



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARCOS NASCIMENTO BRANCHE

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE MEDIÇÃO E FLUXO DE CARGA
HARMÔNICO TRIFÁSICO**

DM 05/2005

**UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará
2005**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

MARCOS NASCIMENTO BRANCHE

**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS DE
DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE MEDIÇÃO E FLUXO DE CARGA
HARMÔNICO TRIFÁSICO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Pará (UFPA), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de Sistemas de Energia Elétrica.

**UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará
2005**

B816a Branche, Marcos Nascimento

Avaliação da qualidade de energia em sistemas de distribuição através de medição e fluxo de carga harmônico trifásico / Marcos Nascimento Branche; orientadora, Maria Emília de Lima Tostes, 2005.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2005.

1. Energia elétrica – controle de qualidade. 2. Energia elétrica – distribuição. 3. Harmônicos. I. Título.

CDD – 21. ed. 621.3191

AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO ATRAVÉS DE MEDIÇÃO E FLUXO DE CARGA HARMÔNICO TRIFÁSICO

MARCOS NASCIMENTO BRANCHE

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica**, na área de Sistemas de Engenharia Elétrica, e aprovada, na sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará.

Prof^a. Dr^a. Maria Emilia de Lima Tostes (UFPA)
Orientadora

Prof. Dr. Ubiratan Holanda Bezerra (UFPA)
Co-Orientador

Prof. Dr. Jurandyr Nascimento Garcez (UFPA)
Membro da Banca Examinadora

Prof. Dr. Ghendy Cardoso Junior (UFPA)
Membro da Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes (UFPA)
Coordenador do PPGEE

Belém-PA
2005

DEDICATÓRIA

À Deus, que proporcionou a vida e tem iluminado meus caminhos em todos os momentos de minha jornada.

Aos pais, Guilherme e Socorro, pela criação, educação e ensinamentos valiosos – que mesmo com o devir do tempo – são lembrados no exercício profissional e repassados em meu cotidiano.

Aos irmãos que – mesmo distantes – permaneceram presentes, constantes em minhas memórias... A infância: o início de nossas vidas, as brincadeiras, as chamadas de atenção; a adolescência e as primeiras conversas acerca '*do que vamos ser quando crescermos*'... Vocês, todos vocês, que fraternamente sempre me incentivaram, são responsáveis por mais esta conquista pessoal.

AGRADECIMENTOS

Aos meus orientadores, professora Dra. Maria Emilia de Lima Tostes e professor Dr. Ubiratan Holanda Bezerra pela orientação e dedicação oferecidas, bem como ensinamentos necessários à conclusão deste trabalho.

Ao engenheiro Rogério Diogne pelas valorosas colaborações prestadas.

À Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA) por ter concedido a possibilidade de pesquisa para a realização deste trabalho

A todos os professores e colegas que contribuíram para a realização deste trabalho através de conversas e consultas técnicas, sempre dispostos a ajudar.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma análise da qualidade de energia realizado em um sistema real de distribuição de energia elétrica, a partir das diferentes classes de consumo atendida pela concessionária. O estudo foi realizado em duas etapas, sendo a primeira através de medições realizadas no secundário de transformadores da rede de distribuição que atende ao sistema da CEA (Companhia de Eletricidade do Amapá), previamente classificados por classe de atendimento sendo, classe comercial, residencial e mista. Através do estudo torna-se possível a identificação e a caracterização de fontes geradoras de harmônicos no sistema, possibilitando assim a análise do nível de injeção de harmônicos em sua rede de distribuição, bem como a avaliação dos impactos que essas fontes distribuídas de geração harmônica podem provocar na qualidade de energia fornecida pela concessionária. A etapa final do estudo apresenta o uso de um fluxo de carga harmônico trifásico, onde a partir do perfil harmônico obtido no estudo, é feita uma avaliação de forma global do sistema.

ABSTRACT

This work presents an analysis about the power quality, carried out in a real electrical energy distribution grid, considering different customers groups, located in the low voltage grid. The study was made in two steps. The first one through measurements registered in the transformers of the distribution grid supplied by CEA – Amapá's Electricity Company, previously classified in groups as: commercial group, residential group and home-and-commercial group, identifying and characterizing the generators sources of harmonics generation in the system, making possible, this way, an analysis of the harmonic injection level in the distribution grid as well as the impacts these distribution sources of harmonic generation can provoke in the power quality offered by the CEA utility. The last stage of the study presents the use of a three-phase harmonic load flow, where, considering the harmonic profile found out through the measurements carried out, a global evaluation of the system is provided.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Temperatura para carregamento linear e não-linear	14
Figura 2.2 – Expectativa da vida útil em função da DHi(%)	14
Figura 2.3 – Estimativa da vida útil em função da distorção de corrente	19
Figura 2.4 – Variação da temperatura na presença de harmônicos	21
Figura 2.5 – Fator de depreciação	22
Figura 3.1 – Curva de carga do alimentador	29
Figura 3.2-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 45kVA)	31
Figura 3.2-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 45 kVA)	32
Figura 3.2-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 45kVA)	32
Figura 3.2-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 45kVA)	33
Figura 3.2-(e) – Fator de potência (trafo 45kVA)	33
Figura 3.3-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 75kVA)	34
Figura 3.3-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 75 kVA)	34
Figura 3.3-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 75kVA)	35
Figura 3.3-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 75kVA)	35
Figura 3.3-(e) – Fator de potência (trafo 75kVA)	36
Figura 3.4-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 112,5kVA)	36
Figura 3.4-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 112,5kVA)	37
Figura 3.4-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 112,5kVA)	37
Figura 3.4-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 112,5 kVA)	37
Figura 3.4-(e) – Fator de potência (trafo 112,5kVA)	38
Figura 3.5-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 150kVA)	39
Figura 3.5-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 150kVA)	39
Figura 3.5-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 150kVA)	39
Figura 3.5-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 150 kVA)	40
Figura 3.5-(e) – Fator de potência (trafo 150kVA)	40
Figura 3.5-(f) – Carregamento dos transformadores residenciais	41
Figura 3.5-(g) – Distorção harmônica total de tensão em transformadores residenciais	42
Figura 3.5-(h) – Distorção harmônica total de corrente em trafos residenciais	42
Figura 3.5-(i) – Fator de potência para grupo residencial	43

Figura 3.6-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 75kVA)	44
Figura 3.6-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 75 kVA)	44
Figura 3.6-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 75kVA)	45
Figura 3.6-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 75kVA)	45
Figura 3.6-(e) – Fator de potência (trafo 75kVA)	46
Figura 3.7-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 112,5kVA)	46
Figura 3.7-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 112,5kVA)	47
Figura 3.7-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 112,5kVA)	47
Figura 3.7-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 112,5 kVA)	48
Figura 3.7-(e) – Fator de potência (trafo 112,5kVA)	48
Figura 3.8-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 150kVA)	49
Figura 3.8-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 150kVA)	49
Figura 3.8-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 150kVA)	50
Figura 3.8-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 150 kVA)	50
Figura 3.8-(e) – Fator de potência (trafo 150kVA)	51
Figura 3.8-(f) – Carregamento dos transformadores mistos	51
Figura 3.8-(g) – Distorção harmônica total de tensão em trafos mistos	52
Figura 3.8-(h) – Distorção harmônica total de corrente em trafos mistos	53
Figura 3.8-(i) – Fator de potência para grupo misto	53
Figura 3.9-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 45kVA)	54
Figura 3.9-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 45 kVA)	55
Figura 3.9-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 45kVA)	55
Figura 3.9-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 45kVA)	56
Figura 3.9-(e) – Fator de potência (trafo 45kVA)	56
Figura 3.10-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 75kVA)	57
Figura 3.10-(b) – Distorção harmônica parcial de tensão (trafo 75kVA)	57
Figura 3.10-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 75kVA)	58
Figura 3.10-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 75kVA)	58
Figura 3.10-(e) – Fator de potência (trafo 75kVA)	58
Figura 3.11-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 112,5kVA)	59
Figura 3.11-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 112,5kVA)	59
Figura 3.11-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 112,5kVA)	60
Figura 3.11-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 112,5 kVA)	60
Figura 3.11-(e) – Fator de potência (trafo 112,5kVA)	61

Figura 3.12-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 150kVA)	61
Figura 3.12-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 150kVA)	61
Figura 3.12-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 150kVA)	62
Figura 3.12-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 150 kVA)	62
Figura 3.12-(e) – Fator de potência (trafo 150kVA)	63
Figura 3.13-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 225kVA)	63
Figura 3.13-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 225kVA)	64
Figura 3.13-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 225kVA)	64
Figura 3.13-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 225 kVA)	65
Figura 3.13-(e) – Fator de potência (trafo 225kVA)	65
Figura 3.14-(a) – Distorção harmônica total de tensão (trafo 300kVA)	66
Figura 3.14-(b) – Harmônicos parciais de tensão (transformador 300kVA)	66
Figura 3.14-(c) – Distorção harmônica total de corrente (trafo 300kVA)	67
Figura 3.14-(d) – Distorção harmônica parcial de corrente (trafo 300 kVA)	67
Figura 3.14-(e) – Fator de potência (trafo 300kVA)	68
Figura 3.14-(f) – Carregamento dos transformadores comerciais	68
Figura 3.14-(g) – Distorção harmônica total de tensão em trafos mistos	69
Figura 3.14-(h) – Distorção harmônica total de corrente em trafos comerciais	70
Figura 3.14-(i) – Fator de potência para grupo comercial	70
Figura 4.1 – Fluxograma simplificado do programa utilizado	75
Figura 4.2 – Janela principal	75
Figura 4.3 – Janela dados de barra	76
Figura 4.4 – Janela dados do transformador	76
Figura 4.5 – Janela dados de linhas e cabos	77
Figura 4.6 – Janela dados de carga	77
Figura 4.7 – Valores de tensão para barra primária	79
Figura 4.8 – Valores de tensão para barra secundária	79
Figura 4.9 – DHTv(%) calculado pelo programa fluxo de carga (carga residencial)	80
Figura 4.10 – DHTi(%) calculado pelo fluxo de carga (carga residencial)	80
Figura 4.11 – DHTv(%) calculado pelo programa fluxo de carga (carga comercial)	81
Figura 4.12 – DHTi(%) calculado pelo fluxo de carga (carga comercial)	81

Figura 4.13 – DHTv(%) calculado pelo programa fluxo de carga (carga comercial)	82
Figura 4.14 – DHTi(%) calculado pelo fluxo de carga (carga comercial)	82
Figura 4.15 – Tensão rms calculado pelo programa de fluxo de carga	83
Figura 4.16 – DHTv(%) calculado com programa de fluxo de carga	83
Figura 4.17 – DHTi(%) calculado com programa de fluxo de carga	83
Figura 4.18 – Resultado de potência ativa barra 19	84
Figura 4.19 – Resultado de potência reativa barra 19	84

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Distúrbios frequentes	11
Tabela 2.2 – Fator “K” e percentual de carga	17
Tabela 2.3 – Limites de suportabilidade dos capacitadores	20
Tabela 2.4 – Níveis de tensões harmônicas.....	25
Tabela 2.5 – Limites de distorção harmônica	25
Tabela 2.6 – Limites de correntes harmônicas	26
Tabela 2.7 – Limites globais de tensão	26

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 PESQUISAS RELACIONADAS À QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	2
1.2 QUALIDADE DE ENERGIA	4
1.3 JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	5
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	6
CAPÍTULO 2 – FÊNOMENOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	7
2.1 INTRODUÇÃO	7
2.2 DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO	8
2.2.1 Forma dos distúrbios	8
2.2.2 Duração dos distúrbios	8
2.2.3 Localização dos distúrbios	9
2.2.4 origem dos distúrbios	9
2.3 HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA	10
2.3.1 Cargas não-lineares	11
2.3.2 Consequências da presença de distorções harmônicas em alguns componentes do sistema elétrico	12
2.3.3 Padrões de emissão de harmônicos	22
2.3.3.1 Normas que regulam a injeção de harmônicos	24
2.3.3.2 Normas internacionais	24
2.3.3.3 Normas Nacionais	26
2.4 CONCLUSÃO	27
CAPÍTULO 3 – O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ANALISADO E A GERAÇÃO DE HARMÔNICOS	28
3.1 INTRODUÇÃO	28
3.2 O SISTEMA EM ESTUDO	28

3.3 ESTRATÉGIAS DAS MEDIÇÕES PARA IDENTIFICAÇÃO DOS HARMÔNICOS GERADOS NO SISTEMA CEA	29
3.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES REALIZADAS NO SISTEMA	31
3.4.1 Avaliação dos transformadores residenciais	31
3.4.1.1 Transformadores com potência nominal 45kVA	31
3.4.1.2 Transformadores com potência nominal 75kVA	34
3.4.1.3 Transformadores com potência nominal 112,5kVA	36
3.4.1.4 Transformadores com potência nominal 150kVA	38
3.4.1.5 Análise do carregamento de transformadores residenciais	40
3.4.1.6 Avaliação conjunta do grupo residencial	41
3.4.2 Avaliação dos resultados das medições realizadas nos transformadores do grupo de carga mista	43
3.4.2.1 Transformadores de potência nominal 75kVA	44
3.4.2.2 Transformadores de potência nominal 112,5kVA	46
3.4.2.3 Transformadores com potência nominal 150kVA	49
3.4.2.4 Análise do carregamento dos transformadores de carga mista	51
3.4.2.5 Avaliação conjunta do grupo misto	52
3.4.3 Avaliação dos resultados de medições realizadas no grupo de transformadores comerciais	53
3.4.3.1 Transformadores de potência nominal 45kVA	54
3.4.3.2 Transformadores com potência nominal 75 kVA	56
3.4.3.3 Transformadores com potência nominal 112,5 kVA	59
3.4.3.4 Transformadores com potência nominal 150 kVA	61
3.4.3.5 Transformadores com potência nominal 225 kVA	64
3.4.3.6 Transformadores com potência nominal 300 kVA	65
3.4.3.7 Análise do carregamento dos transformadores comerciais	68
3.4.3.8 Avaliação conjunta dos transformadores comerciais	69
3.5 CONCLUSÃO	71
CAPÍTULO 4 – ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ATRAVÉS DO FLUXO DE CARGA HARMÔNICO TRIFÁSICO	73
4.1 INTRODUÇÃO	73
4.2 O PROGRAMA DE FLUXO DE CARGA HARMÔNICO	74

4.2.1 Interface com o usuário	75
4.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO	78
4.3.1 Resultados com o fluxo de carga harmônico para o alimentador Padre Júlio	78
4.4 CONCLUSÃO	85
CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES	86
TRABALHOS PUBLICADOS	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
APÊNDICE	93

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Desde a concepção até a implementação de um sistema capaz de monitorar e controlar a qualidade de energia tem-se um alto empreendimento técnico, uma vez que constitui um importante instrumento de informações para as concessionárias, possibilitando a identificação de distúrbios e a definição de soluções mais eficazes para os problemas detectados.

Nessa busca pelo conhecimento e a possibilidade de avaliação do Sistema de Energia Elétrica, a Qualidade de Energia tornou-se palavra chave no âmbito industrial dos últimos anos. Concessionárias e consumidores de energia estão cada vez mais preocupados com as características do suprimento elétrico. O interesse pelo tema é crescente, causando definições distintas, devido às necessidades envolvidas no problema.

Para as concessionárias de energia, o marco para uma melhor qualidade da energia elétrica pode ser medida pela evolução da sociedade tecnológica e a reestruturação do setor elétrico. Esta reestruturação traz a competitividade para um setor no qual a energia elétrica passa a ser um produto comercial, tanto para as concessionárias, como para o usuário final do produto, pois as empresas que fornecem energia com maior qualidade possuem maior chance de sobreviver no mercado competitivo.

A sociedade tecnológica evolui, resultando na automação dos processos industriais, o que acarretou em mais produção, flexibilidade e qualidade do produto industrial. Por outro lado as cargas tornaram-se mais sensíveis quanto à variação de tensão de alimentação e mais perturbadoras com a eletrônica de potência (SILVA e ALVES, 2002).

Dentre os principais distúrbios sofridos pela tensão de suprimento e atuantes no comprometimento da qualidade de energia, encontram-se as distorções harmônicas. Tal fenômeno além de caracterizar uma tensão distorcida, pode em primeira instância produzir falhas parciais como a redução de vida útil e operação inadequada de equipamentos eletroeletrônicos. Essas distorções são expressas em

termos de distorções harmônicas de tensão e corrente, e normalmente causadas pela operação de cargas com características não-lineares.

Devido ao crescente interesse mundial, sobre os problemas envolvendo distúrbios capazes de afetar a qualidade de energia elétrica fornecida aos usuários finais do produto, as concessionárias estão desenvolvendo programas de forma a atender os consumidores com mais qualidade, promover uma maior divulgação do assunto e de certa forma, procurar solucionar os distúrbios em conjunto com seus consumidores. Torna-se então, de extrema importância o incentivo ao desenvolvimento de novas instrumentações e ferramentas computacionais, que auxiliem na eliminação ou na atenuação dos fenômenos indesejáveis, no que diz respeito ao fornecimento e utilização de energia elétrica.

Neste sentido, este trabalho propõe um estudo da qualidade de energia através da identificação e a caracterização de fontes individuais geradoras de harmônicos no sistema de distribuição de energia elétrica da Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA), através de medições realizadas em diferentes grupos de consumidores desta companhia, (consumidor residencial, comercial e algumas cargas mistas), a fim de identificar e analisar as características associadas a cada grupo, e a partir de então, através de um fluxo de carga harmônico trifásico avaliar as conseqüências acarretadas ao sistema de distribuição devido à geração de correntes harmônicas.

1.1 PESQUISAS RELACIONADAS COM A QUALIDADE DE ENERGIA EM SISTEMAS DE ENERGIA

Os problemas com a qualidade de energia não são recentes, porém passaram a ser estudados de forma correlacionada e não de forma isolada como no passado. Temas que envolvem a propagação e a geração de harmônicos nos sistemas de energia têm enfoque especial na literatura, onde muitos trabalhos técnicos têm sido desenvolvidos.

A geração de distorções harmônicas em sistemas de energia na rede metropolitana de Belém foi constatada por Tostes; Bezerra al (2001). Eles verificaram que as 3^a, 5^a e 7^a freqüências harmônicas são mais significativas e, em muitos casos, excedem os limites preditos em normas.

Dugan e Kennedy (1995) avaliam a qualidade de energia a partir do aumento de níveis de distorção harmônica com a instalação de equipamentos como banco de capacitores. No trabalho é apresentada a preocupação de concessionárias com problemas de qualidade de energia a partir da instalação de equipamentos responsáveis por aumentar o fator de potência. Os autores propõem um método para indicar a necessidade de correção da distorção harmônica presente na instalação baseada na alocação ótima de equipamentos como banco de capacitores.

Silva e Alves (2002) enfatiza que para o controle dos fenômenos relacionados a qualidade de energia em sistemas elétricos, a solução seria a instalação de instrumentos de medição especializado em pontos do sistema, dedicado a registrar instante, duração, amplitude e frequência com que ocorre, partindo então para um estudo estatístico do distúrbio uma vez que são fenômenos também de caráter aleatório, cita que algumas concessionárias do Estados Unidos e África do Sul já possuem tal prática.

Rossa (2000) avalia o efeito da distorção harmônica da rede elétrica sobre motores elétricos trifásicos de indução mostrando o aumento da dissipação térmica dos motores em função da distorção harmônica de tensão presente na rede de alimentação. No trabalho o autor apresenta uma metodologia para o cálculo do fator derating da potência nominal a ser aplicada quando na presença de distorções harmônicas de tensão nos sistemas de energia.

Bompard (2001) apresenta resultados da análise em sistemas de distribuição que foi constatado a partir de medições nos índices de distorção harmônica de tensão, que segundo os estudos foi provocado devido a instalação de equipamentos compensadores de reativo no circuito de iluminação pública do sistema de distribuição.

Srinivasan (1996) recomenda a análise da distorção da tensão de alimentação em estudos de fluxo de carga harmônico. O autor mostra, entre outros aspectos, que cargas puramente indutivas ou capacitivas, ou seja, cargas lineares, quando submetidas à tensão não-linear comportam-se como cargas não-lineares, pois suas impedâncias são dependentes da frequência.

Cox (1997), propõem que a qualidade de energia deve ser monitorada de forma contínua de modo a evitar distúrbios nos sistemas em virtude da mudança contínua dos sistemas de distribuição. Comenta ainda que, nestes sistemas, a terceira harmônica surge normalmente devido a cargas eletrônicas e que a 5ª e a 7ª

harmônicas surgem a partir de dispositivos de controle de motores de velocidade variável. Conclui que em análise harmônica de corrente, o mais relevante é o valor RMS de corrente em relação ao percentual de THD (*Total Harmonic Distortion*), pois um alto THD% normalmente surge em cargas pequenas quando as grandes cargas lineares estão desligadas.

Bollen e Lundquist (2000) no trabalho relata a utilização de um fluxo de carga harmônico ativo para sistemas de distribuição de baixa e média tensão e sua variação com a interação da carga com o sistema. Apresenta diferença dos níveis de distorções harmônica de tensão entre sistemas de baixa e de alta tensão, concluindo que a diminuição nos níveis de distorção harmônica da alta tensão é resultante da mistura maior de cargas lineares e não-lineares instaladas e também do bloqueio oferecido a algumas componentes harmônicas pelo enrolamento delta dos transformadores e ainda pela utilização de filtros harmônicos.

1.2 A QUALIDADE DE ENERGIA

As divergências no entendimento do conceito de qualidade de energia podem fazer com que se tenham conceitos diferentes, dependendo do referencial adotado. As concessionárias poderiam entender como sendo a necessidade de adequar os limites de tensão a índices propostos pelo órgão regulador. Por outro lado, fabricantes de equipamentos poderiam entender simplesmente como sendo um fornecimento de energia que atendesse aos requisitos necessários para a operação de seus equipamentos produzidos. Para o consumidor final, seria de maior importância um uso contínuo e eficiente deste produto, a energia.

Devido tratar-se de área de interesse do sistema de energia elétrica, a qualidade de energia relaciona vários fenômenos, que vão desde problemas relacionados com comunicação em redes de transmissão de dados, a geração, distribuição e o consumo da energia elétrica. A interpretação destes fenômenos, principalmente as distorções de tensão e corrente, localizados nos pontos de acoplamento comum, como também dentro das instalações do próprio consumidor de energia, está associada diretamente a racionalização de energia e aumento da produtividade.

Dentre as diversas definições do termo qualidade de energia, percebe-se a ausência de uma padronização comum, associada a esclarecimentos e soluções para os diversos problemas dos sistemas elétricos. De uma forma geral, a conceituação da perda da Qualidade de Energia é adotada por alguns especialistas da área, como sendo: “Qualquer problema, manifestado na tensão, corrente ou frequência, que resulte em falha ou operação indevida de equipamentos elétricos dos consumidores” (DUGAN *et al.*, 1996).

Segundo a Norma ISO-8402 (International Organization for Standardization) a Qualidade de Energia pode ser conceituada da seguinte forma: “Qualidade é a totalidade de características de uma entidade, que lhe confere a capacidade de satisfazer as necessidades explícitas e implícitas. Entidade é todo elemento que pode ser considerado e descrito individualmente”.

1.3 JUSTIFICATIVAS PARA O TRABALHO

Existe por parte das concessionárias de energia elétrica a necessidade do suprimento e a manutenção de uma tensão senoidal com amplitude e frequência constantes, de modo que possibilitem a adequada operação de diversos equipamentos elétricos. Surge então a necessidade de se conhecer os distúrbios que venham a afetar a qualidade de energia em diferentes sistemas de distribuição, que estão diretamente relacionados com suas características regionais e perfis de consumo a serem atendidos. Eventos associados à qualidade de energia, como as distorções harmônicas, são pouco explorados dentro dos sistemas de distribuição que trabalham diretamente com a utilização crescente da eletrônica de potência e com a inserção de cargas não lineares no sistema sem um estudo prévio.

Assim este trabalho tem o objetivo de identificar e avaliar o problema da geração de distorção harmônica, traçando o perfil dos índices de geração de harmônicos por classe de consumo atendido pela CEA, hoje desconhecido, e que são de extrema importância para a perfeita operação e planejamento do sistema elétrico da companhia.

A utilização de um programa de fluxo de carga harmônico trifásico possibilitará a avaliação e o planejamento do sistema de distribuição, considerando o uso dessas cargas. A utilização de dados reais do sistema coletados a partir do

perfil obtido no estudo, permitirá que os operadores do sistema adquiram uma base mais realista para tomadas de decisão frente a distúrbios relacionados à qualidade de energia.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Para o desenvolvimento desta dissertação, os assuntos que levam ao tema principal, foram organizados em 5 capítulos, a saber: o capítulo 1 é dedicado a introdução do trabalho, abordando o tema qualidade de energia.

O capítulo 2 apresenta uma visão geral sobre os principais distúrbios e harmônicos em sistemas de distribuição de energia elétrica, seus efeitos sobre o sistema bem como algumas normas existente para o estudo de distorções harmônicas.

O capítulo 3 apresenta o sistema de distribuição avaliado e mostra os resultados das medições efetuadas em grupos de transformadores da classe residencial, mista e comercial, identificando e caracterizando o perfil de cada classe.

O capítulo 4 mostra a avaliação realizada no sistema através de um programa de fluxo de carga harmônico trifásico, utilizando-se índices coletados através do estudo.

O capítulo 5 apresenta as conclusões referentes ao trabalho, apresentando também as referências bibliográficas consultadas.

CAPÍTULO II

FENÔMENOS ASSOCIADOS À QUALIDADE DE ENERGIA EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.

2.1 INTRODUÇÃO

Um sistema de energia elétrica tem como objetivo principal o fornecimento contínuo de energia (poucas interrupções), com confiabilidade, qualidade (pequena variação magnitude de tensão, corrente e freqüência) e a um custo razoavelmente baixo (LOPES, 2001).

Em regime permanente, sem perturbações, tem-se o equilíbrio estável em perfeita harmonia entre os diversos elementos armazenadores de energia que constituem um sistema elétrico, desde aquele representado pelo minúsculo campo elétrico da bucha de um transformador até a energia cinética das turbinas e rotores dos geradores (DELAIBA *et al.*, 1996), no entanto, as necessidades de suprimento, bem como a sensibilidade das cargas a serem atendidas foram se modificando ao longo do tempo.

A comodidade, facilidade e eficiência encontradas no dia-a-dia face ao uso de equipamentos eletrônicos é sem dúvida indiscutível; por outro lado é notório o aumento da sensibilidade desses equipamentos a distúrbios no sistema, com o agravante de apresentar características não-lineares, sendo também fontes de distúrbios referentes a qualidade de suprimento no setor elétrico. Como resultado, surgem os harmônicos que provocam a distorção da onda senoidal de tensão ocasionando danos a componentes da rede elétrica e falhas em equipamentos.

Em face desta grande diversidade de elementos e cargas existentes, encontra-se nos sistemas elétricos de potência um elenco diversificado de perturbações que podem dar início ao afastamento do sistema elétrico das condições ideais de qualidade de energia desejada pelas concessionárias.

Neste capítulo será feito um estudo da forma como os distúrbios estão dispostos nos sistemas elétricos de energia, com ênfase aos harmônicos de tensão e corrente, suas conseqüências bem como as principais normas de regulamentação.

2.2 DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Os distúrbios são fenômenos físicos que causam a falha ou mau funcionamento do sistema, e que poderiam ser classificados quanto a forma, duração, localização e origem (SILVA e ALVES, 2002).

2.2.1 Forma dos distúrbios

Dependendo da forma pela qual o distúrbio se manifesta sobre o sistema, pode-se identificar os seguintes fenômenos:

- * Variação de valor eficaz (amplitude de tensão e corrente).
- * Variação de frequência
- * Variação da forma de onda (harmônicos)
- * Flutuação de tensão
- * Desequilíbrio de tensão ou corrente
- * Descarga eletrostática

2.2.2 Duração dos distúrbios

Em relação ao tempo de duração dos distúrbios nos sistemas elétricos, esses podem ser classificados em:

- * Permanente
- * Momentâneo
- * Transitório

As perturbações permanentes são as mais fáceis de serem encontradas e resolvidas, devido, na maioria das vezes, serem causadas por fenômenos determinísticos; por outro lado, as perturbações momentâneas e transitórias são as mais difíceis de serem medidas, pois são causadas por fenômenos aleatórios e de origem tanto no sistema do cliente como no sistema supridor. Neste caso, o

fenômeno mais comum é a Variação Momentânea de Tensão (VMT), sendo também a causadora do maior número de reclamações por parte dos consumidores.

2.2.3 Localização dos distúrbios

Os distúrbios quanto à localização podem ser classificados em:

- * Interno
- * Externo

Esta classificação é para determinar se os distúrbios estão localizados dentro ou fora do sistema sob estudo.

2.2.4 Origem dos distúrbios

Quanto à origem, ou seja, a causa ou fonte causadora do distúrbio, as perturbações no sistema podem ser classificadas em:

- * Sobrecarga
- * Variação de carga
- * Chaveamento de carga
- * Surtos atmosféricos
- * Curto-circuito
- * Carga não-linear
- * Aterramento inadequado
- * Erro humano, vandalismo, ação de agentes ambientais, entre outros.

A tabela 2.1 mostra um resumo das formas de distúrbios mais freqüentes enfocados pela qualidade de energia.

DISTÚRBIOS			
Forma (efeito)	Localização	Duração	Origem (causa)
Desequilíbrio de tensão	* Externo * Interno	* Permanente * Momentânea * Transitória	* Cargas Monofásicas * Rede sem transposição
Variação de frequência de tensão	* Externo	* Permanente * Momentânea * Transitória	* Máquina síncrona
Variação de tensão	* Externo * Interno	* Permanente * Momentânea * Transitória	* Sobrecarga * Falta de carga * Falta na rede * Falta na transmissão * Chaveamento de motores. * Falta monofásica * Rejeição de Carga * Chaveamento de capacitor.
Flutuação de Tensão (Flicker)	* Interno	* Permanente * Momentânea	* Cargas: compressor, forno a arco, laminador.
Deformação da onda (Harmônica)	* Externo * Interno	* Permanente * Momentânea	* Carga não linear * Fornos * Equipamentos eletrônicos * Lâmpadas de descarga * Transformador saturado
Descargas eletrostáticas	* Externo * Interno	* Transitórios	* Equipamentos

Tabela 2.1

2.3 HARMÔNICOS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

O suprimento e a manutenção de uma tensão puramente senoidal com amplitude e frequência constantes, sempre foi objetivo das concessionárias de energia elétrica. O comprometimento com o fornecimento de uma energia elétrica adequada requer uma avaliação constante e detalhada da ocorrência dos mais variados fenômenos elétricos. Particularmente ressaltam-se as preocupações com os níveis de distorções harmônicas de tensão e corrente, normalmente causados pela operação de cargas não-lineares, que, propagando-se pelo sistema elétrico podem ocasionar aquecimentos anormais em transformadores, interferências em

equipamentos eletrônicos de controle, comunicação, microcomputadores entre outros.

2.3.1 Cargas não-lineares

Carga não-linear é aquela que, quando alimentada com tensão senoidal, absorve uma corrente não senoidal, ou seja, a carga não linear tem a características de deformar a forma de onda da corrente absorvida. Nesta definição está implícito que se trata de regime permanente senoidal, por isso, se diz que uma carga linear é aquela onde existe uma proporcionalidade entre tensão e corrente através de uma impedância Z qual afeta a amplitude e a fase da corrente mantendo a forma de onda senoidal; o mesmo não acontece com as cargas não lineares que deformam a forma de onda e por isso também são chamadas de cargas deformantes (DIAS, 1998).

Estas cargas fazem parte de um grupo de cargas especiais que atualmente vem se proliferando no sistema elétrico. Atualmente as cargas não-lineares são classificadas em três categorias de acordo com o tipo de deformação.

As deformações relacionadas diretamente com a não linearidade do arco voltaico são ditas da categoria 1, onde se encontram os equipamentos com características operativas de arco voltaicos como os fornos a arco, máquinas de solda e iluminação fluorescente.

