

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Levantamento de Harmônicas em Redes
de Distribuição de uma Concessionária
de Energia



Leandro Mayron de Oliveira Pinto

João Pessoa-PB, Brasil
Novembro – 2016

LEANDRO MAYRON DE OLIVEIRA PINTO

**LEVANTAMENTO DE HARMÔNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE UMA
CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica - PPGEE, da
Universidade Federal da Paraíba - UFPB, como
requisito parcial para a obtenção do título de
Mestre em Engenharia Elétrica.**

**Orientador: Isaac Freitas Lucena
Camila Gehrke**

JOÃO PESSOA

2016

FICHA CATALOGRÁFICA

PINTO, Leandro Mayron de Oliveira

Levantamento de Harmônicas em redes de distribuição de uma concessionária de energia – João Pessoa-PB, 2016.

104 páginas

Área de concentração: Qualidade de Energia

Orientador: Prof. Dr. Isaac Soares de Freitas

Dissertação de Mestrado – PPGEE\CEAR\UFPB

1.Harmônica; 2. Qualidade de energia; 3. Energia

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA – UFPB
CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS – CEAR
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA - PPGEE**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a Dissertação

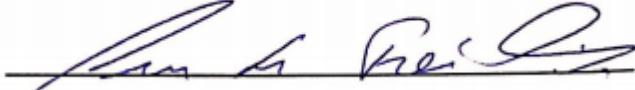
**LEVANTAMENTO DE HARMÔNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE UMA
CONCESSIONÁRIA DE ENERGIA**

Elaborado por

LEANDRO MAYRON DE OLIVEIRA PINTO

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica.

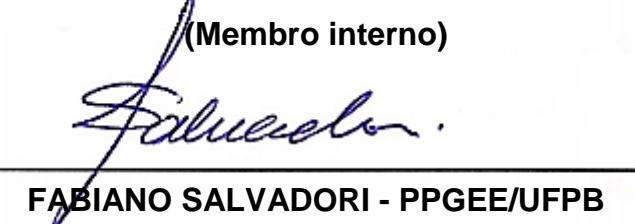
COMISSÃO EXAMINADORA


ISAAC SOARES DE FREITAS - PPGEE/UFPB

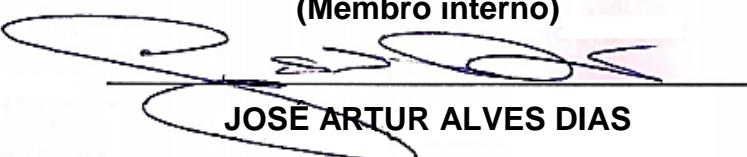
(Orientador)


CAMILA SEIBEL GEHRKE - PPGEE/UFPB

(Membro interno)


FABIANO SALVADORI - PPGEE/UFPB

(Membro interno)


JOSE ARTUR ALVES DIAS

(Membro externo)

João Pessoa/PB, ____ de ____ de ____.

Dedico este trabalho aqueles que sabem aproveitar instantes e transformá-los em eternidade; aqueles que não se cansam de buscas intermináveis e mais ainda, aqueles que nunca estão satisfeitos e querem sempre um pouco mais. Dedico a minha esposa Juliana Duarte pela cobrança constante...

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente a minha esposa amada, que me deu sempre forças para continuar mesmo quando muitas vezes pensei em desistir, quando reclamei por quase nada e sempre quis fazer de tudo. Quando juntos nos apoiávamos em tons de desafio e sempre incentivávamos o desenvolvimento pessoal um do outro.

Agradeço a minha família, meu bem maior, minha mãe, Lucimar, que com todo esforço e carinho me conduziu pelo caminho do bem e me fez construir um caráter sólido. Minhas irmãs, Luciana e Lilian, que desde meu nascimento cuidaram de mim e juntos partilhamos todas as alegrias e tristezas. Ao meu cunhado, Fábio, que me inspira serenidade e companheirismo.

Agradeço aos professores Issac e Camila, que me apoiaram e aceitaram o árduo trabalho de orientar um aluno que teve que conciliar o estudo pela ciência com a prática profissional.

Agradeço ao corpo docente e funcionários do PPGEE da UFPB que demonstraram muita paciência e compreensão com o meu “caso” em particular, sendo muito solícitos todas as vezes que necessitei de alguma informação ou algum documento.

Agradeço por fim a Deus, por permitir minhas escolhas e tentar sempre me mostrar qual o caminho correto a seguir. Obrigado pela família que me alocou, pelos amigos que me permitiu conquistar e pelas conquistas que me permitiu realizar.

Levantamento de Harmônicas em Redes de Distribuição de uma Concessionária de Energia

Resumo: Conhecer os distúrbios, originados dos consumidores, que acometem as redes de distribuição de uma concessionária de energia, bem como sua evolução até as subestações de energia, comparando, ainda, as medições com a literatura e as normas em exercício. Material e Método: Foram realizados três estágios de medições e análises, utilizando-se um analisador digital trifásico. Mediú-se o perfil de harmônicas em diferentes alimentadores de uma subestação, durante sete dias cada um, posteriormente realizou-se a mesma medição em uma única residência e em seguida, investigou-se, nessa mesma residência, os eletrodomésticos geradores de harmônicas. Resultados: Na primeira etapa, a medição dos alimentadores apresentou baixos THD's de tensão e corrente dentro dos limites em norma; já a residência unifamiliar apresentou THD máximo de tensão igual a 2,84 e um THD máximo de corrente de 28,7. Observou-se predominância das 3^a e 5^a harmônicas de tensão e das 3^a, 5^a e 7^a harmônicas de corrente, com alguns momentos de supremacia da 2^a harmônica. Investigando os eletrodomésticos, constatou-se que os de menor potência com fontes chaveadas introduzem a maior quantidade de harmônicas na rede. Conclusão: Os transformadores de distribuição filtram as harmônicas de baixa tensão, servindo como uma barreira para a média tensão, onde não foram detectadas harmônicas consideráveis. As medições revelam que em nenhum caso houve violação do THD de tensão, nem total nem individual, acima dos limites estabelecidos por norma. Contudo, o THD de corrente apresentou diversos momentos acima dos limites aceitáveis quando analisada a baixa tensão. O estudo demonstra que, na subestação de energia, as harmônicas dos consumidores não evoluem até a média/alta tensão.

Palavras-chaves : Harmônicas, Qualidade de Energia, Energia, Analisador trifásico.

Harmonic Survey on Distribution Network of Concessionaire Energy

Abstract: To know the disorders that affect the distribution networks originating from a power utility consumers and its evolution to the power substations, comparing measurements with literature and standards exercise. **Material and Methods:** We conducted three stages of measurement and analysis, using a three-phase digital analyzer, was measured the harmonic profile in different feeders of a substation for seven days each, then held the same measurement in a single residence and then this residence investigated the generators appliance harmonics. **Results:** In the first step, measuring feeders, they had low THD's voltage and current within the limits of standard, single-family residence already had maximum voltage THD equal to 2.84 and a maximum THD current 28.7. There was predominance of 3rd and 5th harmonic voltage and the 3rd, 5th and 7th harmonic current, with a few moments of supremacy of the 2nd harmonic. Investigating the appliance, the less power with switching power supplies introduces the greatest amount of harmonics on the network. **Conclusion:** distribution transformers filter low voltage harmonics, serving as a barrier to the medium voltage, which were not detected significant harmonics. The measurements reveal that in any case there was a violation of the voltage THD, in either whole or individual above the limits established by regulation, yet for the current THD presented several times above acceptable limits when analyzing the low voltage. The study shows that for power substation harmonic consumers do not evolve to the middle / high voltage.

Keywords : Harmonics, power quality, energy, three-phase analyzer.

“Os únicos limites das nossas realizações de amanhã são as dúvidas e hesitações de hoje.”

Franklin D. Roosevelt

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	11
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE ABREVIACÕES E SIGLAS	14
1 INTRODUÇÃO.....	16
1.1 SETOR DE ENERGIA E HARMÔNICAS CRESCEM LADO A LADO.....	16
1.2 OBJETIVO.....	19
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	22
2.1 DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO.....	22
2.1.1 VARIAÇÃO DE TENSÃO DE CURTA DURAÇÃO (VTCD) E VARIAÇÃO DE TENSÃO DE LONGA DURAÇÃO (VTLD).....	22
2.1.2 TRANSITÓRIOS	24
2.1.3 DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO.....	25
2.1.4 DISTORÇÕES DE FORMA DE ONDA	26
2.1.5 OSCILAÇÕES DE TENSÃO	27
2.1.6 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA DO SISTEMA	27
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE UM SINAL HARMÔNICO	28
2.3 DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD)	29
2.4 ESTADO DA ARTE	30
2.5 VISÃO DO ÓRGÃO REGULADOR SOBRE A QUALIDADE DE ENERGIA FORNECIDA	34
2.5.1 NORMA IEEE STD. 519.....	35
2.5.2 PRODIST. MÓDULO 8 – QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA ANEEL (2010)	36
2.5.3 RELATÓRIO DE ANÁLISE DAS CONTRIBUIÇÕES REFERENTE À CONSULTA PÚBLICA Nº 005/2011	38
3 MATERIAL E MÉTODO	41
3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS	41
3.2 MÉTODO DE AQUISIÇÃO.....	43
3.3 ANÁLISE DOS DADOS.....	47
4 RESULTADOS	50
4.1 ALIMENTADOR RESIDENCIAL.....	50
4.2 ALIMENTADOR INDUSTRIAL	55
4.3 ALIMENTADOR COMERCIAL	60

4.4	RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR	65
4.5	CARACTERIZAÇÃO INDIVIDUAL POR EQUIPAMENTO GERADOR DE HARMÔNICA	73
4.5.1	CONDICIONADOR DE AR.....	74
4.5.2	GELADEIRA.....	75
4.5.3	MICRO-ONDAS	77
4.5.4	TELEVISOR LED	78
4.5.5	CARREGADOR DE CELULAR	80
4.5.6	NOTEBOOK.....	81
4.5.7	VENTILADOR	83
4.5.8	GELÁGUA	84
4.5.9	MÁQUINA DE Lavar ROUPA	86
4.5.10	LÂMPADA COMPACTA ELETRÔNICA	87
5	DISCUSSÃO.....	91
6	CONCLUSÕES.....	96
	REFERÊNCIAS.....	99
ANEXO 1 -	NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO	102
ANEXO 2 -	DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO MANGABEIRA.....	104
ANEXO 3 -	SIMULAÇÃO NO PSIM DE HARMÔNICAS EM TRANSFORMADOR.....	104

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE ENERGIA	22
FIGURA 2 - TRANSITÓRIO OSCILATÓRIO.....	25
FIGURA 3 - SISTEMA COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS	26
FIGURA 4 - FORMA DE ONDA DE UM COMPUTADOR COM E SEM HARMÔNICAS	32
FIGURA 5 - OSCILOSCÓPIO KEYSIGHT DSO-X 2014A	41
FIGURA 6 - ANALISADOR DE ENERGIA FLUKE 434 SÉRIE II	42
FIGURA 7 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO PARA MEDAÇÃO TRÍFASICA EM RELIGADOR COOPER ESV-1516.....	44
FIGURA 8 - RELIGADOR COOPER EM SUBESTAÇÃO.....	45
FIGURA 9 - ANALISADOR INSTALADO EM RELIGADOR.....	45
FIGURA 10 - ANALISADOR INSTALADO EM APARTAMENTO RESIDENCIAL .	46
FIGURA 11 - PINÇAS DE TENSÃO E CORRENTE NO QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO GERAL.....	46
FIGURA 12 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO PARA MEDAÇÃO DE CARGA MONOFÁSICA.....	47
FIGURA 13 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO E CORRENTE ALIMENTADOR RESIDENCIAL	52
FIGURA 14 - THD V – ALIMENTADOR RESIDENCIAL.....	53
FIGURA 15 - THD A – ALIMENTADOR RESIDENCIAL	53
FIGURA 16 - THD V X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR RESIDENCIAL	54
FIGURA 17 - THD A X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR RESIDENCIAL	54
FIGURA 18 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO E CORRENTE ALIMENTADOR INDUSTRIAL	57
FIGURA 19 - THD V – ALIMENTADOR INDUSTRIAL	58
FIGURA 20 - THD A – ALIMENTADOR INDUSTRIAL	58
FIGURA 21 - THD V X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR INDUSTRIAL.....	59
FIGURA 22 - THD A X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR INDUSTRIAL.....	59
FIGURA 23 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO E CORRENTE ALIMENTADOR COMERCIAL	62
FIGURA 24 - THD V – ALIMENTADOR COMERCIAL	63
FIGURA 25 - THD A – ALIMENTADOR COMERCIAL	63
FIGURA 26 - THD V X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR COMERCIAL.....	64
FIGURA 27 - THD A X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR COMERCIAL.....	64

FIGURA 28 - CORRENTE MÁXIMA NA RESIDÊNCIA DURANTE O PERÍODO...	66
FIGURA 29 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO COINCIDENTES	69
FIGURA 30 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO NO MOMENTO DE THD TOTAL MÁXIMO	69
FIGURA 31 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE CORRENTE COINCIDENTES....	70
FIGURA 32 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE CORRENTE EM MOMENTO MAIORES INFRAÇÕES POR HARMÔNICAS PARES.....	71
FIGURA 33 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE CORRENTE EM MOMENTO MAIORES INFRAÇÕES POR HARMÔNICAS IMPARES.....	72
FIGURA 34 - EVOLUÇÃO DOS THD'S NO TEMPO	72
FIGURA 35 - FORMAS DE ONDA DE UM CONDICIONADOR DE AR	74
FIGURA 36 - FFT DE UM CONDICIONADOR DE AR.....	75
FIGURA 37 - FORMAS DE ONDA DE UMA GELADEIRA.....	76
FIGURA 38 - FFT DE UMA GELADEIRA	76
FIGURA 39 - FORMAS DE ONDA DE UM MICROONDAS.....	77
FIGURA 40 - FFT DE UM MICROONDAS	78
FIGURA 41 - FORMAS DE ONDA DE UM TELEVISOR LED	79
FIGURA 42 - FFT DE UM TELEVISOR LED.....	79
FIGURA 43 - FORMAS DE ONDA DE UM CARREGADOR DE CELULAR.....	80
FIGURA 44 - FFT DE UM CARREGADOR DE CELULAR	81
FIGURA 45 - FORMAS DE ONDA DE UM NOTEBOOK	82
FIGURA 46 - FFT DE UM NOTEBOOK	82
FIGURA 47 - FORMAS DE ONDA DE UM VENTILADOR	83
FIGURA 48 - FFT DE UM VENTILADOR.....	84
FIGURA 49 - FORMAS DE ONDA DE UM GELÁGUA.....	85
FIGURA 50 - FFT DE UM GELÁGUA	85
FIGURA 51 - FORMAS DE ONDA DE UMA MÁQUINA DE LAVAR ROUPA.....	86
FIGURA 52 - FFT DE UMA MÁQUINA DE LAVAR ROUPA	87
FIGURA 53 - FORMAS DE ONDA DE UMA LÂMPADA COMPACTA ELETRÔNICA.....	88
FIGURA 54 - FFT DE UMA LÂMPADA COMPACTA ELETRÔNICA.....	88
FIGURA 55 - COMPARAÇÃO THD V ALTA BAIXA TRANSFORMADOR	91
FIGURA 56 - COMPARAÇÃO THD A ALTA BAIXA TRANSFORMADOR.....	92
FIGURA 56 - SIMULAÇÃO DE HARMÔNICAS EM UM TRANSFORMADOR.....	92

