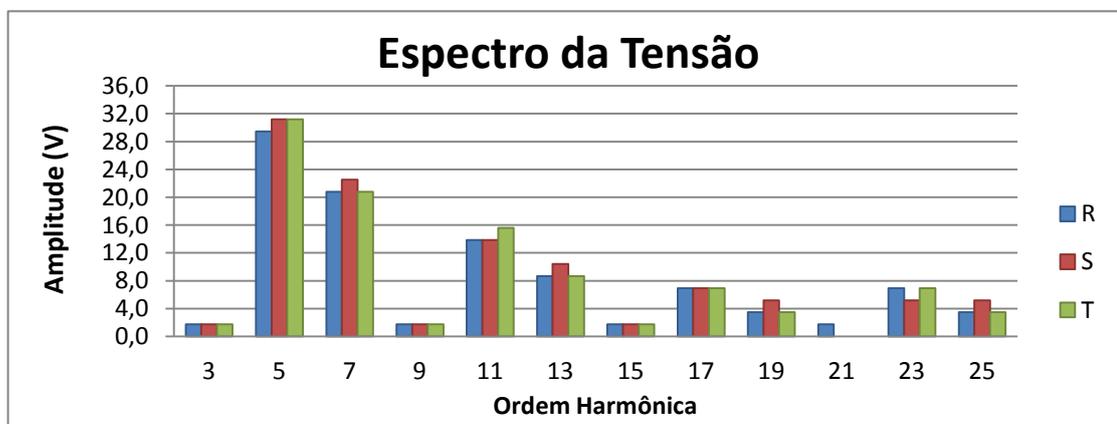
**Tabela 6.3.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 02**

A Tabela 6.3.2 mostra os valores das distorções harmônicas individuais, levando em conta até a 25ª harmônica. Para cada fase, os três maiores valores de DHI estarão em destaque.

Ordem Harmônica	Sequência	DHIv (%)			DHIi (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,2	0,2	0,2	5,0	3,6	3,1
5	-	3,0	3,2	3,2	46,5	44,1	48,0
7	+	2,1	2,2	2,1	23,9	23,0	23,7
9	0	0,2	0,1	0,2	1,8	0,6	0,7
11	-	1,4	1,4	1,6	7,6	7,1	8,0
13	+	0,9	1,0	0,9	4,8	4,9	4,7
15	0	0,1	0,1	0,1	0,7	0,3	0,4
17	-	0,7	0,7	0,7	3,6	3,3	4,0
19	+	0,4	0,5	0,4	2,4	2,4	2,2
21	0	0,1	0,1	0,1	0,6	0,3	0,3
23	-	0,6	0,6	0,7	2,2	1,8	2,3
25	+	0,4	0,5	0,4	1,2	1,4	1,2

**Tabela 6.3.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 02**

Em seguida, as Figura 6.3.2 e 6.3.3 trazem os espectros de frequência da tensão e corrente para cada fase, sendo considerado até a 25ª componente harmônica.



**Figura 6.3.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 02**

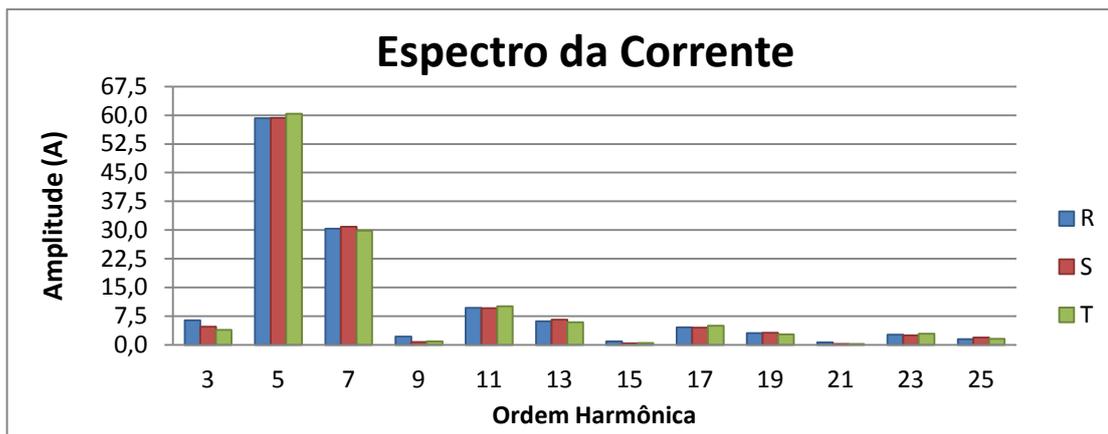


Figura 6.3.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 02

### 6.3.1 Análise da Tensão

Na sequência, são apresentados os resultados da comparação entre os dados coletados sobre tensão e as normas respectivas:

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Os valores coletados do DHIv, em nenhuma fase, ultrapassam os valores estabelecidos na Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

Como dito, a carga ligada ao Ponto 02 é unicamente não linear, sendo um inversor de frequência. Por isso, esse ponto de medição foi classificado como Classe 3 (Apenas cargas não-lineares). A Tabela 4.2 define DHTv máximo de 10% para Classe 3. O maior DHTv registrado, Tabela 6.3.1, foi de 4,5%, estando em conformidade com a norma.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

Os DHTv registrados não ultrapassam o limite de 5% estabelecido pela Tabela 4.8. Para as componentes individuais esta norma limita o valor de DHIv em 3% e nas harmônicas de 5ª ordem da fase S e T, como mostra a Tabela 6.3.2, o valor da DHIv chega a 3,2%, estando acima do permitido.

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Todos os valores de DHTv de DHIv coletados neste transformador, estão abaixo dos limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### 6.3.2 Análise de Corrente

Segue abaixo o resultado da comparação entre os dados da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7).

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

Para encontrarmos a relação usada na Tabela 4.7, a corrente de curto circuito é 40 kA e a corrente máxima de demanda foi calculada a partir da potência máxima de demanda especificada em projeto, neste caso de 443,40 kW.

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.2.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.2.2)$$

$$I_l = \frac{443400,0}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 0,8} \quad (6.2.3)$$

$$I_l = 463,76 \text{ A} \quad (6.2.4)$$

Com esses valores, a relação entre corrente de curto-circuito e corrente máxima de demanda ficou igual a 86,25. Para relação entre 50 e 100, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 12%. Como mostra a Tabela 6.3.1, os DHTi superam os 57%, estando muito acima do estabelecido na norma.

Para harmônicos de corrente de até 10ª ordem, a Tabela 4.7 estabelece valor máximo de DHli em 10%. As 5ª e 7ª componentes registradas neste ponto chegam a 48% e 23%, expressando altos índices de distorção. Para os harmônicos entre 11ª e 16ª ordem, a Tabela 4.7 define DHli máximo de 5,5%. A 11ª componentes chegam ao DHli de 8%, também estando em desacordo com a norma. Os DHli das outras componentes estão de acordo com a norma.

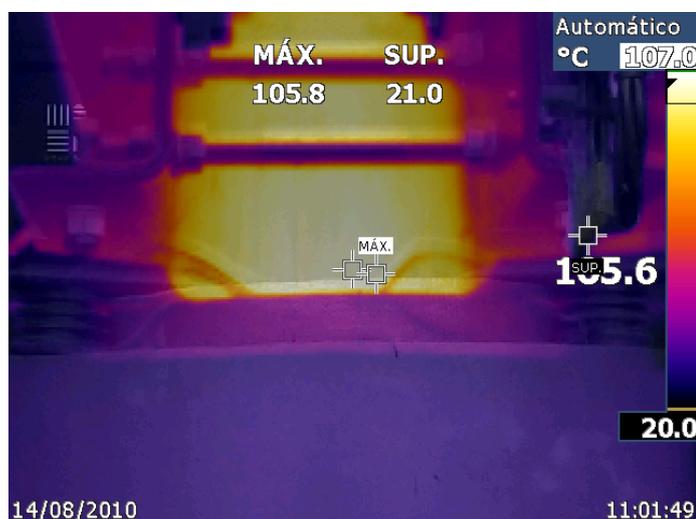
### 6.3.3 Breve Conclusão

As distorções de tensão neste ponto são de baixa proporção. Os valores de DHTv e DHlv estão dentro dos limites definidos nas normas, exceto o DHlv da componente de 5ª ordem que, na fase S e T, excedeu o valor definido na

IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8). A 5ª harmônica é sequência negativa e causa torque pulsante, porém se aplica principalmente a motores com acionamento direto, como dito, neste ponto é alimentado apenas um inversor de frequência. Neste caso, a DHIv de 5ª não apresenta grandes riscos.

Para a corrente, as medições nos mostram um alto índice de distorção harmônica de corrente, com alto DHTi para todas as fases superando os valores definidos na norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8). As componentes harmônicas responsáveis pelos altos DHTi são as de 5ª, 7ª e 11ª ordem. As 5ª e 11ª são sequência negativa e provocam o surgimento de componentes harmônicas de tensão de sequência negativa, geradoras de torque pulsante.

Um dos principais problemas do alto DHTi, chegando neste ponto a 57%, é o sobreaquecimento dos transformadores devido aumento expressivo das perdas, provocando a redução considerável de sua vida útil. Além desses, este alto DHTi provoca o sobreaquecimento dos condutores. Na análise termográfica, Figura 6.3.4, a temperatura do núcleo do TF – DRV – 2001 é de aproximadamente 106°C, estando quase ao limite máximo para operação.



**Figura 6.3.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-DRV-2001**

Outro grande problema é o grande aumento na corrente eficaz que as harmônicas de correntes provocam. Neste caso, como mostra o espectro de corrente, Figura 6.3.4, as amplitudes das 5ªs, 7ªs e 11ªs harmônicas são aproximadamente 60 A, 30 A e 9 A, sendo altos valores se comparados a corrente fundamental. Isso impede que sejam adicionadas novas cargas neste ponto, já que

o aumento da corrente eficaz contribui para diminuição da transmissão de potência deste transformador.

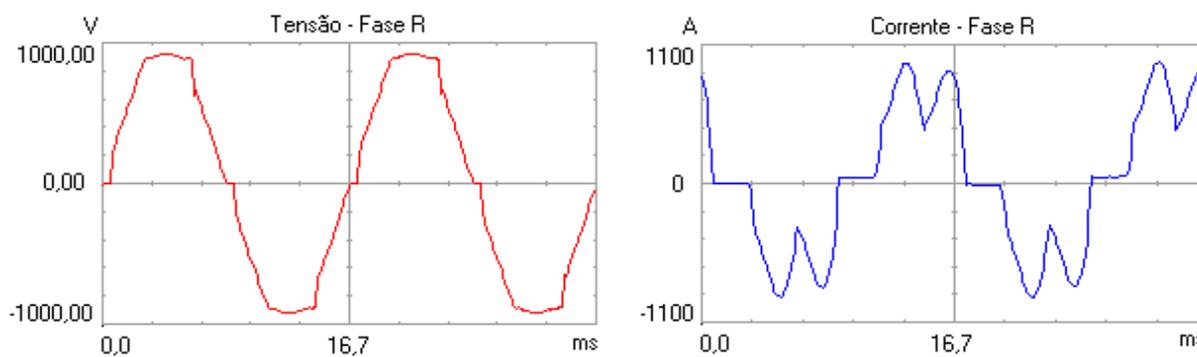
O fator de potência, como mostra a Tabela 6.3.1, é bem menor que o  $\cos\phi$ , o que mostra que as distorções harmônicas aumentaram a potência aparente da carga alimentada. Assim, os geradores ficam sobrecarregados, diminuindo a capacidade alimentar mais cargas. Neste ponto de medição, se não fossem as distorções harmônicas, o fator de potência e o  $\cos\phi$  seriam iguais.

#### 6.4 Ponto de Medição 03: TF – DRV – 2002

As medições neste ponto foram realizadas aproximadamente as 20h36min do dia 27/09/2012. Na sequência, o descritivo, com figuras e tabelas, expondo todo o conteúdo harmônico levantado.

Estas medições foram realizadas sobre o secundário (estrela) do transformador TF – DRV – 2002. Este circuito possui tensão nominal de 690 V e alimenta apenas um inversor de frequência Weg ®, o qual aciona o motor da moenda secadora.

Neste ponto, as formas de onda são semelhantes, pois o inversor de frequência alimentado constitui uma carga trifásica equilibrada. A Figura 6.4.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha da fase R.



**Figura 6.4.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 03**

A Tabela 6.4.1 apresenta os valores eficazes instantâneos das tensões e correntes de linhas no Ponto 03, bem como seus respectivos fatores de potência e DHT. A Tabela 6.4.2 mostra os valores das DHI, levando em conta até a 25ª harmônica. Os três maiores valores de DHI estarão em destaque.

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	cos $\phi$
R	683	618	6,9	34,0	0,93	0,98
S	683	638	6,9	33,2	0,93	0,98
T	682	626	7,2	34,5	0,92	0,98

Tabela 6.4.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 03

Ordem Harmônica	Sequência	DHIv (%)			DHIi (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,3	0,1	0,3	2,2	0,8	2,0
5	-	4,9	4,8	5,1	31,1	30,2	31,5
7	+	2,0	2,1	2,1	9,3	9,7	9,4
9	0	0,2	0,0	0,2	0,5	0,1	0,5
11	-	3,1	2,9	3,1	6,8	6,4	6,8
13	+	1,7	1,9	1,8	3,4	3,7	3,6
15	0	0,2	0,0	0,2	0,3	0,0	0,3
17	-	1,5	1,3	1,5	3,0	2,7	3,0
19	+	1,0	1,2	1,1	2,0	2,2	2,1
21	0	0,2	0,0	0,2	0,3	0,0	0,2
23	-	1,3	1,2	1,3	1,5	1,2	1,4
25	+	1,1	1,3	1,2	1,2	1,4	1,3

Tabela 6.4.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 03

Em seguida, as Figura 6.4.2 e 6.4.3 trazem os espectros de frequência da tensão e corrente para cada fase, sendo considerado até a 25ª componente harmônica.

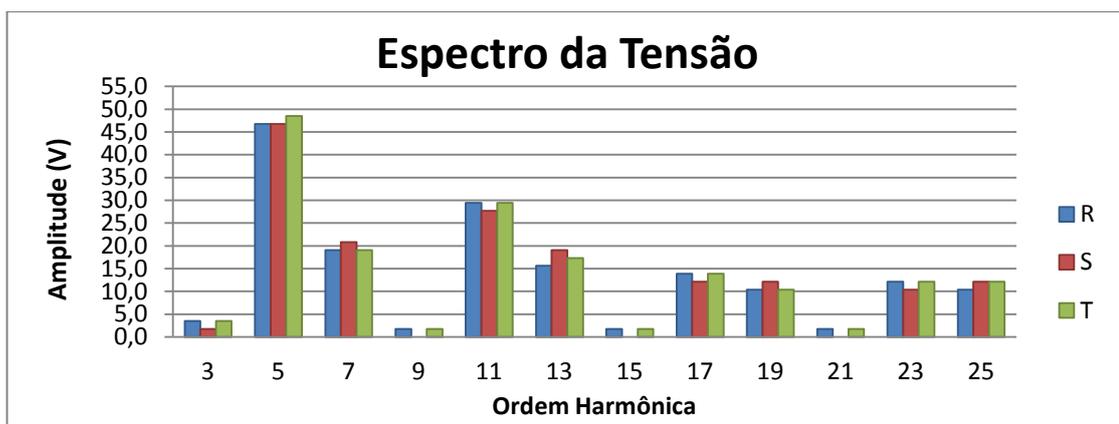
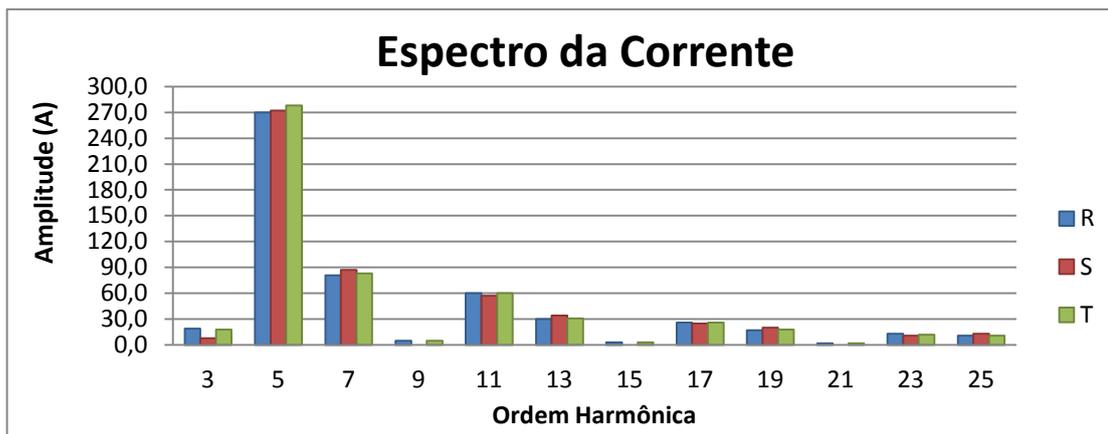


Figura 6.4.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 03



**Figura 6.4.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 03**

### 6.4.1 Análise da Tensão

Na sequência, são apresentados os resultados da comparação entre os dados coletados sobre tensão e as normas respectivas:

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Os valores de DHIv, em nenhuma fase, ultrapassam os valores estabelecidos na Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

Como a carga acoplada ao Ponto 03 é unicamente não linear, sendo um inversor de frequência, esse ponto de medição foi classificado como Classe 3 (Apenas cargas não-lineares). A Tabela 4.2 define DHTv máximo de 10% para Classe 3. O maior DHTv registrado, Tabela 6.4.1, foi de 7,2%, estando em conformidade com a norma.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

A Tabela 4.8 apresentada na IEEE, delimita o valor de 5% para DHTv em circuitos com tensão menor que 69 kV. De acordo Tabela 6.4.1, o valores de DHTv estão todos acima do permitido, chegando a 7,2%. Para as componentes individuais esta norma limita o valor de DHIv em 3% e nas harmônicas de 5ª e 11ª ordem, os valores de DHIv chegam a 5,1% e 3,1%, como mostra a Tabela 6.4.2, ultrapassando o limite da norma.