Quando a natureza da deformação da corrente é oriunda da não linearidade do circuito magnético, a deformação da onda é dita da categoria 2, onde encontram-se equipamentos de núcleo magnético saturado como reatores e transformadores de núcleo saturado.

E finalmente, a categoria 3 é aquele em que a deformação é proveniente da não linearidade dos componentes eletrônicos, onde encontram-se equipamentos eletrônicos como inversores, retificadores, UPS, televisores, forno de microondas, computadores entre outros.

2.3.2 Conseqüências da presença de distorções harmônicas em alguns componentes do sistema elétrico

Qualquer sinal de tensão ou corrente, cuja forma de onda não seja senoidal, pode provocar danos em componentes do sistema elétrico ou aparelhos a eles conectados (MORENO, 2001).

As principais conseqüências observadas em componentes do sistema elétrico submetidos à presença de harmônicos são:

a) cabos – Partindo-se do princípio de que os cabos de alimentação são componentes fundamentais nos sistemas elétricos, torna-se essencial sua análise, diante de várias anomalias que podem se fazer presentes no sistema supridor, caracterizadas por uma baixa qualidade.

A capacidade de corrente dos cabos que compõem os alimentadores e as linhas de transmissão é determinada pela perda Joule gerada no cabo, que está associada e pela capacidade de dissipação do calor para o meio ambiente através da resistência do cabo. O cabo deve dissipar a perda Joule de modo que a temperatura do condutor não ultrapasse um certo valor limite suportável pelo cabo (PACHECO *et al.*, 1999).

A perda Joule média gerada num condutor, quando este é atravessado por uma corrente $i(t)$, corresponde à potência dissipada na resistência deste condutor.

$$p = R \cdot 1/T \cdot \int_0^T i^2(t) dt \quad (2.1)$$

onde,

p é a perda Joule média.

R é a resistência ôhmica do condutor

T é o período da corrente $i(t)$.

A resistência ôhmica do condutor é função da frequência ($1/T$) da corrente $i(t)$ que, aumenta de valor em relação a sua a resistência ôhmica em corrente contínua devido ao efeito pelicular e proximidade de outros condutores que causam uma desuniformidade na distribuição de corrente no condutor.

Assim se a corrente $i(t)$ não for senoidal, isto é, deformada por causa de uma carga não linear, através da decomposição de Fourier da corrente $i(t)$ com o teorema da superposição, pode-se escrever (SILVA e ALVES, 2002).

$$p = \sum_{h=1}^{\infty} R_h \cdot I_h^2 \quad (2.2)$$

onde,

R_h é a resistência ôhmica do condutor na frequência da componente harmônica h
 I_h é o valor eficaz da componente harmônica da corrente $i(t)$.

Desta forma ao se desejar usar um cabo para uma corrente não-senoidal, deve-se garantir que esta corrente não gere perda joule superior a perda joule produzida por uma corrente senoidal.

Para investigar o acréscimo de temperatura do cabo sob condições de funcionamento em que as tensões e correntes apresentam distorções harmônicas, deve-se conhecer, além dos dados físicos dos cabos, a variação da com o carregamento nas diversas frequências harmônicas.

Na presença de harmônicos, podem ser verificadas elevações de temperatura nos cabos isolados. Isso é constatado na Figura 2.1, retirado de (PACHECO *et al.*, 1999), a qual mostra o comportamento térmico deste componente, alimentando uma carga não-linear, ou seja a ele é imposta uma certa distorção de corrente; os efeitos sobre a temperatura são bem acentuados, como pode ser visto na figura 2.1, que mostra o perfil da temperatura de um cabo exposto a uma distorção de corrente igual a 25%.

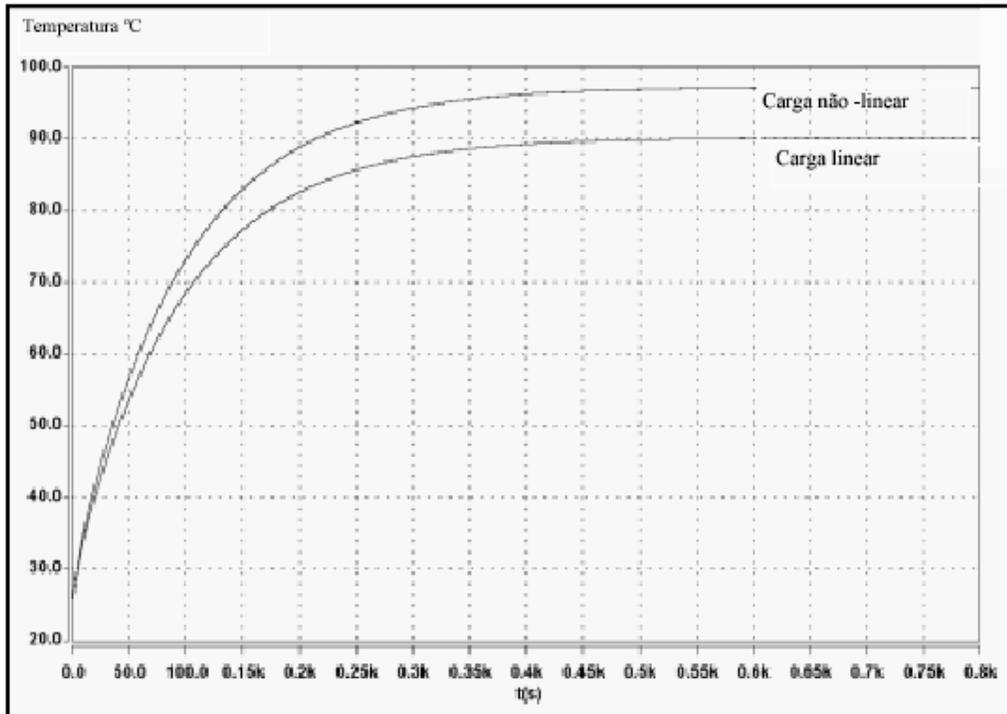


Figura 2.1 - Gráfico da temperatura para carregamento linear e não-linear (PACHECO *et al.*, 1999)

A partir da figura 2.1, percebe-se que a temperatura de regime permanente na isolação do condutor é de 90° C, quando este atende uma carga linear. Quando da sua operação com 25% de DHTi, a temperatura final atinge o valor de 97,6°C.

Sob esses aspectos, a vida útil dos cabos, também é afetada como mostra a figura 2.2 retirado de (PACHECO *et al.*, 1999).

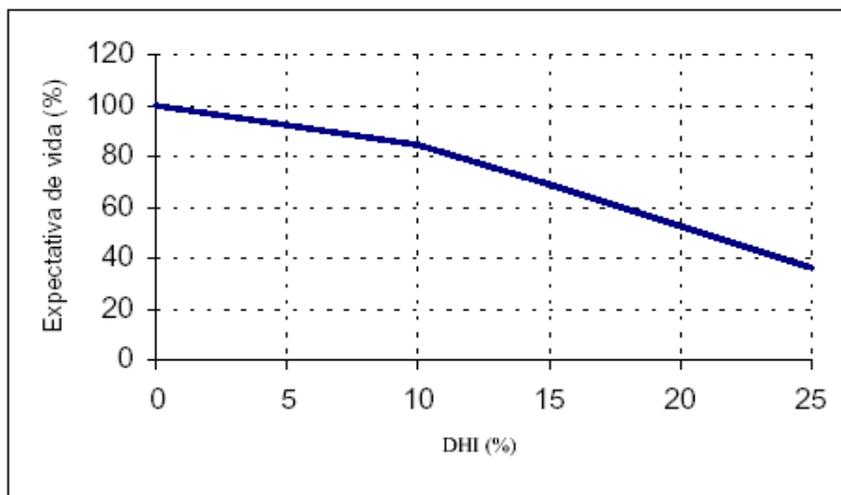


Figura 2.2 - Expectativa da vida útil em função da distorção de corrente (PACHECO *et al.*, 1999).

Na figura 2.2 é possível verificar a relação da vida útil do cabo com a distorção de corrente, onde mostra a queda da vida útil do cabo em função de um aumento do DHI em uma faixa de 0 a 25%; isto representa distorções típicas em instalações industriais. Estas componentes harmônicas individuais são relacionadas com as ordens 5, 7, 11 e 13.

b) transformadores – Os transformadores de distribuição e de força são projetados e construídos com isolamento consistindo, geralmente, de materiais orgânicos e/ou inorgânicos como o óleo mineral e o papel. A degradação de algumas propriedades do isolante está, via de regra, associada à ação individual e/ou conjunta das seguintes possibilidades: calor (reações químicas aceleradas), contaminação, umidade, acidez, vibrações, etc. Considerando que o transformador está, usualmente, na “interface” entre as fontes de energia e muitas cargas não lineares, o efeito dos harmônicos no comportamento térmico deste componente representa um assunto de grande relevância.

As perdas num transformador podem ser divididas em duas parcelas: perda em vazio e perda em carga.

A perda em vazio é devido à tensão de excitação do núcleo e conseqüentemente á corrente de excitação do núcleo. Embora esta corrente seja não senoidal seu valor é pequeno comparado com a corrente de carga e, portanto, seu efeito é mínimo.

A perda em carga pode ser subdividida em perdas no cobre e no ferro. A perda no cobre é devido ao efeito Joule nos enrolamentos e a perda no ferro é devida às perdas por histerese e Foucalt que aparecem no núcleo, nas paredes do tanque do transformador e em sua estrutura (SILVA e ALVES, 2002).

Assim, pode-se expressar a perda total de um transformador em carga como

$$p = p_{cu} + p_{fe} = R \cdot I^2 + p_{fe} \quad (2.3)$$

Para as perdas no cobre (p_{cu}) e no ferro (p_{fe}), tem-se:

$$p_{cu} = p_{cun} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} (I_h / I_n)^2 \quad (2.4)$$

onde,

p_{cu} é a perda no cobre com corrente não senoidal

p_{cun} é a perda nominal no cobre com corrente senoidal

I_h é a componente harmônica da corrente não senoidal

I_n é a corrente nominal senoidal do transformador

A perda Foucault é proporcional ao quadrado da frequência e a perda histerética é proporcional a frequência.

A norma ANSI/IEEE C57. 110 “Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Nonsinusoidal Loads Currents (Dry – Type and Liquid Immersed up to 50 MVA)” de 1986 considera:

- * a perda no cobre é uniformemente distribuída nos enrolamentos;
- * a perda no ferro é proporcional ao quadrado da frequência e da corrente;
- * a perda no ferro máxima é 400% maior que a perda no ferro média.

$$p_{cu} = p_{cun} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} (I_h / I_n)^2 \quad (2.5)$$

$$p_{fe} = p_{fen} \cdot \sum_{h=1}^{\infty} (I_h / I_n)^2 \cdot h^2 \quad (2.6)$$

onde,

p_{cu} é a perda no cobre com corrente não senoidal

p_{cun} é a perda no cobre nominal com corrente senoidal

p_{fe} é a perda no ferro com corrente não senoidal

p_{fen} é a perda no ferro nominal com corrente senoidal

I_h é a componente harmônica da corrente não senoidal

I_n é a corrente nominal senoidal do transformador

As expressões 2.4 e 2.5 permitem determinar as perdas efetivas no cobre e no ferro acarretadas por corrente não senoidal desde que se conheça as perdas nominais do transformador. A precisão das expressões acima se encontra nos

harmônicos de ordem 3, 5 e 7 e são conservativas para as de ordem superior (SILVA e ALVES,2002).

A norma ANSI/ IEEE C57.12.00 “Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers” de 1987 e a norma ANSI/IEEE C57.12.01 “Standard General Requirements for Dry-Type Distribution and Power Transformers Including Those With Solid Cast and/or Resin-Encapsulated Winding” de 1989 recomendam que a corrente de carga do transformador não tenha um THD de corrente superior a 5%. Na prática, este valor de THD de corrente é facilmente superado quando o transformador alimenta cargas não lineares de potência nominal da ordem de 10% a 20% da potência nominal do transformador.

Em 1992 a norma 1562 da Underwrites Laboratory (UL) “Standard for Transformer, Distribution, Dry-Type, Over 600 Volts” definiu o fator “k” para transformadores. Segundo esta norma, o fator “k” é uma classificação aplicada ao transformador para indicar sua adequação para uso com cargas não lineares.

$$k = \sum_{h=1}^{\infty} (I_h / I_n)^2 \cdot h^2 \quad (2.7)$$

onde,

I_h é a componente harmônica da corrente não senoidal da carga não linear.

I_n é a corrente nominal senoidal do transformador.

A tabela abaixo apresenta os valores de fator "k" padronizado e o percentual de carga não linear sobre a potência do transformador recomendada pelo fabricante de transformador segundo a UL.

FATOR K	PERCENTUAL
1	15%
4	35%
13	75%
20	100%
30	100%
40	100%
50	100%

Tabela 2.2

A definição de fator “k” é até o presente momento, uma definição exclusiva da norma da UL não tendo definição em outras normas tais como IEEE, ANSI, NEMA.

Um ponto importante na análise dos transformadores é quanto sua vida útil, sendo que a norma brasileira NBR 5416 sugere que seja estimada, tomando-se como base a expressão a seguir:

$$\rho_1 = 10^{\left[\left(\frac{6972,15}{\Theta + 273} \right)^{-14,133} \right]} \quad (2.8)$$

onde,

□ Θ - Temperatura no ponto mais quente;

ρ_1 - Expectativa da vida útil.

A título de ilustração é mostrado na figura 2.3, retirado de (DELAIBA, 1996) a expectativa de vida útil de um transformador submetido a condições não ideais de suprimento e carga. Nesse sentido, a Figura 2.3 mostra o comportamento dessa grandeza quando o transformador é exposto a uma distorção de tensão constante e igual a 5%, e a distorção de corrente é variável dentro de uma faixa compreendida entre 0 e 35%.

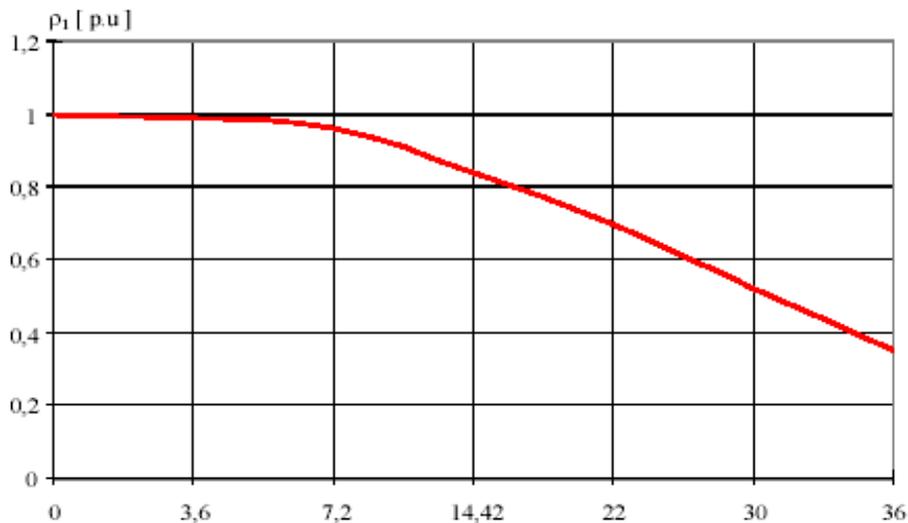


Figura 2.3 – Estimativa da vida útil em função da distorção harmônica de corrente (DELAIBA, 1996)

Observa-se pela figura que a expectativa de vida útil tem uma redução acentuada à medida que o nível de distorção harmônica de corrente é elevado, sendo recomendado algumas vezes o redimensionamento do transformador.

c) capacitores – A avaliação da suportabilidade dos bancos de capacitores submetidos a sinais distorcidos de tensão e/ou corrente leva em consideração as grandezas que influenciam na vida útil do mesmo. Nesse contexto citam-se a tensão eficaz total, a tensão de pico, a corrente eficaz total e a potência reativa total nos referidos equipamentos.

Assim, para fins de uma primeira análise, pondera-se que à medida que a frequência aumenta, a reatância capacitiva diminui de acordo com a seguinte relação (SOUTO et al.,1999):

$$X_{ch} = \frac{X_{c1}}{h} \quad (2.9)$$

onde,

X_{Ch} – Reatância capacitiva de ordem h;

h – Ordem harmônica considerada;

X_{C1} – Reatância capacitiva na frequência fundamental.

Nessas condições, mesmo com uma pequena distorção de tensão para uma dada ordem harmônica h, pode-se atingir um alto valor de distorção de corrente no capacitor (I_h), à medida que a frequência harmônica aumenta, como rege a equação 2.10 a seguir:

$$I_h = \frac{V_h}{X_{ch}} \quad (2.10)$$

onde,

I_h – Corrente harmônica individual de ordem h no banco de capacitores;

V_h – Tensão harmônica individual de ordem h.

Desta forma, conclui-se que os capacitores poderão sofrer um *stress* térmico (sobreaquecimento), devido às correntes harmônicas, e problemas de isolamento (fadiga), oriundo das distorções de tensão, o que, conseqüentemente, conduzirá a uma redução na sua vida útil. Assim, para evitar tal inconveniente, as normas nacionais e internacionais orientam no sentido de fixar condições que preservem a integridade dos capacitores.

A ANSI/IEEE *Standard* 18-1980 especifica os limites toleráveis pelos capacitores quando estes se encontram submetidos a sinais distorcidos de tensão e/ou corrente. Tais índices são apresentados na tabela 2.3.

Grandeza	Limite
QCT	≤ 135 % da potência reativa nominal
Vef	≤ 110 % da tensão eficaz nominal
Ief	≤ 180 % da corrente eficaz nominal
Vpico	≤ 120 % da tensão de pico nominal

Tabela 2.3 - Limites de suportabilidade dos capacitores

d) motores de indução – Um sistema elétrico com a qualidade de tensão de suprimento comprometida, mais especificamente no que diz respeito à geração de harmônicos podem ocasionar sobreaquecimentos consideráveis em máquinas rotativas que constituem a maioria das cargas conectadas aos sistemas elétricos industriais.

O aumento no aquecimento devido ao aumento das perdas no ferro e no cobre é o maior efeito dos harmônicos em máquinas rotativas (indução e síncrona), e quando comparado com alimentação senoidal, tem-se um possível aumento do nível de ruídos (POMILIO,1997).

Correntes harmônicas são criadas nos motores quando a rede de alimentação possui componentes em freqüência que não a fundamental. Conseqüentemente a elevação de temperatura do motor operando em uma determinada condição de carga e distorção harmônica de tensão será maior que para o motor operando nas mesmas condições de carga, porém alimentado por uma tensão senoidal pura na freqüência nominal.

Essa variação de temperatura experimental para um motor de indução, quando exposto a uma tensão de alimentação distorcida, pode ser verificado na figura 2.4.

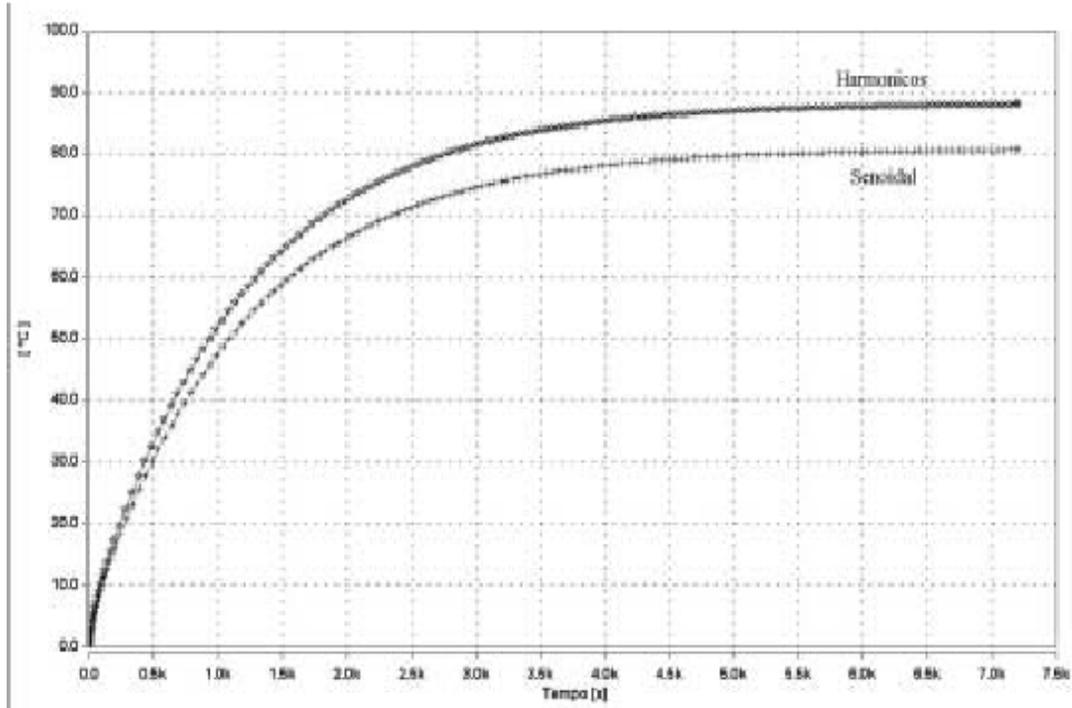


Figura 2.4 - Variação de temperatura na presença de harmônicos (SOUTO et al. ,1999).

Da figura anterior, pode-se observar um aumento da temperatura no enrolamento do estator, quando da presença de harmônicos, em relação à situação operacional com tensões ideais. A temperatura final do estator, considerando que a temperatura ambiente é igual a 40°C , é da ordem de $128,1^{\circ}\text{C}$ significando uma elevação de $7,4^{\circ}\text{C}$ em relação ao caso ideal.

O efeito dos harmônicos sobre os motores bem como sua limitação depende também do projeto e do tipo de motor. É fato que, além de aumentos de temperatura no estator e no rotor, haverá uma redução de eficiência e vida útil do motor (SOUTO et al. 1999).

É proposto na Norma NEMA MG 1-1993 parte 30, um fator de depreciação da potência do motor quando este estiver operando em potência nominal e submetido a uma tensão deformada. Este fator é obtido da curva da figura 2.5, em função do fator de tensão harmônica (HVF), que é definido por.

$$\text{HVF} = \sqrt{\sum_{h=5} v_h^2 / h} \quad (2.11)$$

O somatório é para valores de “h” ímpares e não múltiplos de 3.

onde,

V_h = tensão harmônica.

h = ordem harmônica.

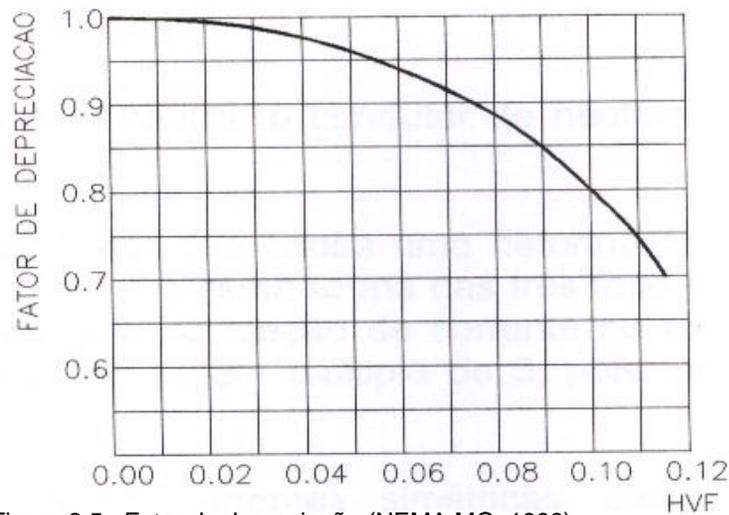


Figura 2.5 - Fator de depreciação (NEMA MG, 1993)

2.3.3 Padrões de emissão de harmônicos.

No sentido de garantir a qualidade no suprimento de energia elétrica, a partir do conhecimento de índices de harmônicos existentes no sistema elétrico, e os danos que as distorções harmônicas de tensão e corrente podem causar aos componentes do sistema ou a equipamentos a ele conectados, faz-se necessário o estabelecimento de normas que indiquem os limites de harmônicos injetados nos sistemas de energia, para que dessa forma tanto a concessionária como os consumidores possam controlar tais distúrbios.

Os primeiros documentos a cerca de considerações a serem feitas sobre normas que regem a qualidade de energia são provenientes da Europa e Estados Unidos. Em meados de 1969 o CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) e o IEC (International Electrotechnical Commission) formaram comitês para investigar o efeito dos harmônicos causados por circuito eletrônicos utilizados em equipamentos domésticos.

As normas da IEC fornecem diretrizes e procedimentos para diferentes regulamentações que normatizam questões vinculadas a qualidade de energia. Em junho de 1992, a IEEE 519 “Recommended Practice” passa a prover um documento sobre as causas, efeitos, medições e controle de harmônicos em sistemas de potência (HB).

No Brasil, utiliza-se limites estabelecidos pelo ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico), que são resultados da formação dos grupos GCOI (Grupo Coordenador para Operação Interligada) e GCPS (Grupo Coordenador de Planejamento dos Sistemas Elétricos) que *a priori* elaboraram o documento “Procedimentos de medição para a aferição da qualidade da onda de tensão quanto ao aspecto de conformidade”.

A caracterização da presença de harmônicos de tensão e corrente pode ser feito através do tratamento individual ou total dos mesmos, sendo:

$$\text{Distorção Harmônica Individual de Tensão: } \frac{V_h}{V_1} \times 100 \quad (2.12)$$

$$\text{Distorção Harmônica Total de Tensão: } \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} V_h^2}}{V_1} \times 100 \quad (2.13)$$

$$\text{Distorção Harmônica Individual de Corrente: } \frac{I_h}{I_1} \times 100 \quad (2.14)$$

$$\text{Distorção Harmônica Total de Corrente: } \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \max} I_h^2}}{I_1} \times 100 \quad (2.15)$$

2.3.3.1 As normas que regulam a injeção de harmônico

No que diz respeito a normas internacionais, tem-se hoje em destaque as recomendações IEC e a IEEE que se constituem as mais conceituadas referências sobre harmônicos, e no Brasil o ONS elaborou limites para definir os padrões de desempenho da rede básica.

2.3.3.2 Normas internacionais

a) A IEC (International Electrotechnical Commission) é uma organização mundial de normatização, cujo objetivo é promover a cooperação internacional em questões relativas às normas, recomendações e orientações no contexto elétrico.

No tocante a harmônicos este documento contém os seguintes tópicos:

- * A IEC 1000-2-2 - Estabelece os limites de tensões harmônicas individuais e totais para baixa tensão ($BT \leq 1 \text{ kV}$), assim como apresenta conceitos relacionados com desequilíbrio de tensão;
- * IEC 1000-3-2 - Define limites para as correntes harmônicas produzidas por equipamentos de baixa potência e destinados à instalação em sistemas de BT;
- * A IEC 1000-3-6 determina limites de emissão de harmônicos de cargas não-lineares conectadas a sistemas de média ($1\text{kV} < MT \leq 35\text{kV}$) e alta tensão ($35\text{kV} < AT \leq 230\text{kV}$);
- * A IEC 1000-4-7 apresenta orientações vinculadas com a aplicação de instrumentos de medição de frequência até 2500Hz. Adicionalmente apresenta sugestões para os intervalos de tempo destinados às medições de harmônicos.

Quanto aos níveis máximos para as tensões harmônicas em BT e MT, aplica-se a recomendação IEC 1000-3-6, conforme tabela 2.4.

Harmônicas ímpares Não-múltiplas de 3		Harmônicas ímpares Múltiplas de 3		Harmônicas pares	
Ordem h	Tensão Harmônica %	Ordem h	Tensão Harmônica %	Ordem h	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			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2 + 1,3 x (25/h)				

Nota – Distorção Harmônica Total (THD): 8%.

Tabela 2.4 - Níveis de tensões harmônicas para sistemas de potência de BT e MT.

b) O IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) possui uma hierarquia de documentos desde os de caráter instrutivos até os mais regulamentadores.

Neste trabalho é apresentado o IEEE Standard 519-1992, que estabelece procedimentos para o controle de existência de harmônicos em sistemas de potência, juntamente com os limites recomendados para injeção de corrente harmônica.

Os limites de distorção de tensão estabelecidos para os diferentes níveis de tensão estão apresentados na tabela a seguir.

Tensão nominal do PAC (Vn)	Distorção Harmônica de Tensão Individual (%)	Distorção Harmônica de Tensão Total – THDVn (%)
$V_n \leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
$69 \text{ kV} < V_n \leq 161 \text{ kV}$	1.5	2.5
$V_n > 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

Tabela 2.5 – Limites de distorção harmônica de tensão em % da nominal

As correntes harmônicas provenientes dos consumidores são avaliadas nos seus pontos de acoplamento comum (PAC) com a concessionária. Tais limites dependem da entre a carga (I_L) do consumidor e a corrente de curto-circuito (I_{cc}), como apresentado na tabela 2.6.

Vn ≤ 69 kV						
<i>Icc/ IL</i>	<i>h < 11</i>	<i>11 ≤ h < 17</i>	<i>17 ≤ h < 23</i>	<i>23 ≤ h < 35</i>	<i>35 ≤ h</i>	<i>THDi</i>
< 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
69 kV < Vn ≤ 161 kV						
<20*	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	1.25	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
Vn > 161 kV						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0

Tabela 2.6 - Limites de correntes harmônicas

2.3.3.3 Normas nacionais

Nacionalmente em termos de harmônicas, tem-se o ONS que no intuito de avaliar o desempenho global quanto a harmônicos nos barramentos da rede básica correspondentes a distorção harmônica de tensão, apresentado conforme tabela 2.7, os padrões globais:

V < 69 Kv				V ≥ 69 kV			
Ímpares		Pares		Ímpares		Pares	
Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)	Ordem	Valor (%)
3, 5, 7	5	2, 4, 6	2	3, 5, 7	2	2, 4, 6	1
9, 11, 13	3	≥ 8	1	9, 11, 13	1,5	≥ 8	0,5
15 a 25	2	-	-	15 a 25	1	-	-
≥ 27	1	-	-	≥ 27	0,5	-	-
D = 6%				D = 3%			

Tabela 2.7 – limites globais de tensão

2.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os principais distúrbios existentes no sistema de energia elétrica, com atenção especial aos harmônicos de tensão e corrente, bem como as principais normas que regulamentam a geração de distorção harmônica. O capítulo seguinte trata de forma detalhada da geração de harmônicos no sistema de distribuição de energia da CEA que foram identificados a partir de medições nos secundários dos transformadores pertencentes ao sistema estudado.

CAPÍTULO III

O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO ANALISADO E A GERAÇÃO DE HARMÔNICOS

3.1 INTRODUÇÃO

A preocupação com falhas ou operação indevida de equipamentos elétricos, bem como a queda na produção são problemas relacionados à qualidade de energia, que tornaram-se mais comuns atualmente nas concessionárias de energia elétrica.

A principal razão pela qual existe um interesse em torno desse problema é sem dúvida o aspecto financeiro. Grandes impactos econômicos envolvem as concessionárias, seus consumidores e os fabricantes de equipamentos elétricos.

Entre os distúrbios e a qualificação de um padrão de qualidade da energia, os harmônicos encontram-se em uma posição de destaque, considerando que atualmente é notório o aumento das cargas não-lineares tornando o sistema de energia mais propenso e sensível a esses distúrbios.

No intuito de identificar e caracterizar as fontes geradoras de harmônicos, para que dessa forma seja possível a análise do nível de injeção harmônica na rede de distribuição primária da CEA, é apresentado neste capítulo os resultados dos estudos realizados nesse sistema, a partir de medições registradas no secundário de transformadores previamente classificados em grupos por classe de consumo.

3.2 O SISTEMA EM ESTUDO

O sistema analisado neste trabalho é parte integrante do sistema da Companhia de Eletricidade do Amapá (CEA), localizada na cidade de Macapá, com capacidade de geração de 200MW em conjunto com a Eletronorte. Atualmente atende a aproximadamente 118.000 consumidores, totalizando um consumo máximo 112 MWh anual de energia, sendo distribuída a seus consumidores através de 21 alimentadores distribuídos pela cidade.