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DA ANEEL PARA VARIAÇÃO DE TENSÃO	23
TABELA 2 - LIMITES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO PELA IEEE STD 519.....	35
TABELA 3 - LIMITES DE DISTORÇÃO DE CORRENTE PELA IEEE STD 519...36	
TABELA 4 - LIMITES DE DISTORÇÃO TOTAL DE TENSÃO PELO PRODIST MÓDULO 8	36
TABELA 5 - LIMITES DE DISTORÇÃO INDIVIDUAL DE TENSÃO PELO PRODIST MÓDULO 8	37
TABELA 6 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO ALIMENTADOR RESIDENCIAL.....	50
TABELA 7 - VALORES MÁXIMOS NÃO COINCIDENTES DE THD INDIVIDUAL DE TENSÃO E CORRENTE DE ALIMENTADOR RESIDENCIAL.....	51
TABELA 8 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO ALIMENTADOR INDUSTRIAL	55
TABELA 9 - VALORES MÁXIMOS NÃO COINCIDENTES DE THD INDIVIDUAL DE TENSÃO E CORRENTE DE ALIMENTADOR INDUSTRIAL	56
TABELA 10 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO ALIMENTADOR COMERCIAL	60
TABELA 11 - VALORES MÁXIMOS NÃO COINCIDENTES DE THD INDIVIDUAL DE TENSÃO E CORRENTE DE ALIMENTADOR COMERCIAL	61
TABELA 12 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO PROJETO PILOTO	65
TABELA 13 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO PROJETO PILOTO	67
TABELA 14 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO - MEDAÇÃO X LIMITE..	68
TABELA 15 - RESUMO DOS ELETRODOMÉSTICOS DA RESIDÊNCIA.....	73

LISTA DE ABREVIASÕES E SIGLAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CC - Corrente Contínua

DNAEE - Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica

IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

IEC - International Electrotechnical Commission

NBR - Norma Brasileira

ONS - Operador Nacional do Sistema

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

QEE - Qualidade da Energia Elétrica

RMS - Root Mean Square

TP - Transformador de Potencial

VTCD - Variação de Tensão de Curta Duração

VTLD - Variação de Tensão de Longa Duração

THD – Distorção Harmônica Total

PST – Short-term probability

PLT – Long term probability

Icc – Corrente de curto circuito

1 INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 SETOR DE ENERGIA E HARMÔNICAS CRESCEM LADO A LADO

A energia elétrica nos dias atuais é considerada um bem essencial, da qual a população necessita não apenas para seu conforto, como se pensava décadas atrás, mas para realização das tarefas vitais da sociedade, como setores de produção, mobilidade urbana, educação, agricultura e saúde.

Ao longo dos anos, muitos investimentos foram realizados na área de energia elétrica, entretanto também houve mudanças no perfil de consumo e nas características dos consumidores. Décadas atrás os consumidores residenciais eram considerados cargas puramente resistivas, onde seus maiores gastos eram com chuveiro elétrico, ferro de passar e geladeira. Hoje, independentemente da classe, cada residência possui diversas televisões, computadores, micro-ondas, condicionadores de ar, e tantas outras cargas não-lineares que distorcem as formas de onda de tensão e corrente e introduzem distúrbios na rede.

A maioria das cargas que causam tais deformações nas formas de onda de tensão ou corrente são, como já mencionados, elementos não lineares, os quais podem ser em menor número, mas de grande potência, motores, geradores, fornos a arco voltaico, grupos retificadores; ou em grande quantidade, mas de baixa potência computadores, lâmpadas fluorescentes, eletrodomésticos (TAVARES, 2008). Percebe-se assim, que tais equipamentos estão presentes em todo o sistema elétrico, constantemente provocando distorções nas formas de ondas de tensão (ou corrente) e acarretando efeitos indesejáveis, que serão expostos no decorrer deste trabalho.

Nos dias atuais, as perturbações elétricas no sistema de energia são uma grande preocupação na área de qualidade de energia. Para uma distribuidora de energia, existem diversas perturbações que podem ocorrer ao sistema, entre elas: variação de tensão de curta ou longa duração, variação de frequência, transitórios, distorções da forma de onda de tensão, desequilíbrio ou oscilação de tensão. Cada uma dessas perturbações será melhor definida e explicitada no capítulo 2 desse trabalho.

A qualidade dessa energia (tanto fornecida, quanto consumida) vem sendo cada vez mais discutida no contexto global, onde o continente europeu é a maior

referência nessa busca incessante pela qualidade. Franco (2013) define um problema de qualidade de energia como: “qualquer problema de energia manifestado na tensão ou corrente ou nas variações de frequência que resulte em falha ou má operação de equipamentos de consumidores”.

No contexto atual da distribuição de energia no Brasil, apesar dos enormes investimentos na ampliação do sistema elétrico, da expansão de redes e do aumento da capacidade de geração e transmissão de potência; poucas distribuidoras de energia investem na qualidade dessa energia fornecida. Uma pequena interrupção do fornecimento de poucos minutos pode representar compensações de centenas de milhares de reais a fábricas e outros consumidores, entretanto, com exceção do nível de tensão, a legislação brasileira não prevê multas ou compensações quando a qualidade da energia fornecida não estiver adequada. Na conjuntura econômica atual, apenas quando houver interferência no retorno financeiro das empresas é que a atenção mudará do foco continuidade e o sistema elétrico irá evoluir na vertente da qualidade.

Toda distribuidora de energia do Brasil, independente de tamanho ou quantidade de clientes, é fiscalizada pelo órgão regulador nacional ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Tal órgão possui diversas diretrizes que as distribuidoras devem seguir, por exemplo, os módulos do PRODIST (Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) que “são documentos elaborados pela ANEEL e normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas a funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica” e a Resolução Normativa nº414/2010 que trata dos direitos e deveres do consumidor de energia elétrica. Será tratado em um capítulo à parte, como a reguladora ANEEL se fundamenta e o que ela exige da qualidade de energia fornecida pelas distribuidoras de energia.

Em relação às perturbações, uma silenciosa e muitas vezes oculta, são as harmônicas. As harmônicas são extremamente danosas ao sistema elétrico, uma vez que elas aumentam as perdas por efeito joule, causam sobreaquecimento nos condutores, provocam mal funcionamento de equipamentos, reduzem a vida útil, provocam aumento do ruído, geram perda do torque em motores, levam a saturação de núcleos de transformadores, promovem desequilíbrios de correntes, entre outros efeitos indesejáveis. Diante disso, esse trabalho investigará esses sinais contendo

harmônicas em busca de compreender seu comportamento no domínio da frequência, bem como conhecer como suas manifestações evoluem desde os consumidores finais de uma distribuidora de energia elétrica até suas respectivas subestações.

No passado, não se havia maiores preocupações com as harmônicas, apesar de conhecer sua existência, não havia um estudo detalhado de suas consequências. Além disso, cargas com características não lineares eram pouco utilizadas e os equipamentos eram mais resistentes (na verdade, menos sensíveis) aos efeitos provocados por harmônicas. Entretanto, nos últimos anos, com o rápido desenvolvimento da eletrônica de potência e a utilização de métodos que buscam o uso mais racional da energia elétrica, o conteúdo harmônico presente nos sistemas tem crescido exponencialmente, o que tem causado uma série de efeitos indesejáveis em diversos equipamentos, comprometendo a qualidade e o próprio uso da energia elétrica.

Uma tensão ou corrente harmônica pode ser definida como um sinal senoidal cuja frequência é múltiplo inteiro da frequência fundamental do sinal de alimentação, o que provoca deformações nas formas de onda presente (CHAMPMAN, 2002). Sendo assim, utilizando o conceito de Fourier, toda função periódica não senoidal pode ser representada por uma soma de termos senoidais; o primeiro desses termos seria a fundamental e os outros seriam as harmônicas. (TAVARES, 2008)

Este trabalho visa confrontar os aspectos teóricos do tema, observados em outros trabalhos na maioria das vezes de forma computacional, ou minimalista do ponto de vista de restrição da carga analisada, com um estudo prático apresentado em três níveis: subestações abajadoras de uma concessionária de energia, cliente em residência unifamiliar e eletrodomésticos individualmente analisados, percorrendo uma grande diversidade de cargas analisadas.

Por meio de medições reais em campo, aliado a comparação da distribuição eletro-geográfica desses pontos de medição, este trabalho se propõe a observar como as harmônicas geradas por cargas não-lineares se dispersam ao longo do sistema elétrico (dos clientes, passando pelos alimentadores até as subestações de energia) e identificar qual o impacto destas para as variantes do sistema.

Para obter a aquisição de dados, iniciou-se as medições de tensão e corrente em uma subestação de distribuição de energia, em seguida realizou-se as medições de uma residência familiar, em busca das distorções harmônicas provocadas pelos

aparelhos domésticos comuns, e, por fim, a investigação individual desses eletrodomésticos. Os resultados serão exibidos ao longo do capítulo 4 dessa dissertação.

As medições mencionadas foram realizadas no sistema da empresa que é detentora do direito de concessão do fornecimento de energia elétrica do Estado da Paraíba. Devido a um grande número de possibilidades, e após análise das medições de três diferentes tipos de alimentadores (residencial, industrial e comercial), foi escolhido o alimentador residencial para aprofundamento do levantamento, por apresentar os resultados mais regulares que os demais alimentadores pesquisados. Com a definição do tipo de alimentador, em razão do grande número de opções possíveis, foi avaliado um cliente típico desse alimentador e, em seguida, identificadas as fontes geradoras das harmônicas inicialmente encontradas.

Como já explanado, no estudo em questão, busca-se correlacionar desde a subestação de energia até o consumidor final como ocorre a evolução das harmônicas na rede, e quais as precauções, ou não, que tanto o cliente quanto a concessionária devem tomar no caso de grandes distorções da qualidade de energia.

No decorrer dessa dissertação, será abordado, inicialmente, o estado da arte sobre o tema de harmônicas e qualidade de energia em geral. No segundo capítulo, será explanado sobre as legislações e normas vigentes aplicadas ao mercado de energia elétrica. A metodologia a ser implementada para aquisição dos dados será apresentada no terceiro capítulo. No quarto capítulo, será evidenciada uma análise criteriosa dos dados obtidos, seguida pela explanação dos resultados e comparações possíveis entre teoria e prática. Por fim, a conclusão ressaltará os pontos relevantes desse trabalho, sugestões de continuidades dos estudos, inclusões de normas reguladoras e uma visão futura da qualidade de energia no Brasil.

1.2 OBJETIVO

A pesquisa em questão visa investigar os distúrbios que acometem as redes de distribuição de uma concessionária de energia, sendo estes originados dos consumidores, e sua evolução até as subestações de energia.

Espera-se detectar as principais harmônicas existentes nos alimentadores e, ao confrontar com a literatura, confirmar a presença ativa das 3^a, 5^a e 7^a harmônicas tanto de tensão como de corrente.

Especificamente, pretende-se ainda verificar se os resultados encontrados estão dentro dos limites estabelecidos pelas normas vigentes, tanto o PRODIST quanto a IEEE 5419, e identificar se há ou não transgressões ocorridas no sistema de baixa e média tensão.

Por último, a depender dos resultados encontrados, pode ser sugerido a concessionária o monitoramento de outros pontos do sistema diferente dos utilizados e uma provável vigilância constante, e não esporádica, dos distúrbios de qualidade de energia; podendo envolver também a revisão das normas em exercício ou a criação de novas normas, caso seja necessário.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2 REVISÃO DE LITERATURA

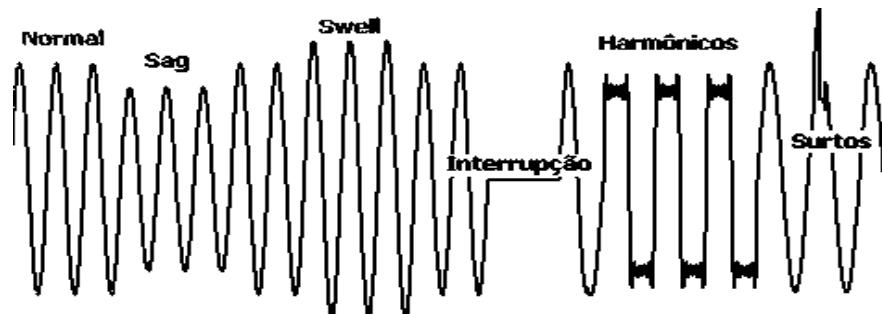
Com o intuito de embasar esse trabalho, será exposta a seguir uma breve explicação acerca dos conceitos que serão tratados ao longo dessa dissertação e, em seguida, o estado da arte sobre o tema harmônica, com as principais observações dos diversos trabalhos científicos estudados para compor essa revisão de literatura.

2.1 DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO

Os distúrbios no sistema elétrico podem ser acometidos na tensão, na corrente, na frequência, ou combinados entre si. Alguns são perceptíveis pelos consumidores (flicker, afundamento de tensão ou interrupções), enquanto outros passam despercebidos pelos usuários, mas não pelos equipamentos ou sistemas de medição de qualidade (harmônicas, transitórios e variação de frequência).

Alguns dos distúrbios mais comuns, e também mais enfrentados pelas concessionárias de energia, são apresentados na Figura 1:

FIGURA 1 - DISTÚRBIOS EM SISTEMAS DE ENERGIA



Fonte: Qualidade de energia – Causas, efeitos e soluções – Edgard Franco

2.1.1 Variação de Tensão De Curta Duração (VTCD) e Variação de Tensão de Longa Duração (VTLD)

As VTCD's e VTLD's podem ser instantâneas, momentâneas ou temporárias. Na Energisa, concessionária de energia onde a pesquisa foi realizada, por exemplo, ocorre quando parte da rede básica é conectada ou desconectada do sistema com a entrada ou a perda de um transformador ou linha de 230kV. As mais conhecidas são o "Sag" e o "Swell".

A IEEE 1159-1195 define “Sag” como uma redução de 10% a 90% do valor eficaz da tensão ou corrente na frequência nominal, com duração de meio ciclo a um minuto. Já o “Swell” é definido como elevações entre 10% e 80% do valor eficaz da tensão ou corrente na frequência nominal, com duração de meio ciclo a um minuto.

Os efeitos de um “Sag” geralmente são mais visíveis do que os de “Swell”. Um “Sag” de duração maior que três ciclos é geralmente visto como o piscar de iluminação. Equipamentos mais sensíveis, como computadores, podem travar ou mesmo perder informações armazenadas.

Já os efeitos do ‘Swell’ são mais danosos aos equipamentos, visto que sobretensões podem danificar permanentemente os aparelhos causando maiores riscos a pessoas e equipamentos.

Tais distúrbios podem ocorrer devido a manobras no sistema de alta tensão, como já mencionado, mas também causados por descargas atmosféricas, curtos-circuitos ou falhas na rede de distribuição ou transmissão.