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Todos os valores coletados, de DHTv e de DHIv, estão abaixo dos limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### 6.4.2 Análise de Corrente

Abaixo estão os resultados da comparação entre os dados da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7).

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

A corrente de curto circuito neste ponto é 40 kA [11]. Para encontrarmos a relação usada na Tabela 4.7, vamos utilizar a corrente calculada a partir da potência máxima de demanda especificada em projeto, neste caso de 1478,00 kW.

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.2.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.2.2)$$

$$I_l = \frac{1478000,0}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 0,8} \quad (6.2.3)$$

$$I_l = 1545,88 \text{ A} \quad (6.2.4)$$

Com esses valores, a relação entre corrente de curto-circuito e corrente máxima de demanda ficou igual a 25,88. Para relação entre 20 e 50, a Tabela 5.7 determina DHTi máximo de 8%. Como mostra a Tabela 6.4.1, os DHTi superam os 34%, muito acima do permitido.

Para harmônicos de corrente de até 10ª ordem, a Tabela 4.7 estabelece valor máximo de DHli em 7%. As 5<sup>as</sup> e 7<sup>as</sup> componentes registradas neste ponto chegam a 31% e 9%, indicando altos índices de distorção. Para os harmônicos entre 11ª e 16ª ordem, a Tabela 4.7 define DHli máximo de 3,5%. A 11<sup>as</sup> e 13<sup>as</sup> componentes chegam ao DHli de 6% e 3,7%, não respeitando a norma. Os DHli das outras componentes estão de acordo com a norma.

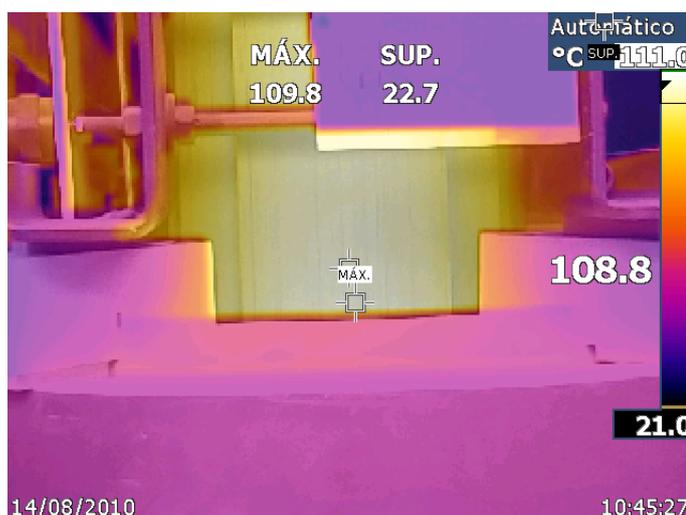
### 6.4.3 Breve Conclusão

As distorções de tensão neste ponto tem proporção mediana e não podem ser desprezadas. Os valores de DHTv e DHlv estão em desacordo com a

norma IEEE – std 519-1992. O DHTv chegando a 7,2% demonstrando que a forma de onda esta consideravelmente distorcida, podendo acarretar alguns danos, como mal funcionamento de equipamentos eletrônicos que dependem de uma forma de onda apurada, neste caso o inversor de frequência.

Os harmônicos de tensão de 5<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup> ordem, excederam os valores definidos na IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8). Essas harmônicas, juntamente com a de 7<sup>a</sup> ordem, são as principais responsáveis pelo alto DHTv e são sequência negativa, causadores de torque pulsante. O inversor alimentado neste ponto, não sofre diretamente com o efeito de torque pulsante, porem o alto DHTv, provocado principalmente por essas harmônicas, pode resultar em erros de medições, para equipamentos de medição que não são TRUE rms, e mal funcionamento para equipamentos eletrônicos. Alem disso, se forem ligadas cargas lineares a esse transformador, a tensão distorcida provocará uma corrente distorcida nas mesmas frequências, implicando em sobreaquecimento nos condutores por presença de altas frequências.

A respeito da corrente os índices de DHTi chegam neste ponto a 34%. O principal problema é o sobreaquecimento do transformador devido aumento excessivo das perdas, reduzindo a vida útil do mesmo. Os harmônicos de corrente nessas proporções também sobreaquecem os condutores. A Figura 6.4.4 mostra a temperatura do núcleo do TF – DRV – 2002 que é aproximadamente 110°C, próximo do máximo permitido.



**Figura 6.4.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-DRV-2002**

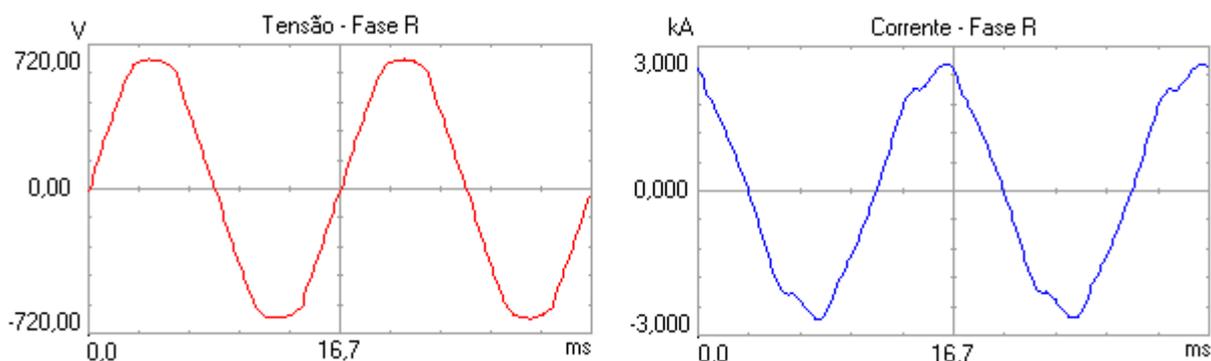
Além disso, os harmônicos com altas amplitudes, como mostra o espectro da corrente, aumentam consideravelmente a corrente eficaz do circuito. Neste caso, Figura 6.4.3, as amplitudes das 5<sup>as</sup>, 7<sup>as</sup>, 11<sup>as</sup> e 13<sup>as</sup> harmônicas são aproximadamente 270 A, 85 A, 60 A e 30 A. Isso dificulta a adição de novas cargas neste ponto.

Novamente, analisado a Tabela 6.4.1, notamos que o fator de potência é menor que o  $\cos\phi$ , demonstrando o aumento de reativos circulantes na rede.

## 6.5 Ponto de Medição 04: TF – 6501

As medições neste ponto foram realizadas aproximadamente as 21h46min do dia 07/12/2012. O analisador foi colocado sobre o secundário (estrela) do transformador TF – 6501, cujo circuito possui tensão nominal de 480 V e alimenta bombas, centrífugas e painéis de iluminação e tomadas. Dentre essas cargas estão presentes as lineares e não lineares.

Neste ponto, existe um pequeno desequilíbrio entre as fases, o que deixou a fase S um pouco mais sobrecarrega. Entretanto as formas de onda das fases se assemelham. A Figura 6.5.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha da fase R.



**Figura 6.5.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 04**

A Tabela 6.5.1 apresenta todos os parâmetros elétricos em valores instantâneos. A Tabela 6.5.2 mostra os valores das DHlv e DHli para harmônicos até da 25<sup>a</sup> ordem.

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	cos $\phi$
R	472	1835	2,6	5,6	0,79	0,80
S	472	1943	2,8	5,6	0,78	0,78
T	471	1849	2,9	6,1	0,76	0,77

Tabela 6.5.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 04

Ordem Harmônica	Sequência	DHIv (%)			DHIi (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,2	0,2	0,3	0,7	0,8	1,2
5	-	1,9	2,1	2,2	4,9	4,8	5,3
7	+	1,3	1,5	1,5	2,4	2,6	2,7
9	0	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
11	-	0,7	0,6	0,8	0,6	0,5	0,6
13	+	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
15	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
17	-	0,4	0,3	0,4	0,3	0,2	0,3
19	+	0,2	0,3	0,3	0,2	0,3	0,2
21	0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
23	-	0,3	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2
25	+	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2

Tabela 6.5.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 04

As Figuras 6.5.2 e 6.5.3 trazem os espectros de frequência da tensão e corrente para cada fase.

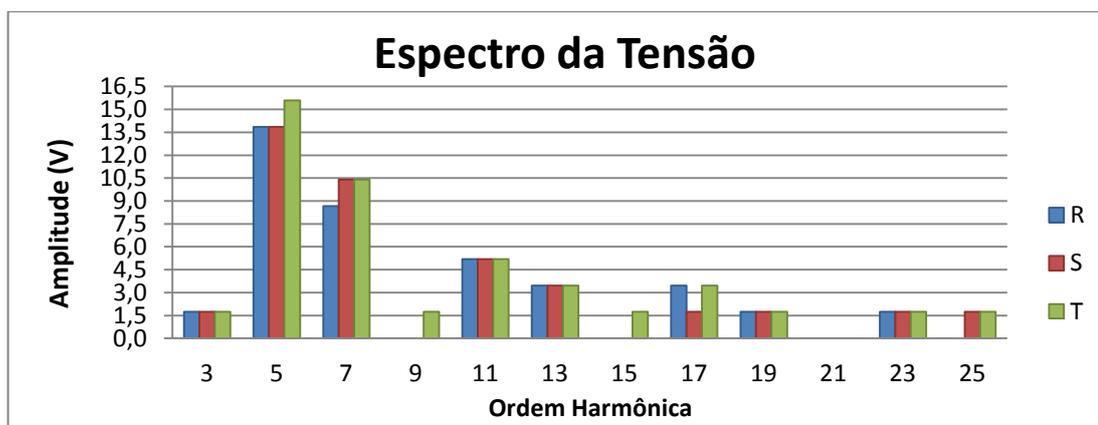
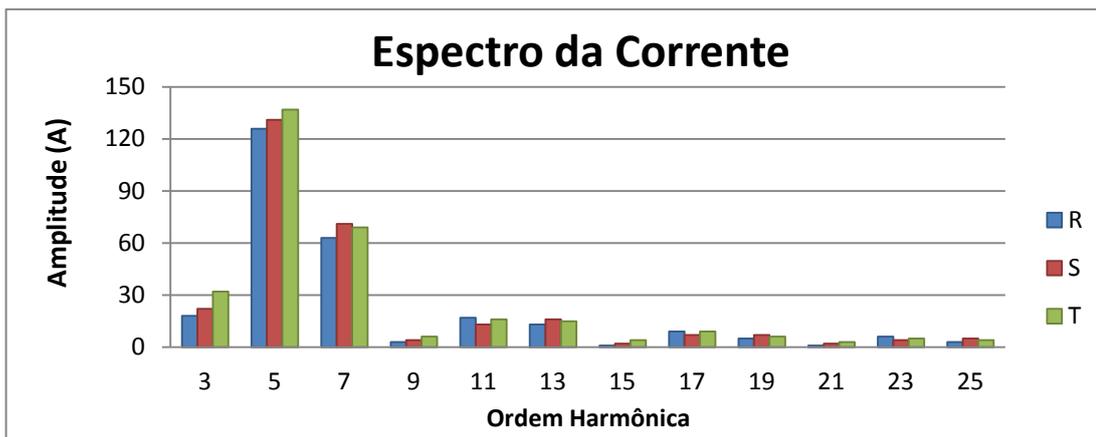


Figura 6.5.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 04



**Figura 6.5.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 04**

### **6.5.1 Análise de Tensão**

Neste subtópico, os valores referentes a tensão do Ponto 04, serão comparados com as normas respectivas.

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Os valores de DHLv, em nenhuma fase, ultrapassam os valores estabelecidos na Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

O Ponto 04 de medição se enquadra na Classe 2 (ponto de ligação comum em ambiente industrial). Os valores medidos de DHTv, Tabela 6.5.1, são menores que 3%, estando em conformidade com a norma que permite até 8%.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

Para este circuito essa norma, Tabela 4.8, delimita o valor de 5% para DHTv. De acordo Tabela 6.5.1, os valores medidos estão abaixo do permitido. Para DHLv a norma limita em 3% e, conforme a Tabela 6.5.2, os DHLv estão dentro do permitido

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Os valores de DHTv e de DHLv, estão abaixo dos limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### 6.5.2 Análise de Corrente

Abaixo estão os resultados da comparação entre os dados da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7).

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

A corrente de curto circuito é de 40 kA. Para encontrarmos a relação utilizada na Tabela 4.7, utilizaremos a corrente calculada através da potência máxima de demanda, 1435,14 kW:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.5.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.5.2)$$

$$I_l = \frac{1435140,0}{\sqrt{3} \cdot 480 \cdot 0,7} \quad (6.5.3)$$

$$I_l = 2466,00 \text{ A} \quad (6.5.4)$$

A relação entre a corrente calculada e a corrente de curto é igual a 16,22. Para relação menor que 20, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 5,0%. Como mostra a Tabela 6.5.2, os DHTi superam os 6,1%, ou seja, estão acima do limite. A Tabela 4.7 traz também os valores máximos para DHli e, comparando com nossos resultados, constatamos que as componentes de 5ª ordem estão próximas de 5% ultrapassando o valor de 4% estipulado pela norma para essas frequências.

### 6.5.3 Breve Conclusão

Neste ponto, a distorção da tensão é de baixa relevância, como pode ser visto na Figura 6.5.1, a forma de onda é praticamente senoidal. Os valores de DHTv e DHlv estão todos em conformidade com as normas, expressando uma pequena influência harmônica de tensão sobre o sistema.

Sobre a corrente, os dados coletados nos mostram que os índices de distorção estão acima dos estabelecidos nas normas. As componentes harmônicas responsáveis pelo DHTi de 6,1% são as de 5ª e 7ª ordem, pois tem alta

amplitude, Figura 6.5.3. A componente de 5ª ordem excede um pouco o valor definido na IEE, o que pode gerar problemas principalmente pelo fato de aumentar o DHTi e de ser sequência negativa, provocando o surgimento de harmônicos de tensão de sequência negativa.

É bom observar que mesmo valores baixos para os DHli, em circuitos como este, onde a corrente tem um valor elevado, o harmônicos de corrente ajudam a sobrecarregar o transformador, aumentando a corrente eficaz e aumentando as perdas, reduzindo a capacidade de alimentação e a vida útil do mesmo. Observando a Figura 6.5.3, percebemos que a 5ª e 7ª componente tem amplitude de 135 A e 70 A, sendo considerada alta, justamente pelo fato da corrente do circuito ser alta. A Figura 6.5.4 nos mostra que o transformador está operando a 118°C, estando acima do máximo permitido, danificando sua isolação e prejudicando seu rendimento.