Especificamente neste trabalho, utiliza-se o alimentador Pe. Júlio, localizado na área urbana da cidade com aproximadamente 4,0 km de comprimento, possuindo 94 transformadores de energia ao longo de sua extensão, sendo que 62% desses transformadores atendem a cargas com características comerciais e o restante 38% atendendo a cargas residenciais e algumas cargas mistas.

O alimentador em questão possui curva de carga com características bem definidas, por possuir na sua maioria o atendimento a cargas comerciais, ficando claro o aumento do consumo nos horários matutino e vespertino, com quedas no horário noturno, conforme figura 3.1.

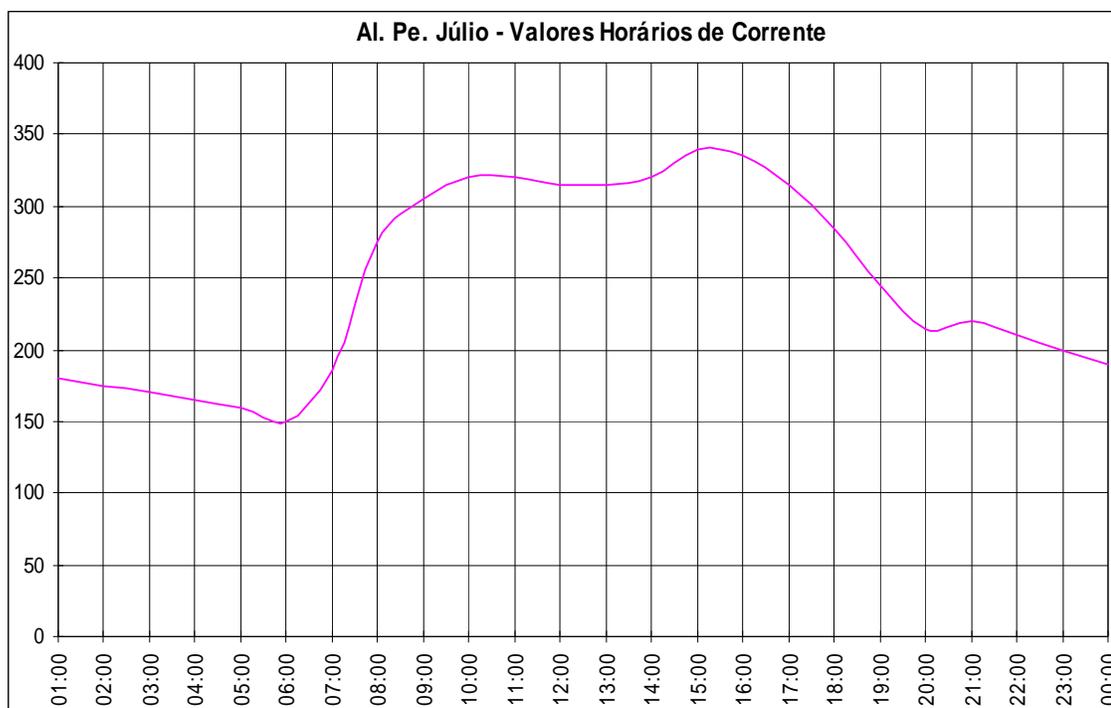


Fig. 3.1 Curva de carga do alimentador (I x t)

3.3 ESTRATÉGIAS DAS MEDIÇÕES PARA A IDENTIFICAÇÃO DE HARMÔNICOS GERADOS NO SISTEMA CEA

Para que fosse possibilitada a identificação e a caracterização dos harmônicos gerados no sistema em estudo, foi necessário realizar o levantamento do perfil de classes de consumo atendido por determinados transformadores. Essa

etapa do trabalho necessariamente foi realizada antes dos serviços de registro em campo, para que desta forma pudesse dar suporte e conhecimento sobre os transformadores a serem medidos.

De posse do perfil de atendimento dos transformadores, esses foram classificados em grupos por classe de consumo e potência nominal, ou seja, os transformadores pertencentes ao alimentador em estudo foram classificados em grupos de classes comercial, residencial e mista, e também por sua potência nominal de atendimento, variando na faixa de 45kVA a 300kVA.

Esse procedimento se justifica pelo fato de o alimentador possuir características bem definidas por suas classes comerciais e residenciais, o que contribui de forma direta para a redução do número de suposições quando avaliado o sistema de forma global.

Na tentativa de monitorar pontos estratégicos do sistema, abrangendo características de toda área de concessão e ainda diferentes categorias de consumidores em função da importância da carga atendida, foram selecionados 16 transformadores ao longo do alimentador Pe. Júlio, de modo a ter-se o perfil de geração de harmônicos de cada tipo de carga atendida por determinado transformador.

As medições foram realizadas em períodos matutinos, vespertinos e noturnos, num período médio de 24 a 48 horas em cada transformador com medições coletadas a cada 10 (dez) minutos, observando-se os períodos de carga máxima e mínima.

Foram coletadas medidas de tensão (V), corrente (I), fator de potência (FP), além de potência ativa (kW), potência reativa (kVAR), potência aparente (kVA) e frequência (Hz) para cada ponto de medição.

Os registros das medições foram possíveis com a utilização de um equipamento de medição e análise de qualidade de energia que faz a decomposição harmônica até a 51^a ordem, expressando essa decomposição espectral através de gráficos de barras; modelo trifásico, com capacidade de 600V e 1000A acoplado no secundário dos transformadores de rede de distribuição de energia.

3.4 AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS DAS MEDIÇÕES REALIZADAS NO SISTEMA.

Nesta seção serão apresentados os resultados dos registros de medições nos transformadores avaliados, identificando e caracterizando os índices de distorções harmônicas gerados. Os transformadores avaliados podem ser visualizados conforme anexo I (Al. Pe Júlio em camadas).

3.4.1 Avaliação dos transformadores residenciais

O primeiro grupo de transformadores a ser avaliado é o de classe residencial. Os transformadores analisados neste grupo são trifásicos com potência nominal na faixa de 45kVA a 150kVA.

3.4.1.1 Transformador com potência nominal de 45kva

A figura 3.2-(a) apresenta os resultados de distorção harmônica total percentual de tensão, DHTv(%).

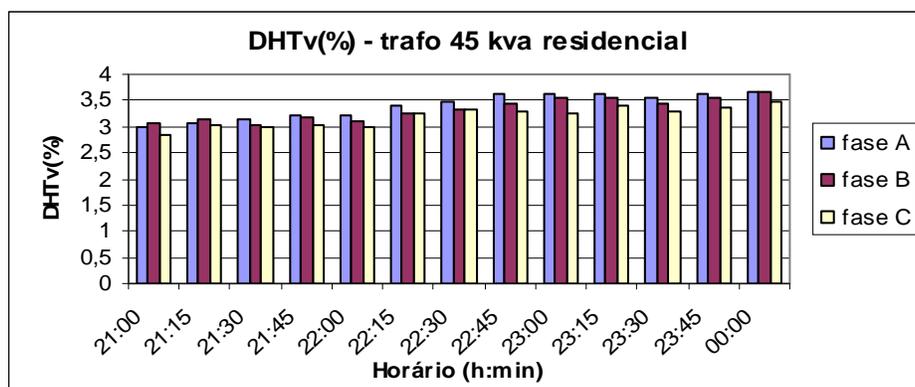


Figura 3.2-(a) - Distorção Harmônica Total de Tensão

A figura mostra que o DHTv(%) para este transformador esta na faixa de 2,8% a 3,6% que indica estar dentro dos limites estabelecidos em norma (IEEE-519), observa-se que num período de 03 (três) horas (entre 21h00 e 24h00) a distorção

harmônica percentual total de tensão permanece aproximadamente constante, caracterizando a condição de regime permanente dos harmônicos.

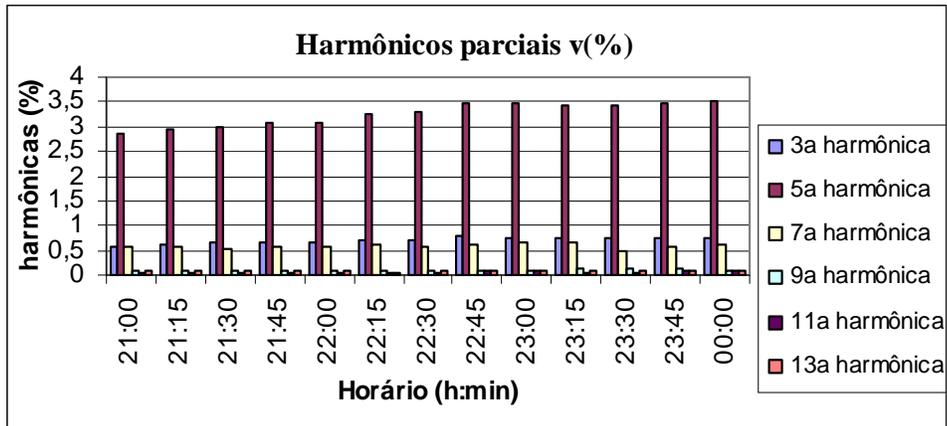


Figura 3.2-(b) – Harmônicos parciais de tensão

A figura 3.2-(b) mostra os harmônicos parciais de tensão para este transformador onde verifica-se a presença de harmônicos significativos de ordens 3^a, 5^a e 7^a e sendo o mais intenso o de 5^a ordem.

Na seqüência são mostradas as figuras 3.2-(c) e 3.2-(d), onde são apresentadas as distorções harmônicas percentuais totais de corrente, DHTi(%), e suas componentes harmônicas parciais de corrente para o referido transformador.

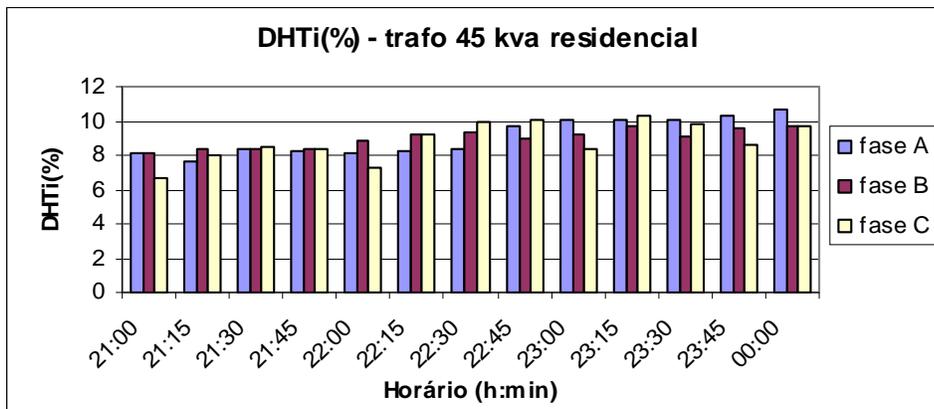


Figura 3.2-(c) – Distorção Harmônica Total de corrente

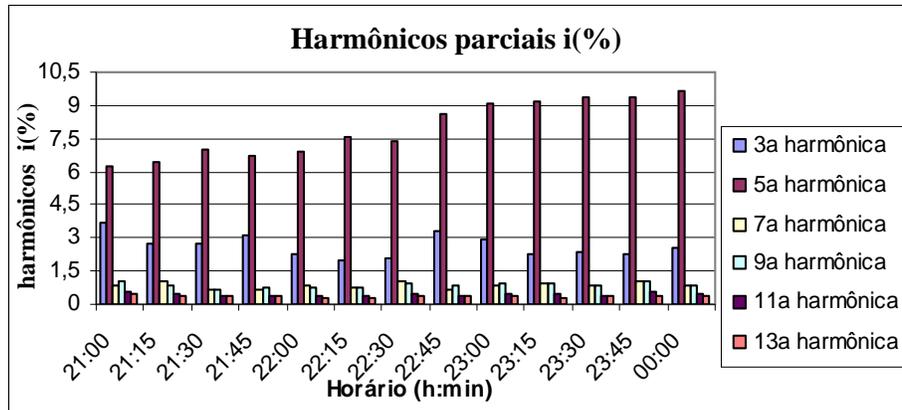


Figura 3.2-(d) – Harmônicos parciais i (%)

Através das figuras 3.2-(d) verifica-se que as DHTi(%) para este transformador, que possui $I_{cc} = 1200A$, ficam próximos de 10%, o que extrapola valores permitidos em norma (IEEE-519).

A avaliação do fator de potência do transformador é feito através da figura 3.2-(e).

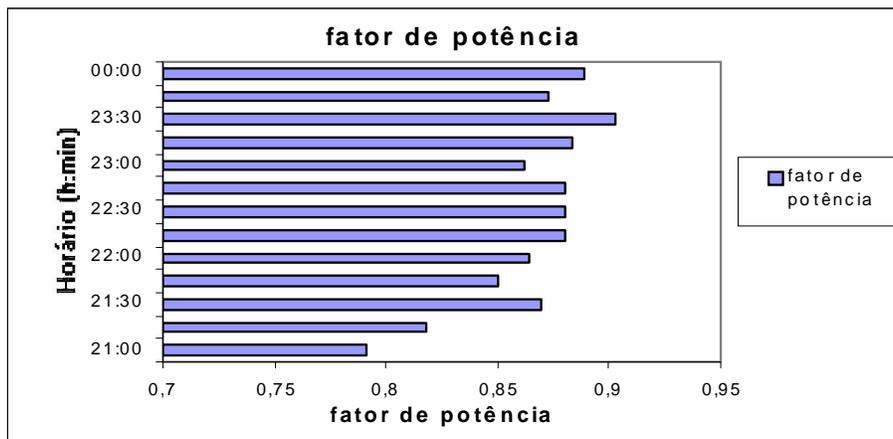


Figura 3.2-(e) – Fator de potência do transformador.

O fator de potência, como pode ser verificado através da figura 3.2(e) está abaixo do valor estipulado pela concessionária, o que se traduz em um alto valor de potência reativa.

Para este transformador de 45kVA com perfil residencial analisado, pode-se perceber a existência de distorções harmônicas, sendo as 3ª, 5ª e 7ª as mais significativas, com maior relevância a distorção de 5ª harmônica.

As distorções harmônicas de correntes observadas no transformador analisado são mais significativas, chegando a violar as normas.

3.4.1.2 transformador com potência nominal de 75kva

As Figuras 3.3-(a) e 3.3-(b) apresentam as distorções harmônicas percentuais totais de tensão e as distorções harmônicas parciais de tensão, respectivamente, para este transformador.

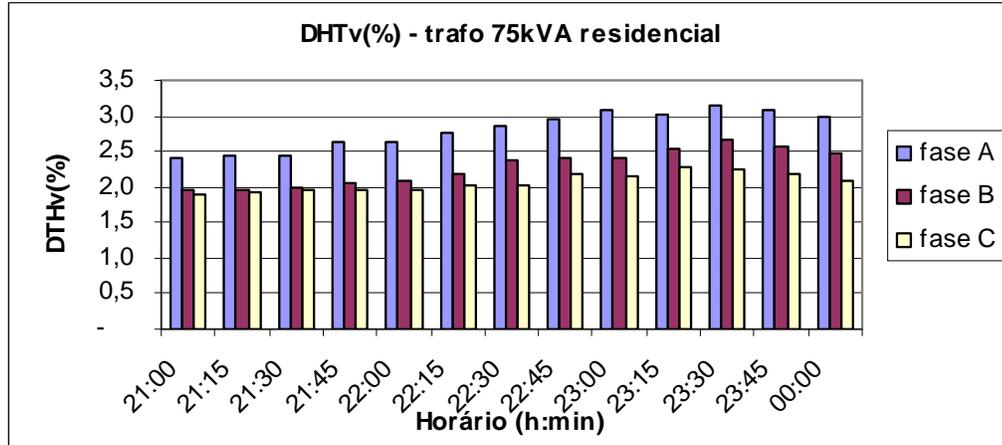


Figura 3.3-(a) – Distorção harmônica total de tensão.

A figura 33-(a) mostra a DHTv(%) para o transformador de 75kVA com perfil residencial. A figura 3.3-(b) onde são observadas suas harmônicas parciais de tensão, revela que para distorção de tensão existe uma significância para o 5ª harmônica, sendo percebidos também harmônicos de 3ª, 7ª, 9ª e 11ª ordens. Percebe-se também um desbalanceamento entre as fases a, b e c do sistema, o que pode ser notado através dos índices de DHTv(%) e DHTi(%) nas figuras 3.3-(a) e 3.3-(c).

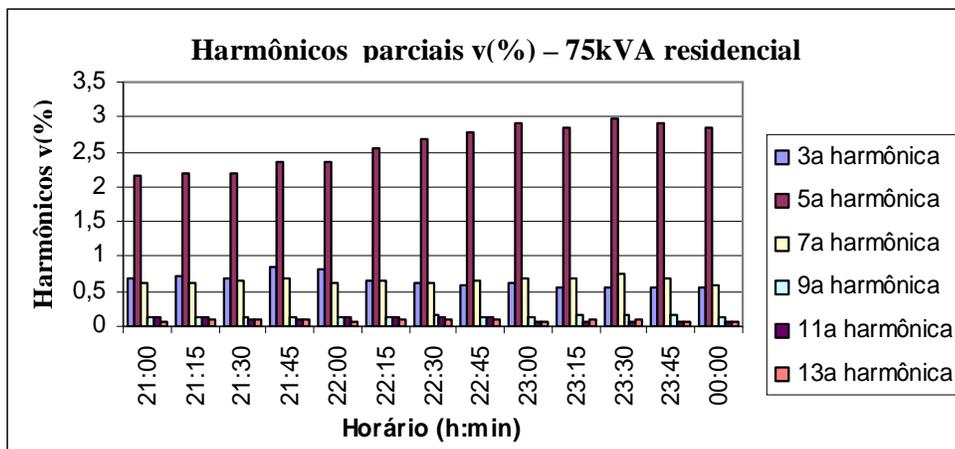


Figura 3.3-(b) - Harmônicos parciais de tensão.

A distorção harmônica total percentual de corrente para este transformador é mostrada na figura 3.3-(c), e as distorções harmônicas parciais de corrente na figura 3.3-(d), como segue:

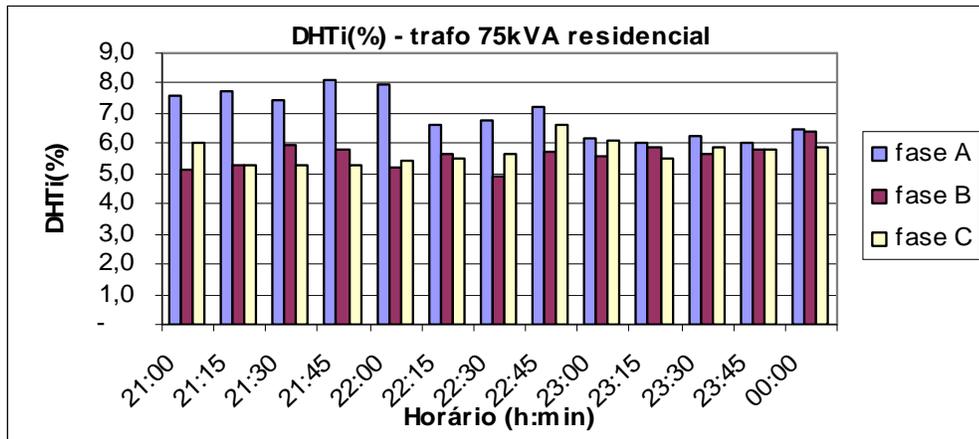


Figura 3.3-(c) – Distorção Harmônica total de corrente

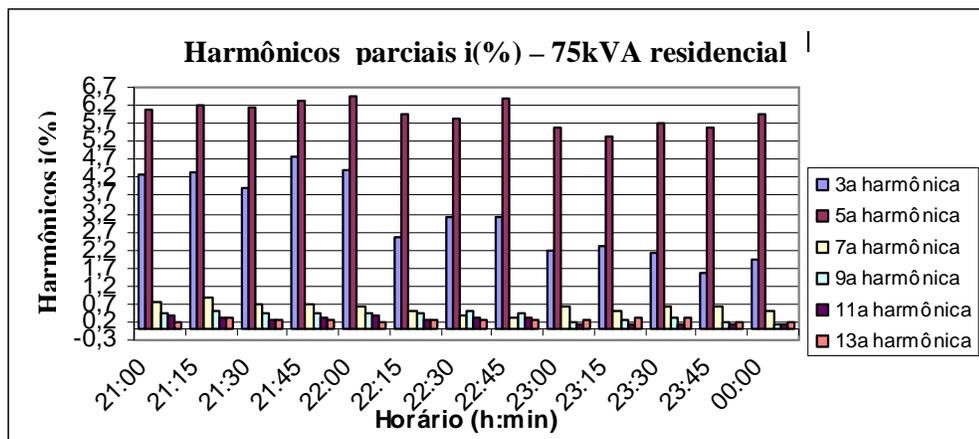


Figura 3.3-(d) – Harmônicos parciais de corrente,

As análises realizadas para esse transformador revelam a existência de harmônicos parciais de tensão e corrente nas ordens 3^a, 5^a, e 7^a, contendo também os de 9^a, 11^a, e 13^a ordens, porém com maior significância para harmônicas de 5^a ordem, chegando a pouco mais de 3% para tensão e 8% para corrente, extrapolando limites máximos tanto para tensão como corrente (IEEE-519).

O fator de potência do transformador pode ser avaliado através da figura 3.3-(e).

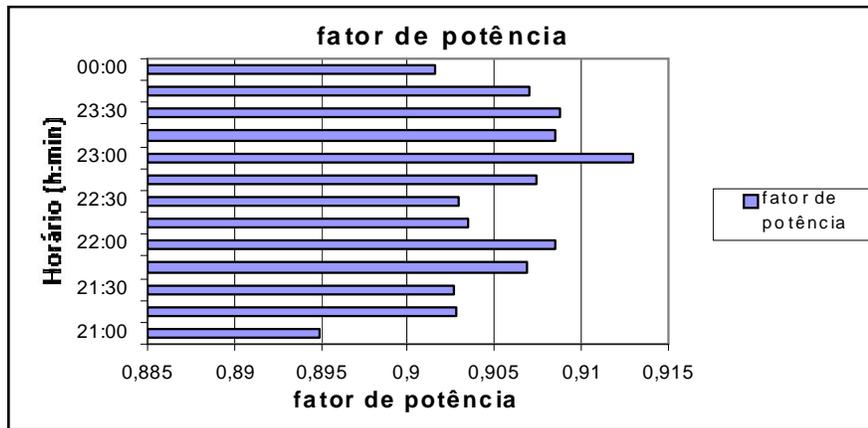


Figura 3.3-(e) – fator de potência

O valor do fator de potência para este transformador como pode ser observado, não possui valor adequado segundo norma (NTD 01) da concessionária.

3.4.1.3 Transformador com potência nominal de 112,5kva

A figura 3.4-(a) mostra a distorção harmônica total percentual de tensão para o transformador de 112,5kVA que se apresenta na faixa de 2,5(%) a 3,5(%), e a figura 3.4-(b) mostra as distorções harmônicas parciais, onde se percebe a presença de harmônicos de ordens 3^a, 5^a, 7^a e 9^a com relevância para o 5^o harmônico, que extrapola a faixa dos 3% estabelecido como limite máximo.(IEEE-519).

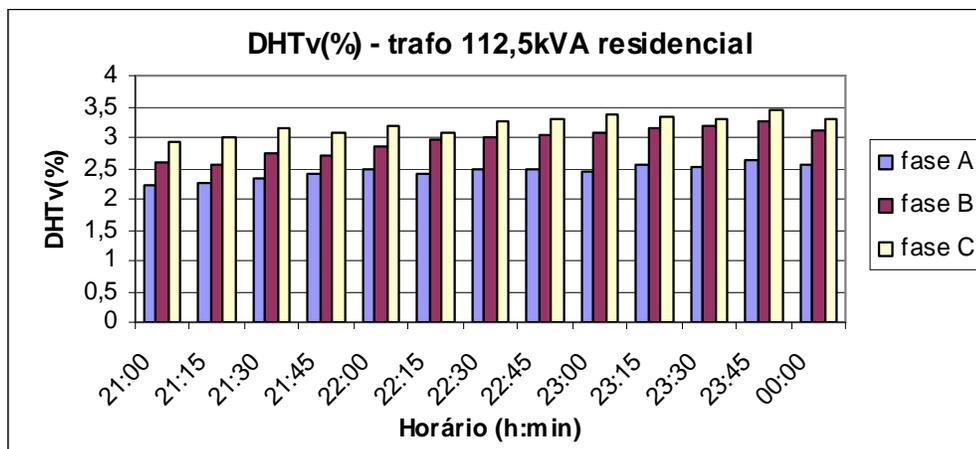


Figura 3.4-(a) – Distorção harmônica de tensão.

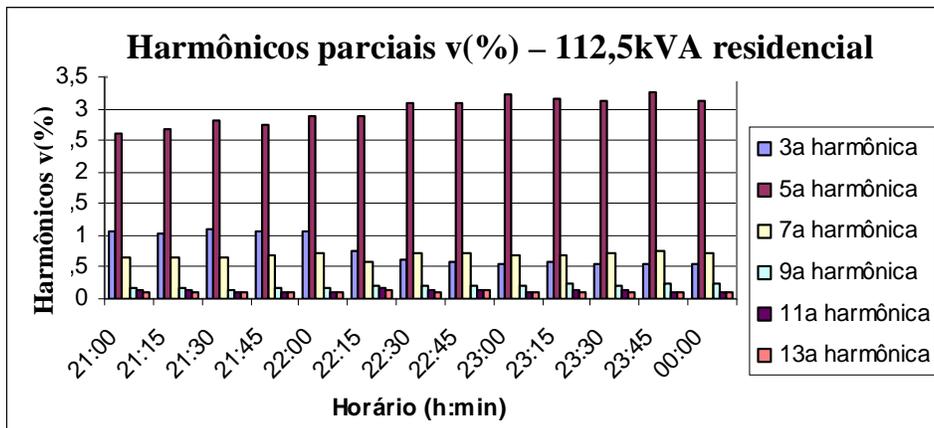


Figura 3.4-(b) - Harmônicos parciais de tensão

Na seqüência as figuras 3.4-(c) e 3.4-(d) mostram as DHTi(%) e suas harmônicas percentuais parciais respectivamente.

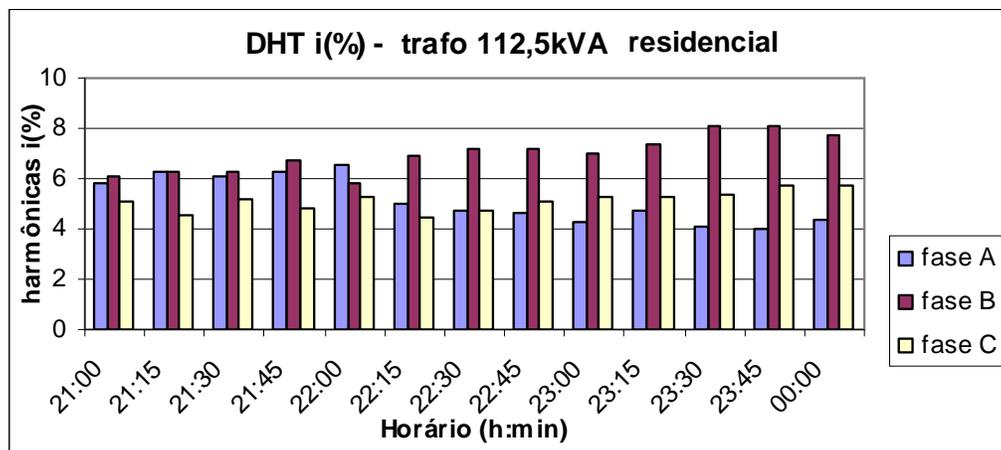


Figura 3.4-(c) - Distorção Harmônica total de corrente

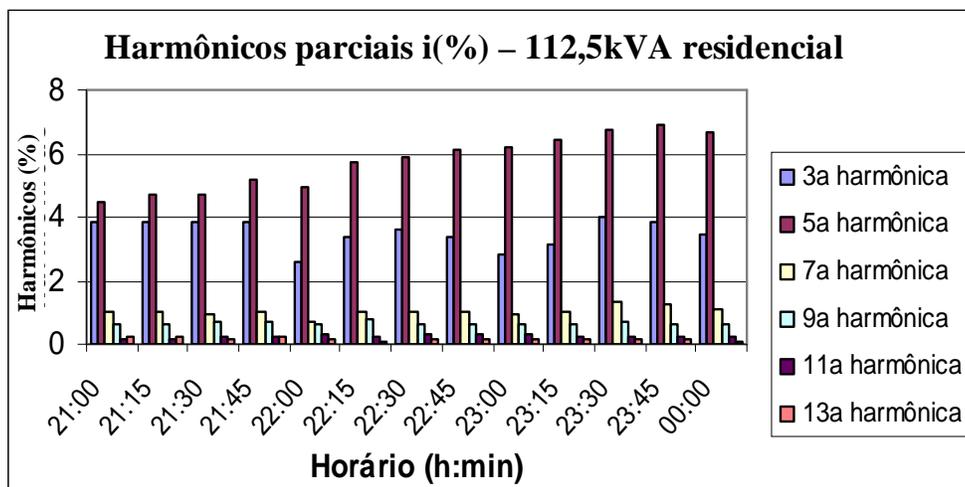


Figura 3.4-(d) - Harmônico parciais de corrente.

Através das figuras percebe-se a presença de harmônicos de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordens, sendo o harmônico de 5^a ordem o mais significativa. Para este transformador verifica-se a distorção harmônica total de corrente próxima a 8%, extrapolando a norma.

Através da figura 3.4-(c) é percebido o desbalanceamento existente entre as fases a, b e c do sistema.

O fator de potência que pode ser avaliado através da figura 3.4-(e), encontra-se abaixo do estipulado pela concessionária, que é 0,92.

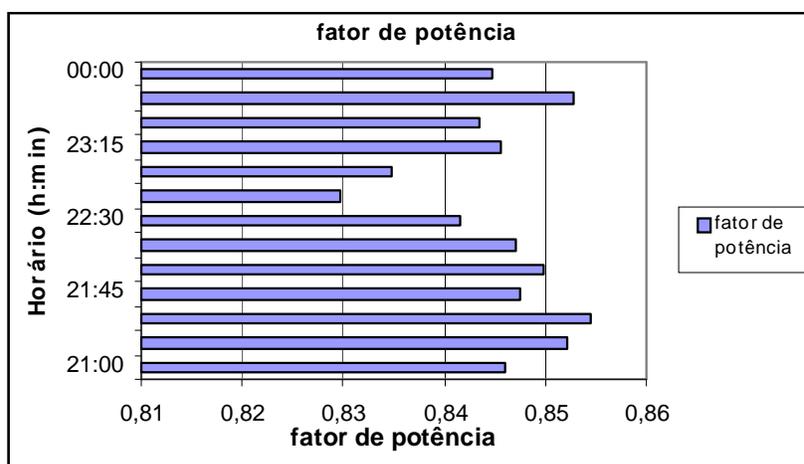


Figura 3.4(e) – Fator de potência.

3.4.1.4 Transformador com potência nominal de 150kva.

O transformador de 150kVA com perfil residencial é avaliado a seguir, através da figura 3.5-(a), onde percebem-se os níveis de distorção harmônica total percentual de tensão para este transformador próximos de 3,5%, sendo notado também uma diferença próximo de 1% de DHTv entre as fases, devido ao desequilíbrio de fases no sistema.

Os harmônicos parciais de tensão são mostrados na figura 3.5-(b), onde é notada a incidência de harmônicos de 3^a, 5^a e 7^a ordens, com maior relevância também para os harmônicos de 5^a ordem.