A ANEEL classifica as variações de tensão de uma forma diferente da IEEE, conforme exemplificado na Tabela 1:

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DA ANEEL PARA VARIAÇÃO DE TENSÃO

Classificação	Denominação	Duração da Variação	Amplitude da tensão (valor eficaz) em relação à tensão de referência
Variação Momentânea de Tensão	Interrupção Momentânea de Tensão	Inferior ou igual a três segundos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Momentâneo de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Momentânea de Tensão	Superior ou igual a um ciclo e inferior ou igual a três segundos	Superior a 1,1 p.u
Variação Temporária de Tensão	Interrupção Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Inferior a 0,1 p.u
	Afundamento Temporário de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior ou igual a 0,1 e inferior a 0,9 p.u
	Elevação Temporária de Tensão	Superior a três segundos e inferior a três minutos	Superior a 1,1 p.u

A Nota Técnica nº 0029/2011-SRD/ANEEL, de 30/06/2011, estabelece que a diferença entre uma VTCD e uma VTLD é a duração do distúrbio, quando a primeira é inferior a três minutos e a segunda superior a três minutos.

2.1.2 TRANSITÓRIOS

Franco (2013) entende que: “os transitórios são fenômenos eletromagnéticos oriundos de alterações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica”. Os transitórios possuem uma duração muito pequena, entretanto, podem acarretar efeitos destruidores quando impõem equipamentos a altos módulos de tensão e/ou corrente, podendo acarretar a explosão desses aparelhos.

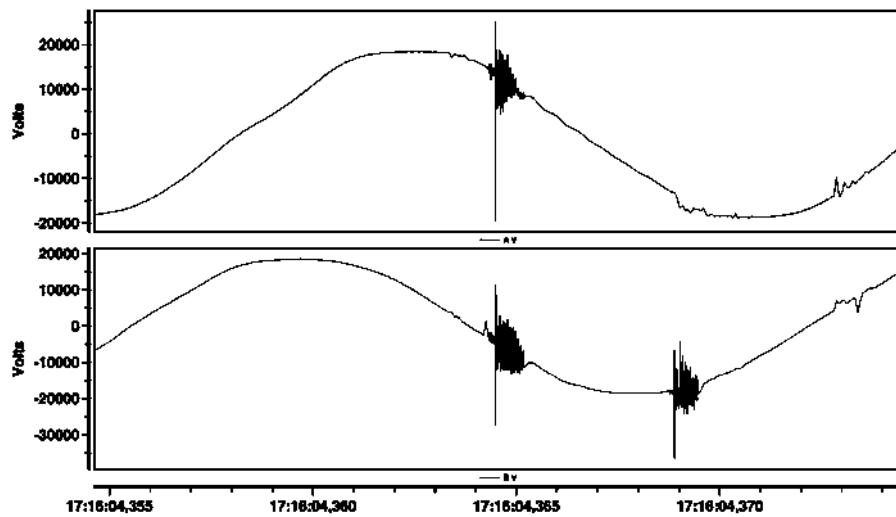
Os transitórios podem ser impulsivos, quando causados por descargas atmosféricas ou oscilatórios, bem como ocasionados por chaveamento na rede ou energização de bancos capacitores e transformadores.

Normalmente os impulsos transitórios são rapidamente amortecidos pelo sistema devido sua alta frequência. Já nos oscilatórios de baixa e média frequência o sistema leva um tempo maior para amortecê-lo. (Paulilo, Teixeira, Bacca, 2013)

Em 2014, a Energisa Paraíba enfrentou seu primeiro grave problema de ferroressonância, quando um Transformador de Potencial em série com um Transformador de Força de 138kV induziu tensões da ordem de 2pu sobre o equipamento, a uma frequência de 30KHz, acarretando em várias falhas e desligamentos. A ferroressonância é um fenômeno caracterizado por sobretensões e formas de ondas irregulares e está associado com a excitação de uma ou mais indutâncias por meio de uma capacidade série.

A Figura 2 representa um exemplo de transitorio causado pela energização de um banco de capacitores.

FIGURA 2 - TRANSITÓRIO OSCILATÓRIO



Fonte: Transientes – Electric Service em: <http://www.electricservice.com.br/transientes>

2.1.3 DESEQUILIBRIO DE TENSÃO

O desequilíbrio de tensão é muito comum em distribuidoras de energia, normalmente são causados pela má distribuição de cargas monofásicas. Em um sistema trifásico ideal, as fases deveriam possuir mesmo módulo defasadas 120° entre si; entretanto, na realidade pode ocorrer tanto distinção nos módulos das fases quanto defasagem angular diferente de 120° .

Um agravante ao desequilíbrio de tensão é o avanço na instalação de redes monofílares com retorno pela terra, conhecidas como MRT's. Segundo Ribeiro (1993) tais redes utilizam apenas um condutor fase em 13,8KV para levar energia, normalmente a comunidades rurais ou clientes isolados onde não se justificam financeiramente a extensão de uma rede trifásica; e tem seu neutro “solidamente” aterrado, o que promove o retorno da corrente pela terra. Em alimentadores onde existem diversas derivações em MRT's, devido esforço em gestão e planejamento, se torna praticamente impossível promover um bom balanceamento de fases, o que causa desequilíbrios na tensão.

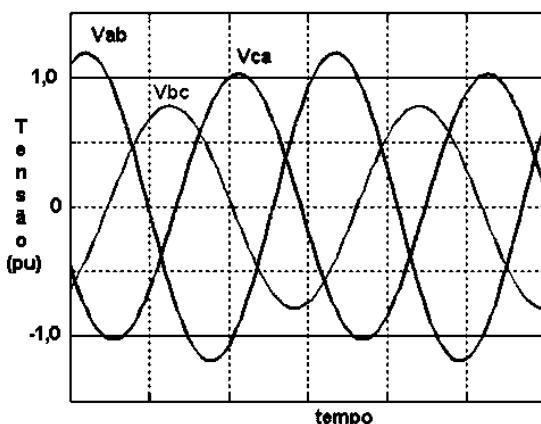
O fator de desequilíbrio utilizado pela ANEEL pode ser mensurado pela razão entre a magnitude da tensão de sequência negativa e a magnitude da tensão de sequência positiva. O módulo 8 do PRODIST determina que: “o valor de referência para o desequilíbrio de tensão nos barramentos do sistema de distribuição, com

exceção da baixa tensão, deve ser igual ou inferior a 2%. Tal valor deve ser adotado para o planejamento do sistema elétrico em termos de qualidade da energia elétrica".

A maioria dos usuários domésticos contribui com o desequilíbrio de tensão, mesmo que não afetados por ele, quando a concessionária distribui os clientes monofásicos de forma desordenada e sem planejamento prévio. O desequilíbrio de tensão é prejudicial para motores de indução e máquinas síncronas quando aumentam as perdas e reduzem a vida útil do equipamento, e também para retificadores, quando estes trabalham com tensões desequilibradas gerando 3^a harmônica e seus múltiplos, o que acarreta a manifestação de ressonâncias indesejadas.

A Figura 3 representa um sistema onde ocorre desequilíbrio de tensão majoritariamente na fase A:

FIGURA 3 - SISTEMA COM TENSÕES DESEQUILIBRADAS



Fonte: Disponível em: <http://qualidadedaenergia.blogspot.com.br/2014/10/o-desequilibrio-de-tensao-e-o-prodist.html>

2.1.4 DISTORÇÕES DE FORMA DE ONDA

A distorção da forma de onda é definida como um desvio em regime permanente, da forma de onda puramente senoidal, na frequência fundamental, e caracterizada principalmente pelo seu conteúdo espectral (FRANCO, 2013).

As distorções mais comuns são as harmônicas e as inter-harmônicas. As harmônicas como já informado, são componentes múltiplos da frequência fundamental da onda. Quando uma carga não-linear drena corrente do sistema de geração de energia, o fluxo de corrente passa por toda a impedância do sistema da rede elétrica. As correntes não-senoidais simétricas dos modernos dispositivos

eletroeletrônicos produzem harmônicas ímpares que somadas à senóide original produzem distorções. Retificadores de meia onda, mesmo que menos frequentemente, também são capazes de gerar harmônicas pares, encontrados nas formas de ondas assimétricas.

As inter-harmônicas são diferenciadas das harmônicas de rede por possuírem frequência múltiplas não-inteiras da fundamental. As inter-harmônicas são provocadas pela presença na rede de circuitos cicloconversores, filtros ativos, drivers lineares de motores ou dispositivos à base de arco voltaico.

As harmônicas são hoje, entre todos os distúrbios da rede, as que mais contribuem para deteriorar a qualidade da energia elétrica, as quais serão melhor detalhadas no decorrer dessa dissertação.

2.1.5 OSCILAÇÕES DE TENSÃO

As oscilações de tensão, ou flutuações de tensão, são oscilações decorrentes de cargas variáveis, principalmente aquelas que provocam variações contínuas e rápidas na magnitude da corrente de carga.

Tais flutuações, segundo o PRODIST, são classificadas em aleatórias, repetitivas ou esporádicas. Elas representam uma variação sistemática de +/-5% dos valores eficazes de tensão de suprimento.

As oscilações no sistema elétrico provocam queda de rendimento dos equipamentos, interferências nos sistemas de proteção, oscilações de potência e torque das máquinas elétricas, bem como o conhecido efeito “flicker” ou cintilação luminosa (FRANCO, 2013).

2.1.6 VARIAÇÃO DE FREQUÊNCIA DO SISTEMA

A variação de frequência do sistema ocorre quando há divergências entre seus valores e os valores da frequência fundamental. Segundo as normas IEC 61000-2-2, são aceitáveis variações de até +/- 1Hz, variações fora desses limites são relativamente raras e são atribuídas a grandes faltas na rede básico do sistema de transmissão.

Apesar de raro, esse distúrbio possui efeitos de grandes proporções. O Esquema Regional de Alívio de Carga – ERAC é um Sistema Especial de Proteção (SEP) específico de corte de carga por subfrequência e/ou taxa de variação de frequência. Os grandes blecautes que aconteceram nos últimos anos ocorreram por falhas no sistema de transmissão, o que desencadeou variações na frequência da rede e, devido à proteção do ERAC, houve corte na carga para evitar blecautes ainda maiores.

2.2 CARACTERIZAÇÃO DE UM SINAL HARMÔNICO

Entre os distúrbios de qualidade de energia que acometem o sistema elétrico, será enfatizado as harmônicas por se esse o objetivo do referido trabalho. Como já explanado na introdução, um sinal harmônico é aquele que possui componentes cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental da onda. Por exemplo, para uma onda senoidal a frequência de 60Hz, suas harmônicas possuirão frequência de 120Hz, 180Hz, 240Hz, etc. Essa noção de harmônicas se aplica a todos os fenômenos periódicos, independentemente de sua natureza, e particularmente para as tensões e correntes CA.

Uma das formas de se caracterizar o sinal harmônico é por meio da fórmula de Fourier apresentada na Equação 1:

$$v(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - n\phi) \quad (1)$$

Onde:

- Y_0 = valor da componente CC, geralmente nulo;
- Y_n = valor eficaz da componente harmônica de ordem “n”;
- ω = frequência angular da componente fundamental;
- ϕ_n = defasagem da componente harmônica de ordem “n”;

Não se consegue determinar com precisão a quantidade de harmônicas presentes em um sinal distorcido, entretanto, como a amplitude das harmônicas decresce com os múltiplos da fundamental, normalmente somente as primeiras

causam danos ao sinal, enquanto as de altas frequências possuem amplitudes muito baixas e podem ser desconsideradas.

Surge assim a questão de quantas harmônicas devem ser consideradas em uma análise: alguns autores estipulam até a 17^a harmônica, outros sugerem considerar 40 múltiplos da fundamental e outros apenas até a 11^a harmônica. Considerando as normas, têm-se aquelas que estabelecem limites de distorção como, por exemplo: a Norma IEEE Std. 519 que considera até a 35^a harmônica; a Norma IEC 61000-3-2 que considera até a 39^a harmônica; e o módulo 8 do PRODIST da ANEEL que considera apenas até a 25^a harmônica.

2.3 DISTORÇÃO HARMÔNICA TOTAL (THD)

A distorção harmônica total (THD) pode ser definida como um parâmetro que mensura o quanto deformado está um sinal quando comparado com seu valor senoidal, ou seja, é possível atribuir um valor percentual de distorção do sinal analisado. Dessa forma, referência em qualidade de energia estabeleceram limites de distorções harmônicas aceitáveis (de 3 a 5%) e “exprime de uma maneira geral a capacidade que os equipamentos elétricos e eletrônicos têm de suportar os níveis de harmônicas sem degradação ou falha prematura” (ENGEMATEC, sem ano).

A fórmula de cálculo desse percentual é revelada na Equação 2 abaixo:

$$\text{THD}(\%) = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{n=\infty} Y_n^2}}{Y_1} \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

- Y_n é a componente de ordem harmônica (>1);
- Y_1 é a componente fundamental;

Observa-se que se não existirem harmônicas no sinal analisado, a THD será igual a zero, sendo assim, quanto menor a THD de um sinal melhor para o sistema.

O módulo 8 do PRODIST nomeia THD de tensão como DTT (Distorção Harmônica Total de Tensão).

2.4 ESTADO DA ARTE

O subcapítulo de estado da arte tem o objetivo de evidenciar como se apresenta a literatura atual no que diz respeito ao estudo das harmônicas no sistema de energia.

Hooman, Wilsun e Biao (2011) apresentaram uma nova perspectiva para as distribuidoras, onde antes era dada grande importância para as contribuições harmônicas individuais de cada cliente, o método apresentado analisa a rede evidenciando qual das cargas é a responsável (ou a mais responsável) pelos problemas infligidos ao sistema utilizando a teoria estatística. O artigo revelou como o impacto de cada carga pode ser quantificado usando a matriz de impedância e as correntes harmônicas do sistema. Entretanto, é necessário utilizar medidores para aferir tais correntes harmônicas em cada uma das cargas e é preciso conhecer a matriz impedância do sistema, o que na prática é dificilmente executável.

O artigo informa que os impactos das harmônicas das cargas podem ser negativos ou positivos, ou seja, atuando como filtro ou causando ressonância, respectivamente. Tal afirmação pode influenciar nas análises executadas nesse trabalho quando observadas as harmônicas em alimentadores.

Há 27 anos, Shutter, Vollkommer e Kirkpatrick (1989), apresentaram uma investigação semelhante ao desse projeto anteriormente comentado. Esses pesquisadores estudavam sete alimentadores nos Estados Unidos com diferentes classes de consumidores: residencial, comercial e industrial; e verificaram quais transgrediam o limite dos 5% de THD estabelecido pela Norma IEEE Std. 519 para a classe de tensão estudada. Os autores verificaram ainda que nos pontos onde houve transgressão a responsável foi a 5^a harmônica, o que também será observado no decorrer das medições realizadas ao longo desse trabalho. Os dados do artigo foram armazenados durante uma semana, em intervalos de uma em uma hora, com uma metodologia semelhante à executada nesse trabalho.

O artigo mencionado acima revela que naquela época, nos consumidores de classe residencial, a distorção média é inferior a 1%. Para consumidores de classe industrial, a maior presença foi da 5^a harmônica tanto de tensão como de corrente, mas sem ultrapassar os 3% de THD. Ao decorrer desse trabalho iremos confrontar esses resultados de 1989 com os de resultados atuais do perfil de consumidor.