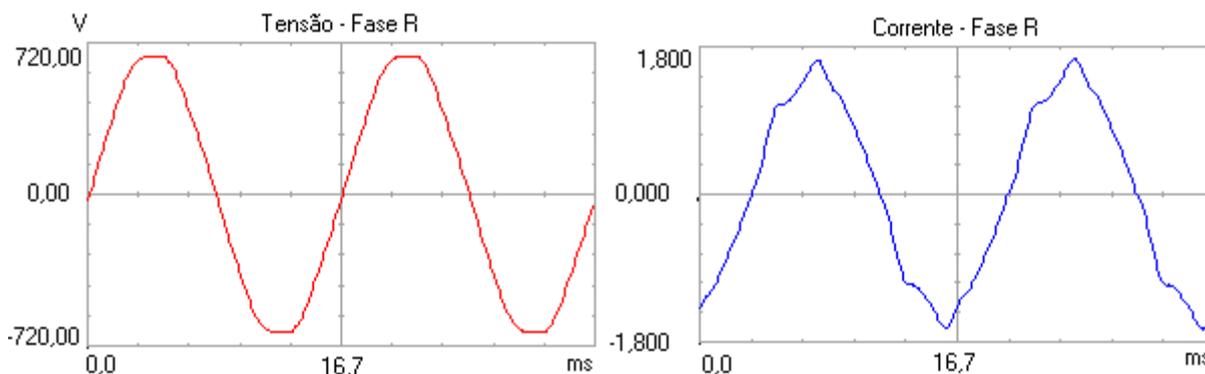


**Figura 6.5.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-6501**

## **6.6 Ponto de Medição 05: TF – 6502**

As medições neste ponto foram realizadas aproximadamente as 20h53min do dia 07/12/2012. A análise foi realizada sobre o secundário (estrela) do transformador TF – 6502, com tensão de linha de 480 V. As cargas alimentadas são bombas e agitadores, sendo algumas caracterizadas como não lineares e outras lineares.

Foi constatado um pequeno desequilíbrio entre as três fases, porém a forma de onda, da tensão e corrente das fases, são semelhantes. A Figura 6.6.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha da fase R.



**Figura 6.6.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 05**

A Tabela 6.6.1 apresenta em valor instantâneo a tensão, corrente, DHT, fator de potência e  $\cos \phi$ . A Tabela 6.6.2 mostra os valores e a sequência das DHlv e DHli para harmônicos até da 25ª ordem.

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	$\cos \phi$
R	480	1090	2,1	7,1	0,76	0,77
S	479	1155	2,3	7,7	0,76	0,77
T	478	1212	2,3	7,6	0,74	0,75

**Tabela 6.6.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 05**

Ordem Harmônica	Sequência	DHlv (%)			DHli (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,1	0,2	0,2	0,8	0,8	1,5
5	-	1,5	1,7	1,7	5,4	6,0	5,8
7	+	1,2	1,4	1,3	4,0	4,3	4,2
9	0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,2	0,0
11	-	0,2	0,2	0,3	1,6	1,5	1,6
13	+	0,1	0,1	0,2	0,5	0,5	0,4
15	0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
17	-	0,1	0,0	0,0	0,2	0,2	0,3
19	+	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1
21	0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1
23	-	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
25	+	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1

**Tabela 6.6.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 05**

As Figuras 6.6.2 e 6.6.3 trazem os espectros de frequência da tensão e corrente, expondo a amplitude em função da frequência para cada fase.

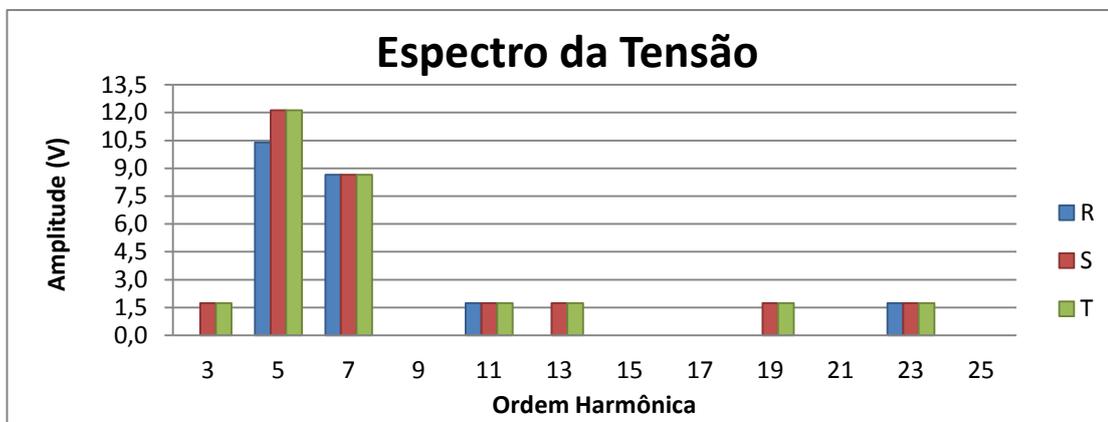


Figura 6.6.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 05

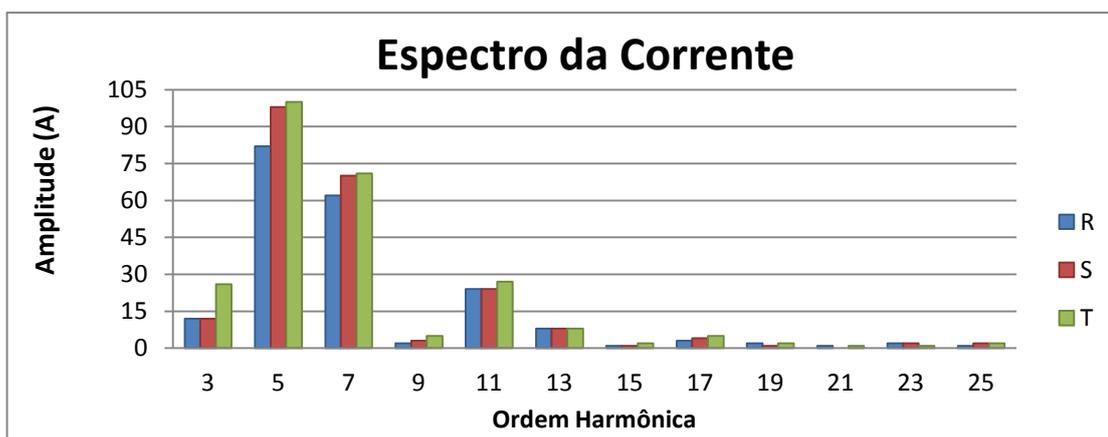


Figura 6.6.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 05

### 6.6.1 Análise de Tensão

Neste subtópico, os valores referentes a tensão do Ponto 05, serão comparados com as normas respectivas.

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Os valores de DHlv, Tabela 6.6.2, respeitam os limites estabelecidos na Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

O Ponto 05 de medição se enquadra na Classe 2 (ponto de ligação comum em ambiente industrial). Os valores medidos de DHTv, Tabela 6.6.1, são menores que 3%, estando em conformidade com a norma que permite até 8%.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

Para este circuito, esta norma delimita na Tabela 4.8, delimita o valor de 5% para DHTv. De acordo Tabela 6.6.1, os valores medidos estão abaixo do permitido. Para DHLv a norma limita em 3% e, conforme a Tabela 6.6.2, os DHLv estão dentro do permitido

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Os valores de DHTv e de DHLv, estão abaixo dos limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### **6.6.2 Análise de Corrente**

Abaixo estão os resultados da comparação entre os dados da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7).

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

A corrente de curto-circuito é de 40 kA [11]. Para calcularmos a relação utilizada nesta norma, utilizaremos a potência máxima de demanda utilizada em projeto, 1,023.55 kW.

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.6.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.6.2)$$

$$I_l = \frac{1023550,0}{\sqrt{3} \cdot 480 \cdot 0,7} \quad (6.6.3)$$

$$I_l = 1758,77 A \quad (6.6.4)$$

A relação entre a corrente de curto e a corrente calculada é igual a 22,74. Para relação entre 20 e 50, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 8,0%. Como mostra a Tabela 6.6.1, os DHTi não chegam a 8%, ou seja, estão dentro do

permitido. Para o DHli, o valores coletados, Tabela 6.6.2, não ultrapassam em nenhuma componente os valores máximos apresentados na Tabela 4.7.

### 6.6.3 Breve Conclusão

No Ponto 05, a medição mostrou que a tensão apresenta pouca distorção em sua forma de onda, conforme pode ser visto na Figura 6.6.1, a tensão se aproxima de uma senoidal perfeita. Concluímos que o pequeno DHTv de aproximadamente 2% não implica em danos relevante a esta análise.

Em relação a corrente, os dados nos mostram que os índices de harmônicos de corrente estão dentro do permitido na norma IEEE, porém o DHTi superou os 7%, uma taxa considerável para um circuito com corrente elevada. As componentes harmônicas responsáveis são as de 5ª e 7ª ordem, pois tem alta amplitude, Figura 6.5.3.

Mesmo que os valores de DHli estejam dentro da norma, nestas proporções eles aumentam a corrente eficaz e contribuem para o sobreaquecimento do transformador, devido aumento das perdas por presença de altas frequências. Assim, a vida útil e a capacidade de transmissão do TF-6502 são comprometidas devido a presença de harmônicos de corrente. A Figura 6.6.4 mostra a temperatura do núcleo do TF-6502 que esta próxima de 110°C, próximo do máximo. Pode-se afirmar que o DHTi superior a 7% tem influência direta sobre essa temperatura.

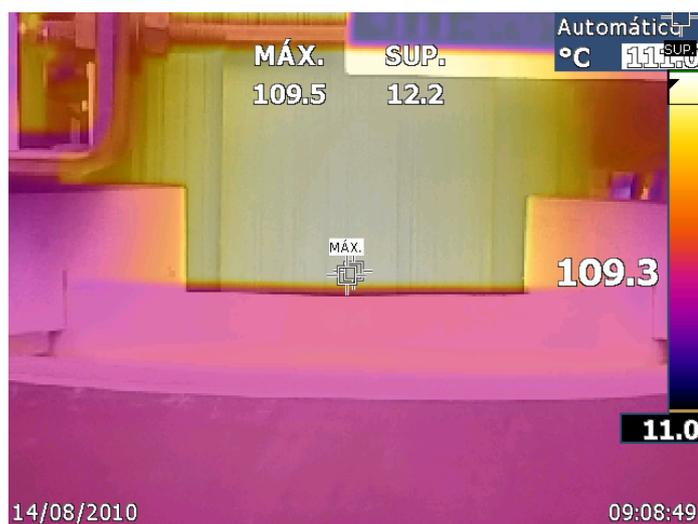


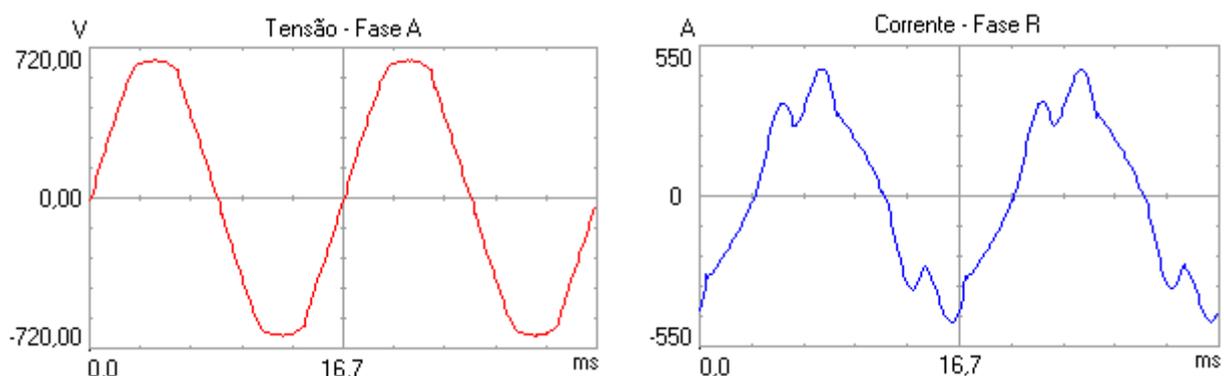
Figura 6.6.4 – Temperatura do núcleo no transformador TF-6502

Neste ponto a diferença foi entre o FP e  $\cos\phi$  é pequena, cerca de 0,01, porem para grandes potências como neste caso, os cabos e transformadores são sobrecarregados pela circulação de reativos na rede.

### 6.7 Ponto de Medição 06: TF – 8001A

As medições neste ponto foram realizadas aproximadamente as 18h30min do dia 27/09/2012. A análise foi realizada sobre o secundário (estrela) do transformador TF – 8001A, com tensão de linha de 480 V. As principais cargas alimentadas são esteiras, bombas, alimentadores, ventiladores e painéis da Caldeira A.

A Figura 6.7.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha da fase R.



**Figura 6.7.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 06**

A Tabela 6.7.1 apresenta todos os parâmetros elétricos em valores instantâneos. A Tabela 6.7.2 mostra os valores das DHlv e DHli para harmônicos até da 25ª ordem.

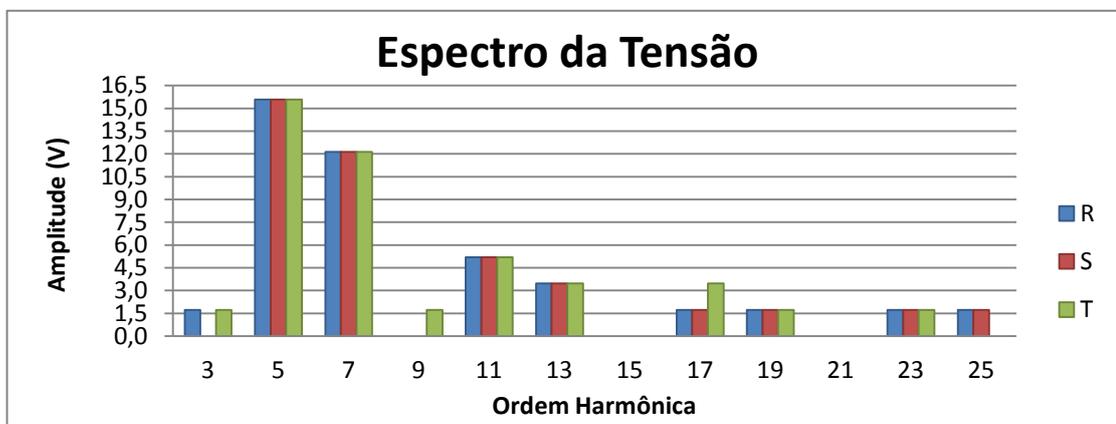
Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	$\cos \phi$
R	484	273	3,0	17,7	0,74	0,75
S	484	284	3,1	17,9	0,72	0,73
T	483	271	3,1	17,7	0,71	0,72

**Tabela 6.7.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 06**

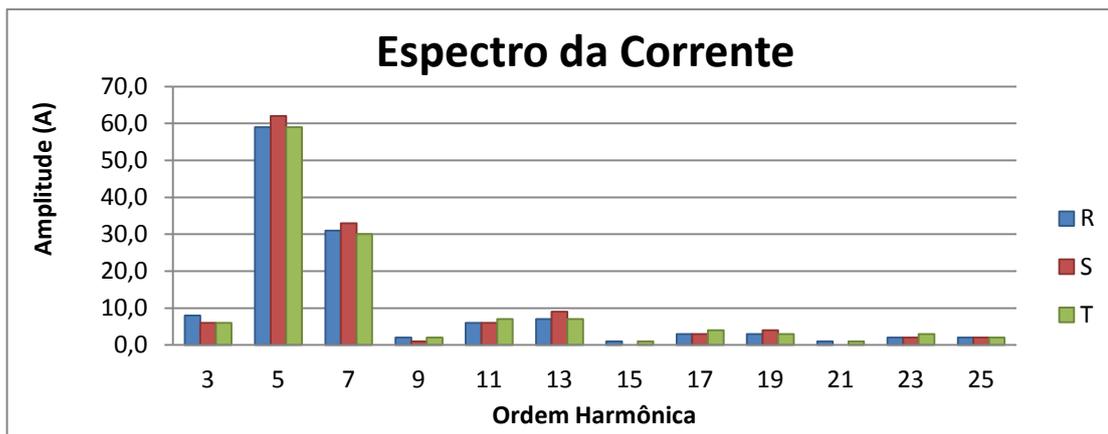
Ordem Harmônica	Sequência	DHIv (%)			DHIi (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,2	0,1	0,2	2,1	1,5	1,7
5	-	2,2	2,3	2,3	15,3	15,5	15,5
7	+	1,7	1,8	1,7	8,2	8,4	8,0
9	0	0,1	0,1	0,1	0,5	0,2	0,4
11	-	0,7	0,7	0,8	1,6	1,6	1,8
13	+	0,5	0,5	0,5	1,8	1,9	1,8
15	0	0,1	0,0	0,1	0,3	0,1	0,3
17	-	0,3	0,3	0,4	0,8	0,8	1,0
19	+	0,3	0,3	0,3	0,9	1,0	0,8
21	0	0,1	0,0	0,1	0,2	0,1	0,2
23	-	0,2	0,2	0,2	0,6	0,5	0,7
25	+	0,1	0,1	0,1	0,5	0,6	0,4

**Tabela 6.7.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 06**

Na sequência, as Figuras 6.7.2 e 6.7.3 trazem os espectros de frequência da tensão e corrente para cada fase, sendo considerado até a 25ª componente harmônica.