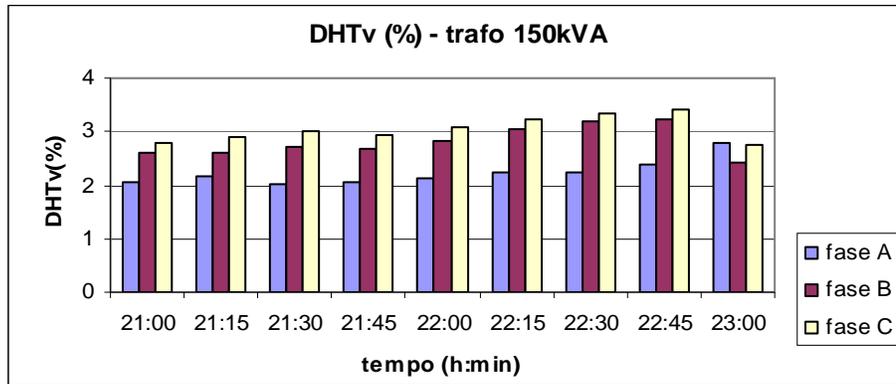


Figura 3.5-(a) – Distorção harmônica total de tensão.

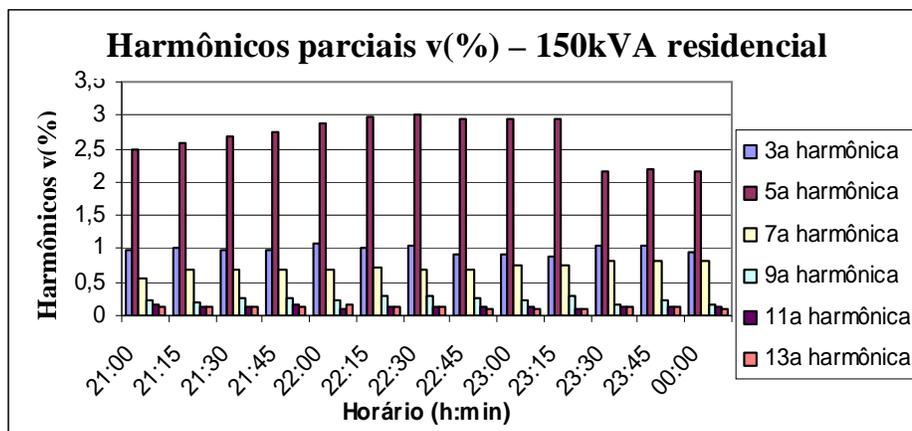


Figura 3.5-(b) - Harmônicos parciais de tensão.

As DHTi(%) e as distorções parciais são também analisadas para este transformador, como se pode ver através das figuras 3.5-(c) e 3.5-(d).

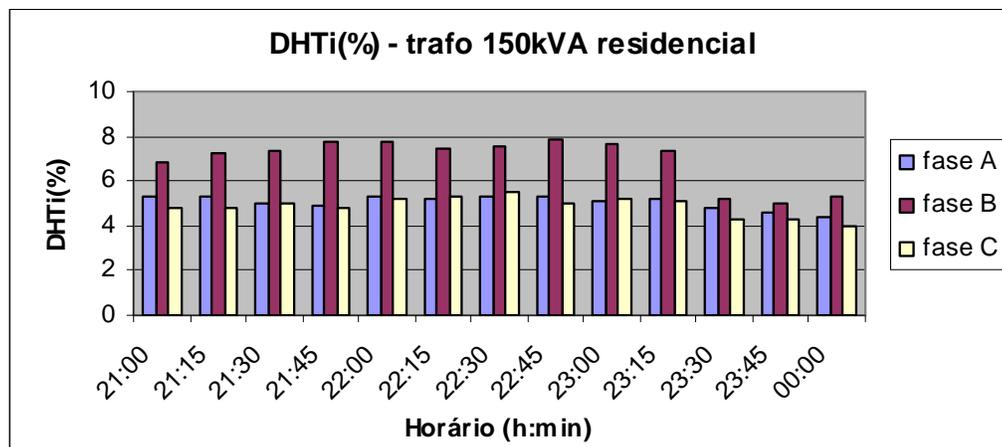


Figura 3.5-(c) – Distorção Harmônica total de corrente.

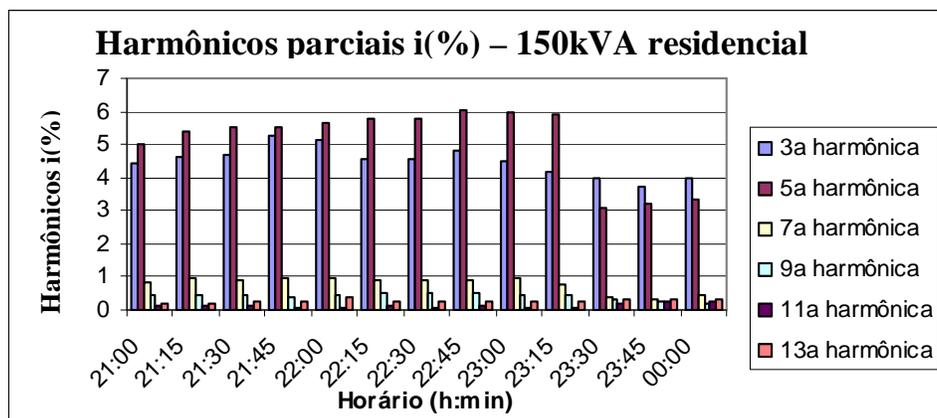


Figura 3.5-(d) - Harmônicos parciais de corrente

Para este transformador as distorções de corrente são mais acentuadas para os harmônicos de 3ª e 5ª ordens, com predominância de harmônicos de 5ª ordem, onde tem-se valores de 3,4% e 8% para distorção total de tensão e corrente respectivamente.

A análise do fator de potência é feita através da figura 3.5-(e), que mostra um valor abaixo do estabelecido em norma.

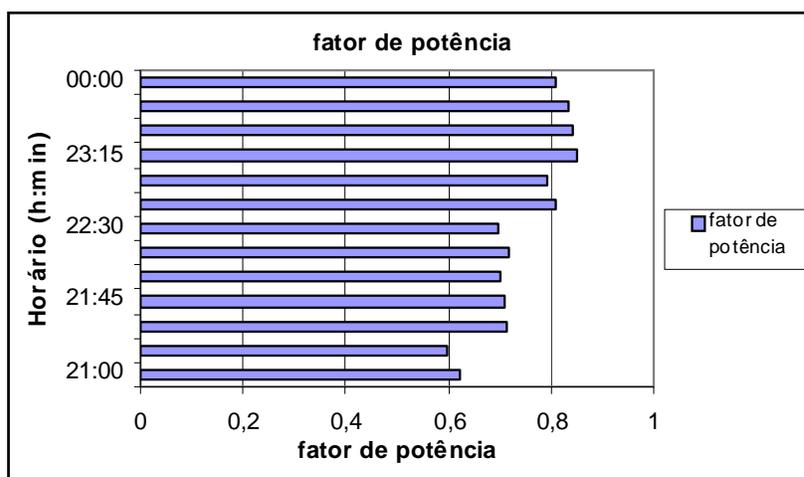


Figura 3.5(e) – fator de potência

3.4.1.5 Análise do carregamento dos transformadores residenciais

Neste item será realizada a análise conjunta do carregamento dos transformadores avaliados. A análise torna-se relevante para constatação da

influência da relação entre o carregamento dos transformadores e seus respectivos índices de distorções harmônicas. A figura 3.5-(f) faz referência ao carregamento dos transformadores residenciais para os instantes mais críticos no que diz respeito às distorções harmônicas de tensão e corrente para a classe residencial.

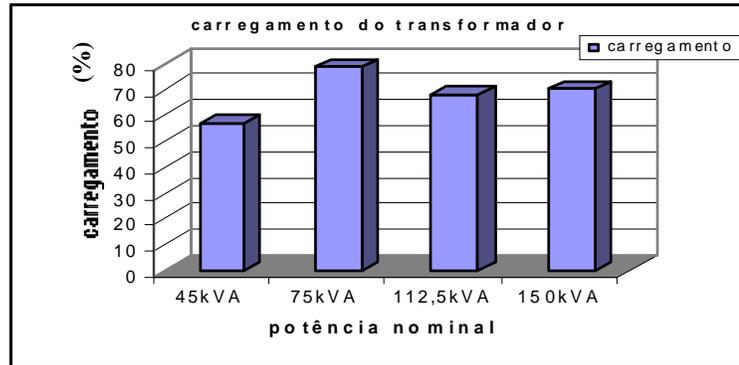


Figura 3.5(f) – Carregamento dos transformadores residenciais.

A figura mostra que no momento das medições o transformador de 45 kVA estava com 55% de sua carga nominal, já o transformador de 75 kVA apresentava 75%, e 65% e 68% para os transformadores de 112,5 kVA e 150 kVA respectivamente.

3.4.1.6 Avaliação conjunta do grupo residencial

Após realização de registros no que diz respeito à distorção harmônica de tensão e corrente em transformadores com perfil residencial em determinadas potências nominais de atendimento, é possível avaliar:

Transformadores desse grupo de consumo possuem distorções harmônicas de tensão e corrente nas ordens de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a e 13^a, nem todas com mesma intensidade, observadas sempre de maior relevância as de 3^a, 5^a, e 7^a ordens.

Os harmônicos de 5^a ordem, seguidos pelos de 3^a ordem, é o mais significativo nos trafos analisados, tanto para distorções harmônicas de corrente como distorções de tensão.

Os índices de distorção harmônica total de tensão registrados tiveram uma média de 3,5% para os transformadores de 45kVA, 3,0% para os transformadores de 75kVA, 3,4% para os transformadores de 112,5kVA e de 3,2% para os de

150kVA, e são mostrados na Figura 3.5-(g). Todos os valores ficaram dentro dos limites aceitáveis por norma, abaixo de 5% conforme estabelece a IEEE-519.

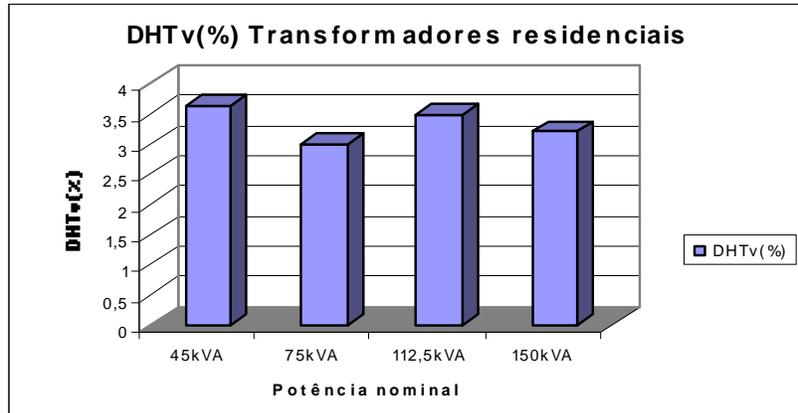


Figura 3.5-(g) – Distorção harmônica total de tensão em transformadores residenciais.

Conforme IEEE-519 para avaliação de distorção harmônica de corrente, observa-se que para este grupo de consumo foram constatadas violações.

Observou-se também que dependendo do carregamento dos transformadores foram encontrados diferentes níveis de distorções totais de corrente, como pode ser verificado nas figuras 3.5(f) e 3.5(h).

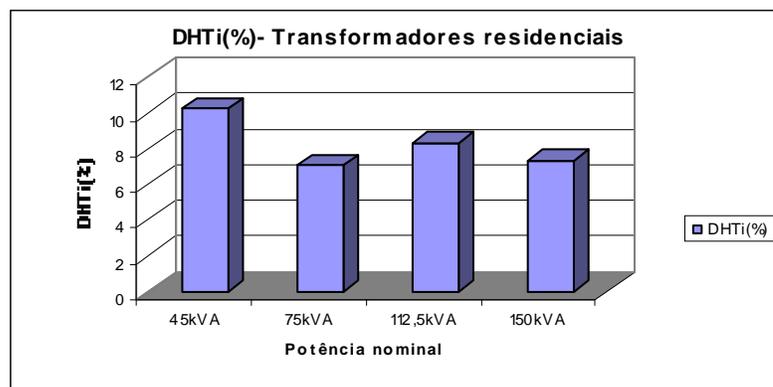


Figura 3.5(h) – Distorção harmônica total de corrente em transformadores residenciais.

O transformador de 45kVA que estava no momento das medições com 55% de sua carga nominal apresentou um índice de distorção total de corrente (DHTi%) de 10,2%, já o de 75kVA que estava no momento das medições com 75% de sua

carga nominal apresentou um índice de DHTi% em torno de 7,0%, o transformador de 112,5kVA que estava no momento das medições com 65% de sua carga nominal apresentou um índice de distorção total de corrente de 8,2% e o transformador de 150kVA que estava no momento das medições com 68% de sua carga nominal apresentou um índice de distorção total de tensão de 7,3% o que mostra que o carregamento dos transformadores interferem nos níveis de distorção harmônica de corrente encontrados.

O Transformador mais carregado apresentou um índice de distorção total menor e o menos carregado um índice de distorção harmônica total de corrente maior. Isso é explicado quando se analisa a diversidade de carga em cada transformador e os cancelamentos harmônicos em um grau maior que pode ocorrer nos transformadores mais carregados.

O fator de potência do grupo de transformadores que atendem a esta classe foi verificado, apresentaram-se abaixo dos limites permitidos em norma conforme é mostrado na figura 3.5-(i). Para os transformadores de 45kVA tiveram uma média de 0,88, os transformadores de 75kVA de 0,92, os de 112,5kVA fatores de potência em torno de 0,83 e os de 150kVA em torno de 0,81.

O fator de potência de um modo geral esta abaixo do que é estipulado pela concessionária, demonstrando uma alta demanda de potência reativa, gerando prejuízos a concessionária.

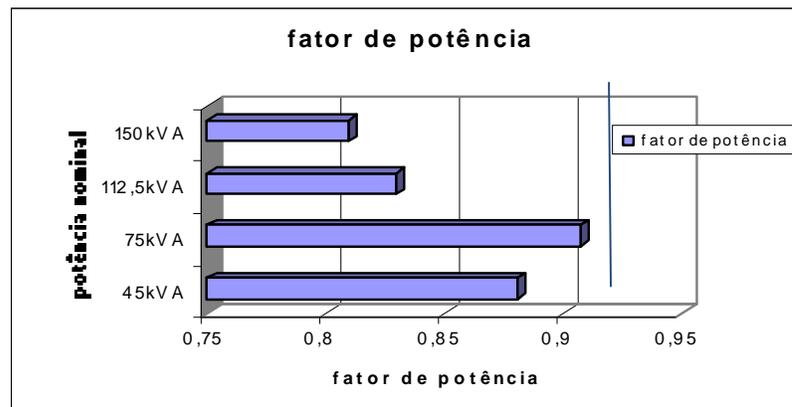


Figura 3.5-(i) - Fator de potência para o grupo residencial.

3.4.2 Avaliação dos resultados das medições realizadas nos transformadores do grupo de classe de cargas mistas

Para esta classe foram analisados transformadores na faixa de 75kVA a 150kVA.

3.4.2.1 Transformador de potência nominal 75kVA

As análises dos registros verificados para esta classe de consumo são mostradas nas figuras 3.6-(a) e 3.6-(b):

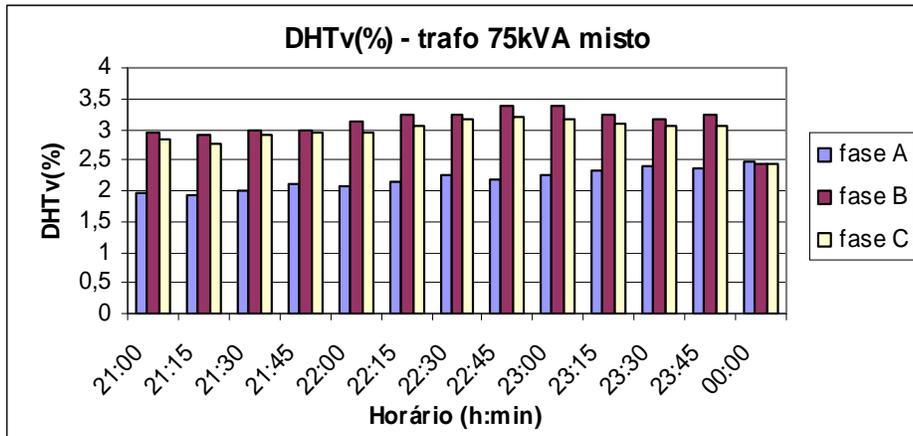


Figura 3.6-(a) – Distorção Harmônica total de tensão

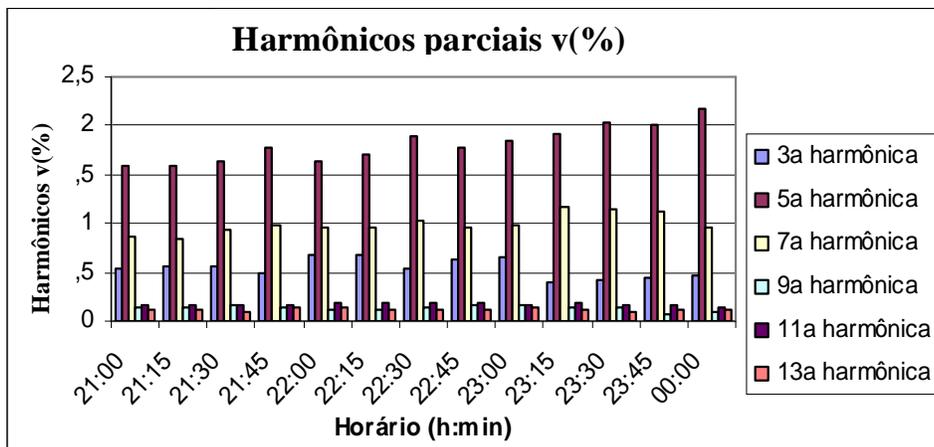


Figura 3.6-(b) – Harmônicos parciais de tensão.

As figuras 3.5-(a) e 3.5-(b) mostram as distorções harmônicas totais percentuais de tensão e as distorções harmônicas parciais respectivamente. Percebe-se a presença de harmônicos de 3^a, 5^a, 7^a, e 9^a ordens, com relevância para os de ordens 5^a e 7^a, com valores próximos ao limite máximo de 3%.

A DHTi(%), bem como os harmônicos parciais são mostrados na figura 3.6-(c) e figura 3.6-(d), onde também é relevante os harmônicos de ordens 3^a, 5^a, 7^a e 9^a, com valores de distorções que chegam próximo de 16%, acima do limite permitido.

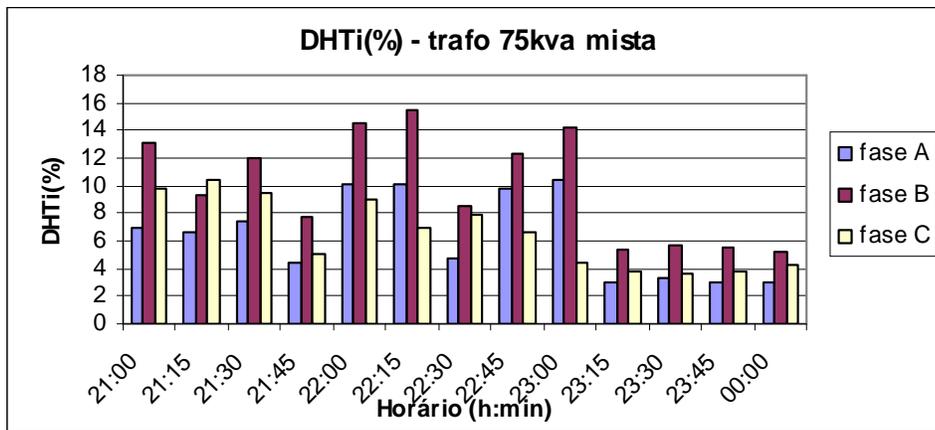


Figura 3.6-(c) – Distorção harmônica total de corrente

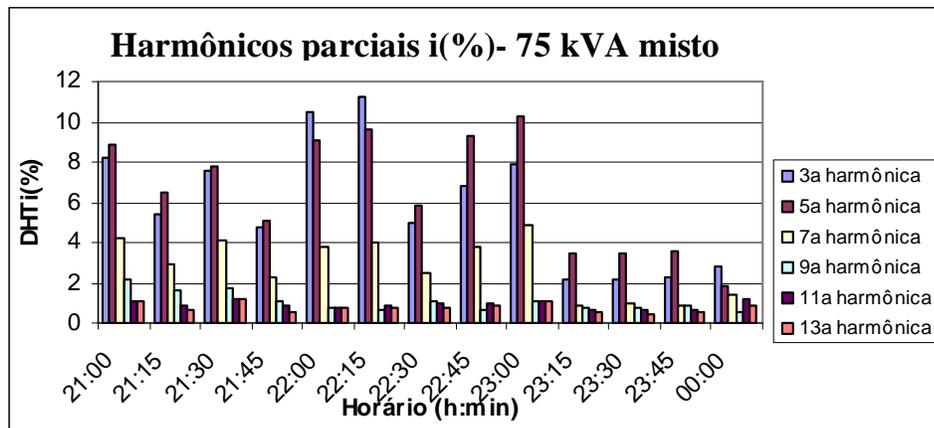


Figura 3.6-(d) – Harmônicos parciais de corrente

O fator de potência para este transformador esta em média dentro da faixa considerada adequada, 0,92, e pode ser constatado pela figura 3.6-(e)

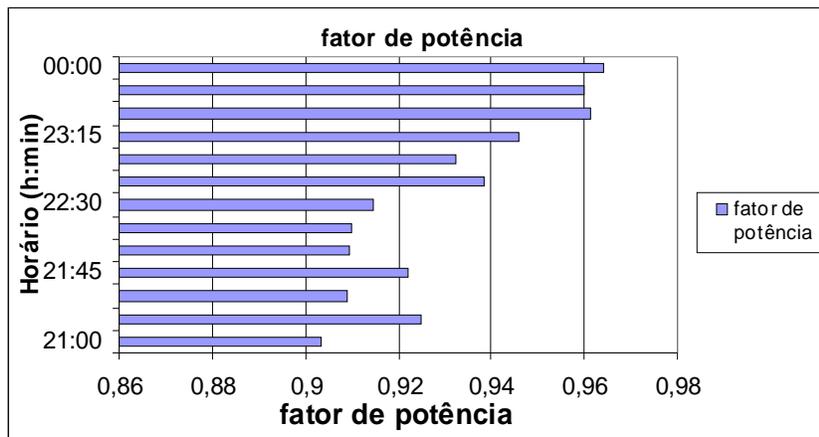


Figura 3.6(e) – Fator de potência

3.4.2.2 Transformador com potência nominal de 112,5kVA

A partir dos gráficos 3.7-(a) e 3.7-(b) podem ser verificadas os níveis de DHTv(%) e as distorções harmônicas parciais respectivamente para este transformador.

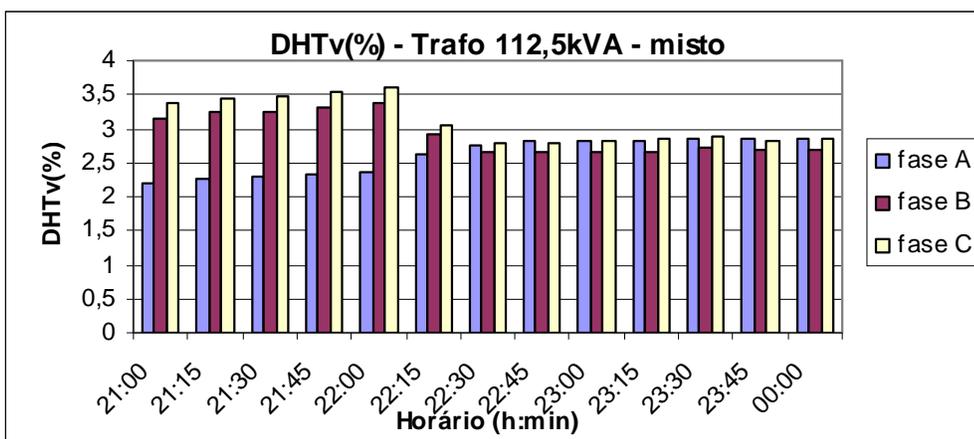


Figura 3.7-(a) - Distorção harmônica total de tensão

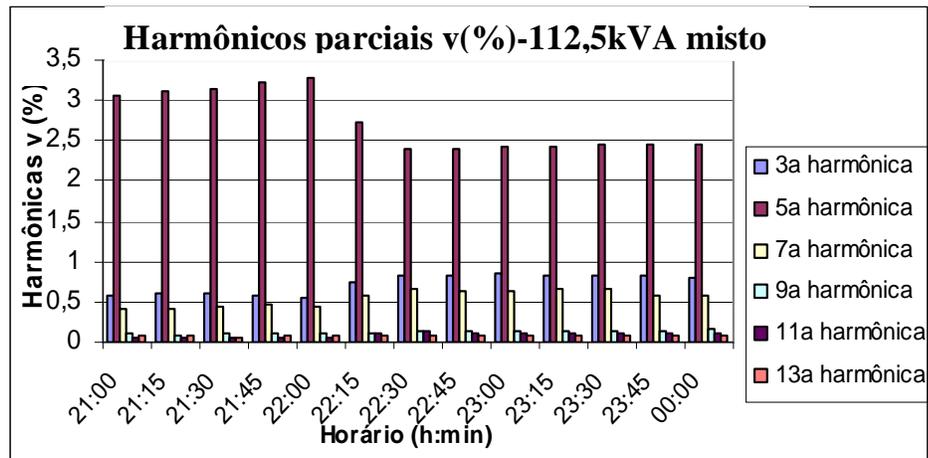


Figura 3.7-(b) – Harmônicos parciais de tensão

Verificando através das figura 3.7-(a) e 3.7-(b) percebe-se ainda a presença de harmônicos de ordens 3^a, 5^a e 7^a com maior significância, e em alguns instantes o harmônico de 5^a ordem extrapolando os 3% estipulados em norma.

Para este transformador foram analisadas também as distorções de corrente através dos gráficos 3.7-(c) e 3.7-(d) onde são mostrados os seus índices.

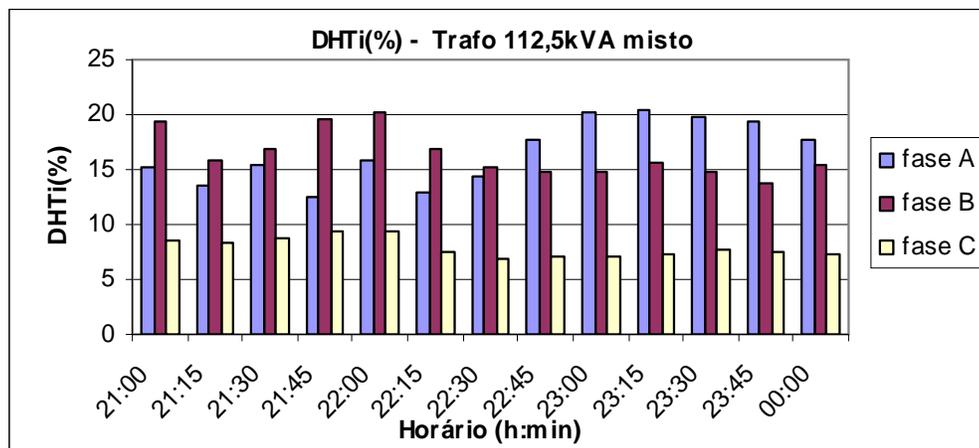


Figura 3.7-(c) – Distorção Harmônica total de corrente

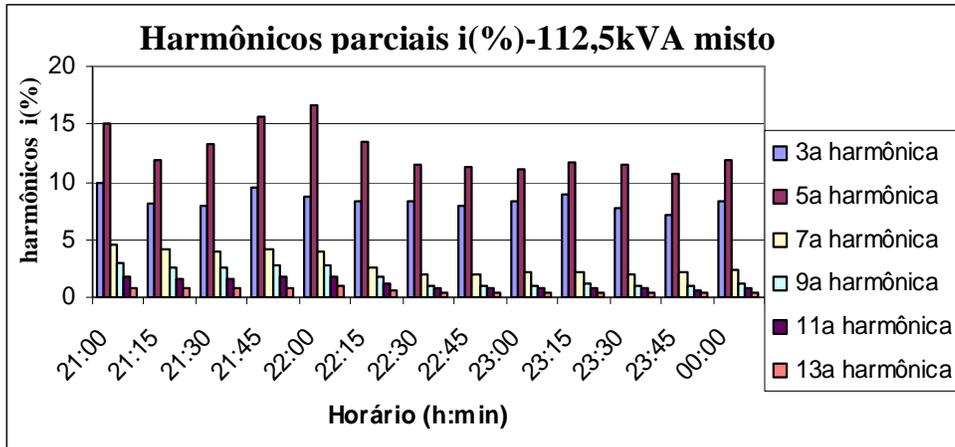


Figura 3.7-(d) – Harmônicos parciais de corrente

Através dos gráficos das figuras 3.7-(c) e (d) percebe-se a forte presença de harmônicos de 3^a, 5^a, 7^a, e 9^a ordens, ainda com maior relevância para os componentes harmônicos de 3^a, 5^a e 7^a ordens, chegando o 5^a harmônico a pouco mais de 15%, índice superior ao estipulado em norma.

O fator de potência para este transformado foi avaliado através da figura 3.7-(e).

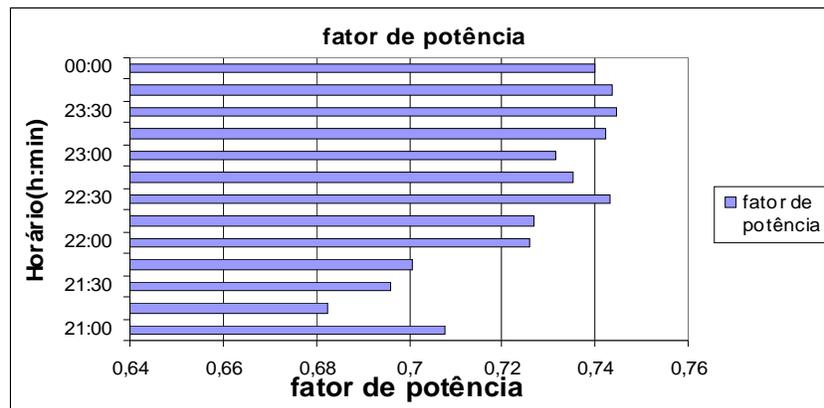


Figura 3.7-(e) – Fator de potência

A fig.3.7-(e) mostra que o valor encontrado para o fator de potência está extremamente baixo do valor considerado adequado, o que acarreta em altos índices de consumo de potência reativa.

3.4.2.3 Transformador com potência nominal de 150kVA

Neste grupo de consumo também foi analisado um transformador de 150kVA, onde os resultados serão mostrados a seguir através das figuras 3.8-(a) e 3.8-(b) que mostram as DHTv(%) e as distorções harmônicas parciais de tensão, respectivamente.