No mesmo artigo analisou-se um prédio comercial com grande número de pequenas cargas eletrônicas e o resultado foi alta contribuição da 3^a harmônica de tensão e 5^a harmônica de corrente, com influência também da 7^a harmônica. Já quando analisado um alimentador de cargas mistas, residencial, comercial e industrial, obteve-se os piores índices de THD de tensão (12,27%) e de corrente (23,74%), com predominância da 5^a harmônica de tensão e corrente, mas também presentes na corrente a 7^a, 11^a e 13^a harmônicas.

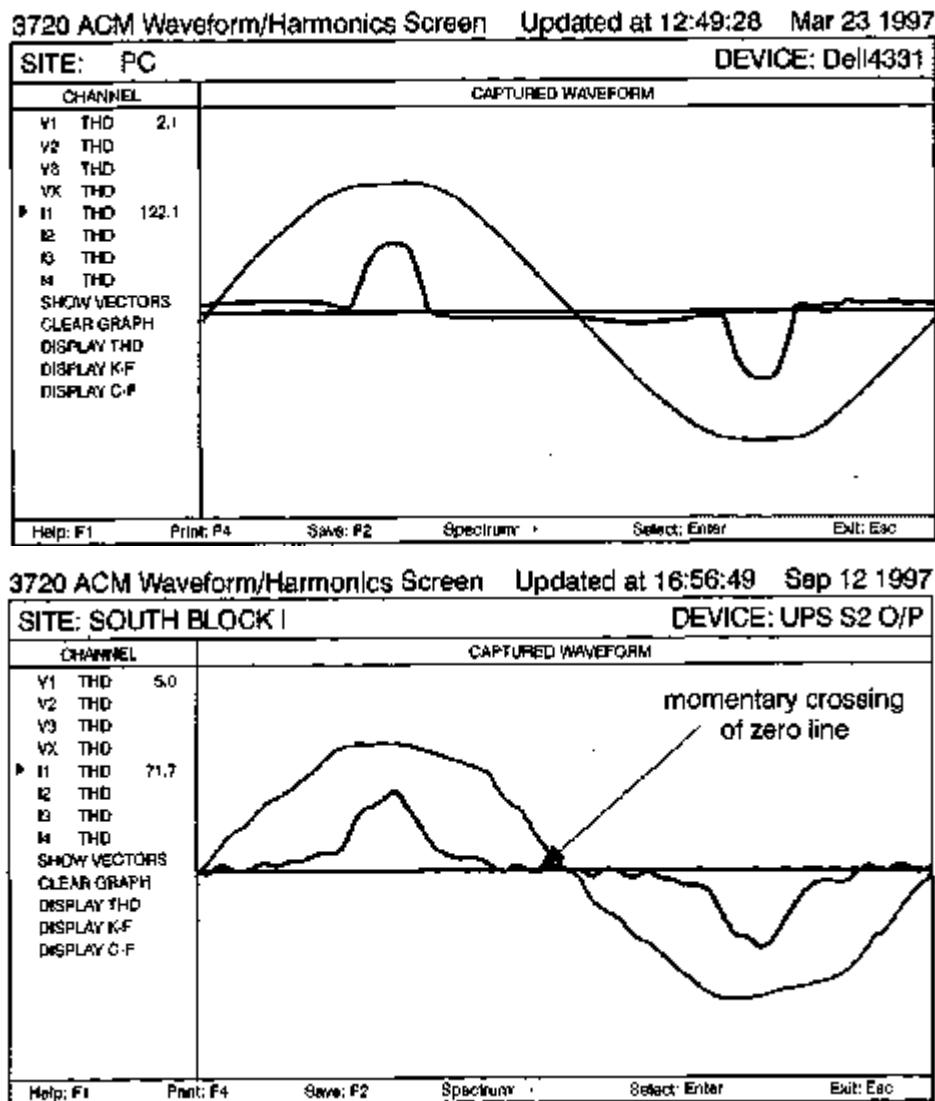
Shutter, Vollkommer e Kirkpatrick (1989) afirmam que os períodos de maiores distorções harmônicas ocorrem durante a carga mínima do circuito. Influenciada pela reduzida potência da instalação, a distorção proporcional cresce durante esses períodos.

Em relação aos equipamentos comuns, a maioria dos computadores pessoais são fortes geradores de harmônicas devido ao uso de fonte chaveadas, com exceção dos computadores que utilizam fontes PFC (*Power Factor Correction*), introduzindo pulsos curtos de corrente próximos ao pico de tensão conforme a Figura 4. Conroy (2001) retratou os problemas relacionados com harmônicas em um prédio comercial devido ao uso de muitos computadores. Apesar da dificuldade do monitoramento contínuo de harmônicas, Lamedica, Sorbillo e Prudenzi (2000) conseguiram identificar também os computadores e as impressoras a tinta e a laser como grandes deformadores de ondas e geradores de harmônicas na rede.

Dez anos depois Falvo et al. (2010) repetiram o experimento e encontraram valores semelhantes, abrangendo a gama de “vilões” na geração de harmônicas para computadores, impressoras, fotocopiadores e lâmpadas compactas.

No caso dos computadores, estes podem alcançar THDi=276,38%, já as lâmpadas fluorescentes compactas (LFC's de ignição 30kHz) chegam a THDi=215,9% e devido sua larga escala de utilização, contribuem para injetar as harmônicas no sistema de distribuição.

FIGURA 4 - FORMA DE ONDA DE UM COMPUTADOR COM E SEM HARMÔNICAS



Fonte: Power monitoring and harmonic problems in the modern building – Eugene Conroy

De todas as harmônicas, a 3^a harmônica é considerada a mais grave das componentes, pois o somatório das 3^as harmônicas de cada fase retorna ao neutro. Esse fenômeno pode resultar em uma corrente de neutro maior do que as correntes de fase, acarretando sobrecarga em transformadores, falha no condutor neutro, sobretensão nas cargas e vibração mecânica nos condutores e conexões. Existem filtros no mercado que são exclusivos para eliminar a 3^o harmônica do condutor neutro. Hoevenaars, Ledoux e Colosino (2003) comprovaram em testes a eficiência da aplicação do filtro, reduzindo drasticamente os distúrbios de harmônicas de corrente em seu estudo de caso.

Em relação a sobrecarga no condutor neutro, a maioria dos projetos de transformadores não consideram a inclusão das correntes harmônicas em seus cálculos, mesmo essas influenciando tanto nas perdas quanto no aquecimento dos transformadores. Existem casos de transformadores superaquecidos ou em sobrecargas mesmo estando aparentemente com carga baixa. Contudo, existe transformadores especificamente projetados para suprir cargas não-lineares, que são conhecidos como Transformadores de classificação K.

Uma grave falha que pode ocorrer para as distribuidoras é devido as harmônicas, sendo possível que disjuntores executem um *trip* indevido por sobrecarga de corrente, mesmo com cargas que não justifiquem essa sobrecarga. As harmônicas de corrente provocam uma sobrecarga contínua nos condutores, causando degradação e aquecimento. No caso de fusíveis, a situação é mais delicada ainda, estes podem romper pelo aquecimento gerado pelas harmônicas, podendo ser interpretado um problema, quando ele não existe.

Segundo Conroy (2001) a medição do fator de potência pode ser deturpada pela presença de harmônicas, quando a distorção de tensão/corrente cruza o zero antes da fundamental e mascara a medição direta do ângulo. A forma ideal para definir o fator de potência é por meio do cálculo de potência ativa e aparente.

Existem três métodos para estimar o conteúdo da carga harmônica: o Fator de Crista (CF), a porcentagem de distorção harmônica total (%THD) e o KFactor. O mais comum é o cálculo da THD, que pode ser definida de duas maneiras diferentes, como uma porcentagem da componente fundamental (%THDF, a definição de IEEE THD) ou como uma porcentagem de RMS (%THDR, utilizados pelos Canadian Standards Association e do IEC).

Indra et al. (2011) alega que em períodos de maior carga, quando os equipamentos são mais solicitados, as distorções harmônicas de corrente aumentam, contradizendo Shutter, Vollkommer e Kirkpatrick (1989).

Já Hoevenaars, Ledoux e Colosino (2003) revelam a dificuldade de obter a corrente de curto-circuito e de carga necessários para calcular os limites das harmônicas de corrente pela Norma IEE Std 519.

2.5 VISÃO DO ÓRGÃO REGULADOR SOBRE A QUALIDADE DE ENERGIA FORNECIDA

Diante do já exposto, percebe-se que a influência harmônica no sistema elétrico pode trazer diversas desvantagens aos equipamentos e perdas financeiras às empresas e aos consumidores. Assim sendo, questiona-se qual a visão do órgão regulador brasileiro sobre a qualidade da energia fornecida pelas concessionárias sob o ponto de vista das harmônicas.

Notadamente a Resolução Normativa nº414/2010 intitulada: “Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica – direito e deveres do consumidor de energia elétrica”, na qual tem como objetivo apresentado no Art.1º: “Estabelecer, de forma atualizada e consolidada, as condições gerais de fornecimento de energia elétrica, cujas disposições devem ser observadas pelas distribuidoras e consumidores”; não faz nenhuma observação aos termos relacionados às harmônicas.

Em alguns de seus artigos, a resolução cita apenas direitos e deveres dos consumidores, alertando para situações em que “uma unidade consumidora pode ter equipamentos que, pelas características de funcionamento ou potência, poderá prejudicar a qualidade do fornecimento a outros consumidores”. Entretanto, não evidencia como podem ser identificados ou mensurados tais prejuízos.

Pior ainda, a Resolução apresenta na “Seção XI Das Obras de Responsabilidade do Interessado Art. 44” que: “é de responsabilidade exclusiva do interessado o custeio das obras realizadas a seu pedido nos seguintes casos: I - extensão de rede de reserva; “II – melhoria de qualidade ou continuidade do fornecimento em níveis superiores aos fixados pela ANEEL”, no entanto, não há menções de como se deve proceder quando não há indicadores fixados.

Outra referência às distribuidoras são os módulos do PRODIST de 2011 (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional), que são “documentos elaborados pela ANEEL que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica”, em um total de nove módulos, onde cada um traz um aspecto diferente das atividades regulamentadas pelo órgão.

O módulo nº 8 do PRODIST trata especificamente de “Qualidade de Energia”, onde as harmônicas são um dos aspectos considerados da qualidade do produto em regime permanente ou transitório. No módulo é apresentado terminologia,

metodologia de medição, instrumentação e valores de referência para as distorções harmônicas.

O artigo 4.5.2 apresenta que: “o espectro harmônico a ser considerado para fins do cálculo da distorção total deve compreender uma faixa de frequências que considere desde a componente fundamental até, no mínimo, a 25^a ordem harmônica ($h_{min} = 25$).”, todavia, não menciona quais instrumentos podem realizar tais medições e, principalmente, o que devem ser feitas com as medidas obtidas.

O Módulo 8 do PRODIST também não define os indicadores de desempenho para harmônicas, isto é, os indicadores a serem comparados com os valores de referência para determinar se a concessionária está transgredindo ou não limites aceitáveis da qualidade de energia. E particularmente, sem indicadores não há compensações para os consumidores, nem investimentos para melhoria dessa qualidade.

Na seção 8.3 – Disposições transitórias, item 5, a ANEEL apresenta que “os valores-limite para os indicadores de qualidade do produto serão definidos após apuração e análise das medições que deverão ser realizadas durante período mínimo de três anos”, contudo, as campanhas de medição nunca se realizaram.

Apesar de não haver indicadores de qualidade, existem limites recomendados. A seguir são apresentados os limites de distorção aplicados pelas principais normas vigentes:

2.5.1 Norma IEEE Std. 519

A norma IEEE Std 519, apresenta limites para distorção individual e total, de tensão e corrente, conforme as Tabelas 2 e 3:

TABELA 2 - LIMITES DE DISTORÇÃO DE TENSÃO PELA IEEE STD 519

Nível de tensão	Máximo individual	Máxima DHT
< 69kV	3%	5%
69kV - 138kV	1.5%	2.5%
> 138kV	1%	1.5%

TABELA 3 - LIMITES DE DISTORÇÃO DE CORRENTE PELA IEEE STD 519

Icc/Icarga	$h < 11$	$11 < h < 17$	$17 < h < 23$	$23 < h < 35$	$35 < h$	DDT
<20	4	2	1.5	0.6	0.3	5
20-50	7	3.5	2.5	1	0.5	8
50-100	10	4.5	4	1.5	0.7	12
100-1000	12	5.5	5	2	1	15
>1000	15	7	6	2.5	1.4	20

Para essa tabela valem as seguintes definições:

- Valores em % da corrente nominal.
- h = ordem da harmônica.
- Icc = corrente de curto-círcuito.
- DDT = distorção de demanda total= DHT/Imax.

Onde a corrente de curto-círcuito pode ser definida através da Equação 4:

$$I_{cc} = \frac{V_{th}}{X_{th}} \quad (4)$$

- V_{th} = é o conjugado da tensão existente no ponto do curto antes da ocorrência da falta.
- X_{th} = é a reatância equivalente, “vista” a partir do ponto de curto-círcuito, com todas as fontes de tensão curtos-circuitadas.
- Icc = é a corrente de curto-círcuito trifásico no ponto do curto.

2.5.2 PRODIST. Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica ANEEL (2010)

O Módulo 8 do PRODIST, apresenta limites totais e individuais apenas para distorções em tensão, sendo as correntes negligenciadas. Abaixo são apresentadas as Tabelas 4 e 5 que revelam os limites mencionados.

TABELA 4 - LIMITES DE DISTORÇÃO TOTAL DE TENSÃO PELO PRODIST MÓDULO 8

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_N \leq 1kV$	10
$1kV < V_N \leq 13,8kV$	8
$13,8kV < V_N \leq 69kV$	6
$69kV < V_N < 230kV$	3

TABELA 5 - LIMITES DE DISTORÇÃO INDIVIDUAL DE TENSÃO PELO PRODIST MÓDULO 8

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

Já os Procedimentos de Rede, que são “documentos de caráter normativo elaborados pelo ONS, com participação dos agentes, e aprovados pela ANEEL, que definem os procedimentos e os requisitos necessários à realização das atividades de planejamento da operação eletroenergética, administração da transmissão, programação e operação em tempo real no âmbito do SIN”; não definem valores de referência, mas indicam limites superiores e inferiores para as distorções harmônicas.

Quando o valor do indicador for menor ou igual ao limite global inferior, o desempenho é considerado adequado; quando o valor apurado do indicador se encontra entre os limites globais inferior e superior, o desempenho é considerado em estado de observação.

Já na hipótese do valor apurado ser maior que o limite global superior, considera-se, a princípio, o desempenho inadequado. Nesse caso, as ações corretivas ou mitigadoras devem ser definidas logo após a realização de investigações para a identificação de causas e responsabilidades.

2.5.3 Relatório de Análise das Contribuições Referente à Consulta Pública Nº 005/2011

Por intermédio de consulta pública, a ANEEL questionou diversas distribuidoras de energia quanto a itens da: “Nota Técnica Nº 0028/2012-Srd/Aneel, de 15/03/2012 – Anexo 1. Revisão Da Regulamentação Sobre A Qualidade Do Produto No Sistema De Distribuição De Energia Elétrica”. Será evidenciado a seguir apenas três das 29 perguntas da consulta, aquelas que tem relação direta com o tema deste trabalho, e as principais respostas de algumas concessionárias.