**Figura 6.7.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 06**



**Figura 6.7.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 06**

### **6.7.1 Análise da Tensão**

Segue abaixo o comparativo de tensão entre dados coletados e as normas respectivas:

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Analisando os valores de DHIv coletados neste ponto, Tabela 6.7.2, verificou-se que neste ponto de medição não existem valores superiores aos limites estabelecidos pela Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

Para esta norma, classificamos a carga alimentada pelo transformador em questão como Classe 2 (ponto de ligação comum em ambiente industrial). A Tabela 4.2, define DHTv máximo de 8% para cargas Classe 2. Comparando os dados coletados, Tabela 6.7.1, notamos que o maior valor de DHTv entre as três fases medidas é de 3,1%, seguindo portanto, o limite definido.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

Para a tensão a Tabela 4.8 limita o DHIv e o DHTv, sendo, neste caso, 3% e 5%, respectivamente. Comparando as Tabelas 6.7.1 e 6.7.3, notamos os valores coletados respeitam a norma.

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Todos os valores de DHTv de DHIv, coletados neste transformador, estão abaixo dos limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### 6.7.2 Análise da Corrente

A seguir, um comparativo entre os valores da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

Para encontrarmos a relação desta norma utilizaremos a corrente de curto circuito 40 kA [11] e a corrente calculada através da potência máxima de demanda, 782,4 kW [9]:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.7.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.7.2)$$

$$I_l = \frac{782400,0}{\sqrt{3} \cdot 480 \cdot 0,7} \quad (6.7.3)$$

$$I_l = 1344,40 \text{ A} \quad (6.7.4)$$

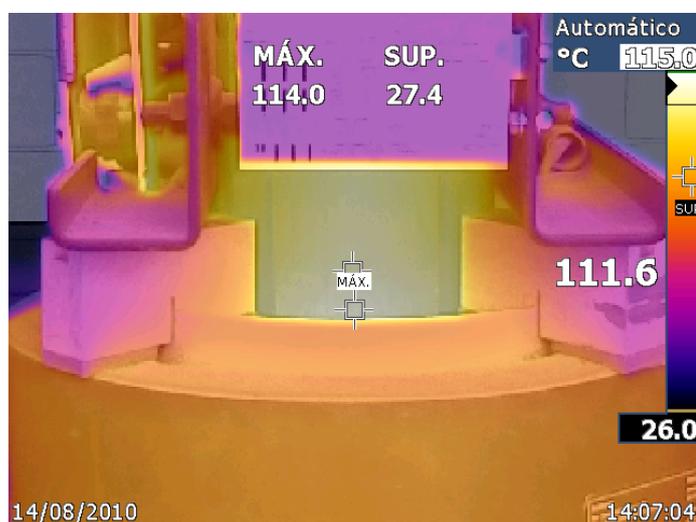
Com essa corrente, a relação entre corrente de curto-circuito e corrente máxima de demanda ficou igual a 29,75. Para relação entre 20 e 50, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 8,0%. Como mostra a Tabela 6.7.1, os DHTi superam os 17%, ou seja, estão bem acima do limite. A Tabela 4.7 traz também os valores máximos para DHli e, comparando com nossos resultados, constatamos que as componentes de 5ª ordem estão próximas de 15% e, as de 7ª ordem, estão próximas de 8%, estando acima do valor de 7% estipulado pela norma para essas frequências.

### 6.7.3 Breve conclusão

A análise mostrou que a tensão apresenta pouca distorção em sua forma de onda, conforme pode ser visto na Figura 6.7.1, a tensão é senoidal. Conclui-se que o DHTv de aproximadamente 3% não implica em danos de alta proporção.

Sobre a corrente, os dados coletados nos mostram que os índices de distorção de corrente estão elevados, com DHTi chegando a 17%. As componentes harmônicas responsáveis pelo alto DHTi são as de 5ª e 7ª ordem, pois tem alta amplitude, como mostra o espectro de frequência na Figura 6.7.3. Essas componentes possuem alta amplitude e excedem o limite estabelecido pela IEE.

O DHTi alto sobreaquece o transformador, reduzindo consideravelmente sua vida útil. A análise termográfica no mostra, Figura 6.7.4, que a temperatura do núcleo do TF – 8001A que esta é de 114°, próximo do máximo permitido pelo manual do transformador [manual Siemens]. Pode-se afirmar que o DHTi neste ponto, superior a 17%, tem influência direta sobre essa temperatura.



**Figura 6.7.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8001A**

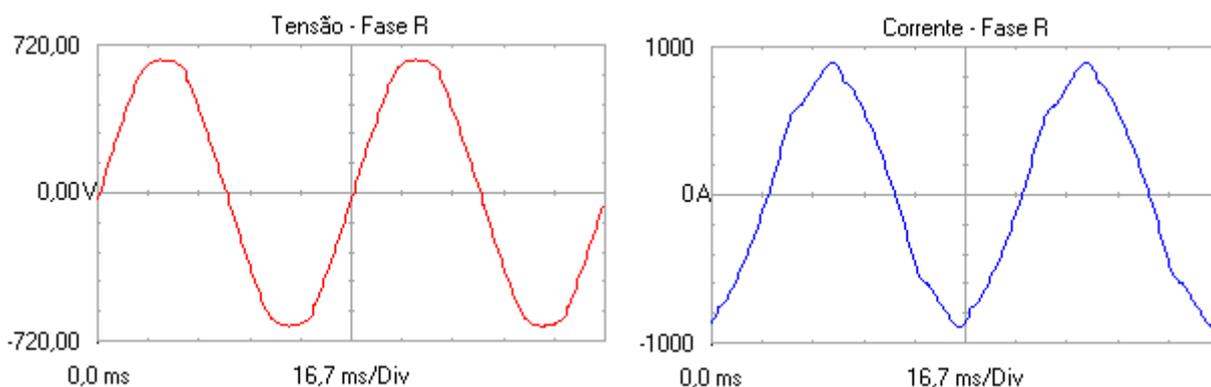
Como pode ser visto no espectro da frequência da corrente, Figura 6.7.3, as amplitudes de 5ª e 7ª ordem tem valores de 60 A e 31 A. Estes valores são altos e aumentam o valor da corrente, diminuindo a capacidade do transformado de alimentar novas cargas.

Novamente, a potência distorcida reduz o fator de potência sobrecarregando os cabos e geradores devido aumento de reativos circulando na rede.

## 6.8 Ponto de Medição 07: TF – 8001B

A coleta de dados neste ponto foi realizada aproximadamente as 18h00min do dia 27/09/2012. A análise foi realizada sobre o secundário (estrela) do transformador TF-8001B. Este circuito possui tensão nominal de 480 V. As principais cargas são esteiras, bombas, alimentadores, ventiladores e painéis da Caldeira B.

Como as fases estão balanceadas a formas de onda são semelhantes em todas as fases. A Figura 6.8.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha da fase R.



**Figura 6.8.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 07**

A Tabela 6.8.1 apresenta todos os parâmetros elétricos em valores instantâneos.

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	cos $\phi$
R	473	607	2,1	4,6	0,71	0,72
S	473	617	2,2	4,7	0,69	0,69
T	472	601	2,2	4,7	0,68	0,68

**Tabela 6.8.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 07**

A Tabela 6.8.2 mostra os valores das DHlv e DHli para cada componente, as Figuras 6.8.2 e 6.8.3 trazem os espectros de frequência da tensão e corrente para cada fase, sendo considerado até a 25ª componente harmônica.

Ordem Harmônica	Sequência	DHIv (%)			DHIi (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,2	0,1	0,2	0,7	0,2	0,7
5	-	1,6	1,6	1,7	3,8	3,9	4,0
7	+	1,3	1,4	1,3	2,4	2,4	2,3
9	0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1
11	-	0,5	0,4	0,5	0,8	0,8	0,9
13	+	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5
15	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
17	-	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4
19	+	0,2	0,2	0,1	0,3	0,3	0,2
21	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1
23	-	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3
25	+	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1

Tabela 6.8.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 07

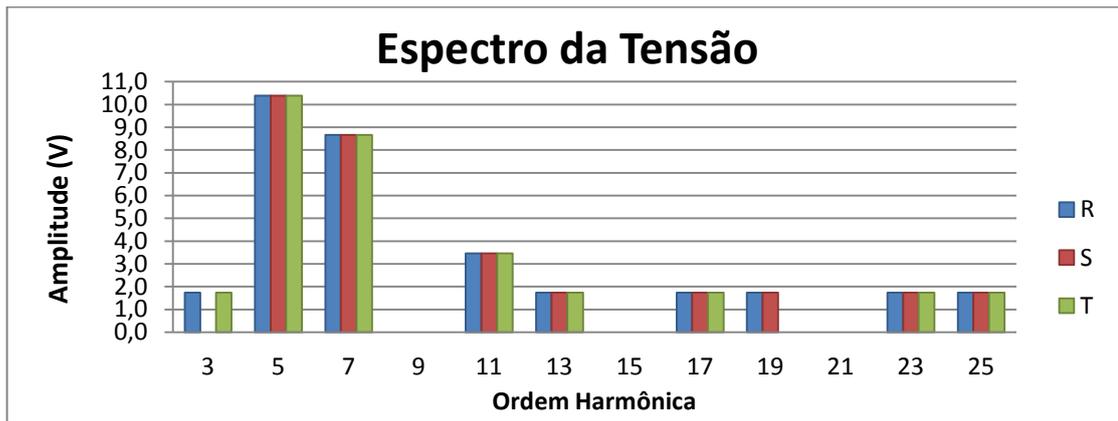


Figura 6.8.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 07

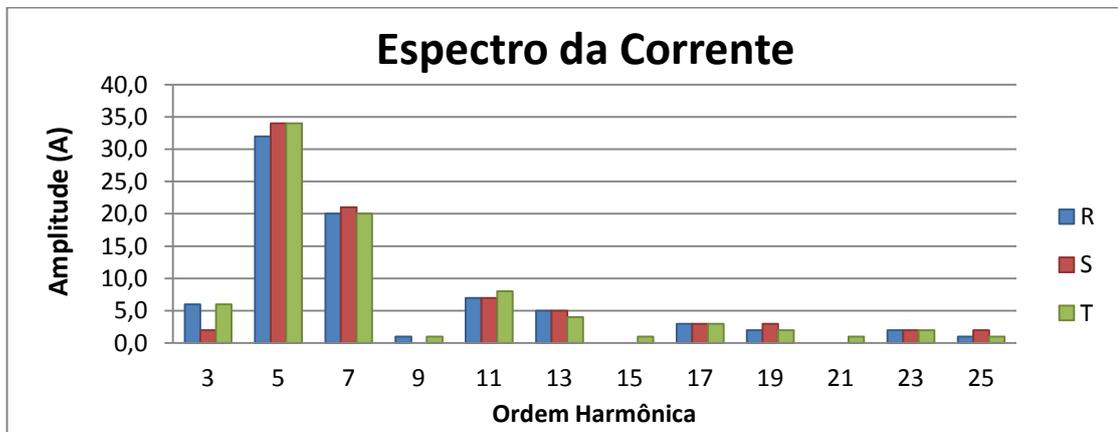


Figura 6.8.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 07

### 6.8.1 Análise de Tensão

Abaixo, os valores referentes a tensão do Ponto 07 serão comparados com as normas respectivas.

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Os valores de DHLv, Tabela 6.8.2, respeitam os limites estabelecidos na Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

O Ponto 07 de medição se enquadra na Classe 2 (ponto de ligação comum em ambiente industrial). Os valores medidos de DHTv, Tabela 6.8.1, são menores que 3%, estando em conformidade com a norma que permite até 8%.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

Para este circuito, esta norma delimita na Tabela 4.8, o valor de 5% para DHTv. De acordo Tabela 6.8.1, os valores medidos estão abaixo do permitido. Para DHLv a norma limita em 3% e, conforme a Tabela 6.8.2, os DHLv medidos estão dentro do permitido

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Os valores de DHTv e de DHLv, estão abaixo dos limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### 6.8.2 Análise de Corrente

Abaixo estão os resultados da comparação entre os dados da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7).

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

Para calcularmos a relação utilizada nesta norma, utilizaremos a potência máxima de demanda utilizada em projeto, 782,40 kW [9]:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.8.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.8.2)$$

$$Il = \frac{782400,0}{\sqrt{3} \cdot 480 \cdot 0,7} \quad (6.8.3)$$

$$Il = 1344,40 \text{ A} \quad (6.8.4)$$

Com a corrente de curto circuito de 40 kA [11] a relação entre a corrente de curto e a corrente calculada é igual a 29,75. Para relação entre 20 e 50, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 8%. Como mostra a Tabela 6.8.1, o DHTi das fases não chegam a 5%, ou seja, estão dentro do permitido. Para o DHli, o valores coletados, Tabela 6.8.2, não ultrapassam em nenhuma componente os valores máximos apresentados na Tabela 4.7.

### **6.8.3 Breve Conclusão**

No Ponto 07, a medição indica baixas taxas de distorção harmônica de tensão, conforme pode ser visto na Figura 6.8.1, a tensão se aproxima de uma senoidal perfeita. Concluímos que o pequeno DHTv de aproximadamente 2% não represente danos consideráveis a instalação.

Em relação a corrente, os dados nos mostram que os índices de harmônicos de corrente estão dentro do permitido na norma IEEE, apresentando pequenos rios ao circuito, como elevação da temperatura nos cabos e aumento de perdas no transformador.

Ressaltando que, com baixos índices de DHli, todos dentro dos limites estabelecido na norma IEEE, as amplitudes são baixas e não interferem muito na temperatura do transformador. Podemos notar na Figura 6.8.4 que o transformador opera em boas condições de temperatura.

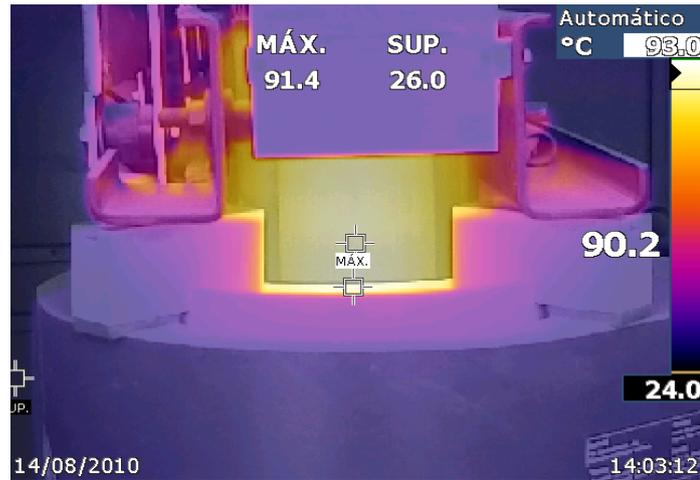


Figura 6.8.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8001B

### 6.9 Ponto de Medição 08: TF – 8001C

A análise neste ponto foi realizada aproximadamente as 18h50min do dia 27/09/2012. A análise foi realizada sobre o secundário (estrela) do transformador TF – 8001C, com tensão de linha de 690 V. As principais cargas alimentadas são ventiladores e bombas de alta potência.

A Figura 6.9.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha da fase R. A Tabela 6.9.1 apresenta todos os parâmetros elétricos em valores instantâneos.