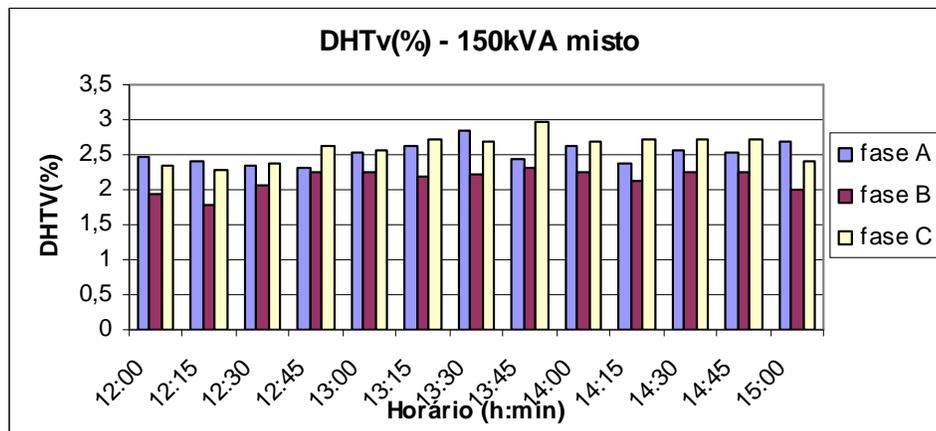


Figura 3.8-(a) – Distorção Harmônica total de tensão

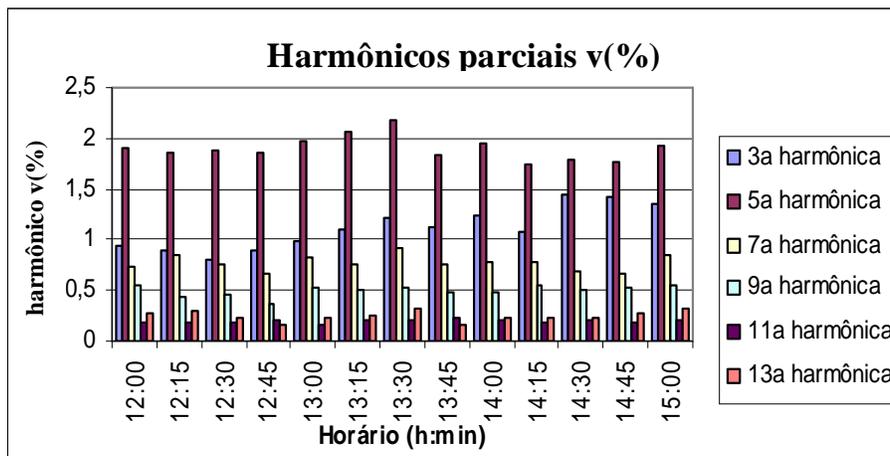


Figura 3.8-(b) - Harmônicos parciais de tensão

Analisando-se as figuras acima percebe-se a presença de harmônicos de 3ª, 5ª, 7ª e 9ª ordens e até mesmo de 11ª e 13ª, porém em intensidades menores. Verifica-se também a relevância do 5º harmônico seguidamente de harmônicos de 3ª ordem, onde tem-se aproximadamente 3% e 2,2% para os valores máximos de distorção individual respectivamente.

As figuras 3.8-(c) e 3.8-(d) apresentam as DHTi(%) e as distorções harmônicas parciais, respectivamente, para o transformador em questão.

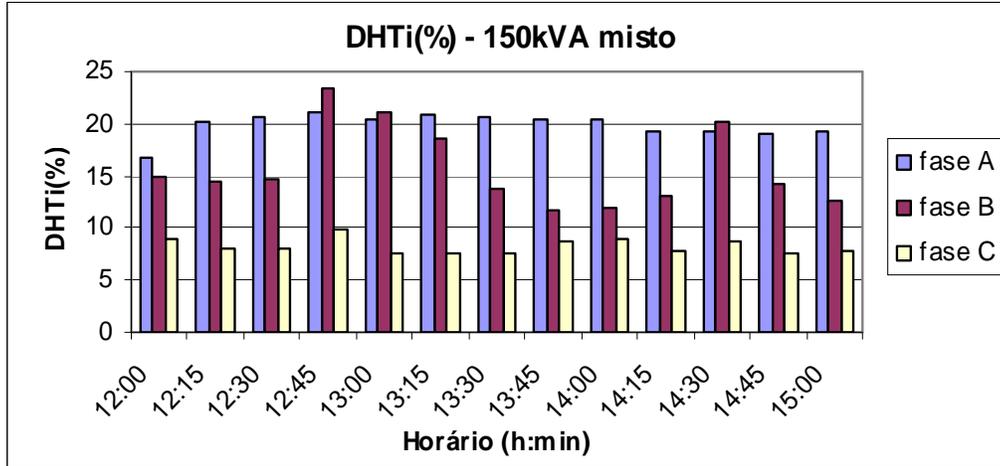


Figura 3.8-(c) – Distorção Harmônica total de corrente

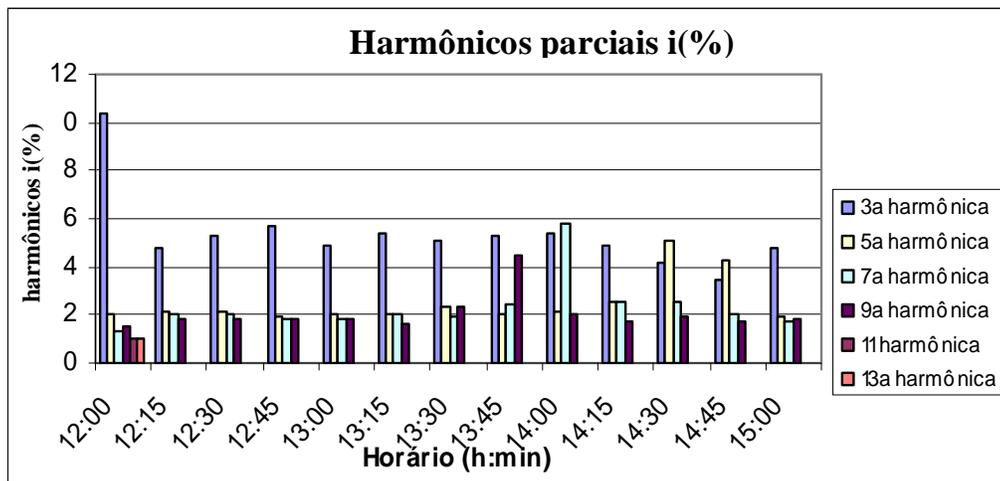
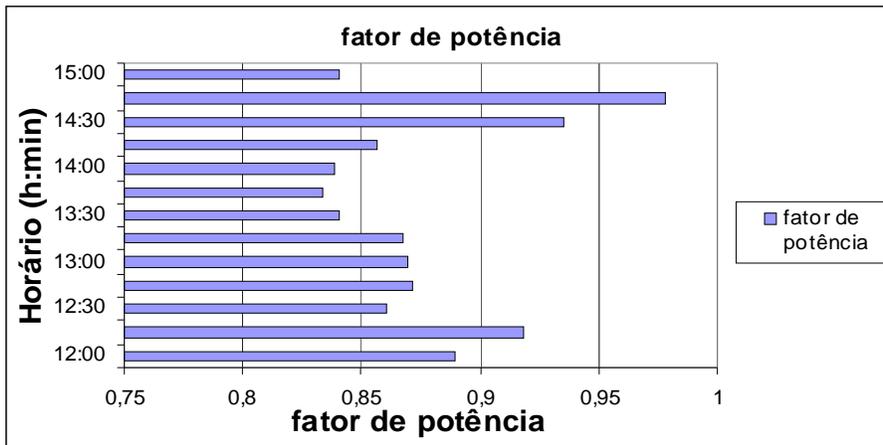


Figura 3.8-(d) – Harmônicos parciais de corrente

Para este transformador existe a presença de harmônicos de ordens 3^a, 5^a, 7^a e 9^a com maior relevância para o 3^a harmônio. Os índices medidos para as distorções totais de corrente extrapolam os 20%.

Também foi analisado o fator de potência, que pode ser verificado pelo gráfico 3.8-(e).



3.8-(e) – fator de potência

A figura 3.8-(e) mostra os valores registrados para o fator de potência para este transformador, revelando que ficam abaixo do valor estipulado pela concessionária em alguns períodos.

3.4.2.4 Análise do carregamento dos transformadores de carga mista

A figura 3.8-(f) mostra os valores registrados para o carregamento dos transformadores avaliados do grupo de carga mista.

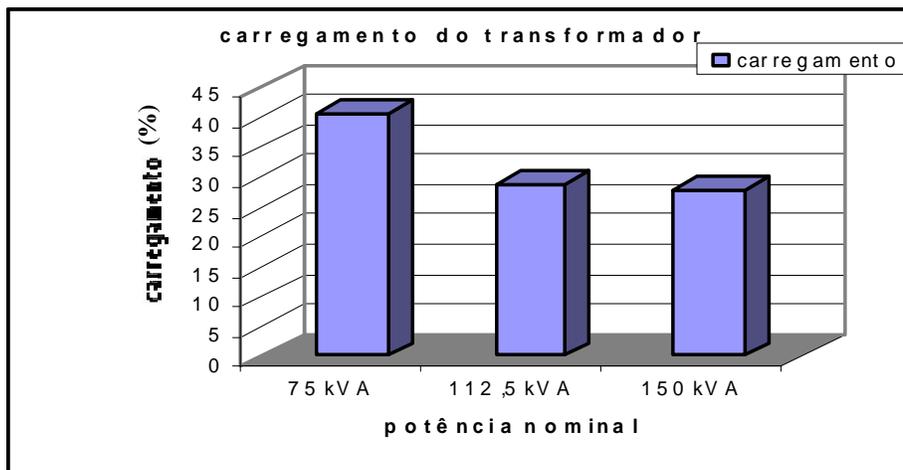


Figura 3.8(f) – Carregamento dos transformadores mistos

Os transformadores deste grupo atendem cargas residenciais, comerciais e pequenas indústrias. Esta classe de consumo foi analisada através de 2 transformadores de 75kVA, que no momento das medições apresentavam um carregamento médio de 40%, 2 transformadores de 112,5kVA com carregamento médio de apenas 27% de sua carga nominal e transformadores de 150kVA com 26% de carregamento, conforme figura 3.8(f).

3.4.2.5 Avaliação conjunta do grupo misto

Os índices de distorções harmônicas de tensão para o grupo misto encontram-se dentro de limites estabelecidos em norma durante todo o período analisado, o que não acontece com índices de distorção de corrente.

A presença de harmônicos de 3^a, 5^a, 7^a, 9^a, 11^a e 13^a ordens são marcantes para o conjunto avaliado. Deve-se, porém, ressaltar que nem todos possuem valores significativos, os harmônicos de maior relevância são os de 3^a, 5^a e 7^a ordens.

Os valores de distorção total de tensão para a classe mista ficaram dentro dos limites estabelecidos em norma, em torno de 3,2% para os transformadores de 75kVA, 3,4% para os de 112,5kVA e de 2,6% para os de 150kVA, como se pode ver na figura 3.8-(g).

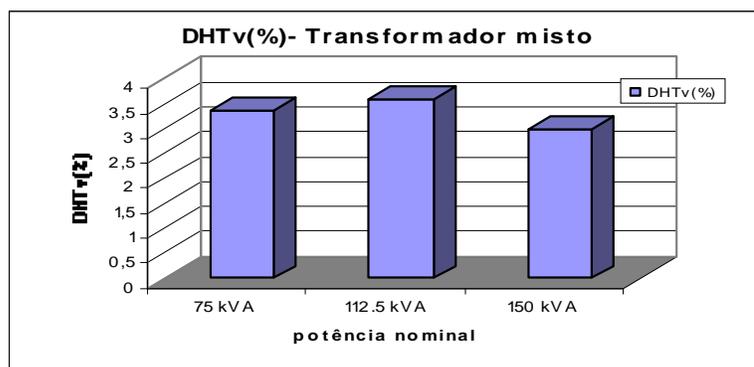


Figura 3.8-(g) – Distorção harmônica de tensão em transformadores com cargas mistas.

A distorção harmônica de corrente para este grupo aparece com valores mais significativos, medindo-se para esse grupo valores de harmônicos de corrente

sempre próximo a 20% para os valores totais de distorção, por outro lado os valores individuais de distorções harmônicas chegam a 10%.

Este grupo de transformadores no período noturno apresentava o menor carregamento de todo o conjunto de transformadores analisados, figura 3.8-(f). Com carregamentos menores apresentaram também os níveis mais altos de distorções totais de corrente, figura 3.8-(h), 16%, 21% e 22%, para os transformadores de 75kVA, 112,5kVA e 150kVA, respectivamente.

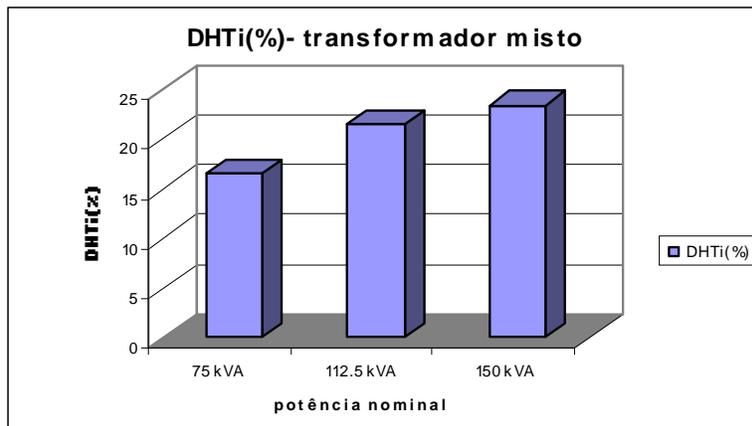


Figura 3.8-(h) – Distorção harmônica total de corrente para transformadores com cargas mista.

Os fatores de potência dos transformadores que atendem a esta classe de consumo são mostrados na figura 3.8-(i).

É possível perceber o baixo fator de potência para os transformadores que atendem a esta classe, coincidindo com o aumento percentual das distorções harmônicas de corrente.

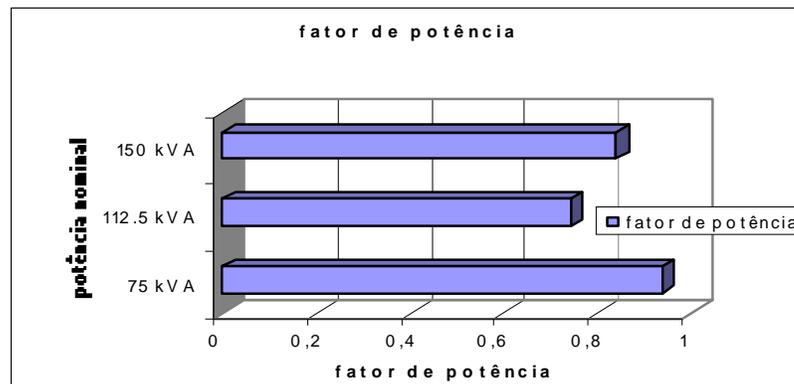


Figura 3.8-(i) – Fator de potência para transformadores com cargas mistas.

3.4.3 Avaliação dos resultados de medições realizadas no grupo de transformadores comerciais.

Os transformadores deste grupo comercial, atendem a uma quantidade maior de equipamentos eletroeletrônicos, lâmpadas de descarga, entre outros equipamentos com características não-lineares, e também por estar em maior quantidade ao longo do alimentador.

A avaliação neste grupo foi realizada através de medições nos secundários dos transformadores, sendo utilizados transformadores na faixa de 45kVA a 300 kVA de potência nominal.

3.4.3.1 Transformador de potência nominal 45 kVA

O transformador de 45 kVA deste grupo foi analisado e seus registros podem ser verificados a partir das figuras 3.9-(a) e 3.9-(b).

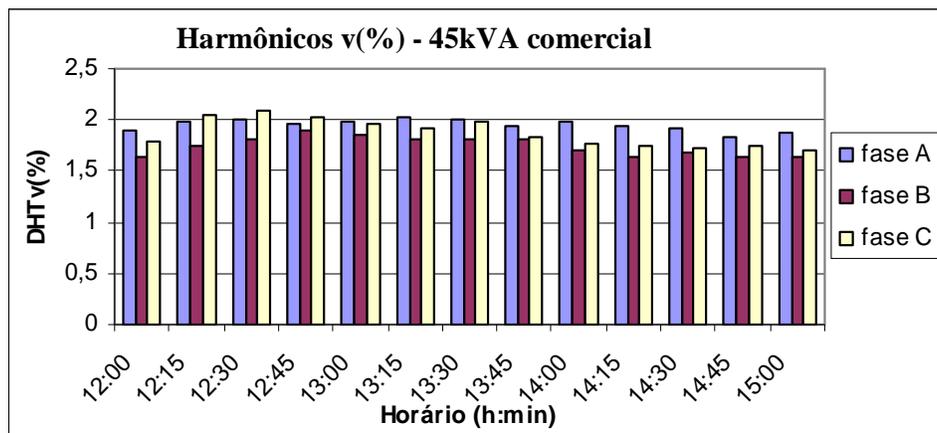


Figura 3.9-(a) - Distorção Harmônica total de tensão.

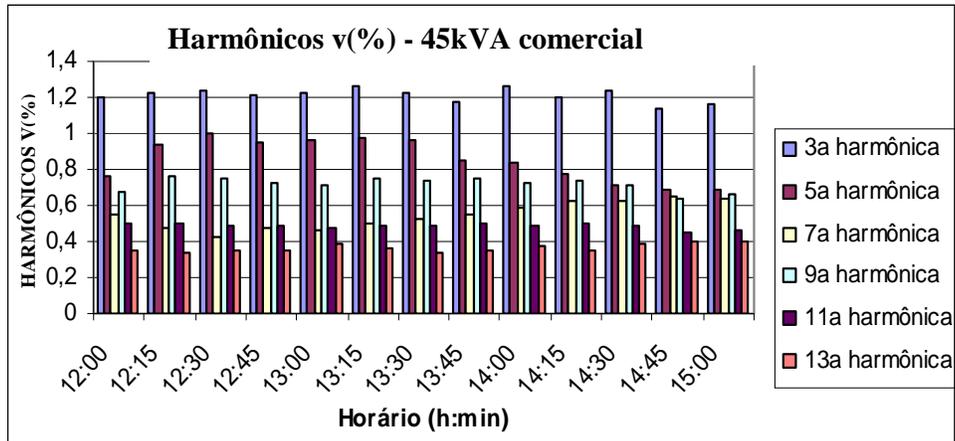


Figura 3.9-(b) – Harmônicos parciais de tensão

A distorção harmônica total de tensão e suas parciais podem ser vistas através das figuras 3.9-(a) e 3.9-(b). Percebe-se os valores de distorções totais próximos a 2% e a presença de harmônicos de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordens, com relevância para os harmônicos de 3^a ordem.

As distorções harmônicas de corrente foram verificadas e seus registros mais expressivos podem ser verificados nas figuras 3.9-(c) e 3.9-(d).

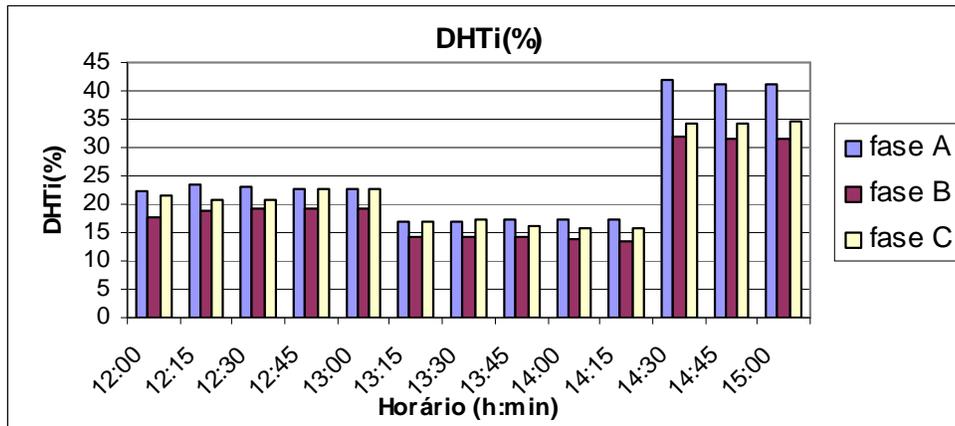


Figura 3.9-(c) - Distorção Harmônica Total de corrente

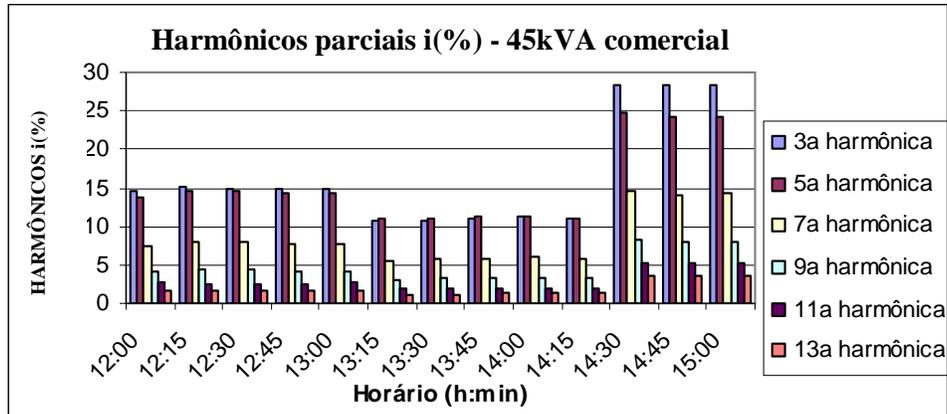


Figura 3.9-(d) – Harmônicos parciais de corrente.

As figuras 3.9-(c) e 3.9-(d) mostram as distorções harmônicas de corrente e as componentes harmônicas parciais, onde nota-se que os valores de distorção harmônica de corrente são expressivos e mais relevantes para os harmônicos de 3ª, 5ª, 7ª, e 9ª ordens.

O harmônico de 3ª ordem seguido do harmônico de 5ª ordem são mais expressivos, tendo seus valores próximos a 30% da componente harmônica fundamental, mostrando a violação da norma pertinente.

O fator de potência para este transformador foi verificado e mostrado através da figura 3.9-(e), percebendo-se valores abaixo do especificado pela concessionária.

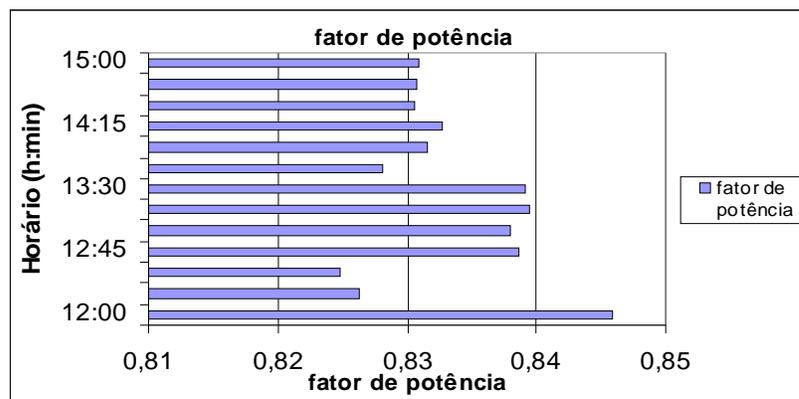


Figura 3.9(e) – Fator de potência

3.4.3.2 Transformador de potência nominal 75kVA

Os registros realizados nesse transformador do grupo podem ser verificados nas figuras 3.10-(a) e 3.10-(b), onde são mostradas as DHTv(%) e suas distorções harmônicas parciais percentuais.

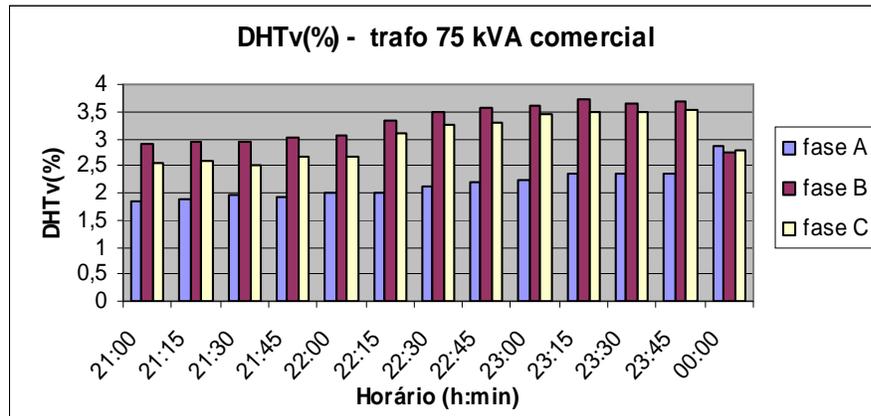


Figura 3.10-(a) – Distorção harmônica total de tensão

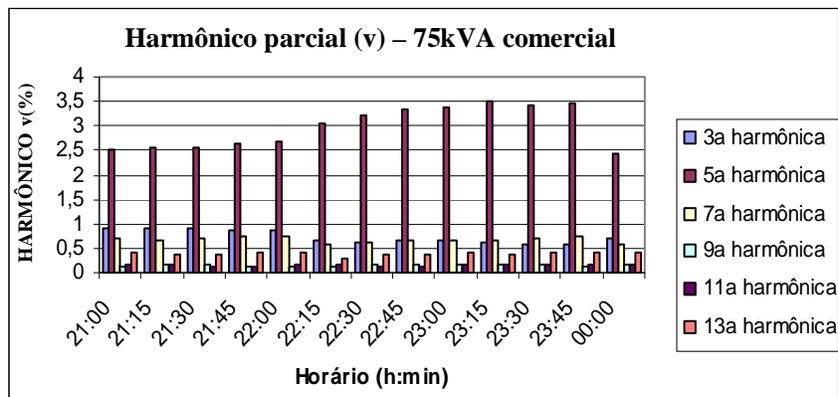


Figura 3.10-(b) – Harmônicos parciais de tensão

As figuras 3.10-(a) e 3.10-(b) mostram as distorções harmônicas total de tensão e as distorções parciais, onde são mostradas as presenças dos harmônicos de 3^a, 5^a e 7^a ordens como os mais expressivos, com maior relevância para o 5^a harmônico, e expressam os valores máximos de 3.7% e 3.5% para as distorções total e parcial de tensão.

As distorções harmônicas de corrente são mais expressivas para essa classe de atendimento como pode ser constatado nas figuras 3.10-(c) e 3.10-(d) a seguir:

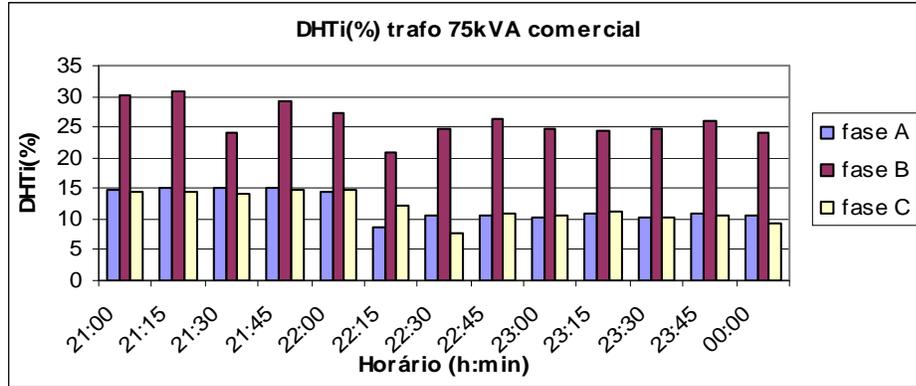


Figura 3.10-(c) – Distorção Harmônica de corrente

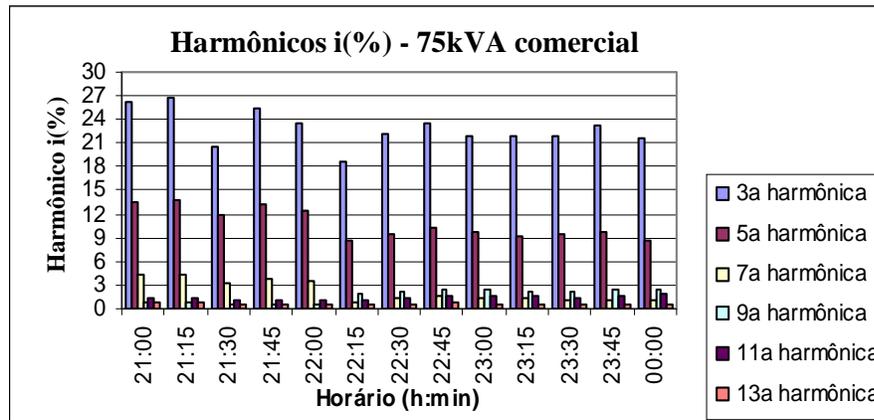


Figura 3.10-(d) – Harmônicos parciais de corrente

Como pode ser notada as distorções harmônicas estão presentes nas ordens 3^a, 5^a, e 7^a como as mais expressivas, e chegam a níveis de 30% quando observadas as distorções totais. No que diz respeito aos harmônicos parciais os níveis também são relevantes, chegando a 27%, extrapolando limites considerados em norma.

O fator de potência analisado para esse transformador está abaixo do valor considerado padrão, como mostra figura 3.10-(e).

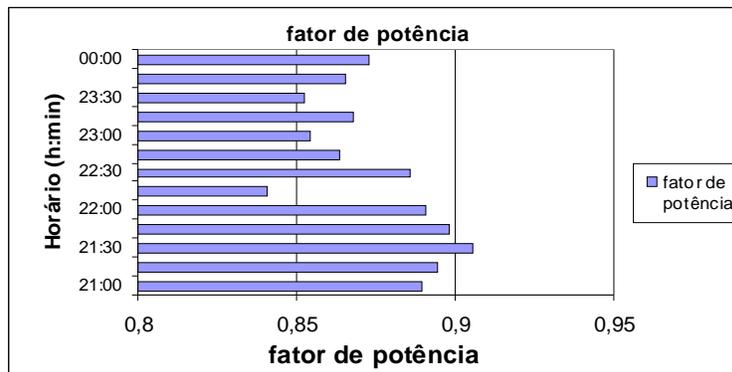


Figura 3.10(e) – Fator de potência.

3.4.3.3 Transformador com potência nominal de 112,5 kVA

Para efeito de análise do grupo com o perfil comercial também foi analisado um transformador com potência nominal de 112,5 kVA, que será mostrado a partir das figuras 3.11-(a) e 3.11-(b), que seguem:

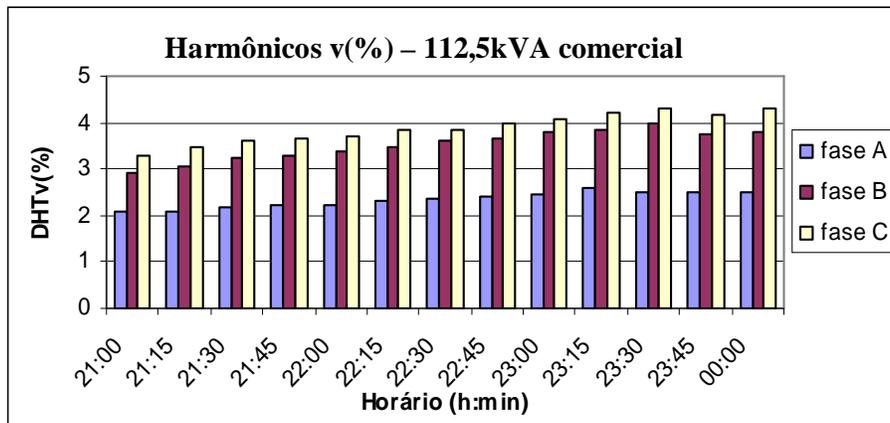


Figura 3.11-(a) – Distorção Harmônica Total de tensão

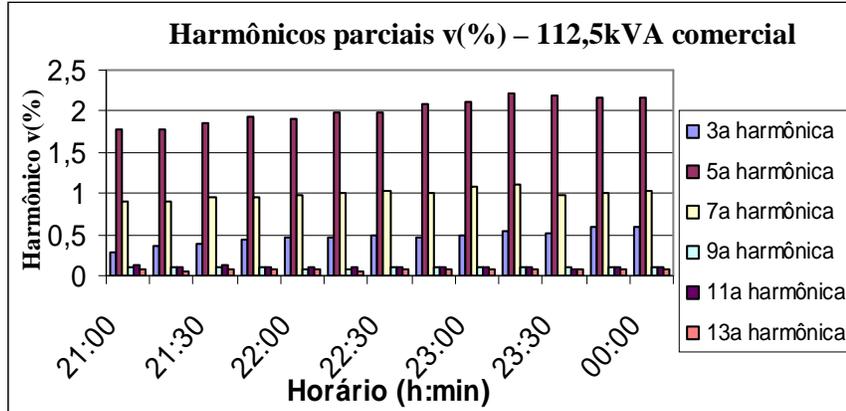


Figura 3.11-(b) – Harmônicos parciais de tensão.

As figuras 3.11-(a) e 3.11-(b) mostram as distorções harmônicas totais de tensão e as distorções harmônicas parciais. Como pode ser visto para este transformador que atende a consumidores comerciais as distorções harmônicas se fazem presentes mais significativamente nas de ordens 3^a, 5^a e 7^a, verificando-se uma relevância maior para as de 5^a ordem, com índices que chegam a pouco mais de 2%, não extrapolando limites adotados em norma (IEEE-519).