A pergunta Q.4 da consulta questiona se “há necessidade de criação de indicadores de harmônicas das correntes elétricas?”, onde a ELEKTRO respondeu que “não, neste momento. Talvez após uma maturação no assunto, isto se faça necessário”, enquanto que a ENERGISA disse “sim, mas apenas para uniformização da terminologia envolvida, mas não devem ser fixados parâmetros de referência a serem observados pela distribuidora”.

Um parecer interessante se deu pelo antigo Grupo Rede Energia (hoje Energisa), onde os especialistas afirmaram: “Há a necessidade de alinhamento na regulação de responsabilidade não só dos distribuidores, como também dos consumidores e das fontes de distorções conectadas ao sistema”. Dessa forma, não só as distribuidoras seriam responsáveis pelo controle dos distúrbios na rede, como passariam a cobrar dos consumidores (na realidade os maiores vilões) que reduzissem a poluição no sistema de energia.

Acerca da mesma pergunta, o Grupo CPFL Energia, a CEAMAZON e a COPEL-D responderam que sim, que há necessidade de serem criados indicadores de harmônicas de corrente.

A pergunta Q.28, por exemplo, questionou: “Atualmente, há algum programa de acompanhamento e controle dos indicadores de qualidade do produto realizado pelas concessionárias de distribuição?”. Seguem algumas respostas:

- Grupo CPFL Energia: “Sim, ainda não há um processo de acompanhamento e controle destes indicadores, embora haja algumas iniciativas neste sentido ainda em caráter experimental. Dentre outros fatores, a falta de definição do protocolo de medição e de apuração, os custos relativamente altos dos qualímetros, e a falta de definição regulatória, são os principais fatores restritivos para o estabelecimento de acompanhamento e controle sistemático dos indicadores de qualidade do produto.”

-
- CEAMAZON: “Não temos conhecimento de programas dessa natureza...”
 - Rede Energia: “Os fenômenos objetos desta consulta são acompanhados de forma esporádica.”
 - GRUPO ENERGISA: “Apenas voltados para a tensão em regime permanente, mas mesmo assim de forma incipiente.”
 - LIGHT: “Não temos conhecimento deste tipo de programa em concessionárias nacionais.”
 - COPEL-D: “Não. Sob demanda, a COPEL é consultada por consumidores quanto à qualidade da energia fornecida e efetua verificações pontuais.”
 - CEMIG: “Os controles são pontuais em casos de reclamações, através de análises específicas.”

Pode-se assim, confirmar que não há acompanhamento e controle de indicadores de qualidade de energia em concessionárias (salvo em regime permanente), e em alguns casos apenas quando ocorrem reclamações de clientes que são feitas verificações em campo.

A pergunta Q.24 questiona: “Como definir a quantidade e a alocação eficiente dos pontos de medição?”. Onde a resposta da Energisa se assemelha bastante com o método a ser adotado nesse trabalho, e suas possíveis sequências: “Entendemos que um padrão mínimo deve ser definido pela ANEEL para todas as distribuidoras (exemplo: 03 pontos por alimentador + clientes AT)”.

A resposta da Energisa à Pergunta Q.24 se assemelha ao objetivo desse trabalho, apenas utilizando um ponto no alimentador (saída da subestação), por motivo de segurança do instrumento analisador.

3 MATERIAL E MÉTODO

3 MATERIAL E MÉTODO

3.1 EQUIPAMENTOS UTILIZADOS

Para realizar a aquisição dos dados e medições, foi utilizado o “Analizador de Qualidade de Potência e Energia Trifásico – Fluke 434II”, o “Osciloscópio da KEYSIGHT DSO-X 2014A” e softwares como *Excel*, *Matlab* e o *Power Log*, software da Fluke para download e análise dos dados gravados no instrumento.

FIGURA 5 - OSCILOSCÓPIO KEYSIGHT DSO-X 2014A



Fonte: <http://www.keysight.com/>

O osciloscópio possui velocidade de amostragem de dois milhões de amostras por segundo, com taxa de atualização de 50mil formas de onda por segundo e largura de banda de 100MHz.

O analisador possui velocidade máxima de amostragem de 200mil amostras por segundo, o que representa 3200 amostras por ciclo, mais do que suficiente para detectar qualquer distúrbio durante a medição realizada. Ele apresenta precisão de 0,5% nas medições de tensão e corrente, 0,01 nas medições de frequência e 0,1% nas medições de fator de potência. O instrumento é capaz de medir até a 50^a harmônica de tensão e corrente, de acordo com a norma IEC 61000-4-7.

FIGURA 6 - ANALISADOR DE ENERGIA FLUKE 434 SÉRIE II



Fonte: <http://www.fluke.com/>

É possível configurá-lo para registrar medições em intervalos entre 0,250 segundos e 2 horas; registrando os valores máximos, médios e mínimos ocorridos entre os intervalos de cada parâmetro escolhido. A depender dos parâmetros escolhidos e do intervalo de medição, o cartão de memória de 8Gb pode armazenar muitos dias de medição (até alguns anos). A bateria suporta 7h de medição ininterrupta, mas do que isso é preciso deixar o equipamento ligado a uma fonte de energia.

É possível definir quais parâmetros salvar entre a lista abaixo:

- **Tensão rms fase-neutro**
- Tensão rms fase-fase
- Tensão de pico
- Tensão de meia onda
- Ângulo da tensão
- **Corrente rms**
- Corrente de pico
- Corrente de meia onda
- Ângulo da corrente
- **Frequência**
- Pst
- Plt
- Potência ativa
- Potência aparente
- Potência reativa
- Potência harmônica
- Potência de desequilíbrio
- Energia ativa
- Energia aparente
- Energia reativa
- **Fator de potência**
- Ângulo do fator de potência
- **THD de tensão**
- **THD de corrente**
- THD de potência
- **Harmônicas de tensão de 1 a 50**
- **Harmônicas de corrente de 1 a 50**
- Harmônicas de potência de 1 a 50
- Ângulo da tensão harmônica
- Ângulo da corrente harmônica

Entre a grande gama de parâmetros possíveis, foram escolhidos os parâmetros destacados em vermelho. Caso seja necessário, é possível utilizar outro parâmetro, realizando novo cálculo.

Para recuperar as medições do analisador foi utilizado o software Power Log da Fluke, capaz de extrair os dados do analisador e convertê-lo em arquivos de texto, facilitando a manipulação das informações. Uma restrição do programa é a capacidade do armazenamento do cartão de memória que limita a leitura, mas não a gravação, dos dados a apenas 7h de cada vez, sendo preciso gerar vários arquivos de sete em sete horas para compor a medição total.

Para análise das medições realizadas foram utilizados os softwares Excel e Matlab para manipulação dos dados e geração dos gráficos de apoio.

3.2 MÉTODO DE AQUISIÇÃO

As aquisições foram divididas em três partes, uma com o analisador de qualidade em uma subestação medindo as formas de onda e perturbações dos alimentadores; outra ainda com o analisador medindo as harmônicas em uma residência unifamiliar; e, uma última, com o osciloscópio na mesma residência medindo as formas de ondas e FFT dos eletrodomésticos presentes que compunham as harmônicas obtidas na aquisição anterior.

Visando a análise da saúde harmônica de alimentadores com tensão de 13,8kV da Energisa Paraíba, para a primeira aquisição mencionada optou-se por realizar medições na Subestação de Distribuição localizada no bairro de Mangabeira, onde a mesma supre a carga de 56 mil clientes entre residenciais, comerciais e industriais.

Esta subestação foi escolhida para sediar o estudo dessa dissertação por apresentar características mistas de classes de clientes, por não haver histórico de arrombamento e furtos na subestação e, principalmente, pelo tipo de religador presente na subestação. Os religadores de modelo “Cooper ESV-1516” contam com transformadores de corrente e tensão em cada fase, microprocessados por um relé de medição localizado no painel do religador. Essa configuração facilita a instalação do analisador de qualidade de energia, visto que todas as grandezas necessárias se concentram em um único ponto no religador. Seu diagrama unifilar pode ser conferido

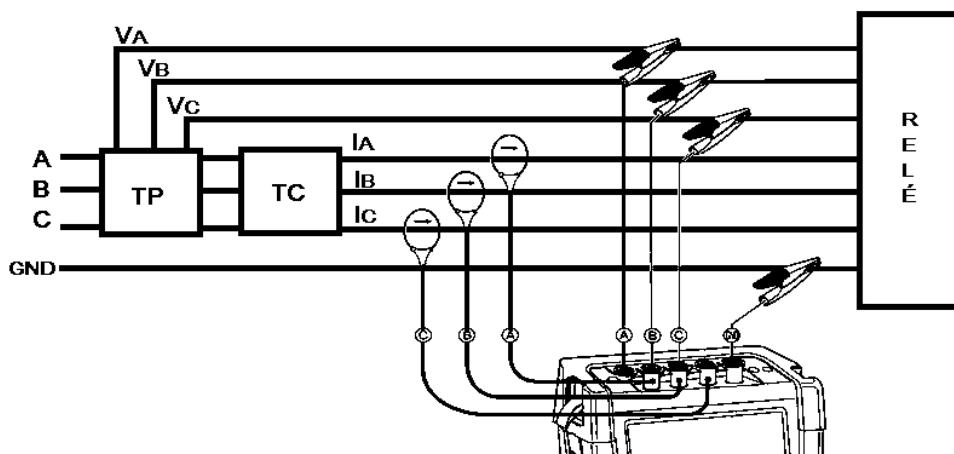
no Anexo 2 desse trabalho. Além dessas características, optou-se por realizar a medição em uma residência contida no mesmo alimentador analisado, no caso, em Mangabeira.

Devido a diversidade de tipo de consumidores, três alimentadores foram escolhidos por comportar um maior número de clientes de cada classe, não exclusivamente, mas majoritariamente. Foram eles:

- 01L1 MGB – Alimentador com carga residencial, suprindo os bairros de Mangabeira I, II, III, IV, V e VI;
- 01L2 MGB – Alimentador com carga comercial, suprindo o centro administrativo, a universidade Unipe e a Prefeitura Municipal;
- 01L3 MGB – Alimentador com carga industrial, suprindo o Shopping Sul.

Para as medições a serem realizadas nas subestações, determinou-se fazer medições de sete dias em cada alimentador, utilizando um intervalo de registro de medição de 15 minutos, ou seja, a cada 15 minutos o analisador gravou os valores máximos, médios e mínimos de cada um dos parâmetros escolhidos, onde posteriormente os dados foram recuperados e, em seguida, o analisador foi reinstalado no alimentador seguinte. Visando a segurança do equipamento e das pessoas as intervenções foram realizadas com o equipamento (religador) desenergizado, utilizando um sistema de religador de transferências para não haver interrupção de energia durante as manobras. O Analisador foi instalado seguindo o modelo da figura 7:

FIGURA 7 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO PARA MEDIÇÃO TRÍFASICA EM RELIGADOR COOPER ESV-1516



Fonte: Acervo pessoal

Devido ao risco operacional e material de se fazer medições ao longo do alimentador durante períodos com o equipamento desassistido, optou-se nesse trabalho pela medição apenas nas subestações. Nesses locais, há painéis que comportam armazenar o instrumento e conectá-lo na rede de energia para manter sua bateria sempre carregada. De tal forma que, em campo, o esquema se apresenta na realidade conforme a figura 8 e 9:

FIGURA 8 - RELIGADOR COOPER EM SUBESTAÇÃO



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 9 - ANALISADOR INSTALADO EM RELIGADOR



Fonte: Acervo pessoal

Para a segunda das aquisições, utilizou-se o analisador medindo uma carga monofásica representada por um apartamento residencial unifamiliar, tendo um casal de adultos como moradores e com eletrodomésticos presentes na maioria das residências brasileiras: geladeira, máquina de lavar, condicionador de ar, bebedouro, micro-ondas, forno elétrico, notebooks, chuveiro elétrico, ventiladores, fogão, televisores e lâmpadas compactas eletrônicas.

FIGURA 10 - ANALISADOR INSTALADO EM APARTAMENTO RESIDENCIAL



Fonte: Acervo pessoal

O analisador foi instalado no quadro geral do apartamento conforme a Figura 11, medindo durante quatro dias toda a carga do apartamento, seus distúrbios ocorridos e o perfil de carga da residência.

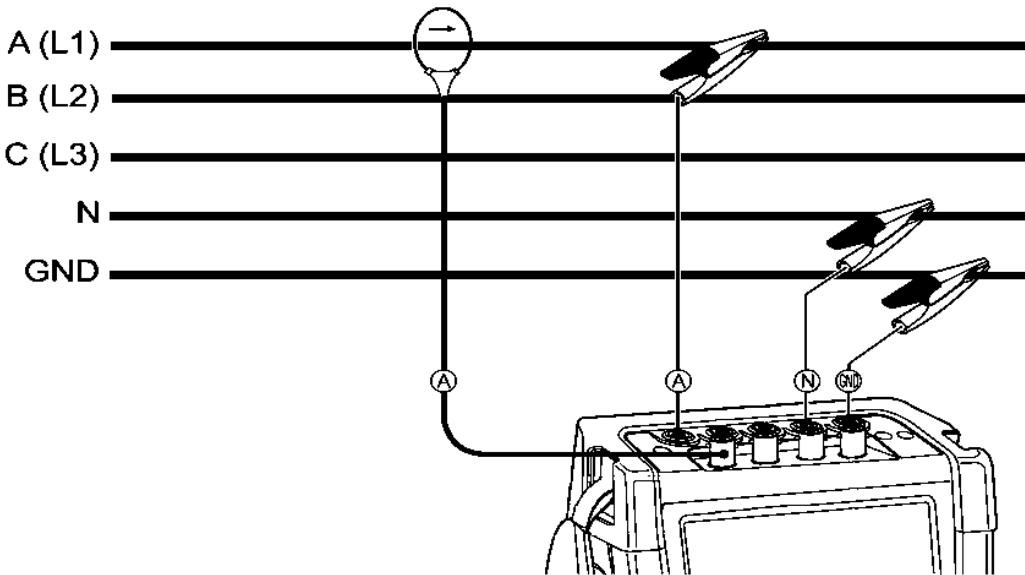
FIGURA 11 - PINÇAS DE TENSÃO E CORRENTE NO QUADRO DE DISTRIBUIÇÃO GERAL



Fonte: Acervo pessoal

O esquema de ligação apresentado na Figura 12 representa como foi feita a ligação das pinças seguindo a orientação dada pelo fabricante do medidor.

FIGURA 12 - ESQUEMA DE LIGAÇÃO PARA MEDIÇÃO DE CARGA MONOFÁSICA



Fonte: Acervo pessoal

A terceira e última aquisição, visando complementar a aquisição anterior e ter uma visão individual de cada eletrodoméstico, utilizando o osciloscópio, registrou-se as formas de ondas de tensão e corrente e a FFT de corrente de cada um deles em um intervalo de funcionamento de aproximadamente dois minutos.

Sendo assim, foram investigados os eletrodomésticos a seguir: geladeira, condicionador de ar, gelágua, televisor de led, ventilador, carregador de celular, micro-ondas, máquina de lavar, notebook e lâmpada compacta eletrônica.