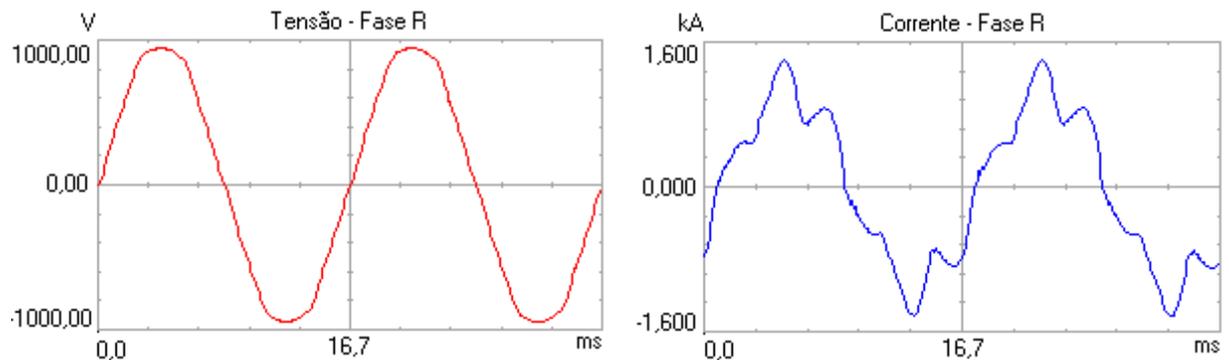


Figura 6.9.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 08

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	cos $\phi$
R	690	841	2,9	22,8	0,97	1,00
S	691	892	3,1	22,1	0,98	1,00
T	688	864	3,2	23,1	0,98	1,00

Tabela 6.9.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 08

A Tabela 6.7.2 mostra os valores das DHlv e DHli. As Figuras 6.9.2 e 6.9.3 apresentam o espectros da tensão e corrente no ponto 08.

Ordem Harmônica	Sequência	DHlv (%)			DHli (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,1	0,1	0,2	1,2	2,0	3,2
5	-	2,3	2,5	2,6	22,0	21,2	22,1
7	+	1,1	1,2	1,2	6,2	6,4	6,1
9	0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,3	0,4
11	-	1,0	1,0	1,1	3,8	3,5	3,7
13	+	0,4	0,5	0,5	1,3	1,4	1,4
15	0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2
17	-	0,5	0,5	0,5	1,3	1,2	1,3
19	+	0,2	0,3	0,3	0,6	0,6	0,7
21	0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
23	-	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,5
25	+	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4	0,4

Tabela 6.9.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 08

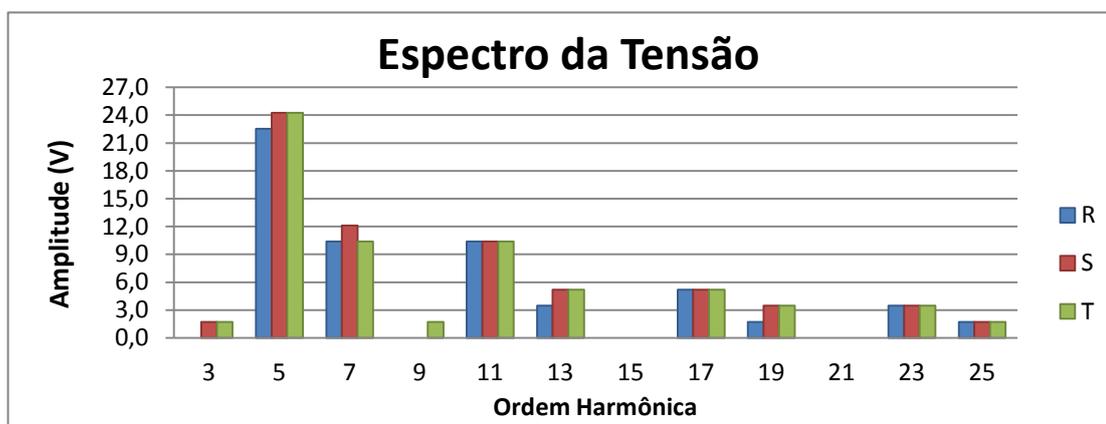


Figura 6.9.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 08

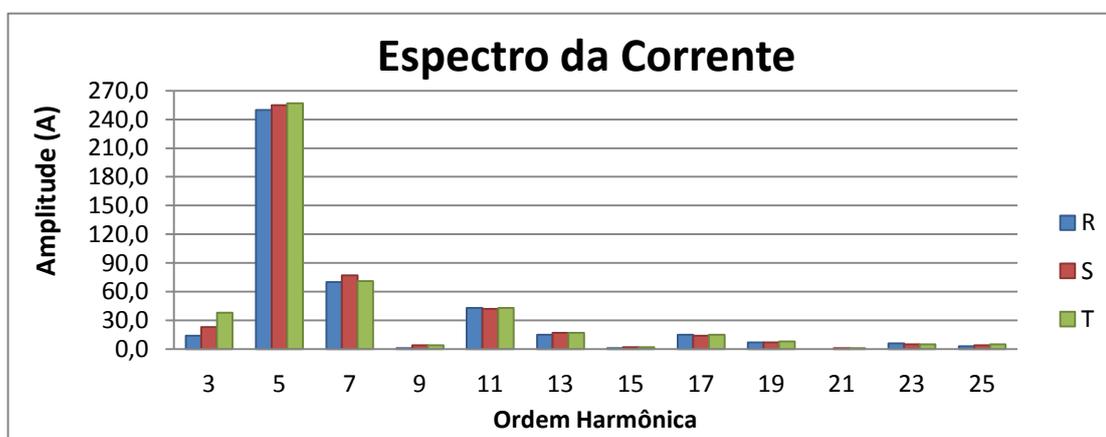


Figura 6.9.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 08

### 6.9.1 Análise de Tensão

Segue abaixo o comparativo de tensão entre dados coletados e as normas respectivas:

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

O valores de DHLv, Tabela 6.9.2, estão abaixo dos limites estabelecidos pela Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

Classificamos este ponto de medição como Classe 2 (ponto de ligação comum em ambiente industrial). A Tabela 4.2, define DHTv máximo de 8% para cargas Classe 2. Comparando os dados coletados, Tabela 6.9.1, notamos que o DHTv atinge 3,2%, estando dentro do permitido.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

Para a tensão a Tabela 4.8 limita o DHTv e o DHLv, sendo, neste caso, 5% e 3%, respectivamente. Comparando as Tabelas 6.9.1 e 6.9.3, notamos que a norma foi respeitada.

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Todos os valores de DHTv de DHLv, coletados neste transformador, estão abaixo dos limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### 6.9.2 Análise da Corrente

A seguir, um comparativo entre os valores da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

Para encontrar a relação utilizaremos a corrente calculada através da potência máxima de demanda:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.9.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.9.2)$$

$$Il = \frac{2917790,0}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 0,9} \quad (6.9.3)$$

$$Il = 2712,70 \text{ A} \quad (6.9.4)$$

Com a corrente de curto circuito 40 kA [11], a relação entre corrente de curto-circuito e corrente máxima de demanda ficou igual a 14,75. Para relação menor que 20, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 5,0%. Como mostra a Tabela 6.9.1, os DHTi superam os 23%, ou seja, estão bem acima do limite. A Tabela 4.7 traz também os valores máximos para DHli e, comparando com nossos resultados, constatamos que as componentes de 5ª ordem estão próximas de 22% e as de 7ª ordem, estão próximas de 6%, estando acima do valor de 4% estabelecido para essas componentes. As componentes de 11ª ordem estão próximas de 4%, ultrapassando também o valor de 2% definido para esta ordem.

### **6.9.3 Breve conclusão**

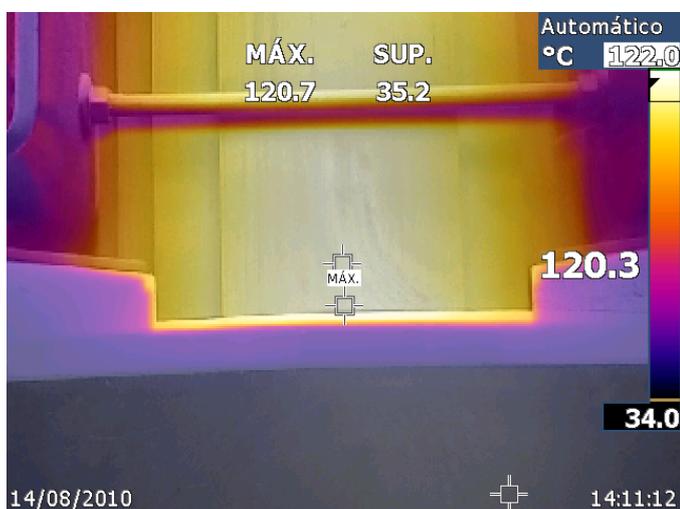
As medições apresentaram pequenas distorções de tensão, como pode ser visto na Figura 6.9.1, a onda da tensão é senoidal. Assim, o DHTv de aproximadamente 3% não representa grandes riscos ao circuito.

A corrente medida apresenta elevados índices de distorção harmônica, com DHTi chegando a 23%. As componentes harmônicas responsáveis pelo alto DHTi são as de 5ª, 7ª e 11ª ordem, pois, como mostra a Figura 6.9.3, elas possuem grandes amplitudes, excedendo os limites estabelecidos pela IEEE.

A alta taxa de DHTi provoca o sobreaquecimento do transformador, danifica sua isolação e reduz consideravelmente sua vida útil. A análise termográfica, Figura 6.9.4, mostra que a temperatura do núcleo do TF – 8001C que esta aproximadamente em 121°, acima do máximo permitido de 115°[manual Siemens]. Pode-se afirmar que o DHTi próximo de 23% contribui diretamente para o sobreaquecimento mostrado no relatório termográfico [Relatório de Termografia], Figura 6.9.4.

Outro problema é o aumento da corrente eficaz provocado pelos harmônicos de corrente com elevada amplitude. Como mostrado no espectro de frequência as componentes de 5ª, 7ª e 11ª ordem, tem amplitudes de 250 A, 70 A e

40 A, os quais são valores altos para este circuito. Esse aumento diminui a capacidade do transformador de alimentar mais cargas.



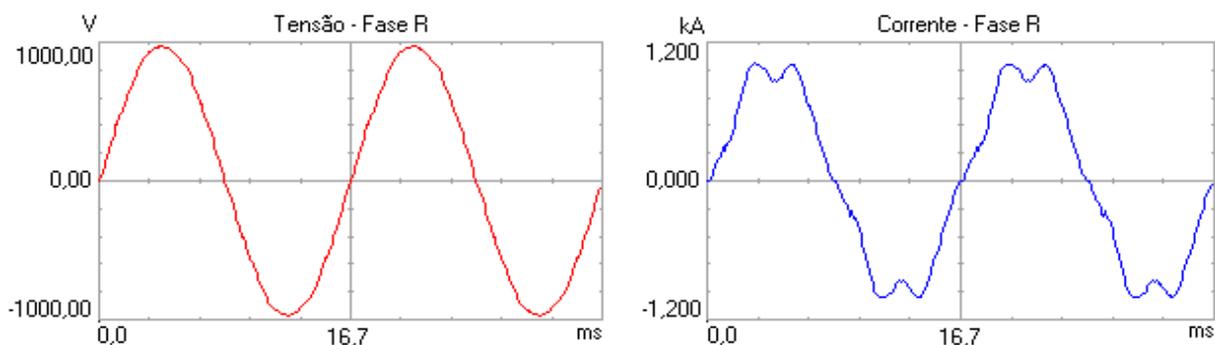
**Figura 6.9.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8001C**

O fator de potência, como mostra a Tabela 6.9.1, está abaixo do  $\cos\phi$ . Quanto mais baixo o fator de potência, maior a energia reativa provocando aumento das perdas e sobrecarga nas instalações.

### 6.10 Ponto de Medição 09: TF – 8001D

A coleta de dados neste ponto foi realizada aproximadamente 18h12min do dia 27/09/2012. A análise foi realizada sobre o secundário (estrela) do transformador TF – 8001D, com tensão de linha de 690 V. As principais cargas alimentadas são ventiladores e bombas de alta potência.

A Figura 6.10.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha coletadas na fase R. A Tabela 6.10.1 apresenta todos os parâmetros elétricos em valores instantâneos.



**Figura 6.10.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 09**

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	cos $\phi$
R	693	818	1,3	12,0	0,90	0,91
S	693	825	1,4	10,8	0,91	0,91
T	691	811	1,4	12,7	0,91	0,91

Tabela 6.10.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 09

A Tabela 6.10.2 mostra os valores das DHlv e DHli. As Figuras 6.10.2 e 6.10.3 apresentam os espectros da tensão e corrente no ponto 09.

Ordem Harmônica	Sequência	DHlv (%)			DHli (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	0,1	0,2	0,3	0,8	0,9	1,4
5	-	0,5	0,5	0,4	10,9	9,7	11,7
7	+	0,7	0,8	0,7	3,6	3,4	3,4
9	0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1	0,1
11	-	0,6	0,6	0,7	1,7	1,6	1,7
13	+	0,2	0,3	0,3	0,4	0,5	0,4
15	0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1
17	-	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4
19	+	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2
21	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
23	-	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
25	+	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,2

Tabela 6.10.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 09

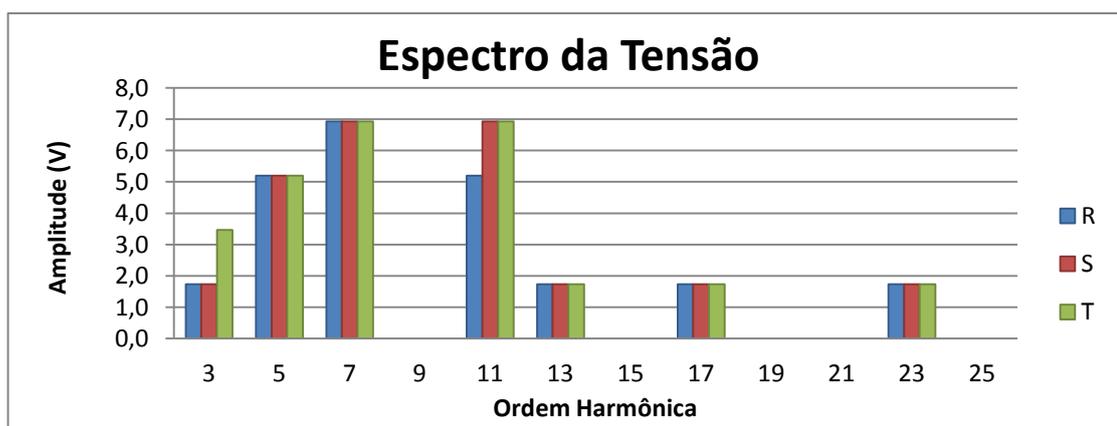
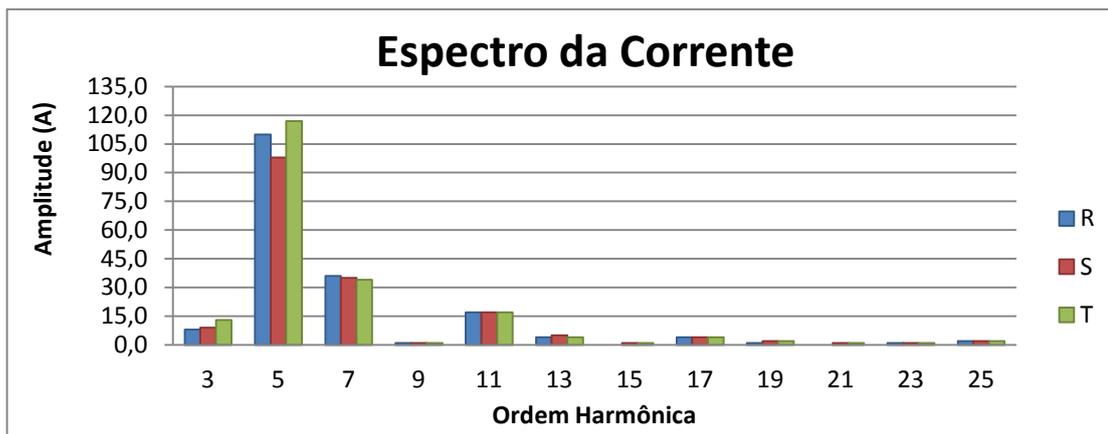


Figura 6.10.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 09



**Figura 6.10.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 09**

### 6.10.1 *Análise de Tensão*

Segue abaixo o comparativo de tensão entre dados coletados e as normas respectivas:

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Todos os valores de DHlv coletados neste ponto, Tabela 6.10.2, estão abaixo dos limites estabelecidos pela Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

Este ponto de medição caracteriza Classe 2 (ponto de ligação comum em ambiente industrial). A Tabela 4.2 estabelece DHTv máximo de 8% para cargas Classe 2 e nosso DHTv não chega a 1,5%, estando dentro do permitido.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

A Tabela 4.8 limita o DHTv e o DHlv, sendo, neste caso, 5% e 3%, respectivamente. Observando as Tabelas 6.10.1 e 6.10.3, notamos que a norma foi respeitada.