As distorções harmônicas de corrente ao serem avaliadas foram colocados seus resultados em termos de $DHT_i(\%)$ e também as distorções harmônicas parciais como mostrado nas figuras 3.11-(c) e 3.11-(d):

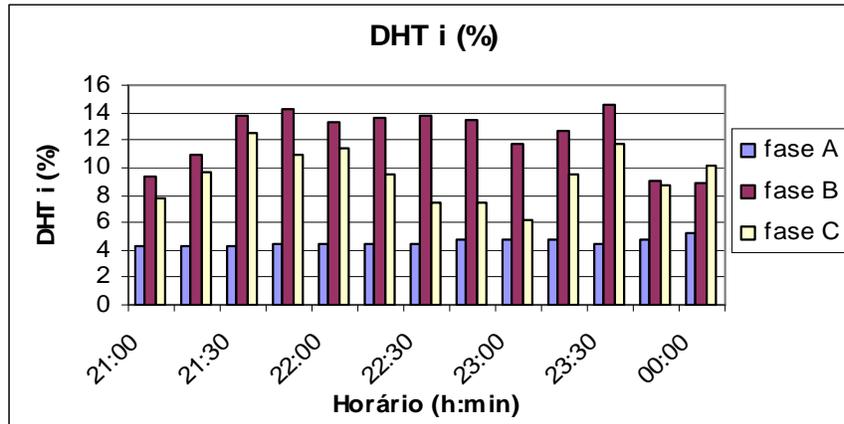


Figura 3.11-(c) – Distorção Harmônica total de corrente

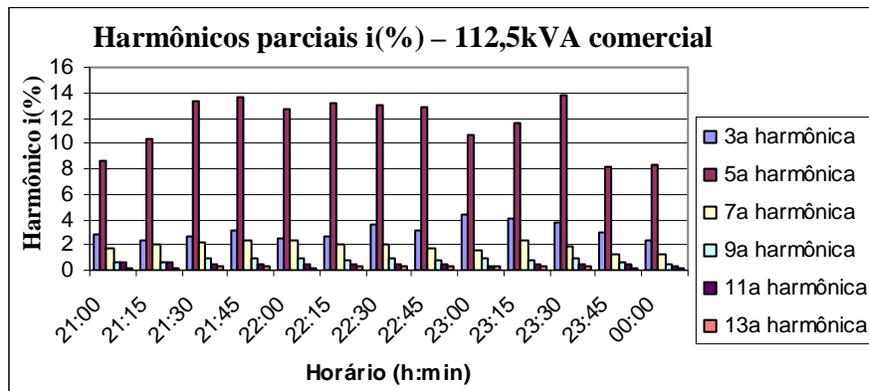


Figura 3.11-(d) – Harmônicos parciais de corrente

Os índices de distorções harmônicas de corrente encontrados para esse transformador que atende a esse grupo de consumidores já possui valores expressivos. A presença de harmônicos é mais marcante nas ordens 3^a, 5^a, 7^a, 9^a e 11^a, tendo como mais significativos os de 5^a ordem, que chegam a 15% em termos de valores de distorção total de corrente.

O fator de potência para esse transformador foi verificado e mostrado como na figura 3.11-(e), onde percebe que somente em alguns instantes que ele está fora do valor considerado adequado.

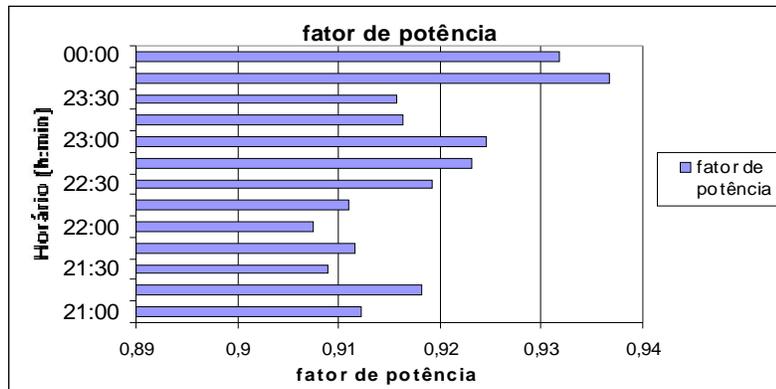


Figura 3.11-(e) – fator de potência.

3.4.3.4 Transformador de potência nominal de 150kVA

Pertencente ao grupo com perfil comercial um transformador de 150kVA foi analisado, com resultados mostrados a partir das figuras 3.12-(a) e 3.12-(b).

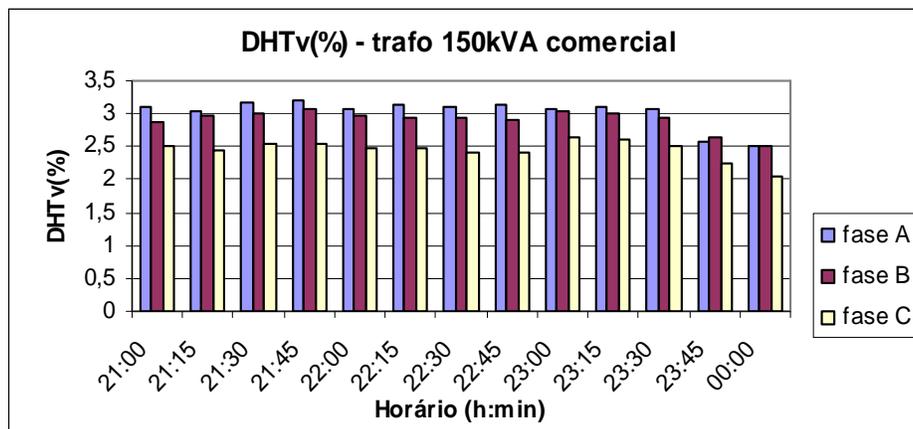


Figura 3.12-(a) – Distorção Harmônica total de tensão

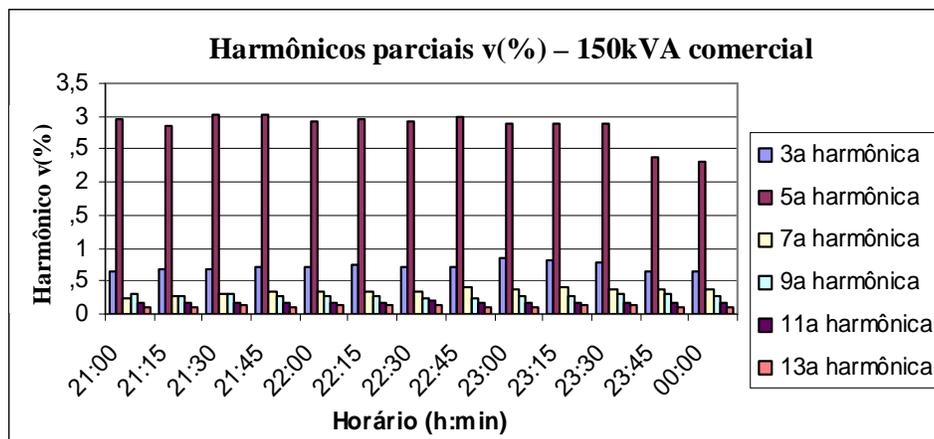


Figura 3.12-(b) – Harmônico parcial de tensão

Os registros de distorções harmônicas total e parcial de tensão para esse transformador apresentam valores acima de 3% para as distorções harmônicas individuais, tendo como mais significativos os harmônicos de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordens e valor mais expressivo para 5^a harmônico.

As distorções DHTi(%) e suas harmônicas parciais de corrente para esse grupo pode ser analisado do através das figuras 3.12-(c) e 3.12-(d).

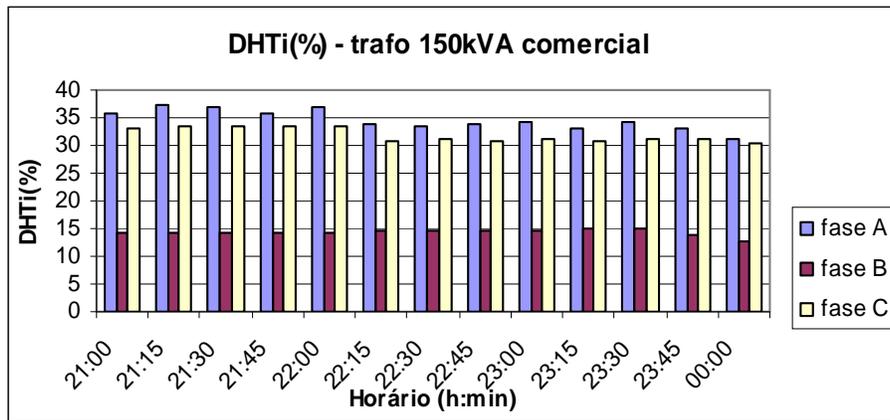


Figura 3.12-(c) – Distorção Harmônica de corrente

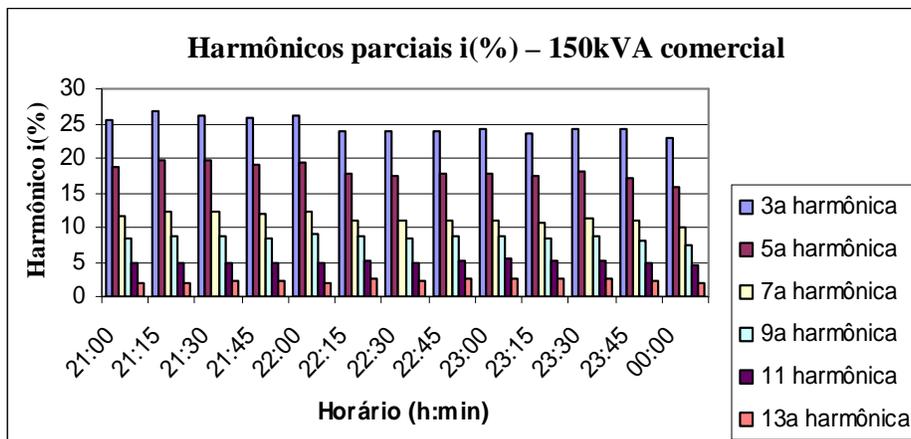


Figura 3.12-(d) – Harmônicos parciais de corrente

Os índices verificados nesse transformador são bem mais relevantes. Pode notar os harmônicos estão presentes principalmente nas 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordens, com maior significado para os de 3^a e 5^a ordens, que chegam a pouco mais de 25%, que se analisado pela norma IEEE-519, facilmente extrapolam o limite admitido.

Os registros de fatores de potência para este transformador apresentam valores adequados durante todo o período de medição, como ilustrado na figura 3.12-(e).

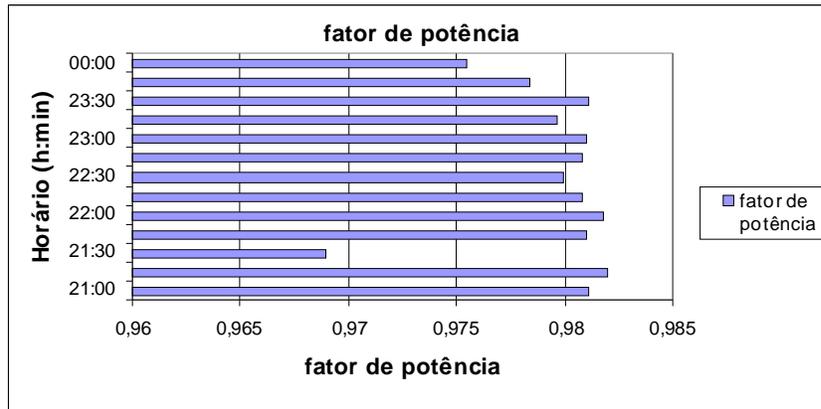


Figura 3.12-(e) – Fator de potência

3.4.3.5 Transformador com potencia nominal de 225kVA

O transformador a ser analisado a partir da figura 3.13-(a) e 3.13-(b) é importante para sua classe de atendimento, pois devido a sua potência nominal é de uso específico par atender a classe comercial.

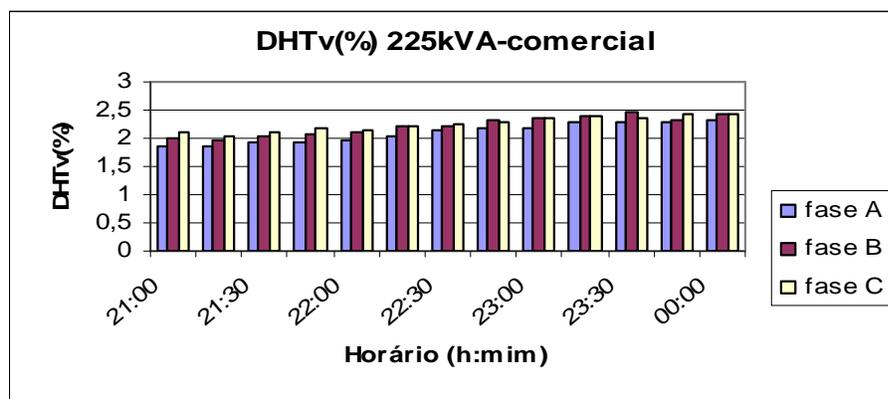


Figura 3.13-(a) - Distorção Harmônica total

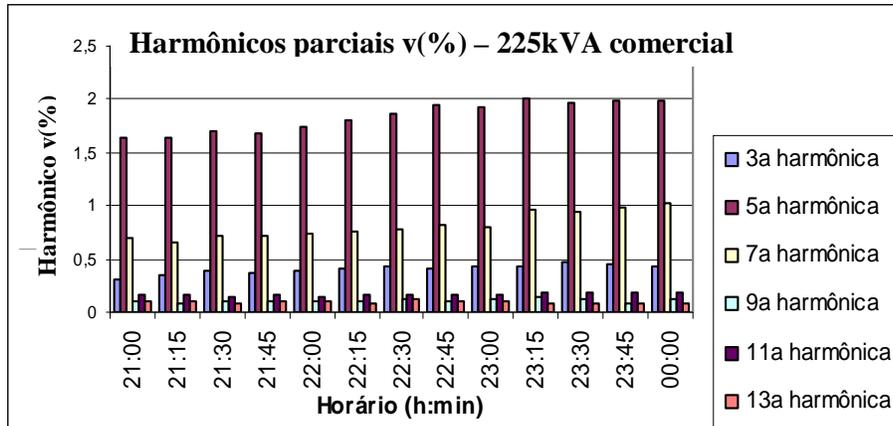


Figura 3.13-(b) – harmônicos parciais de tensão

As DHTv(%) e as distorções harmônicas parciais de tensão avaliadas a partir das figuras 3.13-(a) e 3.13-(b) mostram os harmônicos presentes como sendo relevantes os de ordens 3^a, 5^a e 7^a, com maior valor para o 5^o harmônico chegando aos 2%.

Por outro lado as DHTi(%) e os harmônicos parciais de corrente possuem valores mais expressivos, como mostram as figuras 3.13-(c) e 3.13-(d).

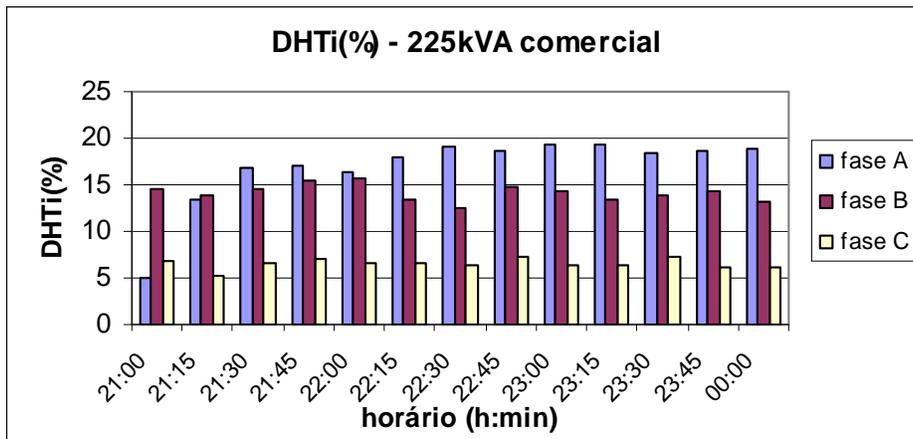


Figura 3.13-(c) – Distorção harmônica de corrente.

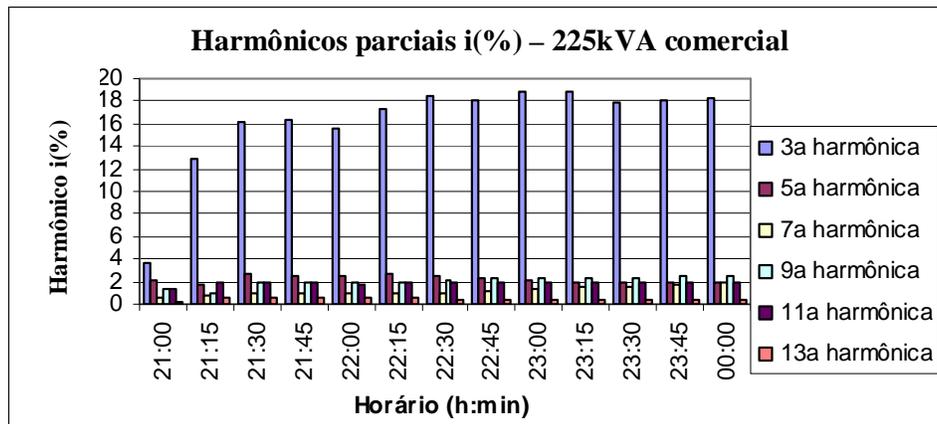


Figura 3.13-(d) – Harmônicos parciais de corrente

Como pode ser notado os valores são bastante expressivos chegando próximo a 20 % para harmônicos de 3ª ordem, que é o mais relevante juntamente com harmônicos de 5ª, 7ª e 9ª ordens. A partir destes valores percebe-se a violação tanto de DHTi(%) como para valores individuais de distorção harmônica

Pode-se observar também o desempenho do fator de potência para este transformador na figura 3.13-(e).

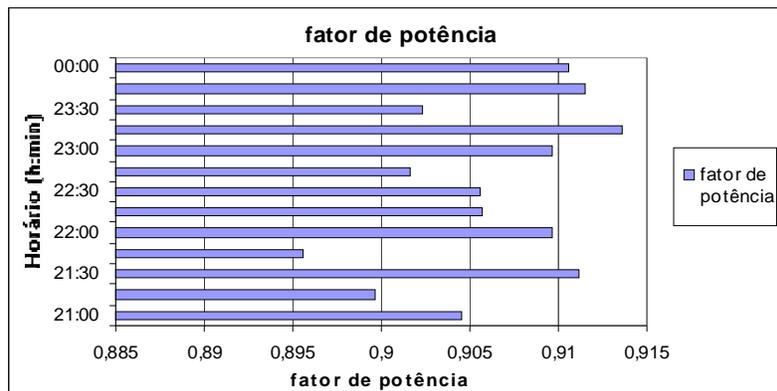


Figura 3.13-(e) – Fator de potência

3.4.3.6 Transformador de potência nominal 300kVA

Para fazer parte do grupo comercial, foi realiza medição em um transformador com capacidade nominal de 300kVA, e os resultados das análises serão mostrados a partir das figuras 3.14(a) e 3.14(b).

Os índices verificados para esse transformador indicam valores máximos de aproximadamente 4% para DHTv(%), e 3.6% para a distorção harmônica parcial de tensão, ocorrendo de forma mais significativa para 5º harmônico.

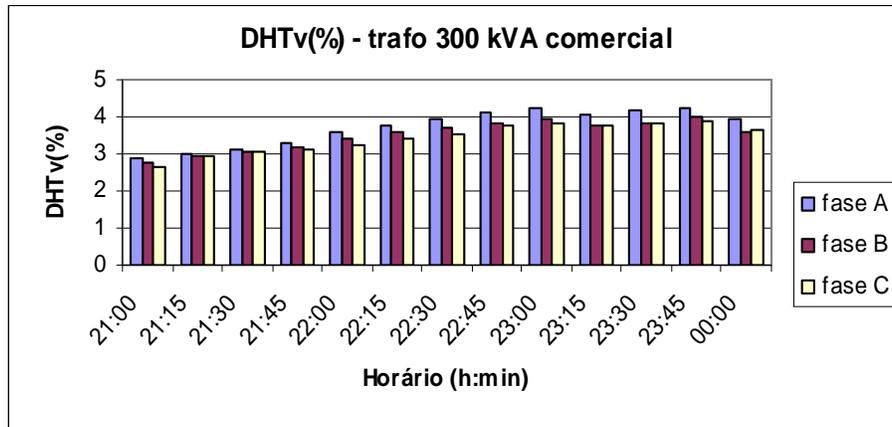


Figura 3.14-(a) – Distorção Harmônica total de tensão

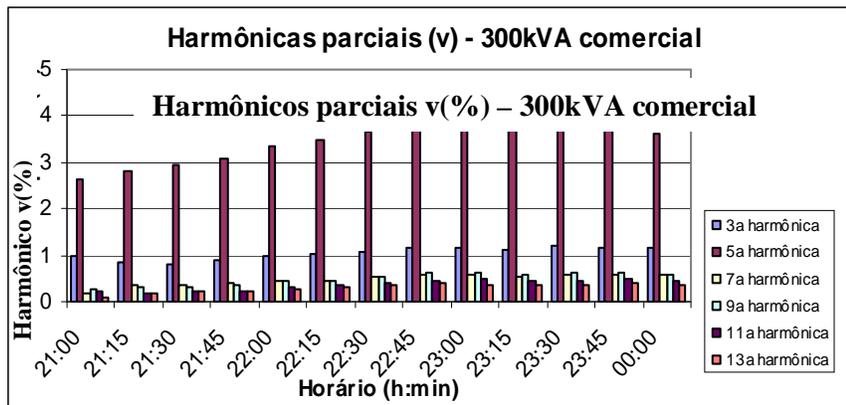


Figura 3.14-(b) – Harmônicos parciais de tensão

As DHTi(%) e as distorções harmônicas parciais de corrente para este transformador também foram analisadas como mostram as figuras 3.14-(c) e 3.14-(d), respectivamente.

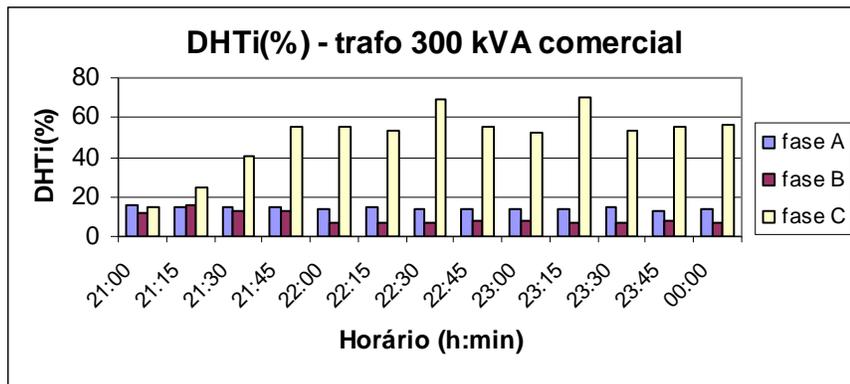


Figura 3.14-(c) - Distorção Harmônica de corrente

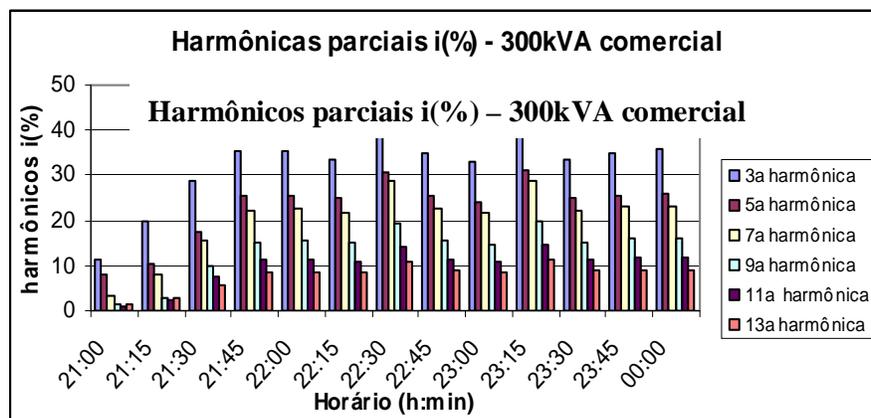


Figura 3.14-(d) – Harmônicos parciais de corrente

Através das figuras mostradas pode-se ver que os valores de distorção harmônica de corrente para o transformador de 300kVA desta classe possui valores bem expressivos, chegando próximo a 80% para os valores de DHTi(%) violando a norma considerada. Os harmônicos são mais relevantes nas ordens 3^a, 5^a, 7^a, 9^a e 11^a, com valor mais expressivo para o 3^o harmônico.

A figura 3.14-(e) mostra o desempenho do fator de potência do transformador, onde se nota valores abaixo do estipulado pela concessionária.

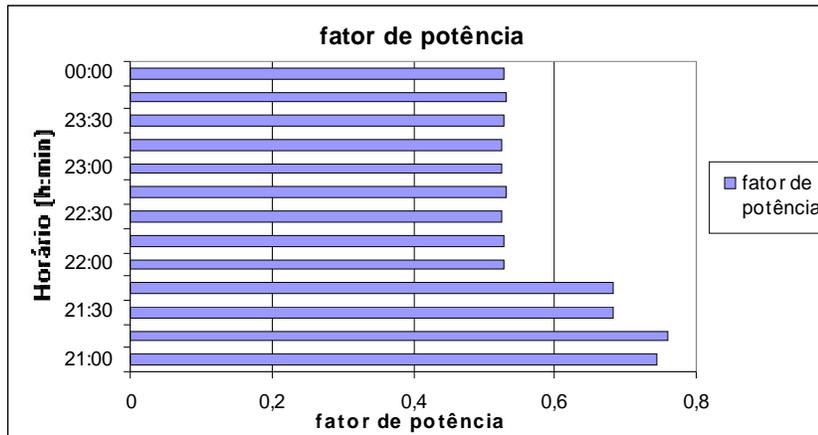


Figura 3.14(e) – Fator de potência

3.4.3.7 Análise do carregamento dos transformadores comerciais

A análise do carregamento dos transformadores pertencentes a classe comercial, é mostrado na figura 3.14-(f).

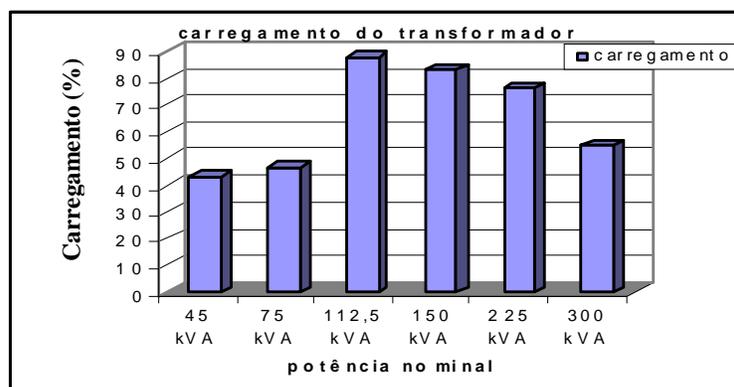


Figura 3.14-(f) – Carregamento dos transformadores comerciais

Os transformadores desta classe possuem carregamento como mostrado na figura 3.14-(f), onde tem-se o transformador de 45 kVA com 43% de carregamento, o transformador de 75 kVA com 47%, o transformador de 112,5 kVA com 88%. O transformador de 150kVA com 83%, e com 76% e 55% de sua potencia nominal estão os transformadores de 225 kVA e 300 kVA respectivamente.

3.4.3.8 Avaliação conjunta dos transformadores comerciais

A avaliação feita nesta classe confirma a presença de harmônicos de ordens 3^a, 5^a, 7^a, e 9^a no sistema, nas diferenciadas das classes mista e residencial na maioria dos transformadores avaliados, por apresentar componente harmônica de ordem 3^a como mais relevante para as distorções harmônicas de correntes avaliadas. Vale ressaltar que esses transformadores atendem a cargas com predomínio de equipamentos eletroeletrônicos.

Os níveis de distorção harmônica total de tensão para a classe comercial são mostrados na figura 3.14-(g)

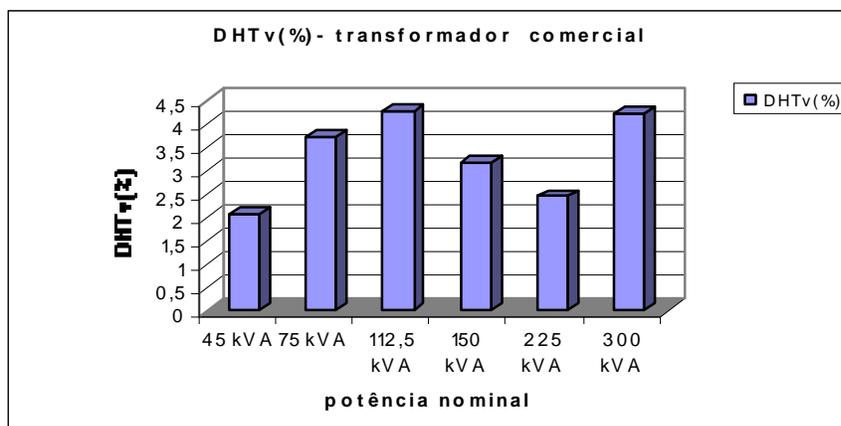


Figura 3.14-(g) – Distorção harmônica total de tensão em transformadores comerciais.

Através da figura 3.14-(g), é possível avaliar os índices de distorção, onde o transformador de 45kVA possui um nível de distorção total de tensão (DHTv%) de 2%, o transformador de 75kVA de 3,5%, o transformador de 112,5kVA de 4,1%, o de 150kVA de 3%, o de 225kVA de 2,4% e o de 300kVA 4,1%.

Esse grupo apresenta valores bem significativos para DHTi(%) quando comparado com os de outras classes de atendimento, justificando-se pelo fato de estar mais propício a cargas não-lineares, como pode ser visto na figura 3.14-(h).

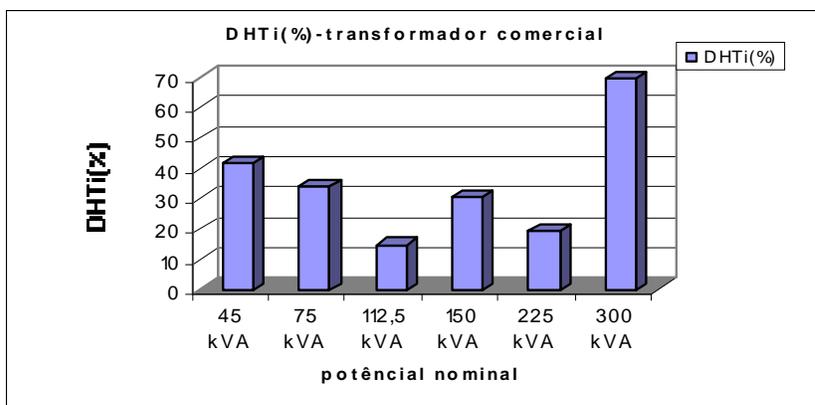


Figura 3.14-(h) – Distorção harmônica total de corrente em transformadores comerciais.

Observou-se também que dependendo do carregamento dos transformadores foram encontrados diferentes níveis de distorções harmônicas totais de corrente, conforme figura 3.14-(f) e 3.14-(h).

A análise mostra que quanto maior o carregamento do sistema alimentado pelo transformador, menores são as distorções harmônicas totais de corrente como foram constatadas com os transformadores de 45kVA e 112,5 kVA que possuíam um carregamento de 43% e 88% e apresentaram taxas de distorção total de corrente de 41% e 14%, respectivamente.