Os resultados de cada uma das aquisições serão apresentados no Capítulo 4.

3.3 ANÁLISE DOS DADOS

Os dados obtidos por meio do registro do analisador e do osciloscópio, em cada uma das aquisições supracitadas, foram manipulados no software *Microsoft Excel* onde se conseguiu padronizar e filtrar os dados realmente relevantes e gerar os gráficos e curvas que serão apresentados logo a seguir. Pelo volume de dados trabalhou-se sempre com os valores máximos dos parâmetros.

Devido a indisponibilidade de manobra do religador na subestação, os sete dias consecutivos de medição não se iniciaram no mesmo dia de semana para cada

uma das medições, nem no mesmo horário, de forma que as figuras que serão apresentadas no capítulo a seguir foram ajustados para representar o mesmo horário em cada medição e os dias de final de semana (sábado e domingo) são destacados nas figuras para que não seja deturpado os resultados.

Quando da escolha ou comparação de um único dia, este dia escolhido foi uma terça-feira de cada uma das semanas de medição. No que se refere a comparação de três dias, foram escolhidos de terça a quinta-feira de cada uma das semanas de medições.

Nas medições ocorridas na residência não houve necessidade de ajustes, pois não haverá comparação com outras residências e quando da medição dos eletrodomésticos, estes ocorrerão em um breve intervalo de tempo.

4 RESULTADOS

4 RESULTADOS

Serão apresentados a seguir, os resultados da primeira aquisição ocorrida nas medições dos alimentadores da Subestação Mangabeira pertencente a Energisa Paraíba, na cidade de João Pessoa.

4.1 ALIMENTADOR RESIDENCIAL

O alimentador majoritariamente residencial 01L1 supre as cargas dos bairros de Mangabeira IV e V, composto na sua maioria por casas populares e de residência monofamiliares.

A Tabela 6 resume os valores máximos, médios e mínimos encontrados durante os sete dias de medição do alimentador residencial:

TABELA 6 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO ALIMENTADOR RESIDENCIAL

Alimentador Residencial			
Tabela Resumo	Mínimo	Médio	Máximo
Tensão (V)	13.680	14.281	14.654
Corrente (A)	58,80	100,57	146,40
Frequência (Hz)	59,78	60,00	60,13
Fator de Potência	0,79	0,83	0,89
THD V máximo	1,56	2,54	3,50
THD A máximo	1,31	2,75	4,78

Percebe-se uma variação de tensão de quase 1kV entre valores mínimos e máximos, onde essa tensão é regulada pelo comutador em carga dos transformadores da subestação e pelos bancos capacitores instalados, que estes também controlam o fator de potência; já a variação de frequência é muito baixa (>1%).

Os valores globais de THD de tensão e corrente apresentam valores inferiores a 5, dentro do que estabelece as Normas IEEE Std 519 e o Módulo 8 do PRODIST.

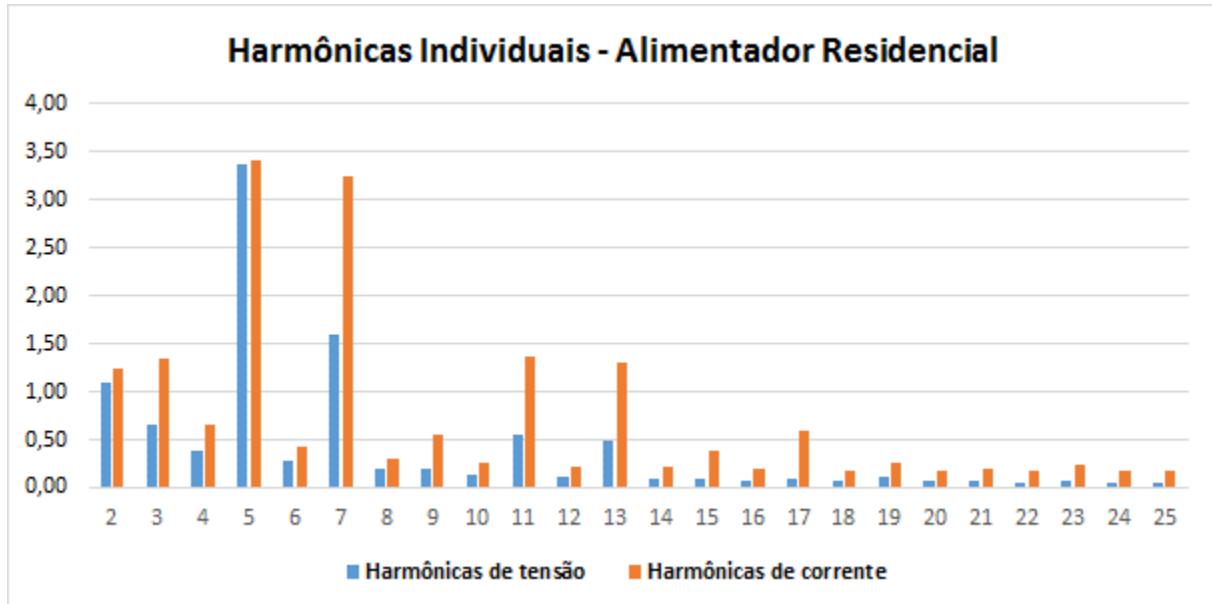
Os valores individuais máximos não coincidentes por fase de distorção harmônica de tensão e correntes podem ser observados na Tabela 7:

TABELA 7 - VALORES MÁXIMOS NÃO COINCIDENTES DE THD INDIVIDUAL DE TENSÃO E CORRENTE DE ALIMENTADOR RESIDENCIAL

Alimentador Residencial				Alimentador Residencial			
THD V	Fase A	Fase B	Fase C	THD A	Fase A	Fase B	Fase C
2 ^a Harmônica	1,10	1,09	1,07	2 ^a Harmônica	1,25	1,13	1,10
3 ^a Harmônica	0,66	0,54	0,63	3 ^a Harmônica	1,34	1,33	1,57
4 ^a Harmônica	0,38	0,38	0,36	4 ^a Harmônica	0,66	0,44	0,52
5 ^a Harmônica	3,37	3,21	3,08	5 ^a Harmônica	3,41	3,59	3,37
6 ^a Harmônica	0,28	0,26	0,26	6 ^a Harmônica	0,43	0,41	0,36
7 ^a Harmônica	1,59	1,31	1,49	7 ^a Harmônica	3,24	3,18	2,91
8 ^a Harmônica	0,19	0,18	0,19	8 ^a Harmônica	0,30	0,32	0,28
9 ^a Harmônica	0,19	0,20	0,18	9 ^a Harmônica	0,55	0,53	0,34
10 ^a Harmônica	0,14	0,14	0,14	10 ^a Harmônica	0,26	0,26	0,20
11 ^a Harmônica	0,55	0,53	0,52	11 ^a Harmônica	1,36	1,19	1,11
12 ^a Harmônica	0,12	0,11	0,11	12 ^a Harmônica	0,21	0,25	0,18
13 ^a Harmônica	0,48	0,38	0,47	13 ^a Harmônica	1,31	1,50	1,39
14 ^a Harmônica	0,10	0,10	0,10	14 ^a Harmônica	0,21	0,24	0,16
15 ^a Harmônica	0,10	0,10	0,09	15 ^a Harmônica	0,39	0,41	0,30
16 ^a Harmônica	0,08	0,08	0,08	16 ^a Harmônica	0,20	0,23	0,16
17 ^a Harmônica	0,09	0,12	0,12	17 ^a Harmônica	0,60	0,62	0,68
18 ^a Harmônica	0,08	0,07	0,07	18 ^a Harmônica	0,18	0,22	0,16
19 ^a Harmônica	0,11	0,08	0,08	19 ^a Harmônica	0,25	0,39	0,36
20 ^a Harmônica	0,07	0,07	0,07	20 ^a Harmônica	0,18	0,20	0,16
21 ^a Harmônica	0,08	0,08	0,06	21 ^a Harmônica	0,19	0,23	0,18
22 ^a Harmônica	0,06	0,06	0,06	22 ^a Harmônica	0,18	0,18	0,16
23 ^a Harmônica	0,07	0,06	0,06	23 ^a Harmônica	0,24	0,22	0,21
24 ^a Harmônica	0,06	0,06	0,05	24 ^a Harmônica	0,18	0,18	0,16
25 ^a Harmônica	0,06	0,06	0,05	25 ^a Harmônica	0,18	0,20	0,17

A Figura 13 apresenta os valores máximos das harmônicas individuais de tensão e corrente:

FIGURA 13 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO E CORRENTE ALIMENTADOR RESIDENCIAL



Revela-se a 5^a e 7^a harmônica como as maiores contribuintes para o THD total, acompanhadas da 2^a, 3^a, 11^a e 13^a harmônicas. Em alguns pontuais momentos, a 2^a harmônica se mostra superior a 3^a, proveniente de motores de indução e desequilíbrios entre fases, são normalmente desconsideradas na literatura e se mostram relevantes no estudo aplicado.

Observando as distorções harmônicas de tensão e corrente ao longo do tempo, durante os sete dias de medição, apresentadas nas Figuras 14 e 15, percebe-se que existe periodicidade como no perfil de carga, aumentando e reduzindo-se ao longo do dia:

FIGURA 14 - THD V – ALIMENTADOR RESIDENCIAL

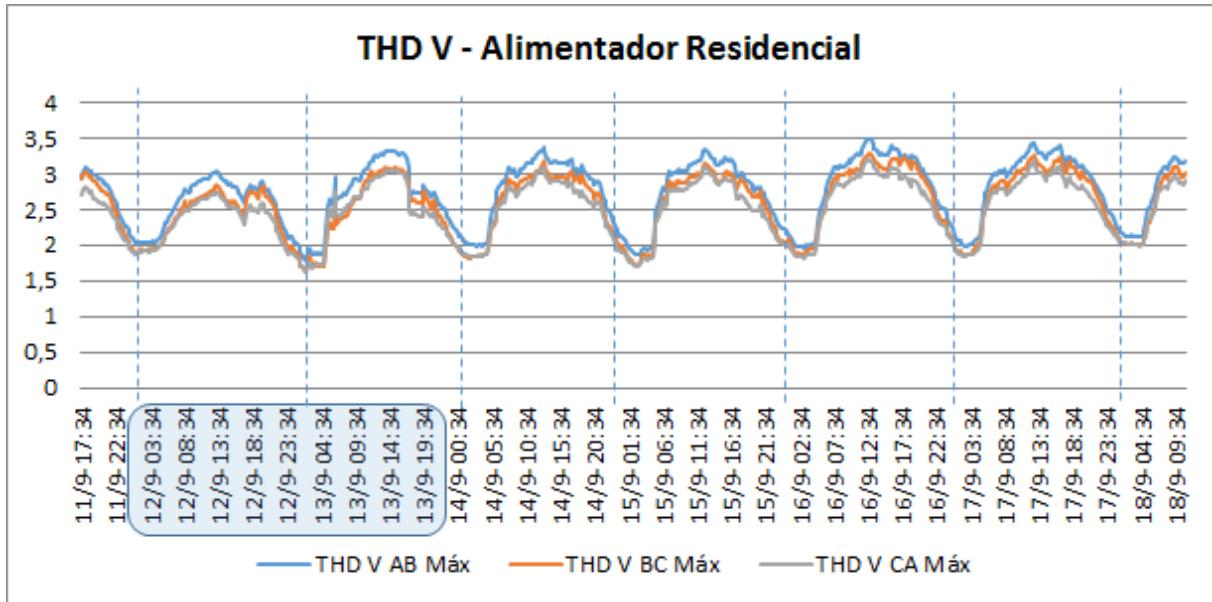
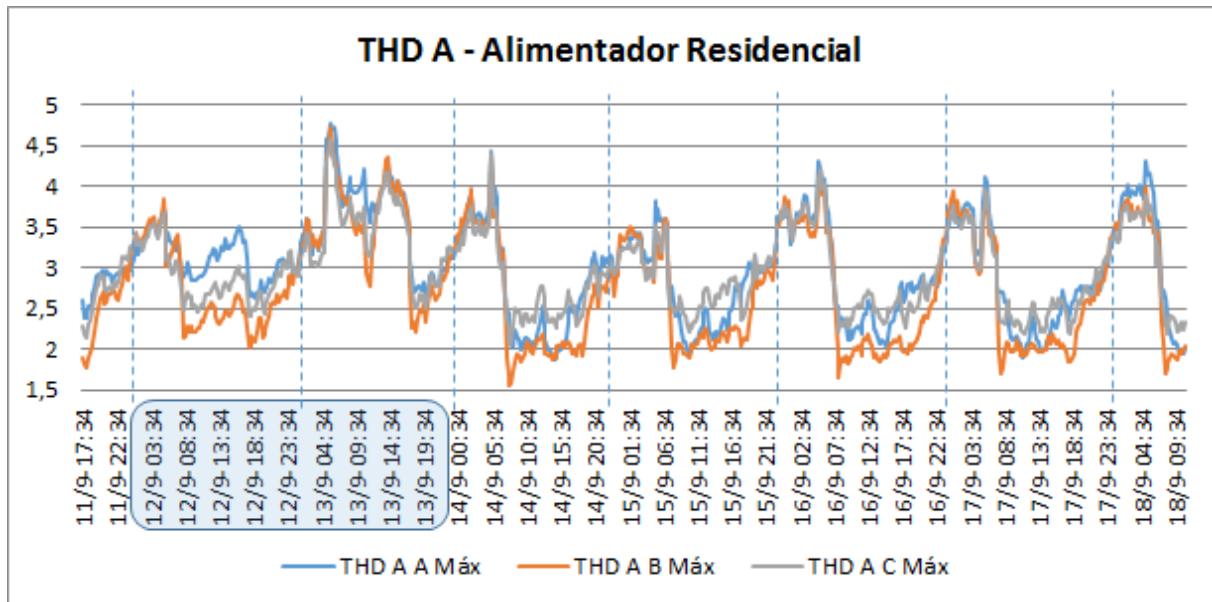


FIGURA 15 - THD A – ALIMENTADOR RESIDENCIAL



Durante os dias de semana, o comportamento das distorções é uniforme, apresentando leve diferença no final de semana (destaque na figura). Com o intuito de avaliar a proporcionalidade da distorção harmônica com a potência demandada, as Figuras 16 e 17 compararam cada uma das distorções com a Potência Ativa suprida no período.