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Todos os valores de DHTv de DHlv, coletados neste transformador, estão em conformidade com limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### 6.10.2 *Análise da Corrente*

A seguir, um comparativo entre os valores da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

A corrente de curto-circuito no ponto de medição 09 é de 40 kA [11]. Para encontrar a relação utilizaremos a corrente calculada através da potência máxima de demanda:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos \phi \quad (6.9.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos \phi} \quad (6.9.2)$$

$$I_l = \frac{2917790,0}{\sqrt{3} \cdot 690 \cdot 0,9} \quad (6.9.3)$$

$$I_l = 2712,70 \text{ A} \quad (6.9.4)$$

A relação entre corrente de curto-circuito e corrente máxima de demanda é de 14,75. Para valores menores que 20, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 5,0%. A Tabela 6.10.1 mostra que os DHTi superam os 12%, desobedecendo a norma. A Tabela 4.7 traz também os valores máximos para DHli e, comparando, constatamos que os harmônicos de 5ª ordem estão próximos de 11%, superando o valor de 4% estabelecido para essas componentes.

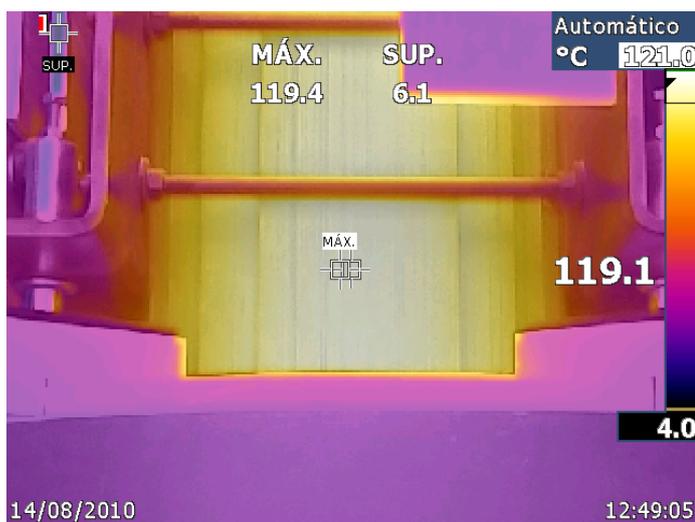
### **6.10.3 Breve Conclusão**

A tensão neste ponto praticamente não apresenta distorção. Assim, o DHTv de aproximadamente 1,4% se torna irrelevante para esta análise.

Nas medições da corrente, foram obtidos elevados índices de distorção harmônica, com DHTi chegando a 12%. Os harmônicos que aumentaram o DHTi são os de 5ª ordem, pois, como mostra a Figura 6.10.3, possuem grandes amplitudes, excedendo o limite estabelecido pela IEEE.

O principal efeito da alta taxa de DHTi neste ponto de medição é o aquecimento do transformador, o que reduz sua vida útil. A análise termográfica mostra, Figura 6.10.4, que a temperatura do núcleo do TF – 8001D que esta aproximadamente em 119°, acima do máximo permitido, comprometendo a isolação e danificando o transformador.

Outro problema é o aumento da corrente eficaz, provocado pelos harmônicos de corrente com elevada amplitude e, o aquecimento dos cabos de alimentação, provocado pela efeito skin. Como mostrado no espectro de frequência as componentes de 5ª e 7ª ordem, tem amplitudes médias de 108 A 35 A, considerados valores significativos para este circuito. O aumento da corrente e o sobreaquecimento dos cabos e do transformador diminui a possibilidade de alimentar novas cargas, pois o principal efeito é a sobrecarga.



**Figura 6.10.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8001D**

### **6.11 Ponto de Medição 10: TF – 8501**

Neste ponto, a coleta foi feita aproximadamente 18h50min do dia 07/12/2012. Os dados foram coletados sobre o secundário (estrela) do transformador TF – 8501, com tensão de linha de 480 V. As principais cargas alimentadas são as cargas essenciais, os sistemas auxiliares dos turbogeradores, entre outras.

A Figura 6.11.1 apresenta a forma de onda da tensão e corrente de linha coletadas na fase R. A Tabela 6.11.1 apresenta todos os parâmetros elétricos em valores instantâneos e a Tabela 6.11.2 apresenta todas as DHlv e DHli para cada fase.

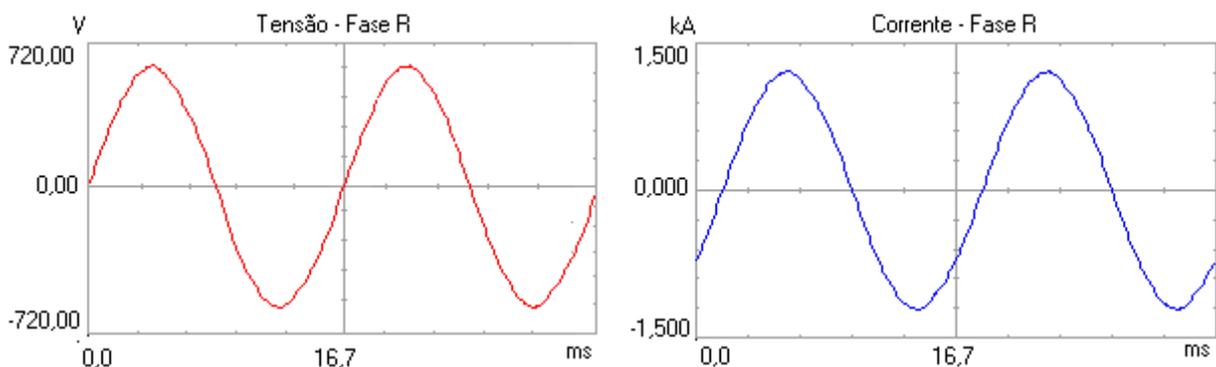


Figura 6.11.1 – Forma de onda da tensão e corrente da fase R no Ponto 10

Fase	Tensão (V)	Corrente (A)	DHTv (%)	DHTi (%)	FP	cos $\phi$
R	473	886	2,1	1,7	0,81	0,81
S	470	910	2,2	1,5	0,84	0,85
T	478	885	1,9	1,5	0,81	0,81

Tabela 6.11.1 – Parâmetros elétricos do Ponto 10

Ordem Harmônica	Sequência	DHLv (%)			DHLi (%)		
		R	S	T	R	S	T
3	0	1,8	1,9	1,6	0,9	0,5	0,6
5	-	0,7	0,6	0,6	1,2	1,2	1,1
7	+	0,5	0,5	0,5	0,4	0,2	0,3
9	0	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
11	-	0,3	0,3	0,4	0,6	0,6	0,5
13	+	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2
15	0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
17	-	0,0	0,0	0,1	0,3	0,3	0,3
19	+	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,3
21	0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
23	-	0,2	0,2	0,2	0,1	0,1	0,1
25	+	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1

Tabela 6.11.2 – DHI de tensão e corrente para fases R, S e T no Ponto 10

As Figuras 6.11.2 e 6.11.3 apresentam os espectros de frequência para tensão e corrente, lembrando, que foram levados em conta componente de até 25ª ordem.

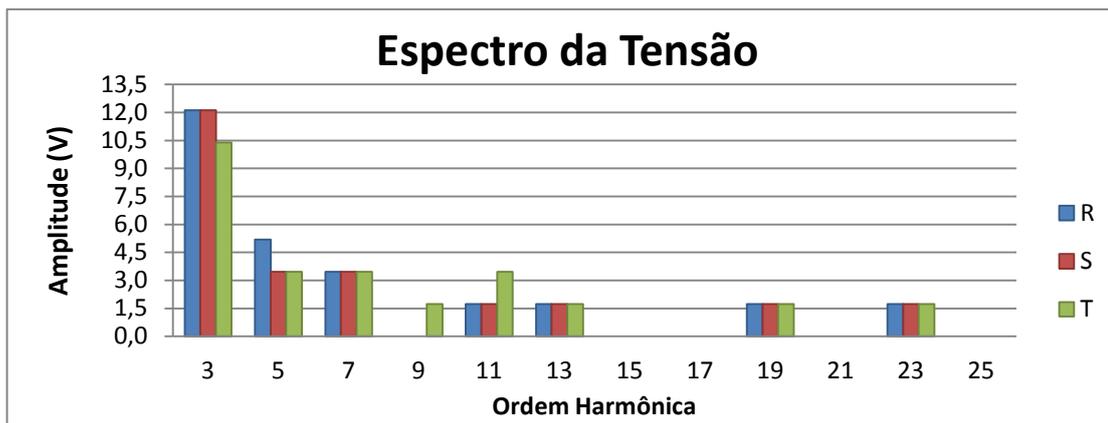


Figura 6.11.2 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 10

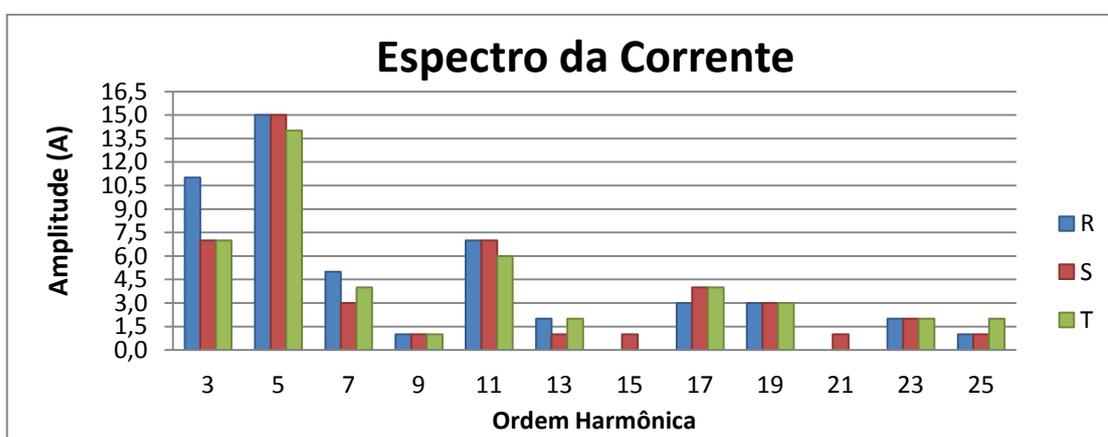


Figura 6.11.3 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 10

### 6.11.1 Análise de Tensão

Segue abaixo o comparativo de tensão entre dados coletados neste ponto e as normas respectivas:

- **IEC – 61000-2-2 (Tabela 4.1):**

Todos os valores de DHlv coletados neste ponto, Tabela 6.11.2, estão abaixo dos limites estabelecidos pela Tabela 4.1.

- **IEC – 61000-2-4 (Tabela 4.2):**

Este ponto de medição se encaixa na Classe 1 (ponto de alimentação de cargas sensíveis). A Tabela 4.2 estabelece DHTv máximo de 5% para cargas Classe 2 e nosso DHTv não passa de 2,2% estando dentro do permitido.

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.8):**

A Tabela 4.8 limita o DHTv e o DHlv, sendo, neste caso, 5% e 3%, respectivamente. Observando as Tabelas 6.11.1 e 6.11.3, notamos que a norma foi respeitada.

- **PRODIST (Tabelas 4.9 e 4.10):**

Todos os valores de DHTv de DHlv, coletados neste transformador, estão em conformidade com limites recomendados nas Tabelas 4.9 e 4.10.

### 6.11.2 Análise da Corrente

A seguir, um comparativo entre os valores da corrente e a norma IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):

- **IEEE – std 519-1992 (Tabela 4.7):**

A corrente de curto-circuito no ponto de medição 10 é de 40 kA [11]. Para encontrar a relação utilizaremos a corrente calculada através da potência máxima de demanda:

$$P = \sqrt{3} \cdot V_l \cdot I_l \cdot \cos\phi \quad (6.9.1)$$

$$I_l = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot V_l \cdot \cos\phi} \quad (6.9.2)$$

$$I_l = \frac{1225450,0}{\sqrt{3} \cdot 480 \cdot 0,8} \quad (6.9.3)$$

$$I_l = 1842,50 \text{ A} \quad (6.9.4)$$

A relação entre corrente de curto-circuito e corrente máxima de demanda é de 21,71. Para valores entre 20 e 50, a Tabela 4.7 determina DHTi máximo de 8%. A Tabela 6.13.1 mostra que os DHTi está abaixo de 2%, respeitando a norma. Os DHli também estão como valores inferiores aos limites estabelecidos pela IEEE.

### 6.11.3 Breve Conclusão

Neste ponto de medição as distorções harmônicas de tensão e corrente apresentam baixos índices. O DHTv esta próximo de 2% e o DHTi de 1,5%. Um dos motivos destas pequenas taxas é a localização deste transformador na planta industrial, pois ele esta localizado dentro da casa de força, bem próximo dos turbo-geradores.

Para tanto, concluímos que as distorções harmônicas neste ponto não trazem impactos significativos a esta análise. A sugestão é que se faça análises nas derivações deste transformador, já que existem inúmeros transformadores de menor potência, amarrados ao este transformador. A Figura 6.11.4 mostra que o TF-8501 opera em condições normais de temperatura.

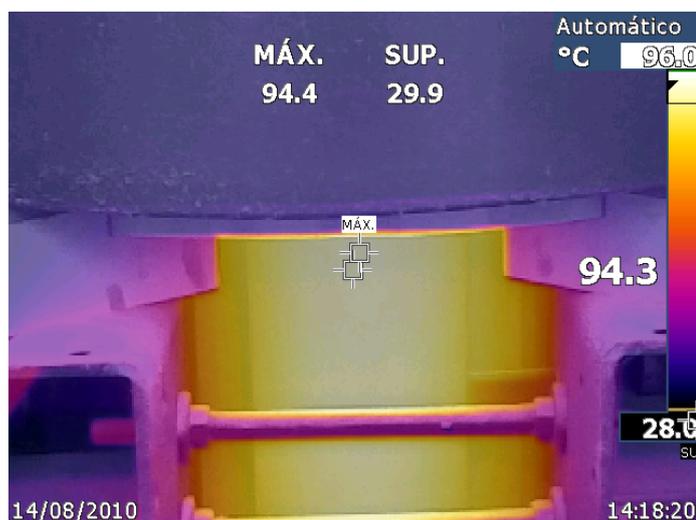


Figura 6.11.4 – Temperatura no núcleo do transformador TF-8501

### 6.12 Análise dos Neutros

O analisador foi colocado também sobre todos os neutros e foi constatado que os mesmos apresentam inúmeros ruídos e interferências não servindo como ponto de referência. É sugerido que se faça um estudo específico para determinar as causas das turbulências encontradas e então seja estudada uma solução adequada para filtrar os ruídos.

Como exemplo, segue abaixo os espectros de frequência da tensão e corrente no neutro do Ponto 03, Figura 6.12.1 e 6.12.2. Como pode ser visto, o

neuro apresenta componentes de inúmeras frequências além da fundamental, apresentando alto índice de ruídos e interferências.