Outro fato relevante é a comparação entre níveis de distorções harmônicas de tensão e corrente mostrados através das figuras 3.14-(g) e 3.14-(h) do grupo de transformadores da classe comercial com relação às outras classes de consumo, figuras 3.5-(g) e 3.5-(h) – residencial e figuras 3.8-(g) e 3.8-(h) – mista, notando-se que os da classe comercial são bem mais altos.

O fator de potência médio encontrado nas medições efetuadas nestes transformadores é mostrado na figura 3.14-(i).

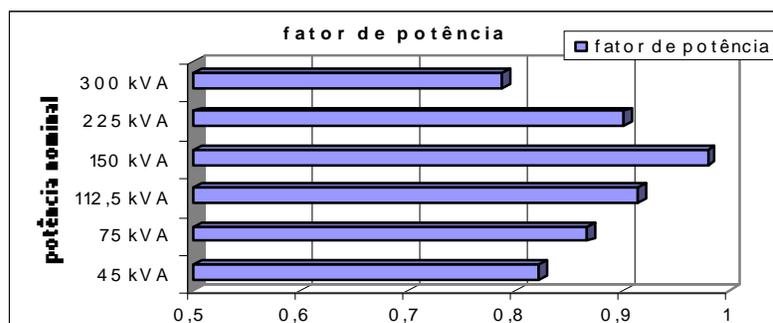


Figura 3.14-(i) – Fator de potência para transformadores comerciais.

Através do gráfico que traduz o desempenho do fator de potência, percebendo-se que para alguns transformadores estes não possuem valores considerados adequados pela concessionária, e coincidem com os transformadores de maiores índices de distorção harmônica.

3.5 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados das medições registradas em transformadores pertencentes ao sistema de distribuição da CEA, que foram previamente classificados em grupos por classe de atendimento residencial, comercial e misto, e também por sua potência nominal.

A classificação por classe de atendimento, originou-se pela necessidade de se ter perfis típicos para cada classe atendida no que diz respeito à injeção de harmônicos.

Foi observado a partir dos registros que o procedimento de separação das classes foi válido, pois classes de atendimento diferentes geram diferentes taxas de harmônicos no sistema de distribuição, principalmente no que diz respeito a geração de correntes harmônicas.

É evidente a diferenciação quanto às taxas de harmônicos geradas entre as classes residencial, mista e comercial. Comprova-se que as diferenças mais marcantes não estão na ordem dos harmônicos verificados, pois os mais significativos para as classes foram os de 3^a, 5^a, e 7^a ordens, observando-se também harmônicos de 9^a, 11^a e 13^a ordens, mas diferenciam-se principalmente no nível de corrente harmônica envolvida, sendo de forma crescente na seguinte ordem de classe: residencial, mista e comercial. Essas constatações são baseadas em análises feitas em transformadores de mesma potência atendendo à classes diferentes como se vê através das figuras 3.2-(d) e 3.9-(d) que mostram as correntes harmônicas para um transformador da classe residencial e comercial respectivamente.

Para os harmônicos de tensão destaca-se o de ordem 5^o com a maior contribuição na distorção total, seguindo-se os de ordens 3^o e 7^o respectivamente. Para a distorção de corrente apenas a classe comercial apresentou o maior valor harmônico de 3^a ordem; as classes residencial e mista apresentaram o 5^o harmônico como mais significativo.

Os níveis de distorção de tensão e corrente foram analisados com base na norma IEEE-519, que como comentado no capítulo anterior estipula de acordo com o nível de tensão do sistema analisado o valor de 5% para DHTv(%), no que diz respeito ao nível de distorção harmônica total de tensão, os grupos avaliados possuem valores de acordo com o estipulado pela norma, seus índices são em média 3,5%, sendo verificado para os grupos mistos e residenciais uma maior relevância para o 5^o harmônico, e no grupo comercial existe a presença mais significativa do 3^o e 5^o harmônicos, com índices próximo a 4,0%.

As distorções harmônicas de corrente são as mais relevantes na análise realizada. Possuem valores bem distintos por classe de atendimento. Na classe residencial os índices encontrados variam de 7% a 10%; na classe mista, onde já se tem algumas cargas comerciais em conjunto com cargas residenciais, os índices encontrados já são mais significativos, chegando acima dos 20% em alguns transformadores, violando assim a norma pertinente.

O grupo comercial também avaliado é o grupo que apresenta o maior índice de distorção harmônica total de corrente. Os índices encontrados nos transformadores dessa classe ultrapassam os limites estipulados em norma, encontrando-se casos mais críticos, chegando a 70% a distorção de corrente.

A análise do fator de potência revela que as unidades transformadoras em sua maioria possuem valores abaixo do valor estipulado pela concessionária, o que demanda maior potência reativa e perdas consideráveis que precisam ser revistas.

A partir deste importante banco de dados, onde se tem o conhecimento do perfil de distorção harmônica por classe de atendimento do alimentador é possível através de um fluxo de carga harmônico trifásico avaliar as conseqüências acarretadas ao sistema de distribuição devido à injeção de correntes harmônicas, que será tratado com maiores detalhes no capítulo seguinte.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA NO SISTEMA ATRAVÉS DO FLUXO DE CARGA HARMÔNICO TRIFÁSICO

4.1 INTRODUÇÃO

Nos capítulos anteriores foram apresentados os principais distúrbios existentes em um sistema de distribuição de energia, bem como as conseqüências que a distorção harmônica causa em alguns equipamentos e no sistema elétrico. Foi também realizada a identificação e a caracterização das fontes individuais geradoras de harmônicos no sistema de distribuição da CEA através de medições realizadas em diferentes grupos de consumidores da Companhia (residenciais, comerciais e mistos) através de um plano de medição executado em transformadores da rede de distribuição urbana que alimenta estas diferentes classes.

A investigação dos efeitos de um sistema de suprimento com qualidade comprometida sobre os diversos componentes elétricos é de fundamental importância para as concessionárias que não dispõem de uma ferramenta capaz de avaliar o comportamento do sistema em operação frente à constantes alterações do perfil de carga atendido, o que hoje se caracteriza em sua grande maioria por cargas não lineares, resultado do uso maciço da eletrônica de potência no sistema de distribuição de energia.

Dentre os vários estudos que se fazem em sistemas de energia elétrica é comum a análise através do fluxo de carga. Esta análise é extremamente usada nas fases de planejamento e operação dos sistemas, alcançando desta forma o estado de operação do sistema elétrico dado sua topologia e configuração de cargas.

O problema do fluxo de carga caracteriza-se por ser não linear, e como tal pode apresentar complicações como a dificuldade de convergência, e outros (TIBURCIO, 1978). Por esta razão os programas de fluxo de carga têm sido objetivo de pesquisas e estudos, visando o desenvolvimento de métodos de solução cada vez mais poderosos.

Dentro da nova estrutura do sistema elétrico no que é relevante a qualidade de energia, é vital que seja realizado seu monitoramento de forma a se ter maior confiabilidade em sua operação; nesse sentido o uso do fluxo de carga harmônico trifásico para a concessionária a partir de dados reais obtidos do perfil harmônico realizado neste trabalho implica de forma direta na diminuição de hipóteses de dados, a redução do número de medições realizadas nos transformadores e a vantagem de se conhecer os parâmetros elétricos em qualquer barra do sistema com maior confiabilidade e precisão.

Desse modo, a partir da identificação e caracterização das fontes de geração de harmônicos no sistema analisado, este capítulo do trabalho avalia os resultados através de um fluxo de carga harmônico trifásico dando continuidade a metodologia empregada no trabalho. O estudo aqui proposto pretende avaliar os impactos causados à rede primária, a partir da injeção de correntes harmônicas nos secundários dos transformadores da rede distribuição devido às cargas não lineares atendidas por esses transformadores.

O algoritmo de fluxo de carga aqui utilizado foi extraído de (TOSTES MEL, 2003), onde discutida amplamente a formulação da metodologia.

4.2 O PROGRAMA DE FLUXO DE CARGA HARMÔNICO TRIFÁSICO

O programa de fluxo de carga harmônico utilizado é baseado no método somatório de correntes, utilizando uma modelagem trifásica para a representação de elementos da rede elétrica. A metodologia empregada é adequada para redes de distribuição radiais e incorpora a representação de barras do tipo P-V no cálculo do fluxo de carga fundamental, tornando o algoritmo apropriado para representação de geração distribuída. As cargas são representadas por fontes de corrente, tanto na componente fundamental como nas componentes harmônicas.

O programa computacional para análise multifásica de fluxo harmônico em redes radiais de distribuição de energia, desenvolvido na linguagem C++ builder, é apresentado de forma simplificada por meio do fluxograma da figura 4.1, no qual pode-se observar que o fluxo de carga harmônico trifásico para análise harmônica é composto por diversas rotinas, as quais efetuam tarefas de determinação ⁷⁴ topologia da rede, cálculo de correntes e tensões, avaliação da convergência e apresentação de resultados (TOSTES MEL, 2003).

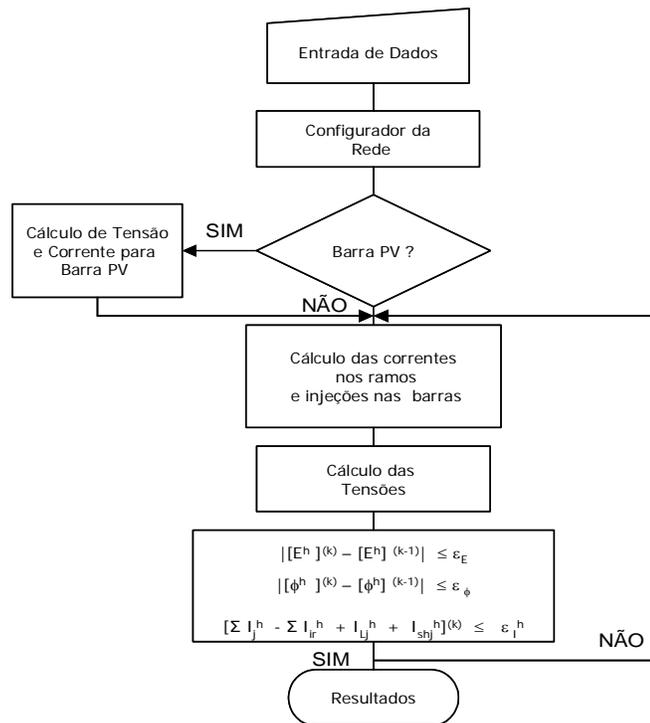


Figura 4.1 – Fluxograma simplificado do programa utilizado (TOSTES MEL, 2003).

4.2.1 Interface com o usuário

O usuário interage com o sistema para a análise do fluxo de carga harmônico trifásico por meio de janelas de dados, tanto para a passagem de parâmetros e informações para o programa como para o acesso aos resultados.

A janela principal é como mostrada na figura 4.2, que funciona como porta de principal de entrada de dados.



Figura 4.2 – Janela principal

* Janela de dados de barra – Nesta janela são inseridos todos os dados de barra necessários para executar o fluxo de carga harmônico. São dados de entrada, como o número da barra, o nome da barra, o tipo de barra, os valores base a serem utilizados e as tensões das fases A, B e C, conforme ilustrado na figura 4.3.

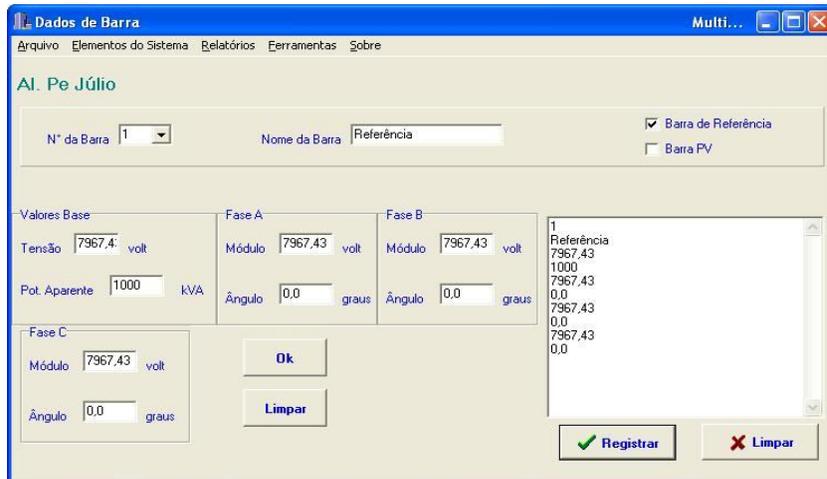


Figura 4.3 – Janela de dados de barra.

* Janela de dados do transformador, nesta janela são inseridos todos os dados do transformador necessários para o cálculo do fluxo harmônico, como o número da barra primária, barra secundária, nome da barra, resistência, reatância, conforme figura 4.4.

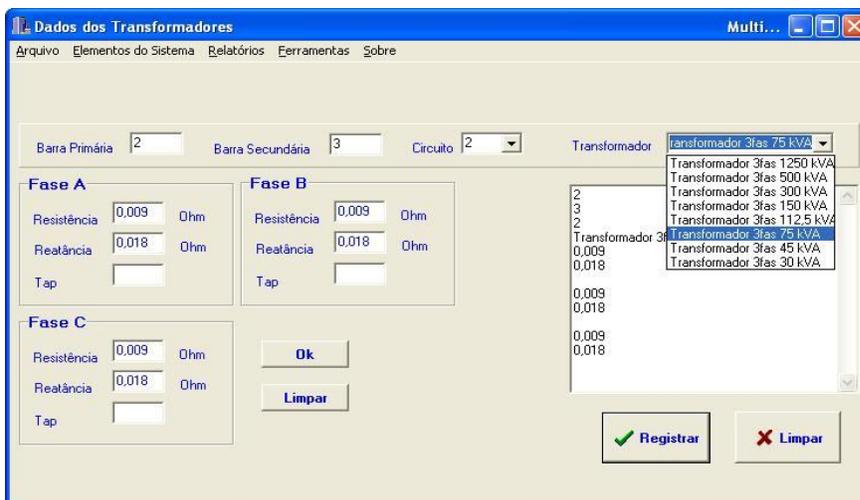


Figura 4.4 – Janela de dados do transformador

* Na janela de dados de linhas e cabos são inseridos todos os dados de linhas e cabos necessários para o fluxo de carga harmônico, como o número de barra origem, o número de barra destino, o número e comprimento do circuito, resistência e reatância de cada circuitos e em cada uma das fases, conforme figura 4.5.

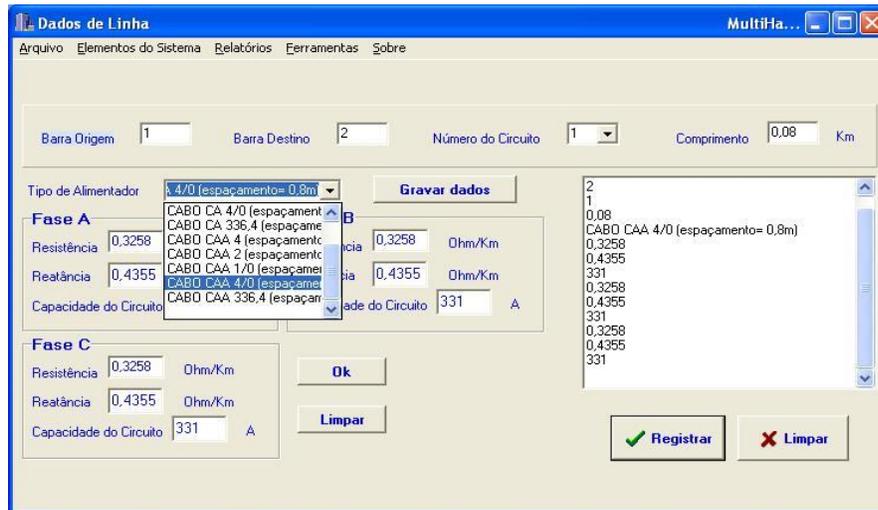


Figura 4.5 – janela de dados de linhas e cabos

* Janela dados de carga – nesta janela são inseridas informações referentes as cargas do sistema, como índices de corrente medidos em cada fase do circuito a ser avaliado, o número de harmônicos, bem como as frequências que se deseja avaliar, como mostra afigura 4.6

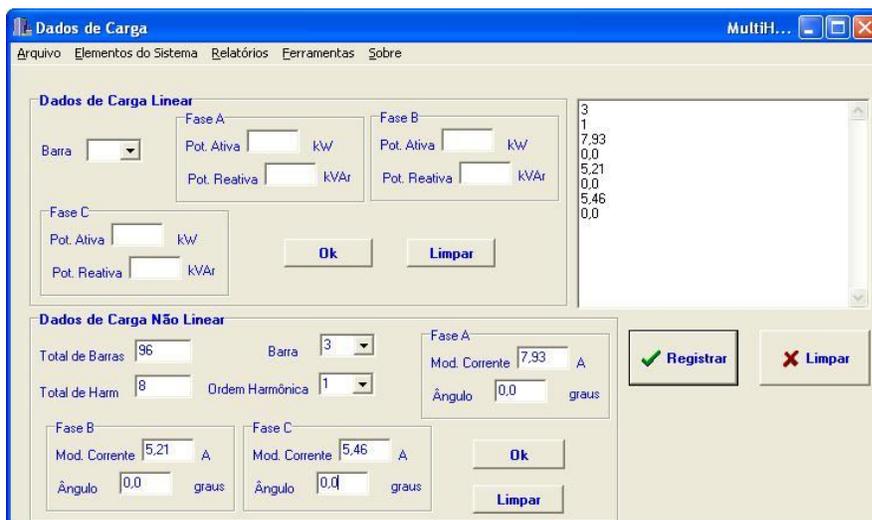


Figura 4.6 – Janela dados de carga.

4.3 AVALIAÇÃO DO SISTEMA EM ESTUDO

Esta seção pretende mostrar os resultados do estudo do fluxo de carga em um alimentador real de uma rede de distribuição urbana que possui 96 transformadores, para o qual foi levantado o perfil de atendimento por meio de medições em campo e mostradas ao longo do trabalho.

O alimentador aqui analisado é o alimentador Pe. Júlio, pertencente à subestação Macapá I da rede metropolitana de distribuição de energia da cidade de Macapá. Todos os circuitos são trifásicos e a tensão de linha na saída da subestação é igual 13800 volts. A representação deste alimentador em camadas é apresentado no Apêndice I.

4.3.1 Resultados obtidos com o fluxo de carga harmônico para o alimentador Padre Júlio.

De modo a se ter o monitoramento em pontos estratégicos do sistema, abrangendo características de toda a área de concessão e ainda diferentes categorias de consumidores em função da importância da carga atendida, foram selecionados 16 transformadores ao longo do alimentador Pe. Júlio, de modo a ter-se o perfil de geração de harmônicos de cada tipo de carga atendida por determinado tipo de transformador.

Para efeito das simulações com o programa de fluxo de carga harmônico trifásico, montou-se o seguinte caso de estudo:

1. Transformadores com medidas coletadas: essas mesmas medidas foram utilizadas para a caracterização das cargas harmônicas, ou seja, as correntes harmônicas, medidas incluindo a fundamental até a 15^a ordem foram injetadas nos secundários desses transformadores;
2. Transformadores sem medidas: foram utilizadas medidas de um transformador similar, de mesma característica de perfil de consumo, de mesma potência e que estivesse o mais próximo possível.

Nas figuras 4.7 e 4.8 são mostrados os resultados para os valores RMS de tensão em algumas barras primárias e secundárias do sistema avaliado que foram calculados com o uso do programa de fluxo de carga harmônico.

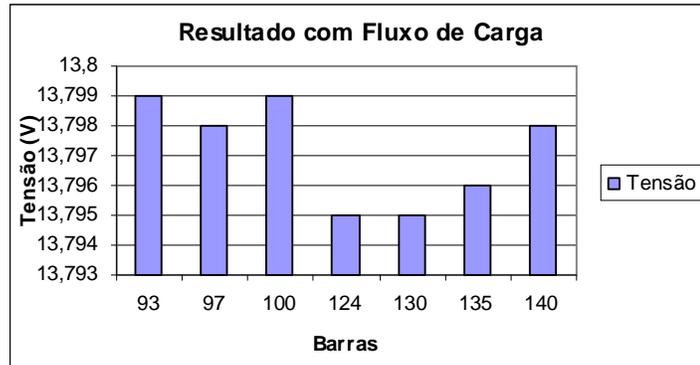


Figura 4.7 – Valores de tensão RMS para barra primária.

Os valores mostrados são das barras de números 93, 97, 100, 124, 130, 135 e 140 que estão localizadas em uma área de maior concentração de carga do alimentador, e apresentam valores um pouco abaixo do valor nominal de 13.8kV (RESOLUÇÃO. 676-ANEEL), o que pode indicar a necessidade de se melhorar o nível de tensão nessas barras, podendo-se fazer uso de compensação de reativos no alimentador.

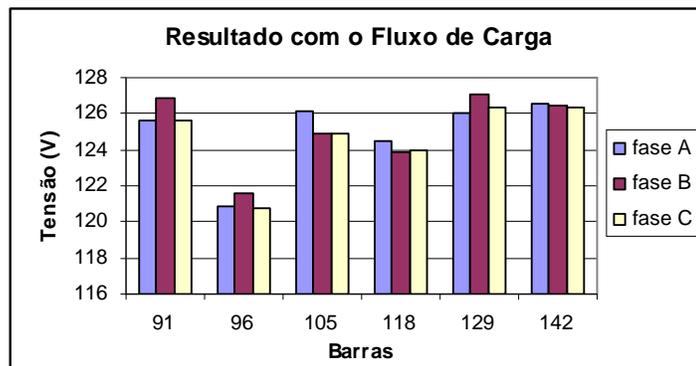


Figura 4.8 – Valor de tensão RMS para barra secundária.

A figura 4.8 apresenta os valores de tensão rms secundária para as barras de números 91, 96, 105, 118, 129 e 142 que são barras localizadas no centro e final do alimentador. Os valores indicam que os índices encontrados estão dentro da faixa considerada adequada (RES. 676-ANEEL), próximos ao valor nominal 127V, mas considerando que são valores calculados no borne do transformador, esse

necessitaria de ajuste no TAP de modo a oferecer melhores índices de tensão principalmente nos finais dos circuitos secundários para o horário de pico do alimentador.

Nas figuras 4.9 e 4.10 são apresentados índices de DHTv(%) e DHTi(%) calculados no secundário das barras 44, 59, 56 e 19, que são barras que possuem transformadores classificados como do grupo residencial, e que foram calculados com o uso do programa de fluxo de carga harmônico trifásico.

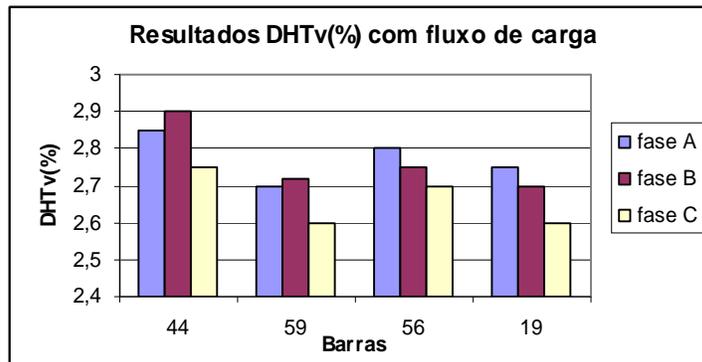


Figura 4.9 – DHTv(%) calculado pelo programa fluxo de carga

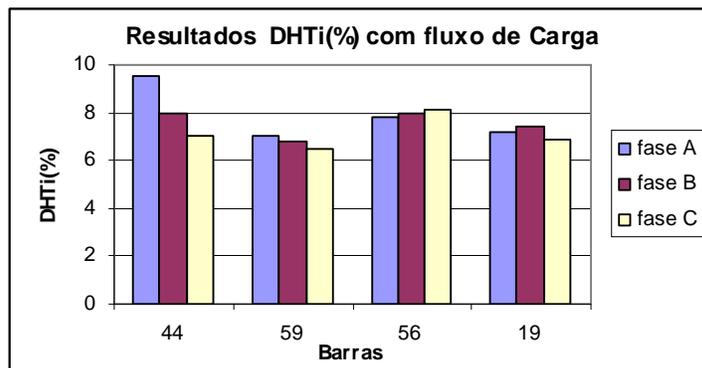


Figura 4.10 – DHTi(%) calculado pelo programa fluxo de carga

As barras apresentadas nas figuras 4.9 e 4.10 representam os transformadores com potência nominal de 45kVA, 75kVA, 112,5kVA e 150kVA respectivamente, pertencente a classe residencial. Os índices de DHTv(%) e DHTi(%) encontrados através da utilização do programa de fluxo de carga harmônico trifásico mostra valores próximos aos valores registrados nas medições para esta classe como mostrados nas seções anteriores, percebendo-se padrões de

impactos harmônicos similares àqueles obtidos com as medições realizadas.

As DHTv(%) e DHTi(%) para as classes mista e comercial também foram avaliadas através do fluxo de carga harmônico trifásico e apresentados nas figuras 4.11 a 4.14.

Os índices de distorções harmônicas de tensão e corrente calculados através do fluxo de carga harmônico trifásico para estas classes mostram taxas de distorções harmônicas similares àquelas já mostradas em seções anteriores, confirmando o perfil obtido através de medições registradas. Os índices referentes a classe mista são apresentados nas figura 4.11 e 4.12 que mostram DHTv(%) e DHTi(%) para transformadores de 75kVA, 112,5kVA e 150kVA respectivamente. Já os índices apresentados nas figuras 4.13 e 4.14 são referentes a classe comercial, que analisam transformadores de 75kVA, 112,5kVA, 150kVA, 225kVA e 300kVA respectivamente .

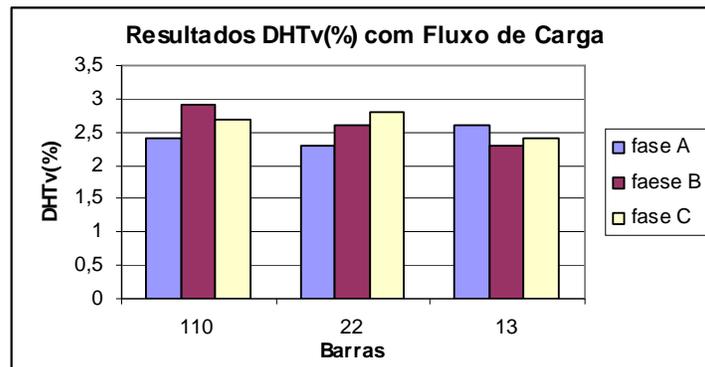


Figura 4.11 – DHTv(%) calculado pelo programa fluxo de carga.

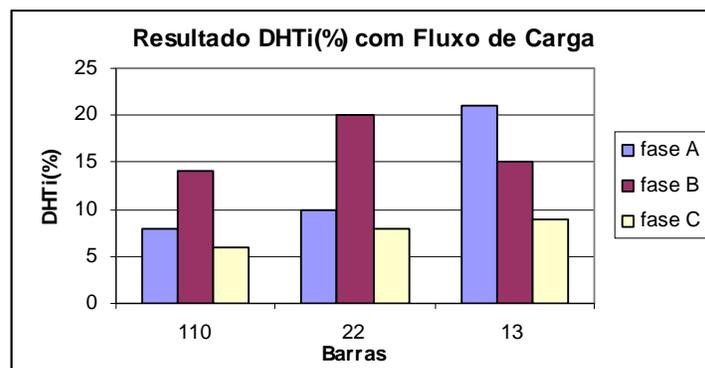


Figura 4.12 – DHTi(%) calculado pelo programa fluxo de carga.

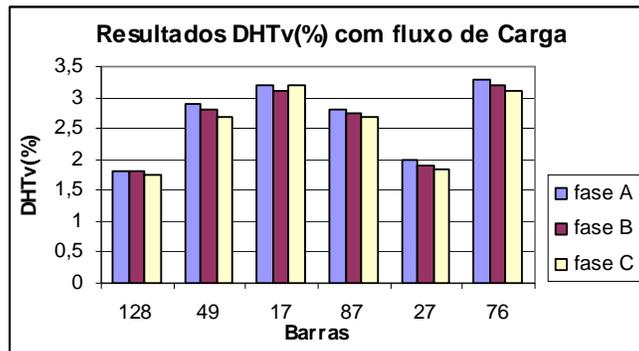


Figura 4.13 – DHTv(%) calculado pelo programa fluxo de carga.

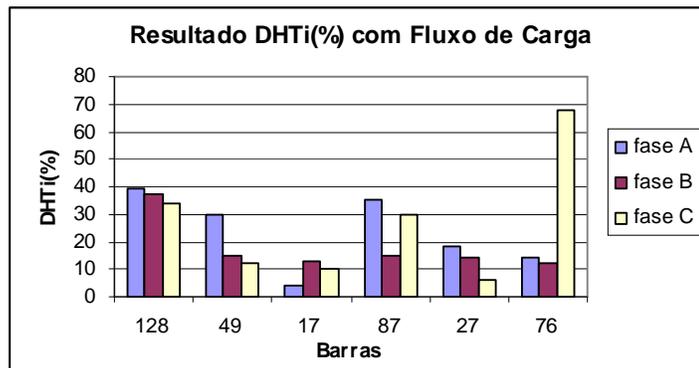


Figura 4.14 – DHTi(%) calculado pelo programa fluxo de carga.

O estudo realizado através do fluxo de carga harmônico trifásico possibilita uma avaliação mais ampla do sistema em estudo, como pode ser observado a partir da figura 4.15 onde mostra índices de distorção harmônica para algumas barras localizadas no início, meio e fim do alimentador, fornecendo um perfil harmônico ao longo do alimentador em barras com medições ou não. Os índices apresentados são referentes as barras 7, 62 e 133 que possuem transformadores de 75kVA, 112,5 kVA e 150kVA pertencentes a classe comercial, que é a classe mais significativa do alimentador em estudo, deixando claro que a partir do estudo realizado pode ser avaliado o perfil harmônico em qualquer barra do sistema.

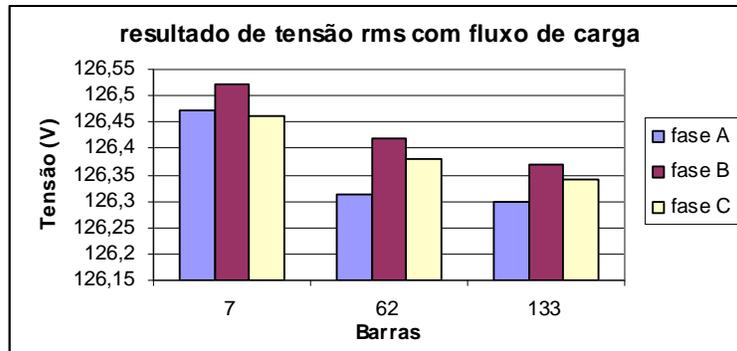


Figura - 4.15 – Tensão RMS com fluxo de carga

A figura 4.15 apresenta resultados de tensão rms calculados a partir do uso do fluxo de carga harmônico trifásico para barras localizadas ao longo do alimentador Pe. Júlio, a figura mostra que os valores encontrados, em média 126V, estão abaixo de seu valor nominal, com quedas um pouco mais acentuadas para o final do alimentador, o que indica a necessidade de ajuste do nível de tensão. O desequilíbrio entre fases também é evidenciado, o que reforça a importância da utilização de um algoritmo de fluxo de carga trifásico para esta aplicação.

A partir da figura 4.16 e 4.17 é realizada uma avaliação da distorção harmônica total de tensão e corrente para o alimentador em questão, onde apresentam-se os índices de DHTv(%) e DHTi(%) ao longo do alimentador.