FIGURA 16 - THD V X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR RESIDENCIAL

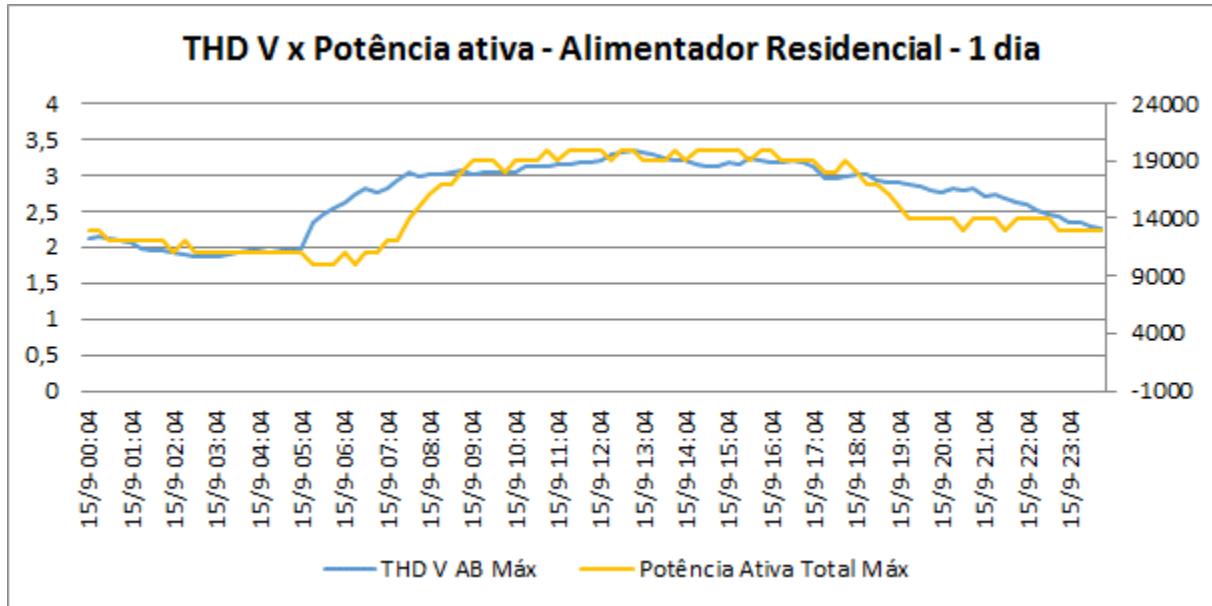
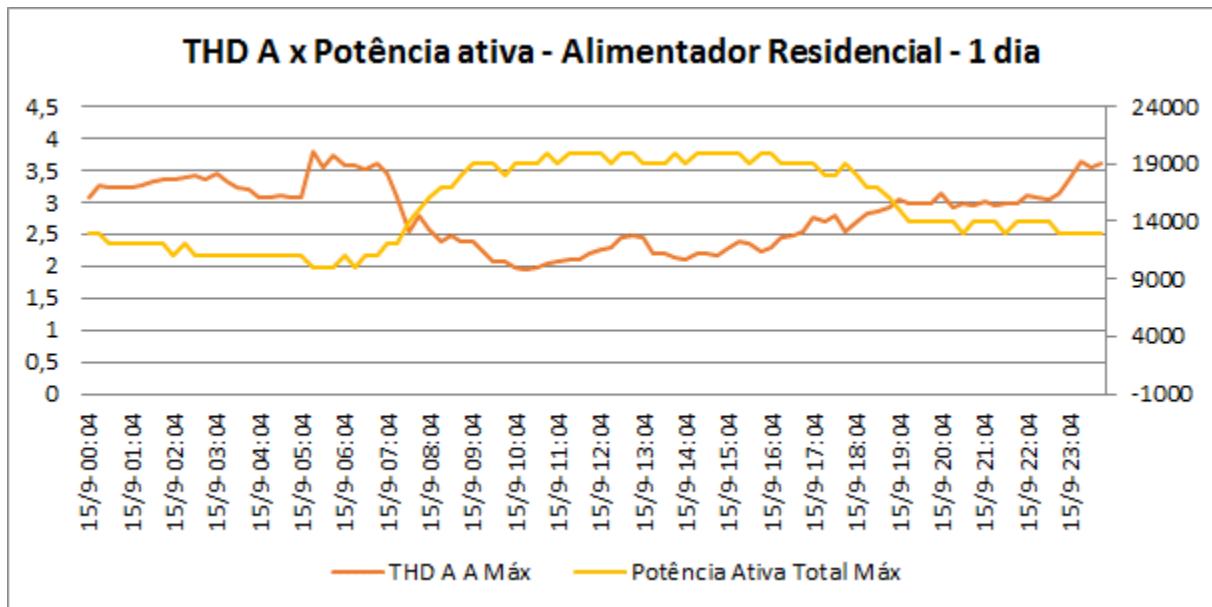


FIGURA 17 - THD A X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR RESIDENCIAL



As Figuras 16 e 17 revelam como o THD de tensão é diretamente proporcional a potência suprida pelo alimentador, enquanto o THD de corrente segue a proporção inversa, contradizendo Indra et al. (2011) que afirma que quanto maior a carga, maior será a distorção harmônica total mensurada.

4.2 ALIMENTADOR INDUSTRIAL

O alimentador majoritariamente industrial 01L2 supre as cargas do Centro Administrativo de João Pessoa, do Fórum de Mangabeira e de algumas oficinas pelo bairro. Existem outros alimentadores exclusivamente industriais na Energisa Paraíba, entretanto o modelo do religador não permite acesso aos condutores secundários internos dos TP's e TC's, inviabilizando a medição.

A Tabela 8 resume os valores máximos, médios e mínimos encontrados durante os sete dias de medição do alimentador industrial:

TABELA 8 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO ALIMENTADOR INDUSTRIAL

Alimentador Industrial			
Tabela Resumo	Mínimo	Médio	Máximo
Tensão média (V)	12.222	14.272	14.843
Corrente média (A)	67,20	95,63	122,40
Frequência (Hz)	58,66	60,00	60,19
Fator de Potência	0,75	0,79	0,90
THD V máximo	1,69	2,56	5,39
THD A máximo	1,50	2,79	5,47

Verifica-se um mínimo de tensão abaixo dos limites estabelecidos em norma e um máximo próximo ao limite de 15kV que é o dimensionamento dos equipamentos da subestação. Acima disto, os equipamentos podem não suportar a tensão imposta e vir a falhar ou explodir. A frequência varia minimamente, assim como no alimentador residencial, enquanto o fator de potência é relativamente mais fraco do que a comparação com o alimentador anterior.

Em relação às distorções harmônicas, percebe-se que esse alimentador transgride os limites estabelecidos pelas normas já explanadas, acima dos 5% de distorção em apenas um momento para o THD de tensão dos 648 instantes de medição (Dia 22/09 às 11h43), representando apenas 0,15% das medições. Por sua vez, para o THD de corrente houve transgressões em 14 medições, representando 2,16% das medições. No geral, o alimentador industrial apresenta uma média de 2,56 para THD V e 2,79 para THD A.

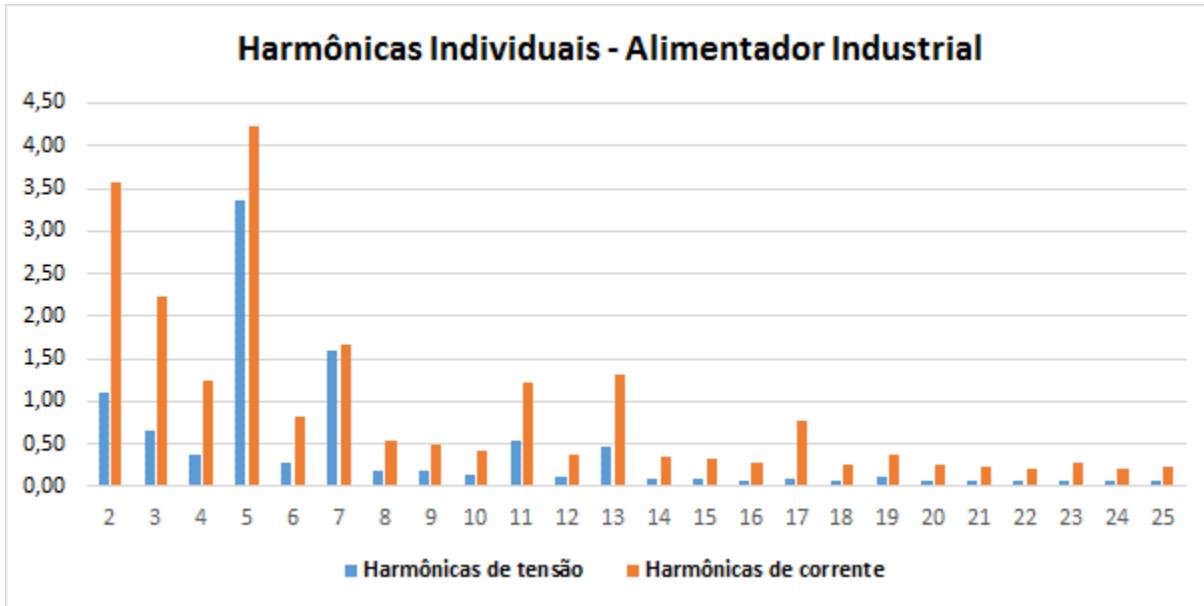
Os valores individuais máximos não coincidentes por fase de distorção harmônica de tensão e correntes podem ser observados na Tabela 9:

TABELA 9 - VALORES MÁXIMOS NÃO COINCIDENTES DE THD INDIVIDUAL DE TENSÃO E CORRENTE DE ALIMENTADOR INDUSTRIAL

Alimentador Industrial				Alimentador Industrial			
THD V	Fase A	Fase B	Fase C	THD A	Fase A	Fase B	Fase C
2^a Harmônica	1,10	1,09	1,07	2^a Harmônica	3,57	3,60	3,59
3^a Harmônica	0,66	0,54	0,63	3^a Harmônica	2,22	1,74	2,16
4^a Harmônica	0,38	0,38	0,36	4^a Harmônica	1,25	1,20	1,22
5^a Harmônica	3,37	3,21	3,08	5^a Harmônica	4,24	4,77	4,20
6^a Harmônica	0,28	0,26	0,26	6^a Harmônica	0,83	0,75	0,74
7^a Harmônica	1,59	1,31	1,49	7^a Harmônica	1,67	1,65	1,45
8^a Harmônica	0,19	0,18	0,19	8^a Harmônica	0,54	0,58	0,54
9^a Harmônica	0,19	0,20	0,18	9^a Harmônica	0,50	0,69	0,62
10^a Harmônica	0,14	0,14	0,14	10^a Harmônica	0,43	0,46	0,45
11^a Harmônica	0,55	0,53	0,52	11^a Harmônica	1,23	1,22	1,12
12^a Harmônica	0,12	0,11	0,11	12^a Harmônica	0,38	0,38	0,39
13^a Harmônica	0,48	0,38	0,47	13^a Harmônica	1,32	1,60	1,52
14^a Harmônica	0,10	0,10	0,10	14^a Harmônica	0,34	0,35	0,33
15^a Harmônica	0,10	0,10	0,09	15^a Harmônica	0,33	0,37	0,31
16^a Harmônica	0,08	0,08	0,08	16^a Harmônica	0,29	0,28	0,28
17^a Harmônica	0,09	0,12	0,12	17^a Harmônica	0,77	0,73	0,66
18^a Harmônica	0,08	0,07	0,07	18^a Harmônica	0,26	0,27	0,24
19^a Harmônica	0,11	0,08	0,08	19^a Harmônica	0,38	0,54	0,53
20^a Harmônica	0,07	0,07	0,07	20^a Harmônica	0,26	0,26	0,23
21^a Harmônica	0,08	0,08	0,06	21^a Harmônica	0,23	0,24	0,23
22^a Harmônica	0,06	0,06	0,06	22^a Harmônica	0,22	0,24	0,21
23^a Harmônica	0,07	0,06	0,06	23^a Harmônica	0,27	0,28	0,24
24^a Harmônica	0,06	0,06	0,05	24^a Harmônica	0,21	0,20	0,20
25^a Harmônica	0,06	0,06	0,05	25^a Harmônica	0,23	0,24	0,20

A Figura 18 apresenta os valores máximos das harmônicas individuais de tensão e corrente:

FIGURA 18 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO E CORRENTE ALIMENTADOR INDUSTRIAL



Revela-se novamente a 5^a e 7^a harmônica como as maiores contribuintes para os THD's totais, acompanhadas da 2^a, 3^a, 4^a, 11^a e 13^a harmônicas. Tanto na distorção de tensão quanto de corrente, a 2^a harmônica se mostra com altos valores, superando a 3^a em um dado momento. No instante de THD máximo de corrente, as harmônicas pares 2 e 4 se destacam, em conjunto com as ímpares 3^a, 5^a e 7^a.

Observando as distorções harmônicas de tensão e corrente ao longo do tempo durante os sete dias de medição apresentadas nas Figuras 19 e 20, percebe-se que existe periodicidade, como no perfil de carga para o THD de tensão, aumentando e reduzindo ao longo do dia, mas de forma quase aleatória no THD de corrente, se elevando no domingo:

FIGURA 19 - THD V – ALIMENTADOR INDUSTRIAL

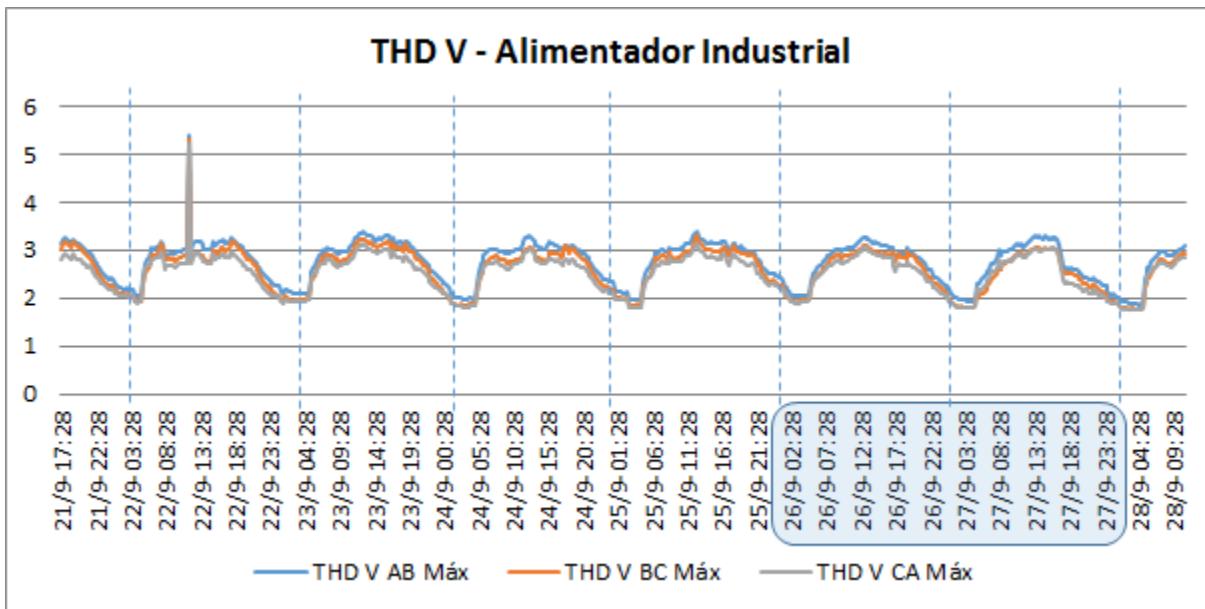
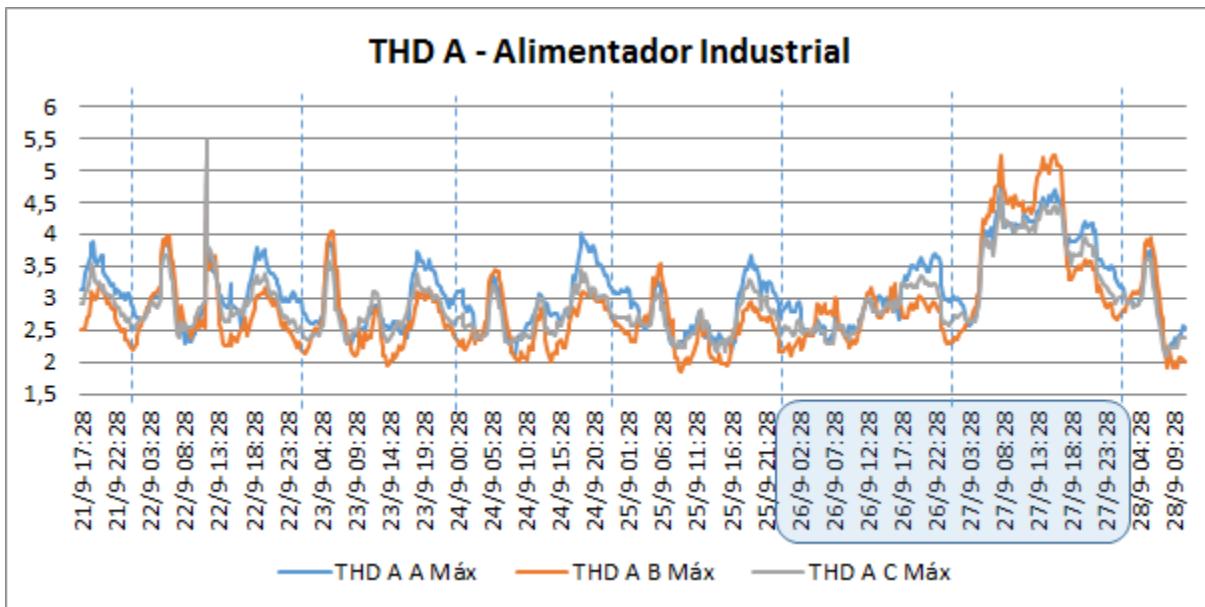


FIGURA 20 - THD A – ALIMENTADOR INDUSTRIAL



Observa-se que em dado instante no dia 22/09 as 11h43 houve um forte distúrbio na rede, provocando as medições máximas de distorção harmônica total de tensão e corrente. Nesse instante as harmônicas pares tiveram forte contribuição no resultado total, diferente das outras medições.