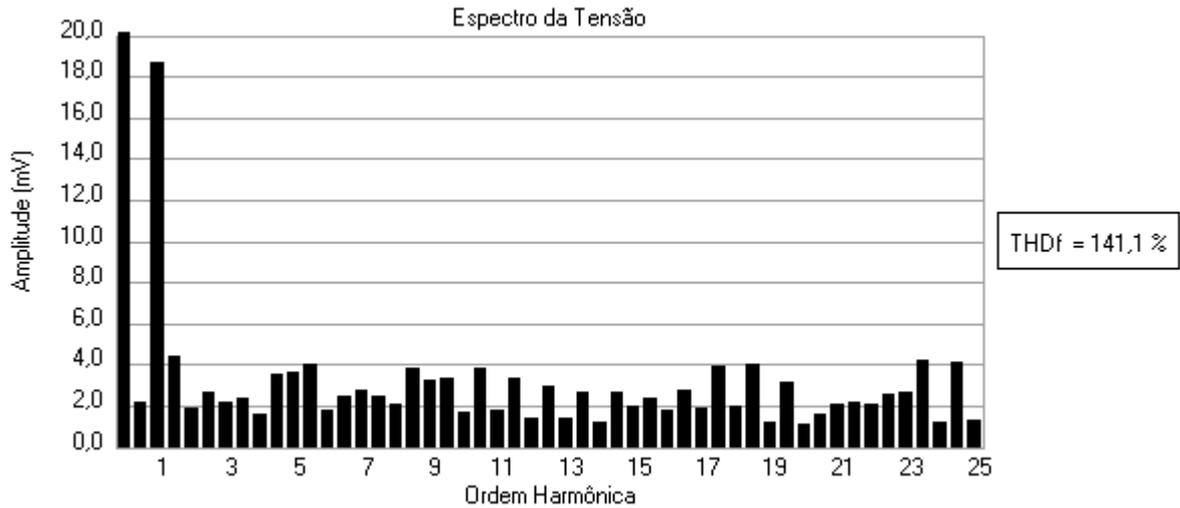


Figura 6.12.1 – Espectro de frequência da tensão no Ponto 03

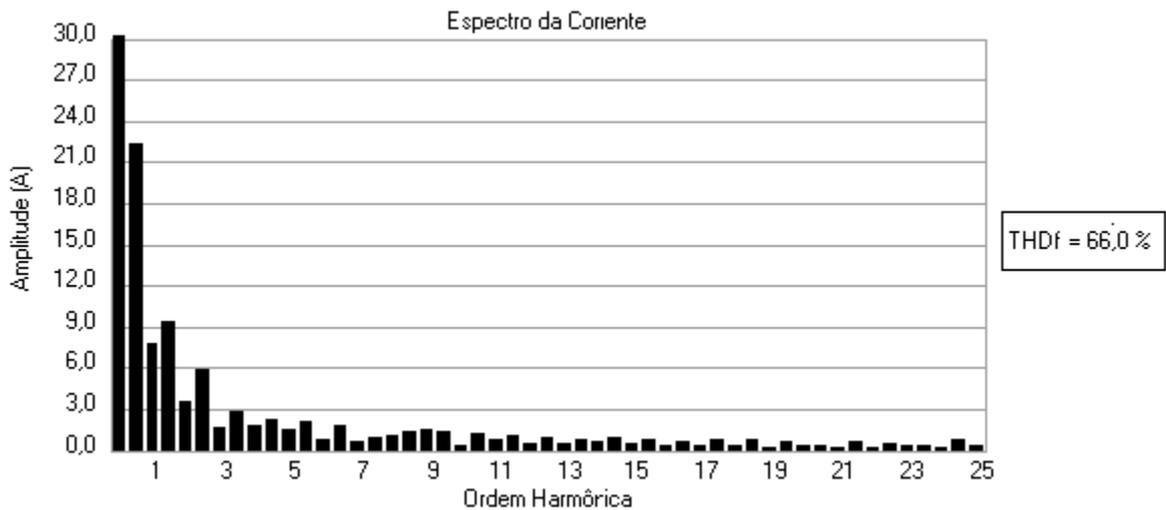


Figura 6.12.2 – Espectro de frequência da corrente no Ponto 03

## **7 POSSÍVEIS CORREÇÕES E MELHORIAS**

### **7.1 Filtros Harmônicos**

Atualmente estão sendo desenvolvidas técnicas inovadoras para compensação harmônica. A mais comum é a utilização de filtros harmônicos, embora, já existam outros meios que estão sendo criados, como: eliminação por compensação do fluxo magnético, redistribuição de cargas, utilização de inversores com elevado número de pulsos, dentre outros [4].

A aplicação dos filtros tem propósito de eliminar ou reduzir uma faixa de frequências harmônicas (ou uma frequência específica) do espectro harmônico de corrente, reduzindo assim, amplitude de uma ou várias componentes harmônicas de tensão e corrente. Em uma segunda característica, os filtros harmônicos muitas vezes podem ajudar na correção do Fator de Potência (FP), influenciando diretamente na transmissão de potência da planta. Existem alguns tipos de filtros compensadores, por exemplo, filtros ativos e filtros passivos.

#### **7.1.1 Filtros Ativos**

Em um conceito simplificado, os filtros ativos para compensação harmônica são dispositivos eletrônicos que geram as correntes harmônicas requeridas pelas cargas não lineares de tal modo que a fonte de alimentação (Geradores) necessite fornecer apenas a corrente fundamental.

Basicamente, o dispositivo mede a corrente harmônica através de transformadores de corrente, analisa o conteúdo harmônico e informa ao gerador de corrente quais são as correntes harmônicas respectivas das cargas. Assim, as correntes são injetadas pelo dispositivo e ocorre a redução de aproximadamente 90% da corrente harmônica exigida da fonte de alimentação.

Este filtro tem ótimo desempenho, porém tem alto custo e complexidade avançada, devendo ser implantado em casos extremos onde as distorções harmônicas interferem em grandes sistemas elétricos causando grandes prejuízos. Neste trabalho não será sugerido a utilização de filtro ativos.

### 7.1.2 Filtros Passivos

Existem vários tipos de filtros passivos, podendo ser classificados, basicamente, pelo modo de acoplamento ao circuito em que será instalado e pela largura de faixa de sintonia. Na sequência, as classificações dos filtros passivos:

- **Tipos de Acoplamento [4]:**

- Filtro Série: Este filtro é acoplado em série com o circuito, impedindo que as componentes harmônicas, para quais ele foi dimensionado, se dispersem pelo sistema elétrico. O fato de estar em série torna esse filtro muitas vezes inviável para circuitos de potência, uma vez que eles devem ser dimensionados para a potência nominal do circuito onde foi instalado. Além disso, a manutenção desse filtro necessita da interrupção do fornecimento. Contudo, por esses e outros motivos, este trabalho não utiliza esse filtro.

- Filtro em Paralelo: É o filtro mais utilizado em função da sua baixa complexidade e baixo custo. É conectado ao sistema em paralelo com a carga, sendo uma baixa impedância para os harmônicos de ressonância. O modo de conexão do filtro em paralelo é também conhecido como “shunt”.

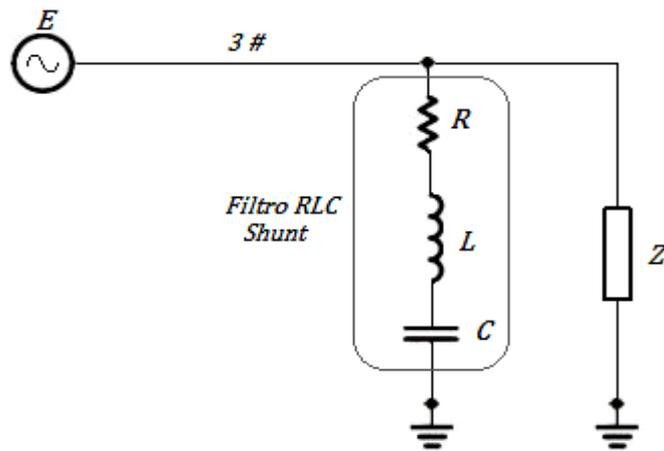
- **Largura de Faixa [4]:**

- Filtro Amortecido: Oferece uma baixa impedância para uma grande faixa de frequência, podendo ser, por exemplo, um filtro passa – alta, onde o filtro representa uma baixa impedância para os harmônicos de alta frequência.

- Filtro Sintonizado: Trabalha com uma faixa bastante reduzida, geralmente, é dimensionado para sintonizar com uma ou no máximo duas componentes harmônicas. Esse filtro é o mais indicado para o sistema elétrico analisado neste trabalho.

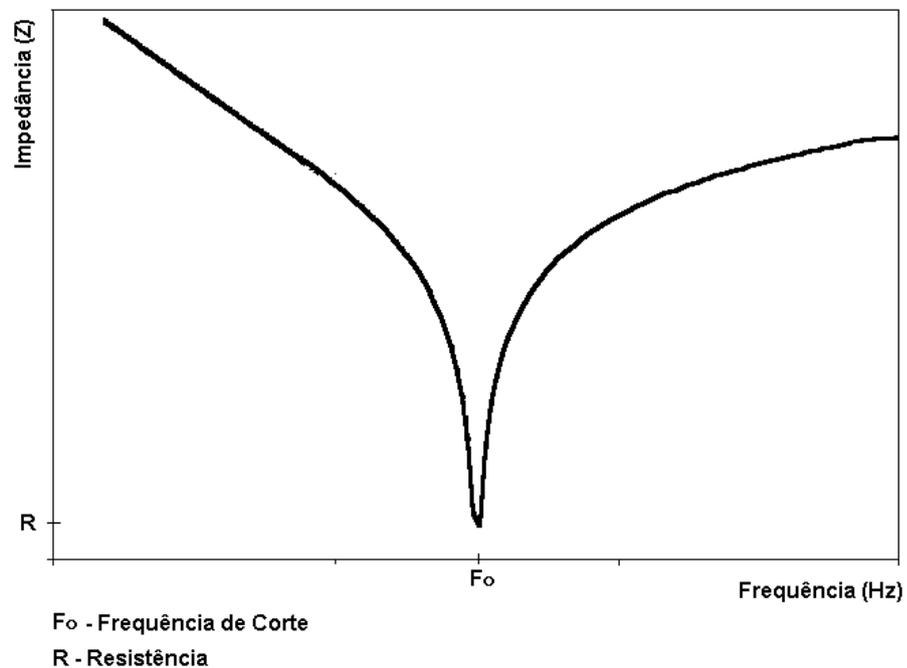
### 7.1.3 Filtro Utilizado

Para o sistema elétrico em análise, o mais indicado e também o mais viável, é o filtro sintonizado em paralelo (RLC shunt), apresentando na Figura 7.1.1. Esse trabalho propõe a utilização desse filtro para eliminar os harmônicos de maior amplitude e influência no sistema.



**Figura 7.1.1 – Filtro RLC Shunt**

O filtro RLC consiste da combinação em séries de resistor, indutor e capacitor. Usualmente, é sintonizado para frequências de baixa ordem, já que essas possuem maiores amplitudes. Para a harmônica de sintonia, como mostrado na Figura 7.1.2, o capacitor e o indutor têm mesma reatância e o filtro apresenta a impedância puramente resistiva.



**Figura 7.1.2 – Gráfico da impedância em relação a frequência do filtro RLC**

Para a frequência de corte (ressonância), para qual o filtro foi projetado, o filtro apresenta menor impedância possível (puramente resistiva). Através do equacionamento abaixo podemos encontrar a frequência de corte.

$$Xl = Xc \quad (7.1)$$

$$\frac{1}{\omega o \times C} = \omega o \times L \quad (7.2)$$

$$\omega o^2 = \frac{1}{LC} \quad (7.3)$$

$$\omega o = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7.4)$$

$$2\pi \times Fo = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7.5)$$

$$Fo = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (7.6)$$

Ressaltando que o cálculo da potência do filtro RLC Shunt não será realizado neste trabalho. O objetivo é apenas indicar possíveis filtros e quais melhorias seriam obtidas na instalação dos mesmos.

## 7.2 Solução para o Ponto 01: TF – 1001

Neste ponto, percebemos que os harmônicos de corrente que causam mais danos ao sistema são os de 5ª e 7ª ordem, ou seja, de 300 Hz e 420 Hz, respectivamente. Definimos para todos os filtros o valor da capacitância como sendo 200 uF. Assim, utilizando a Equação 7.6, encontramos para as frequências de 300 Hz e 420 Hz as respectivas indutâncias de 1,41 mH e 718,0 µH.

Com esses valores, é possível construir dois filtros RLC Shunt, sintonizados para as duas frequências supracitadas. A resistência do filtro constitui, na realidade, na soma das resistências internas dos indutores e capacitores utilizados nos filtros.

Para uma simples análise, após a instalação dos filtros, os harmônicos de corrente de 5ª e 7ª ordem terão suas amplitudes reduzidas ao mínimo. Considerando que elas fossem totalmente extintas o DHTi, no ponto de medição, reduziria de 16% para aproximadamente 3,5% e corrente eficaz abaixaria na fase A de 1121 A para 1059 A. Com isso o DHTi passaria a estar dentro da norma IEEE e devido a eliminação dos harmônicos de corrente de 5ª ordem, com

certeza as componentes da tensão de 5ª ordem, cuja as quais são de sequência negativa e estão acima do permitido na IEEE, também reduziriam, evitando torque pulsando nos motores elétricos e entrando em conformidade com as normas.

Alem disso, com a redução do DHTi o fator de potência é elevado e as perdas nos cabos e nos transformadores são reduzidas, aumentando a vida útil dos mesmos. Melhora também o fluxo de potência do circuito, aliviando o transformador e os geradores.

### **7.3 Solução para o Ponto 02: TF – DRV – 2001**

A análise mostrou que a distorção de corrente está alta, chegando ao DHTi de 57%. Os harmônicos de corrente responsáveis pelo alto DHTi são os de 5ª, 7ª e 11ª ordem, ou seja, de 300 Hz, 420 Hz e 660 Hz, respectivamente. Para calcular os filtros sintonizados nessas frequências, continuamos utilizando o valor da capacitância 200 uF, definido no tópico anterior. Assim, utilizando a Equação 7.6, para a frequência de 300 Hz encontramos a indutância de 1,41 mH, para 420 Hz a indutância calculada é 718,0 µH e para 660 Hz a indutância é 290,75 µH.

Assim, pode-se construir o três filtros passivos RLC Shunt, os quais devem ser instalados em paralelo com a carga. Cada filtro fica responsável por uma frequência em específico, para qual o filtro oferecerá a menor impedância sendo puramente resistiva que, são basicamente a resultante entre a resistência interna do indutor e do capacitor.

Após a implementação dos filtros, as componente de 5ª, 7ª e 11ª terão suas amplitudes reduzidas. Supondo que elas fossem totalmente eliminadas o DHTi, no ponto de medição, reduziria de 57% para aproximadamente 10% e corrente eficaz abaixaria na fase A de 134 A para 91 A. Com isso o DHTi passaria a estar dentro do limite de 12% estabelecido pela norma IEEE. Lembrando que eliminado essas componentes da corrente, as harmônicas de tensão de mesma ordem também reduzirão, abaixando o valor de DHLv da componente de 5ª, o qual estava acima dos limites permitidos.

Além de entrar em conformidade com a norma, a instalação desses filtros reduzirá as perdas no transformador abaixando a temperatura de seu núcleo e aumentando consideravelmente sua vida útil e sua capacidade de transmissão de

potência. As perdas no cabo também diminuem. Outro benefício advindo da redução do DHTi, é a elevação do o fator de potência liberando potência para os geradores.

#### **7.4 Solução para o Ponto 03: TF – DRV – 2002**

Para este ponto, as componentes harmônicas de corrente mais nocivas são as de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup>, 11<sup>a</sup> e 13<sup>a</sup> ordem. Todas elas tem DHli acima do permitido na IEEE, sendo as grandes responsáveis pelo alto DHTi. São propostos quatro filtros RLC Shunt, sintonizados nas frequências de 300 Hz, 420 Hz, 660 Hz e 780 Hz. Utilizando a capacitância 200 uF, através da Equação 7.6, encontramos as indutâncias de 1,41 mH, 718,0 µH, 290,75 µH e 208,17 µH.

Os quatro filtros devem ser instalados em paralelo com a carga. Após a instalação as componentes em questão terão suas amplitudes minimizadas. Para simples análise, considerando que as quatro componentes fossem eliminadas por completo, o DHTi reduziria de 34% para aproximadamente 5% e a corrente reduziria de 618 A para 590 A. Com isso os valores relacionados as distorções de corrente entrariam em conformidade com a norma IEEE.

A redução do DHTi implicaria diretamente na redução do DHTv que esta a margem dos 7%. Além disso, reduziria as perdas nos cabos e no transformador, abaixando sua temperatura e aumentando sua vida útil. O fator de potência se aproximaria do  $\cos\phi$ , minimizando os problemas gerados por um baixo fator de potência.

#### **7.5 Solução para o Ponto 04: TF – 6501**

A análise mostrou que neste ponto os harmônicos de corrente que são mais prejudiciais são os de 5<sup>a</sup> e 7<sup>a</sup>. Os de 5<sup>a</sup> estão acima do valor definido na norma e possui amplitude elevada, já o 7<sup>a</sup> ordem, porém possui amplitude elevada em função da corrente do circuito ser alta. Portanto, sugere-se que seja implantado dois filtros RLC Shunt sintonizados para as frequências de 300 Hz e 420 Hz.