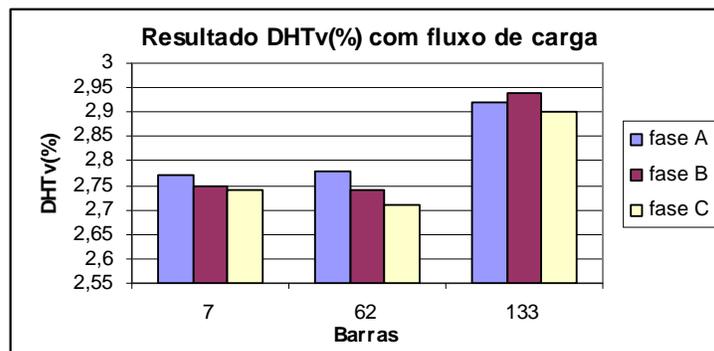


Figura 4.16 – DHTv(%) com fluxo de carga

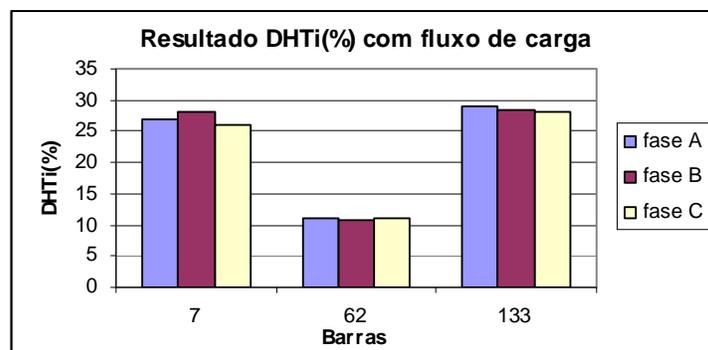


Figura 4.17 – DHTi(%) com fluxo de carga.

Os índices avaliados a partir de 4.16 e 4.17 mostram valores de DHTv(%) e DHTi(%) respectivamente, da classe comercial localizados no início, meio e fim do alimentador Pe. Júlio, esses valores mostram impactos de distorção harmônica de tensão e corrente sofrido pelo sistema de distribuição com sistêmicas violações da norma pertinente (IEEE-519), o que destaca a importância do estudo realizado, que mostra que a partir de dados registrados em medições e juntamente com estudo do programa de fluxo de carga harmônico trifásico, pode-se hoje realizar análises para qualquer barra do sistema com menor número de suposições e maior confiabilidade nos resultados.

Outro tipo de resultado disponibilizado pelo estudo através do fluxo de carga para o sistema pode ser verificado através das figuras 4.18 e 4.19, onde mostram as potências ativas e reativas para uma barra do sistema.

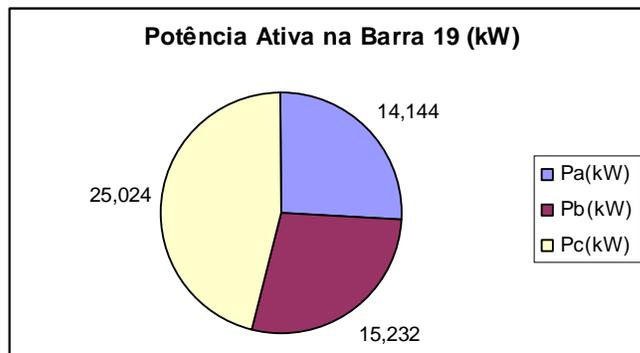


Figura 4.18 – Potência ativa no secundário do transformador 140 (barra 19).

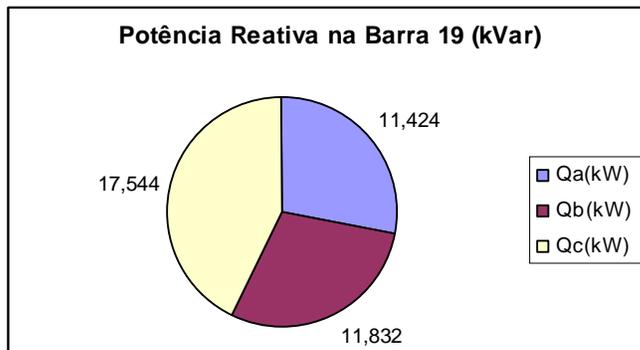


Figura 4.19 – Resultado de potência reativa no secundário do transformador 140 (barra 19).

As figuras 4.18 e 4.19 apresentam os resultados de potência ativa e reativa respectivamente para as fases A, B e C do secundário do transformado de número 140, barra 19, os resultados são úteis para a avaliação do nível de desequilíbrio em termos de carregamento dos transformadores de distribuição.

4.4 CONCLUSÃO

Neste Capítulo foi apresentado a utilização de um programa de fluxo de carga harmônico trifásico para análise do alimentador Pe. Júlio, mostrando os principais parâmetros elétricos do sistema avaliado a partir de medições realizadas.

O programa de fluxo de carga enquanto ferramenta utilizada neste trabalho mostra a capacidade de analisar a propagação de harmônicos gerados por cargas não-lineares distribuídas ou concentradas e aferir os impactos em todas as barras do sistema de distribuição.

A partir dos resultados mostrados através do fluxo de carga harmônico determinado para cada fase da rede elétrica – com considerável redução no número de suposições simplificadoras, pode-se perceber que ao longo do alimentador avaliado existem quedas de tensão nas barras primárias, indicando a necessidade de melhorias no sistema, o que poderia ser feita através de compensação de reativos no sistema. A avaliação realizada nas barras secundárias também apontam níveis de tensão abaixo do nominal, o que poderia ser corrigido com ajuste de TAP, dependendo da viabilidade técnica de cada transformador.

A avaliação realizadas para $DHTv(\%)$ e $DHTi(\%)$ indicam violações sistêmicas para o conjunto considerado, comprovando níveis relevantes do distúrbio no sistema, chamando a atenção para ações mitigadoras.

Com esta dissertação a concessionária dispõe de dados reais para tomadas de decisão a respeito dos distúrbios analisados como, distorções harmônicas, quedas de tensão, desequilíbrio de cargas, perdas e compensação de reativos, o que resulta de forma direta em um aumento da confiabilidade operacional do sistema.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

No decorrer desta dissertação, algumas conclusões já foram apresentadas, neste capítulo final encontram-se reunidas as principais conclusões alcançadas, seguidas de comentários adicionais a partir do trabalho completo.

Foi possível mostrar os principais problemas relacionados à qualidade de energia que ocorrem nos sistemas elétricos de potência dando enfoque para distorções harmônicas, desequilíbrio de tensão e fator de potência. O capítulo III apresenta a identificação e a caracterização das fontes geradoras de harmônicos no sistema de distribuição de energia da CEA, realizada a partir de medições em grupo de transformadores de distribuição previamente classificados por sua classe de atendimento - residencial, comercial e misto.

As taxas de harmônicos geradas entre as classes residencial, mista e comercial possuem diferenças em magnitudes. Estas diferenças não são nas ordens dos harmônicos verificados, pois os mais significativos para todas as classes foram os de 3^a, 5^a, e 7^a ordens, observando-se também harmônicos de 9^a, 11^a e 13^a ordens, mas diferenciam-se principalmente nas taxas totais de distorções harmônicas e no nível de corrente harmônica envolvida, sendo de forma crescente na seguinte ordem de classe: residencial, mista e comercial.

Quanto às distorções de tensão e corrente analisadas através da norma IEEE STD 519, observou-se que o percentual médio encontrado para as distorções totais de tensão para todas as classes encontram-se dentro das normas pertinentes, sendo a classe comercial a possuidora dos maiores índices, próximo a 5%, ocorrendo violações quando verificado seu valores de distorções harmônicas individuais.

Para as distorções de corrente, avaliando-se através da norma IEEE STD 519, observa-se que na maioria dos transformadores analisados o DHTi% máximo para a classe residencial fica abaixo de 20%, no entanto as classes mista e comercial apresentam valores superiores a 20%, chegando a 70% para transformadores de maior potência nominal, mostrando violações sistêmicas aos limites permitidos em norma.

É possível também destacar que o aumento no carregamento reduz a distorção harmônica total, conforme se observou em todos os casos apresentados. As explicações para esta redução estão centradas em alguns fatores, como a presença de cancelamento harmônico e a atenuação, referentes ao aumento de diversidade de carga e intensidade numérica da carga, respectivamente.

A avaliação realizada a partir de dados coletados para fatores de potência mostram de forma clara que para a maior parte dos transformadores avaliados, esses não possuem valores considerados adequados por norma, e são coincidentes com os transformadores de maiores índices de distorção harmônica do sistema, o que confirma a redução do fator de potência das instalações na presença de harmônicos e o aumento de queda de tensão nos circuitos.

Esse baixo fator de potência apresentado no estudo, traduz-se também em uma grande demanda de potência reativa para a concessionária, que a partir de então pode buscar melhorias a fim de reduzir estas perdas e atingir a liberação de uma maior capacidade de potência ativa para o sistema.

Foi apresentado no capítulo IV um estudo do sistema CEA através de um programa de fluxo de carga harmônico trifásico, onde se conseguiu avaliar os parâmetros elétricos do alimentador Pe. Júlio a partir de algumas medições obtidas em campo, em pontos estratégicos.

Com o uso do fluxo de carga harmônico trifásico, tornou-se possível a avaliação do sistema, diminuindo de forma considerável a necessidade de medições em campo, pois tem-se a possibilidade de avaliar índices inerentes a qualidade de energia em qualquer barra do alimentador considerado, possibilitando também a avaliação de rendimento ou manutenção dos transformadores, que como mostrado no capítulo II sofrem influências em suas vidas úteis na presença de harmônicos, bem como a redução de perdas através da compensação de reativos.

Através dos resultados obtidos com o fluxo de carga, pode-se planejar melhor o sistema da CEA, que entre outros aspectos mostra a presença significativa de harmônicos. O uso do fluxo de carga harmônico contribui de forma significativa para a identificação das áreas de maior sensibilidade a determinados parâmetros elétricos ao longo do alimentador, o que possibilita a realização de estudos mais realistas no que se refere a problemas relacionados à qualidade de energia como: os impactos harmônicos, provocados pelas diferentes classes de consumo atendidas

pela concessionária, desbalanceamento entre fases dentro de uma determinada região do sistema e baixo fator de potência.

Como perspectivas futuras para continuação deste trabalho, pode-se recomendar:

- * Realização de estudos estatísticos de modo a conseguir um modelo matemático que expresse mais adequadamente a realidade do sistema a partir de medições amostrais;
- * Estudos de compensação ótima de reativos bem como a aplicação de filtros harmônicos a partir dos resultados encontrados para a melhoria do sistema;
- * Realizar medições diretamente nas várias cargas especiais atendidas pela concessionária, de modo a desenvolver sua modelagem e implementação no fluxo de carga harmônico.

TRABALHOS PUBLICADOS

BEZERRA, U. H.; **BRANCHE, M. N.**; GARCEZ, J. N.; MOSCOSO, M. N.; SENA, J. A. S.; SOUZA, K. T.; SILVA, R. R. da; LEMOS, R. J. S.; “**Sistema de Supervisão da Tensão secundária de transformadores de Distribuição**”. CITENEL, Brasília, 2003.

BRANCHE, M. N.; TOSTES, M.E.L;BEZERRA, U.H, SILVA,R.D.S. “**Análise da Geração de Harmônicos na Companhia de Eletricidade do Amapá em Transformadores Residenciais, comerciais e Mistos**”. IEEE/PES T&D 2004, Latin América, novembro, 2004.

BRANCHE, M. N.; TOSTES, M.E.L;BEZERRA, U.H, SILVA,R.D.S. “**Análise da Qualidade de Energia na Companhia de Eletricidade do Amapá via Medições de Harmônicos no Sistema de Distribuição**”, aceito para apresentação no SENDI, Brasília, novembro, 2004.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEZERRA, U. H.; GARCEZ, J. N.; MOSCOSO, M. N.; SENA, J. A. S.; SOUZA, K. T.; Silva, R. R. da; LEMOS, R. J. S.; TUPIASSU, A. A. e MESQUITA JÚNIOR, J. E.; **Sistema Distribuído de Monitoramento da Qualidade de Tensão em Redes de Distribuição de Energia Elétrica**. Publicado nos anais do XV SENDI - Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica, Salvador - BA, Brasil, 26 a 29 de Novembro de 2002.

BRONZEADO, H. S. **Qualidade da Energia Elétrica: conceitos, problemas e soluções**. AE&T – Assessoria, Eventos e Traduções. Curso Promovido pelo IEEE – Seção Bahia, 2000.

BRONZEADO, H. S.; NETO, S. D. C.; PONTES, S. M. M. **Electric Power Quality Issues in a Deregulated Environment**. Congresso Latino Americano de Distribuição de Energia Elétrica – CONLADIS. Escola Politécnica da USP. São Paulo, 8-10 September, 1998.

BOLLEN, Math H. J; Lundquist, J. **Harmonic Active Power Flow in Low and Medium Voltage Distribution Systems**. IEEE Power Engeneering Society Winter Meeting, Vol. 4, pp. 2858-2863, 2000.

CIPOLI, J.A. **Engenharia de Distribuição**. Ed. Qualitymark,RJ, 1993.

COX, R. W., 'An Intuitive Analysis of Harmonic Power Flow in Electrical Distribution Systems', IEEE Annual Conference on Textile, Fiber and Film Industry Technical, 1997.

DECKMANN, S; Rocco, A ; Oliveira, J.C. **Efeitos Causados Por Harmônicos no Sistema Elétrico e seus Componentes**. Volume II, Capítulo VIII, do Curso de Extensão promovido pela Universidade Federal de Uberlândia,1986.

DELAIBA, A. C., Oliveira, J. C. e VILAÇA, A. L. A. **Life Expectancy Estimation of Transformers under Non Sinusoidal Operation**. 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power – ICHQP, Las Vegas, Outubro-1996.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F. and BEATY, H. W. **Electrical Power Systems Quality**. McGraw Hill, 1996, 265 p.

DUGAN,R.C; Kennedy,B.W. **Industrial Capacitor Application Procedures for Loss Reduction and Estimatio of Harmonics**. IEEE Transaction on Power Systems, 1995.

GALHARDO, Marcos André e Pinho, João Tavares. **Modelagem de Cargas não Lineares em Sistemas Elétricos de Potência**. Publicado nos anais do V SBQEE - Seminário Brasileiro Sobre Qualidade da Energia Elétrica, Aracajú - SE, Brasil, 17 a 20 de Agosto de 2003.

GARCIA, P.A.N., Pereira, J.L.R. e Carneiro, S. **Fluxo de Potência Trifásico por injeção de corrente:** Parte 1- Formulação Básica. Revista Controle & Automação, Vol. 12, No. 03, Set.,Out., Nov. e Dez. de 2001.

IEEE. **Recommended Practice for Electric Power Quality.** IEEE Std. 1159-1995, New York. IEEE,1995.

IEEE Standard 399. **IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis.** IEEE, New York, 1990.

IEEE. Task Force on Modeling and Simulation. **Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks.** Part I: Concepts, Models, and Simulation Techniques. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11 No. 1 pp. 452-465, January 1996.

LOPES, Luis C. **Notas de Aula da Disciplina Dispositivos FACTS.** UFPa, CMEE, 2001.

MACEDO, José Rubens. **Aplicação de Filtros Harmônicos Passivos em Circuitos Secundários.** Revista Eletricidade Moderna, agosto de 2000.

MORENO, Hilton. **Harmônicas nas Instalações Elétricas.** Procobre,1^a.ed.São Paulo,2001.

NBR 5410. **Norma Brasileira de Instalações Elétricas de Baixa Tensão.** 1997.

ORTMEYER, T. H.; AKRAM, M. F.; HIYAMA, T. **Harmonic Modeling of Networks.** IEEE PES Winter Meeting, Tampa, Feb. 1998.

PACHECO, C. R., Oliveira, J. C. e VILAÇA, A. L. A. **Cable Thermal Behavior and Life Expectancy Estimation under Non-Sinusoidal Operating Conditions.** The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Setembro 1999.

P519A, Task Force of the Harmonics Working Group (IEEE PES T&D Committee) and SCC22. **Power Quality: Guide for Applying Harmonic Limits on Power System.** IEEE, May, 1996.

POMILIO, J.A. **Influência dos Harmônicos nas Instalações Industriais.** UFMG, junho,1997.

ROSSA, A.J. e Torri, P.J. **Efeitos da Distorção Harmônica da Rede Elétrica sobre Motores Elétricos.** março,2001.

RESOLUÇÃO nº24, de 27 de Janeiro de 2000, da ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica.

RESOLUÇÃO nº 676, de 16 de dezembro de 2003, da ANEEL- Agência Nacional de Energia Elétrica.

SILVA, E.T; ALVES, F. A. **Qualidade de Energia em Sistemas de Potência**. Curso técnico promovido pela TARGET Eng. e Consultoria. São Paulo, 2002.

SILVA,R.D.S. **Análise e Definição de Índices de Ressonância Harmônica em sistemas de Energia Elétrica**. Dissertação de Mestrado, CPGEE – UFPa, 2004.

SRINIVASAN, K. **On Separating Customer and Supply Side Harmonic Contributions**. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April, 1996.

SOUTO, O. C. N., Oliveira, J. C. e NETO, L. M. **Power Quality Impact on Thermal Behavior and Life Expectancy of a Three Phase Induction Motors**. The IEEE International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives, Gijon, Setembro, 1999.

STEVENSON, J.; WILLIAN, D. **Elements of Power System Analysis**. McGraw-Hill, 1962.

TOSTES, Maria Emília de Lima. **Avaliação dos Impactos Causados na Rede de Distribuição pela Geração de Harmônicos em Consumidores de Baixa Tensão**. Tese de Doutorado, PPGEE- Universidade Federal do Pará, dezembro de 2003.

TOSTES, Maria Emília de Lima; BEZERRA, Ubiratan Holanda; SILVA, Rogério Diogne de Souza; BRANCO, Tadeu da Mata M.; MOURA, Carminda Célia Moura de. **Fluxo De Carga Harmônico Trifásico Via Método Somatório De Corrente**. V SBQEE – Seminário Brasileiro sobre Qualidade da Energia Elétrica, 17 a 20 Agosto de 2003, Sergipe, Aracajú.

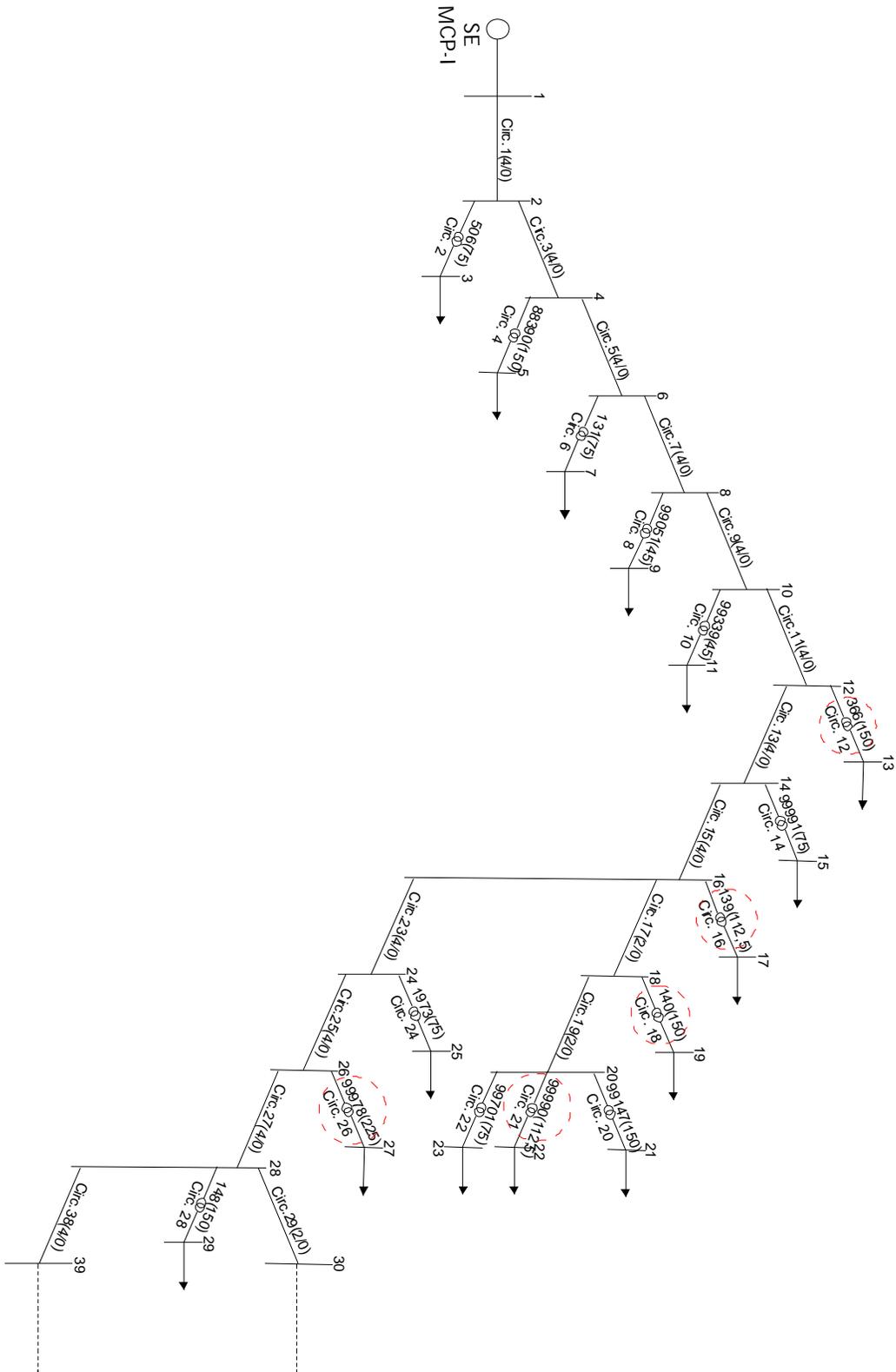
TOSTES, Maria Emília de Lima, BEZERRA, Ubiratan. Holanda; ; ARAUJO, Ana Cristina; TUPIASSÚ, Armando A. **Development of Experimental Models for Harmonic Representation of Low Voltage Customers**. Publicado nos Anais do IEEE Porto Power Tech 2001, setembro de 2001, Porto, Portugal.

TOSTES, Maria Emília de Lima; BEZERRA, Ubiratan Holanda; MOURA, Carminda Célia Moura de; VALENTE, Jorge Augusto Lima; SILVA, Rogério Diogne de Souza; BRANCO, Tadeu da Mata Medeiros. **Distributed Filtering of Harmonic Currents Produced by Low Voltage Customers**. Publicado nos Anais do V INDUSCON – Conferência de Aplicações Industriais, Salvador – BA, Brasil, 03 a 05 de agosto de 2002.

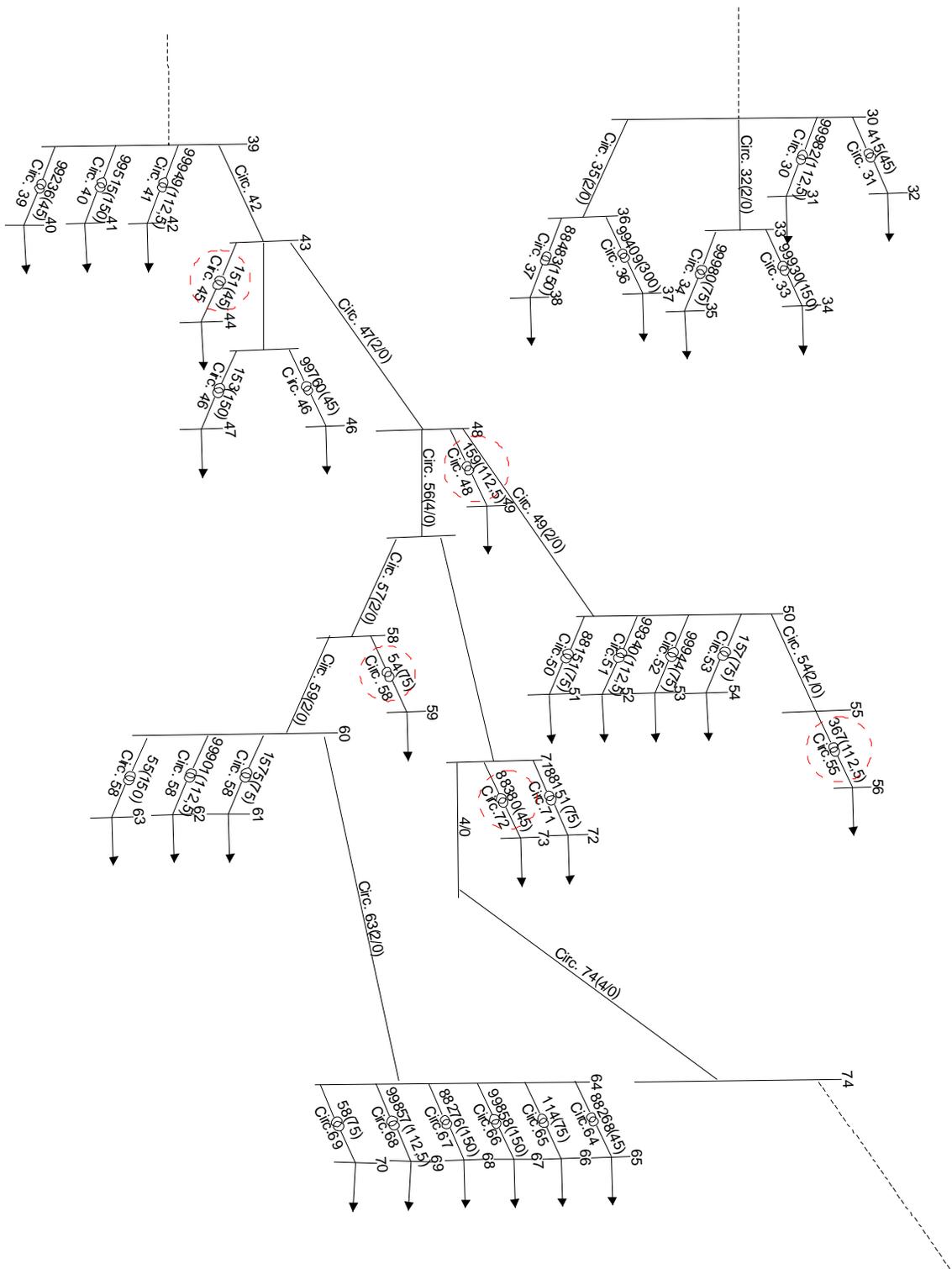
TOSTES, Maria Emília de Lima; BEZERRA, Ubiratan Holanda; MOURA, Carminda Célia Moura de; VALENTE, Jorge Augusto Lima; SILVA, Rogério Diogne de Souza; BRANCO, Tadeu da Mata Medeiros. **Impacts Over The Distribution Grid From The Adoption Of Distributed Harmonic Filters For Low Voltage Customers**. Publicado nos Anais do MED POWER 2002 – 3RD Mediterranean Conference and Exhibition on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion, 04-06 de Novembro de 2002, Athens, Greece.

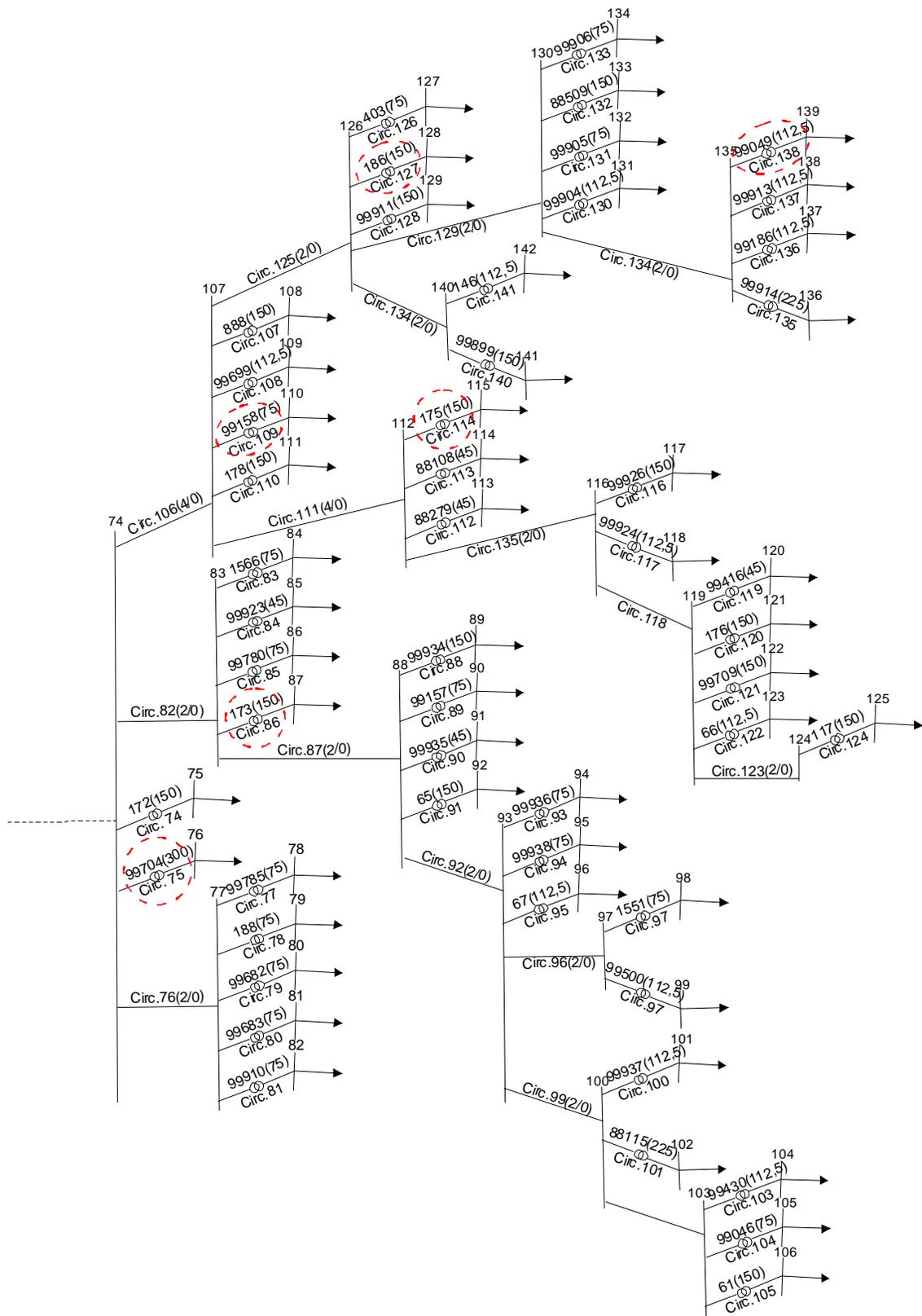
APÊNDICE

ALIMENTADORRE. JULIO EM CAMADAS



APÊNDICE 1.





Características Físicas e Elétricas de Condutores de Alumínio

Alumínio com Alma de Aço - CAA

Condutor AWG/MCM	Formação N° de Fios	Peso Nominal	Resistência 70° - 60 Hz	Reatância Indutiva (Ohm) / km			Corrente Admissível (A)
				e=1,693m	e=1,322m	e=0,800m	
4	6(1)	0,086	1,6397	0,5390	0,5204	0,4825	117
2	6(1)	0,136	1,0321	0,5425	0,5239	0,4860	158
2/0	6(1)	0,216	0,65	0,5379	0,5187	0,4314	212
4/0	6(1)	0,433	0,3258	0,4920	0,4734	0,4355	331
336,4	26(7)	0,687	0,2035	0,4093	0,3906	0,3528	451

Alumínio Simples – CA

Condutor AWG/MCM	Formação N° de Fios	Peso Nominal	Resistência 70° - 60 Hz	Reatância Indutiva (Ohm) / km					Corrente Admissível (A)
				e=1,693m	e=1,322m	e=0,800m	e=0,252m	e=0,200m	
4	7	0,058	1,6119	0,5035	0,4849	0,4470	0,3599	0,3425	116
2	7	0,092	1,0145	0,4759	0,4673	0,4294	0,3423	0,3249	155
1/0	7	0,145	0,6375	0,4685	0,4498	0,4119	0,3249	0,3074	210
4/0	7	0,293	0,3165	0,4421	0,4234	0,3856	0,2985	0,2810	328
336,4	19	0,467	0,2005	0,4205	0,4019	0,3656	0,2769	0,2595	444