Como visto antes, utilizando a capacitância de 200 uF, através da Equação 7.6, encontramos as indutâncias de 1,41 mH e 718,0 µH. Com esses valores de indutância e capacitância é possível implantar o filtro RLC Shunt e mitigar os efeitos das duas componentes supracitadas.

Considerando que as componentes fossem totalmente extintas, o DHTi que era de 5,6% baixaria para aproximadamente 1,2% e a corrente eficaz que era de 1835 A na fase R reduziria para 1822 A. Assim, as taxas de distorção harmônica de corrente ficam abaixo dos limites estabelecidos na IEEE e o problemas advindos são mitigados, ou seja, as perdas no transformador são reduzidas, abaixando sua temperatura e aumentando sua vida útil. Com o baixo DHTi as perdas nos cabos também diminuem.

#### **7.6 Solução para o Ponto 05: TF – 6502**

Neste transformador as medições mostraram que os índices de distorção harmônica de corrente estão de acordo com a norma IEEE, porem o respectivo DHTi de 7% é considerado alto e deve recomenda-se reduzi-lo para que seus efeitos sejam minimizados.

Pela análise feita, os harmônicos de 5ª e 7ª ordem, novamente são os responsáveis pelo alto DHTi. Como já mostrado em tópicos anteriores, para as respectivas frequências de 300 Hz e 420 Hz, utilizando a capacitância de 200  $\mu$ F, as indutâncias são de 1,41 mH e 718,0  $\mu$ H. Os dois filtros devem ser implementados e instalados em paralelo com a carga.

Com a eliminação dessas duas componentes o DHTi na fase R reduz de 7% para aproximadamente 1,9% e a corrente eficaz reduz de 1190 para 1185 A. Com isso, a temperatura do núcleo do transformador reduzira e haverá o aumento de sua vida útil. As perdas nos cabos também reduzirão e o fator se aproximaria do  $\cos\phi$ .

#### **7.7 Solução para o Ponto 06: TF – 8001A**

Os dados coletados nos mostraram que o DHTi neste ponto é de 17% e, novamente, as componentes responsabilizadas, as quais ultrapassam os valores da norma IEEE, são as de 5ª e 7ª componente.

A proposta de filtros harmônicos para este caso é mesma do tópico anterior, portanto, serão deve ser instalado dois filtro RLC Shunt, tendo os mesmos valores. Para efeitos de simples análise, consideramos que as componentes harmônicas foram completamente eliminadas, assim, na fase R o DHTi reduz de

17,7% para aproximadamente 3,5% e a corrente eficaz reduz de 273 A para aproximadamente 269 A. Isso mostra o quanto o DHTi foi minimizado com a eliminação das duas componentes, evitando o sobreaquecimento do transformador aumentando sua vida útil. As perdas no cabeamento também são reduzidas e, considerando que a redução do DHTi foi bastante expressiva, conclui-se que o DHTv de aproximadamente 3% também será diminuído, melhorando a alimentação das cargas.

### **7.8 Solução para o Ponto 07: TF – 8001B**

Para este ponto não se faz necessário implantação de filtros passivos para compensação harmônica, já que a análise apresentou pouca interferência harmônica sobre o sistema.

### **7.9 Solução para o Ponto 08: TF – 8001C**

Os índices de DHTi neste ponto, chegaram a 23%, ultrapassando em muito os valores máximo definidos na IEEE. As componentes harmônicas responsáveis pelo alto DHTi são as de 5<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 11<sup>a</sup>. Todas elas tem DHTi acima do permitido na IEEE. É sugerido que seja instalado três filtros RLC em paralelo, sintonizados nas frequências de 300 Hz, 420 Hz e 660 Hz. Para calcular os valores dos componentes dos filtros, foi utilizado a Equação 7.6 e definida capacitância de 200  $\mu$ F, assim foram encontradas, para as respectivas frequências, indutâncias de 1,41 mH, 718,0  $\mu$ H e 290,75  $\mu$ H.

Após a instalação dos filtros em paralelo com a carga, as componentes terão suas amplitudes reduzidas. Considerando suas totais eliminações, o DHTi de 23% baixaria para aproximadamente 2,5% e a corrente reduziria cerca de 21 A em cada fase.

Os benefícios da redução do DHTi são, aumento da vida útil do transformador, redução das perdas nos cabos, aumento do fator de potência para próximo do  $\cos\phi$  que neste caso é 1. Com tudo, há uma melhor transmissão de potência, onde o transformador reduz sua temperatura aumentando a capacidade de transmitir potência e o gerador é aliviado devido a redução de reativos no sistema elétrico.

### **7.10 Solução para o Ponto 09: TF – 8001D**

A distorção harmônica total de corrente neste ponto chega 12%, excedendo os valores permitidos pela norma IEEE. A principal componente responsável pelo aumento do DHTi é a de 5ª ordem, cujo o DHli também não obedece a IEEE. Portanto, para este caso propõe-se a instalação de apenas um filtro RLC Shunt sintonizado na frequência de 300 Hz. Como já visto nos tópicos anteriores, para um capacitância de 200  $\mu$ F a indutância do filtro deve ser de 1,41 mH.

Com a instalação do filtro, a componente de 5ª ordem é reduzida ao mínimo. Considerando que ela seja eliminada, o DHTi reduziria de 12% para aproximadamente 4% e a corrente reduziria cerca 5 A em cada fase. Os principais benefícios são a diminuição da temperatura do transformador, aumentando sua vida útil e a redução de perdas em cabeamento. Como pode ser visto na análise, o transformador está operando na temperatura um pouco acima do permitido, portanto com a baixa do DHTi, a temperatura pode baixar consideravelmente, colocando o transformador dentro de condições de operação.

### **7.11 Solução para o Ponto 10: TF – 8501**

Para este ponto não se faz necessário implantação de filtros passivos para compensação harmônica. A análise mostrou que a influência harmônica neste ponto não representa riscos.

## 8 CONCLUSÃO

Este trabalho concluiu que as distorções harmônicas de tensão nos pontos medidos não apresentam grandes proporções, principalmente pelo fato dos pontos analisados estarem próximos da geração, assim, as quedas de tensão são baixas, conservando a forma de onda original da tensão.

Por outro lado, na maioria das medições as análises apresentam altas taxas de distorções harmônicas de corrente, as quais são provocadas principalmente pelos inúmeros inversores de frequência presentes nas instalações. Notou-se que os harmônicos de corrente responsáveis pelas grandes distorções são principalmente os de 5ª e 7ª ordem. São essas componentes que, de acordo com os espectros de frequência da corrente, apresentam amplitudes bem superiores as demais.

Os principais danos e prejuízos apontados nas análises para os pontos com alto DHTi, são:

- Aumento das perdas nos transformadores, contribuindo para o sobreaquecimento dos mesmos, reduzindo consideravelmente sua vida útil e sua capacidade de transmissão de potência.
- Aumento da corrente eficaz do circuito, o que aumenta as perdas no cobre e reduz a capacidade de alimentação de novas cargas.
- Aumento das perdas no cabeamento, provocadas pela presença de altas frequências na corrente.
- Redução do fator de potência que deveria ser igual ao  $\cos\phi$  se não fossem as distorções harmônicas. Essa redução acarreta aumento da potência reativa, sobrecarregando os geradores.

A redução da vida útil do transformador, considerando que os transformadores a seco possuem alto valor de mercado, causam grandes prejuízos econômicos. Já a redução do fator de potência também implica em grandes prejuízos, pois a usina comercializa e exporta energia elétrica para o SIN e quanto menor a energia reativa circulante no sistema, maior a capacidade de fornecimento dos geradores.

Por fim, no capítulo anterior foram propostos filtros RLC Shunt que se instalados trariam resultados satisfatórios, reduzindo bastante as distorções

harmônicas de corrente. Esses filtros possuem baixa complexidade e pequenos valores comerciais se comparados aos prejuízos causados pelas harmônicas. São os mais indicados para distorções harmônicas pontuais, como é o caso do nosso sistema.

## 9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FREITAS, G. E. R.; CORRÊA, R. J. F. **Análise de Distúrbios Harmônicos em Componentes do Sistema Elétrico**. 2007. 121f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal do Pará, Belém, 2007. [Orientador: Msc. Edson Ortiz de Matos]. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/26845805/Analise-de-Disturbios-Harmonicos-Em-Componentes-Do>>. Acesso em: 6 nov. 2012.

[2] DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 2010. Texto base utilizado na disciplina de Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica, ministrada no curso de pós-graduação em Engenharia Elétrica – Universidade Estadual de Campinas. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/qualidade/a4.pdf>>. Acesso em: 12 out. 2012.

[3] SOUZA, T. P. **Métodos de Avaliação de Contribuição de Harmônicos por Correlação e Análise Fasorial**. São Paulo. 2011. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. [Orientador: Prof. Dr. Nelson Kagan]. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3143/tde-29082011-113956/pt-br.php>>. Acesso em: 16 dez. 2012.

[4] TEIXEIRA, D. Â. **Análise das Distorções Harmônicas - Estudo de Caso de Um Sistema Industrial**. 2009. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2009. [Orientadores: Prof. Dr. Porfírio Cabaleiro Cortizo; Prof. Dr. Benjamim Rodrigues de Menezes]. Disponível em: <[http://www.cpdee.ufmg.br/documentos/Defesas/866/DM\\_No588\\_Nov\\_2009l.pdf](http://www.cpdee.ufmg.br/documentos/Defesas/866/DM_No588_Nov_2009l.pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2012.

[5] PIRES, W. L. **Guia Técnico - Motores de Indução Alimentados por Conversores de Frequência PWM**. 2006. 61f. Departamento de Pesquisa e Desenvolvimento do Produto - WEG. Disponível em: <[http://www.coe.ufrj.br/~richard/Acionamentos/motores\\_de\\_inducao\\_alimentados\\_por\\_conversores\\_de\\_frequencia\\_PWM.pdf](http://www.coe.ufrj.br/~richard/Acionamentos/motores_de_inducao_alimentados_por_conversores_de_frequencia_PWM.pdf)>. Acesso em: 01 dez. 2012.

[6] MORENO, H. **Harmônicas nas Instalações Elétricas**. 2001. 66f. Instituto Brasileiro do Cobre – Procobre, São Paulo, 2001. Disponível em: <<http://www.rta.com.br/wp-content/uploads/2011/03/harmonicosprocobre.pdf>>. Acesso em: 25 nov. 2012.

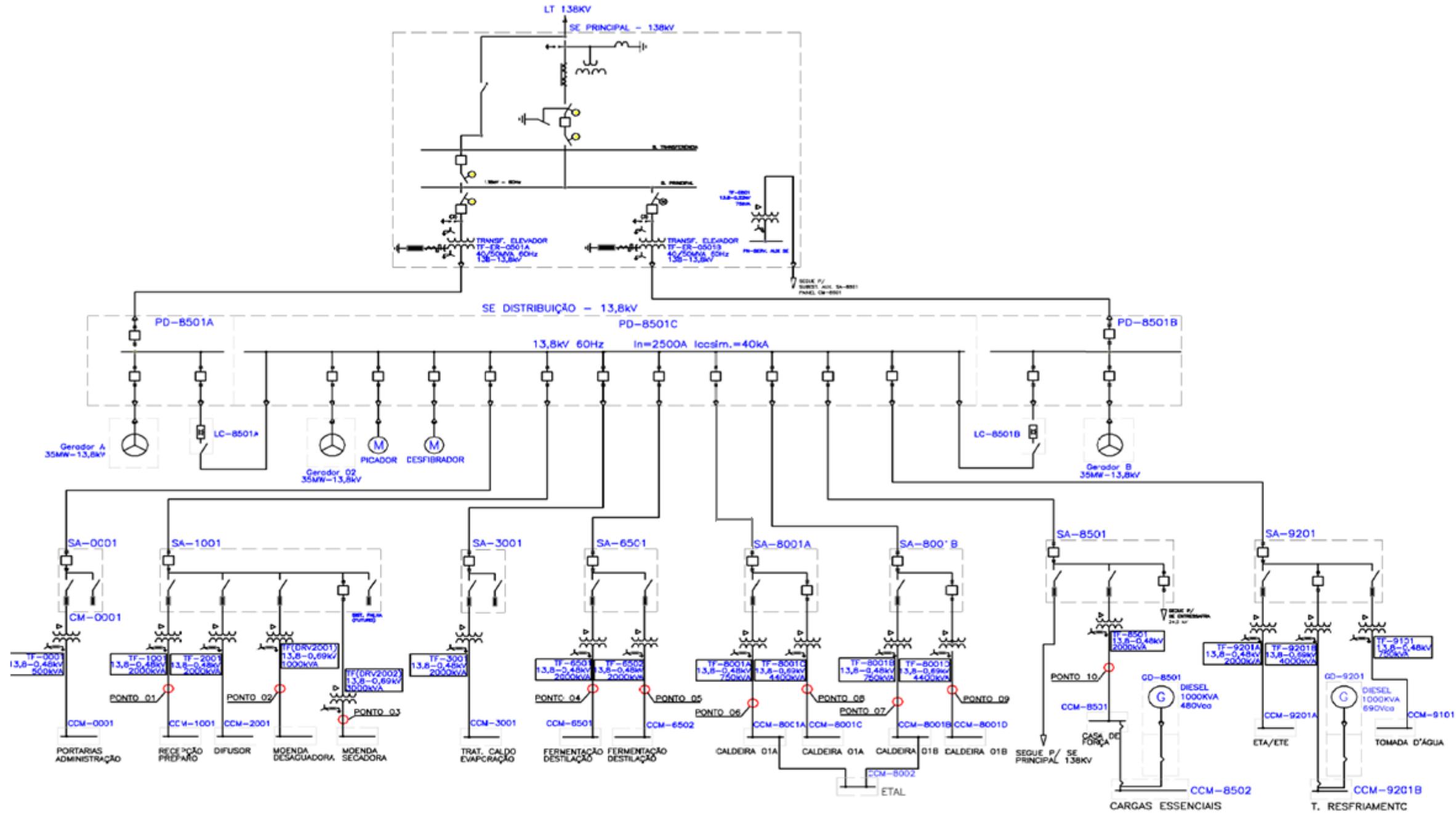
[7] **Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica – Revisão 4**, de 01 de fevereiro de 2012, da Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional.

[8] MORAES, R. A. V. **Estudo de Qualidade de Energia em um Prédio Comercial**. Rio de Janeiro. 2009. 176 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009. [Orientadores: Prof. Richard Magdalena Stephan; Prof. DRMaria Dias Bellar]. Disponível em: <[www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2009092201.pdf](http://www.pee.ufrj.br/teses/textocompleto/2009092201.pdf)>. Acesso em: 20 fev. 2013.

[9] **Lista de Cargas Elétricas – Revisão E**, de 08 de junho de 2009. Projeto Cosan Centro-oeste S/A, PROMON®, 2009.

[10] Guia do Usuário - **FLUKE 434/435 Three Phase Power Quality Analyzer**, FLUKE Corporation®, 2006. Disponível em: <[http://assets.fluke.com/manuals/434\\_435\\_umpor0100.pdf](http://assets.fluke.com/manuals/434_435_umpor0100.pdf)>. Acesso em: 20 jan. 2013.

[11] **Memorial de Cálculo de Curto Circuito – Revisão E**, de 19 de maio de 2008. Projeto Cosan Centro-oeste S/A, PROMON®, 2008.



E	10/10/08	SA	AP	SA	CONFORME PROPOSTA	OC
B	20/05/08	SA	AP	SA	SEM APROVAÇÃO	N
C	20/05/08	SA	AP	SA	SEM APROVAÇÃO	N
A	16/02/08	SA	AP	SA	SEM APROVAÇÃO	N
D	11/05/07	SA	AP	SA	CONFORME PROJ.	AP
Rev.	Descrição	Elab.	Rev.	Rev.	Descrição	Estimado
Proj. Elaborado por	Proj. Revisado por	Proj. C. Rev.	Proj. Revisado por			
ANEXO 02 804908	466000					
<b>COSAN CENTRO-OESTE S/A</b> <b>UNIDADE JATAÍ</b>						
<b>Promon</b>						
<small>Este documento não pode ser usado, reproduzido ou divulgado sem a autorização expressa do COSAN. Este documento não pode ser usado em outros documentos sem a autorização expressa.</small>						
<small>Nome do sistema / Drawing title</small>						
<b>DIAGRAMA UNIFILAR GERAL</b>						
<small>Projeto / Sheet</small>			<small>Revisão / Revision</small>			
<small>Proj. de sistema / Drawing No.</small>			<b>E</b>			
<b>ECSAN001-E2-0001</b>						