Buscou-se no Supervisório da Energisa, nos registros de eventos e nas reclamações de clientes, mas nesse instante (além das harmônicas medidas) nada

de anormal foi sentido pelos equipamentos ou clientes da concessionária; não sendo possível determinar a fonte geradora dessas harmônicas.

FIGURA 21 - THD V X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR INDUSTRIAL

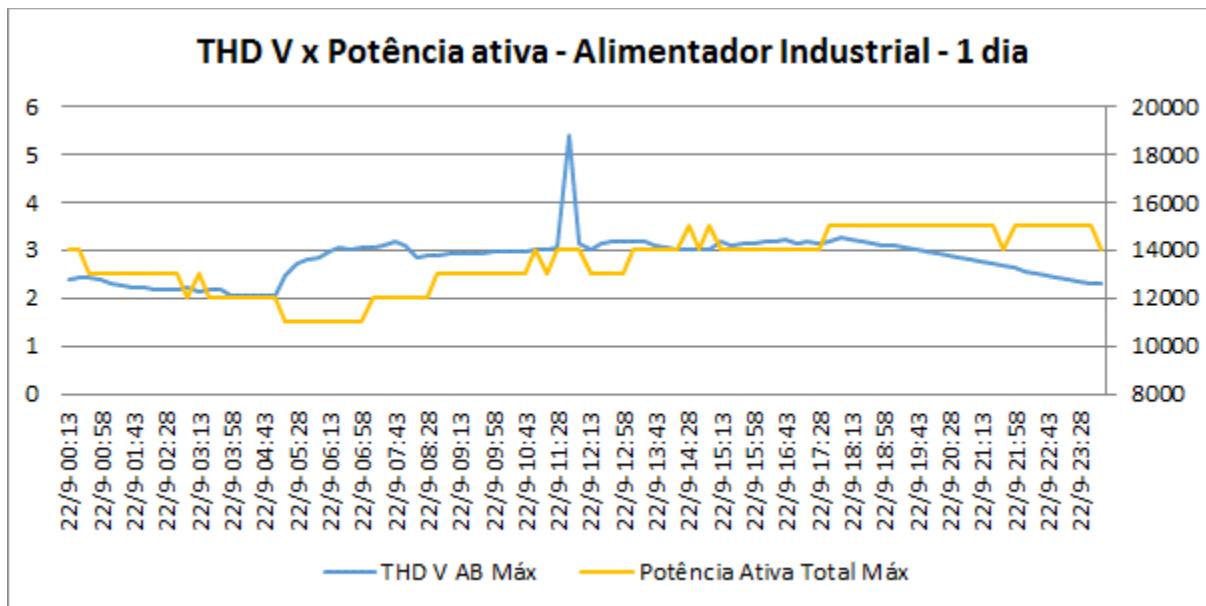
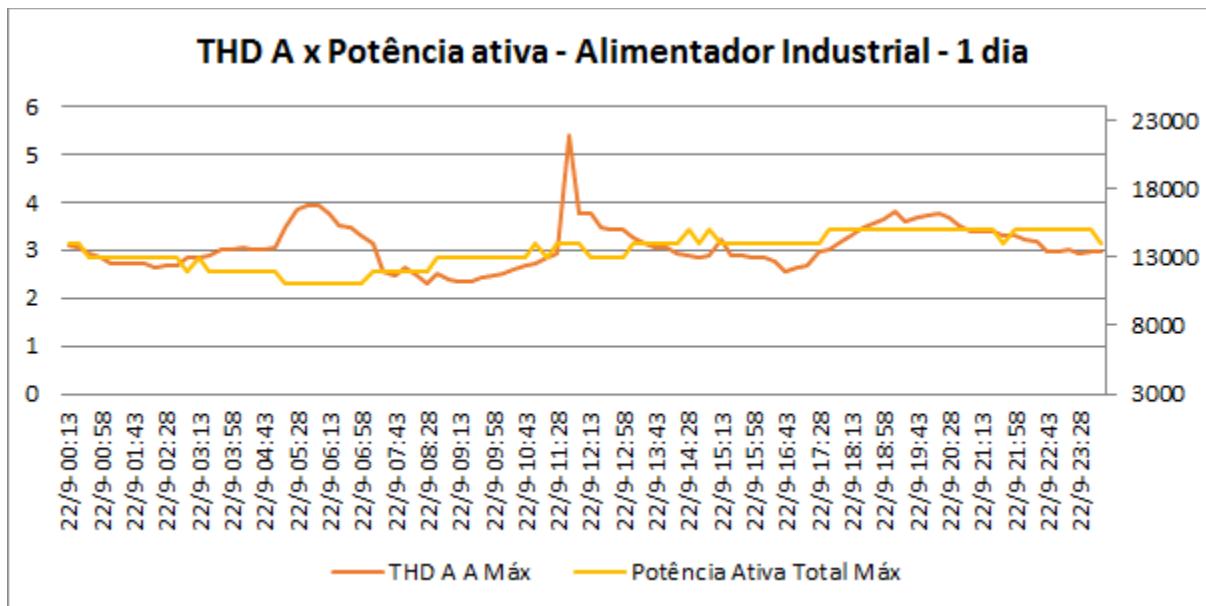


FIGURA 22 - THD A X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR INDUSTRIAL



As Figuras 21 e 22 revelam a evolução ao longo de um dia do THD de tensão e corrente contra a evolução da potência ativa demandada pelo alimentador no mesmo período. Constatase que no instante de pico de THD a potência ativa não acompanha esse pico, novamente revelando a não proporcionalidade da potência demandada com o THD infligido.

Do ponto de vista de proporção, nenhum dos dois THD's se proporcionam com a potência ativa, diferentemente do observado no alimentador residencial, aparentemente não há relação entre as grandezas.

4.3 ALIMENTADOR COMERCIAL

O alimentador majoritariamente comercial 01L3 da Subestação Mangabeira supre as cargas da universidade Unipe e adjacências.

A Tabela 10 resume os valores máximos, médios e mínimos encontrados durante os sete dias de medição do alimentador comercial:

TABELA 10 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO ALIMENTADOR COMERCIAL

Alimentador Comercial			
Tabela Resumo	Mínimo	Médio	Máximo
Tensão média (V)	13.014	14.286	14.711
Corrente média (A)	184,80	250,58	319,20
Frequência (Hz)	59,79	60,00	60,14
Fator de Potência	0,76	0,81	0,88
THD V máximo	1,29	2,26	3,43
THD A máximo	1,01	2,11	4,17

Observa-se que dos três alimentadores, esse é o que possui maior corrente fornecida (maior carga instalada), mesmo não representando maior distorção harmônica total. As tensões médias, frequência e fator de potência são semelhantes aos outros alimentadores, sem nenhuma distinção evidente. Quanto as THD's, estas apresentam valores abaixo dos limites estabelecidos por norma, sem transgressões e com média levemente inferior aos demais alimentadores analisados.

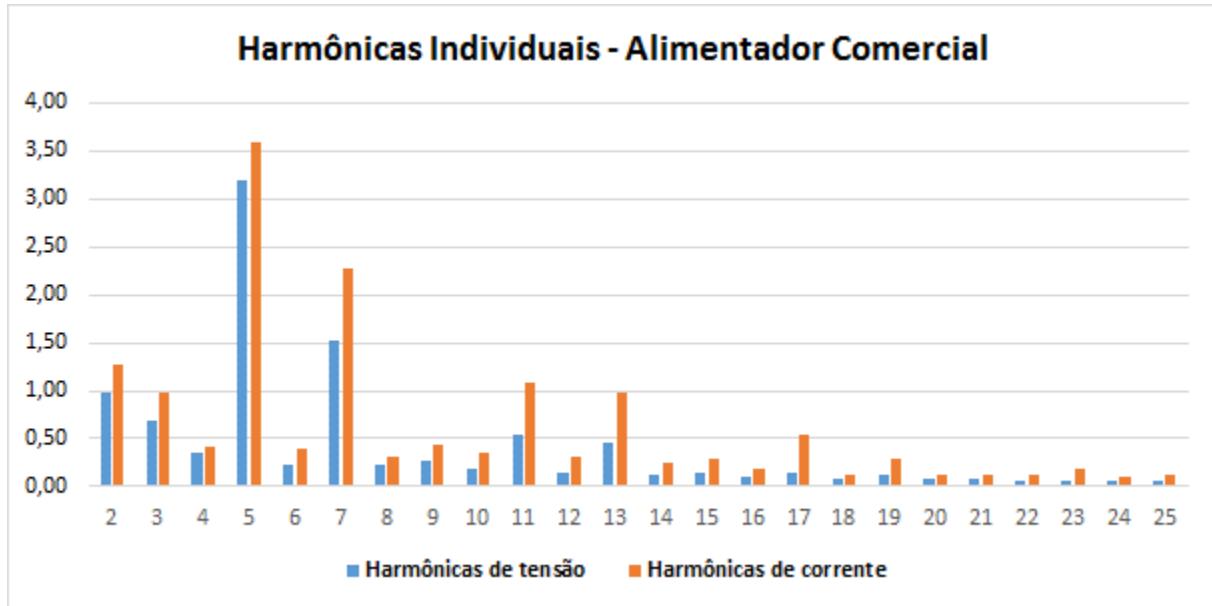
Os valores individuais máximos não coincidentes por fase de distorção harmônica de tensão e correntes podem ser observados na Tabela 11:

TABELA 11 - VALORES MÁXIMOS NÃO COINCIDENTES DE THD INDIVIDUAL DE TENSÃO E CORRENTE DE ALIMENTADOR COMERCIAL

Alimentador Comercial				Alimentador Comercial			
THD V	Fase A	Fase B	Fase C	THD A	Fase A	Fase B	Fase C
2^a Harmônica	0,97	0,97	0,92	2^a Harmônica	1,27	1,18	0,93
3^a Harmônica	0,68	0,48	0,58	3^a Harmônica	0,97	1,15	0,72
4^a Harmônica	0,35	0,35	0,32	4^a Harmônica	0,41	0,53	0,49
5^a Harmônica	3,19	3,12	2,91	5^a Harmônica	3,60	3,53	3,48
6^a Harmônica	0,23	0,22	0,22	6^a Harmônica	0,40	0,34	0,25
7^a Harmônica	1,53	1,31	1,50	7^a Harmônica	2,27	2,00	1,94
8^a Harmônica	0,23	0,17	0,25	8^a Harmônica	0,32	0,36	0,29
9^a Harmônica	0,28	0,23	0,23	9^a Harmônica	0,43	0,39	0,34
10^a Harmônica	0,18	0,17	0,14	10^a Harmônica	0,36	0,30	0,27
11^a Harmônica	0,54	0,58	0,51	11^a Harmônica	1,08	0,99	1,05
12^a Harmônica	0,15	0,17	0,12	12^a Harmônica	0,32	0,31	0,28
13^a Harmônica	0,45	0,33	0,44	13^a Harmônica	0,97	1,03	1,01
14^a Harmônica	0,13	0,13	0,10	14^a Harmônica	0,25	0,25	0,27
15^a Harmônica	0,15	0,16	0,10	15^a Harmônica	0,30	0,29	0,22
16^a Harmônica	0,10	0,11	0,09	16^a Harmônica	0,18	0,18	0,20
17^a Harmônica	0,15	0,14	0,13	17^a Harmônica	0,55	0,59	0,46
18^a Harmônica	0,09	0,09	0,08	18^a Harmônica	0,13	0,16	0,17
19^a Harmônica	0,12	0,12	0,12	19^a Harmônica	0,29	0,40	0,26
20^a Harmônica	0,08	0,08	0,07	20^a Harmônica	0,12	0,14	0,13
21^a Harmônica	0,08	0,07	0,07	21^a Harmônica	0,13	0,19	0,13
22^a Harmônica	0,07	0,07	0,06	22^a Harmônica	0,12	0,14	0,13
23^a Harmônica	0,07	0,08	0,07	23^a Harmônica	0,18	0,18	0,13
24^a Harmônica	0,07	0,06	0,06	24^a Harmônica	0,11	0,12	0,11
25^a Harmônica	0,07	0,06	0,07	25^a Harmônica	0,13	0,15	0,13

A Figura 23 apresenta os valores máximos das harmônicas individuais de tensão e corrente:

FIGURA 23 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO E CORRENTE ALIMENTADOR COMERCIAL



Semelhante aos outros alimentadores, as 5^a e 7^a harmônicas são as que possuem maiores magnitudes para os THD's totais, acompanhadas da 2^a, 3^a, 11^a e 13^a harmônicas. Em ambos os THD's, novamente a 2^a harmônica se mostra com valores superiores a 3^a harmônica em um dado momento. No instante de THD máximo de tensão e corrente, diferentemente do alimentador anterior, não é onde as 2^a harmônica se destaca, mas sim a 5^a e 7^a harmônicas.

Observando as distorções harmônicas de tensão e corrente ao longo do tempo durante os sete dias de medição, apresentadas nas Figuras 24 e 25, percebe-se a mesma periodicidade para o THD de tensão, e a forma quase aleatória do THD de corrente, com destaque para o domingo:

FIGURA 24 - THD V – ALIMENTADOR COMERCIAL

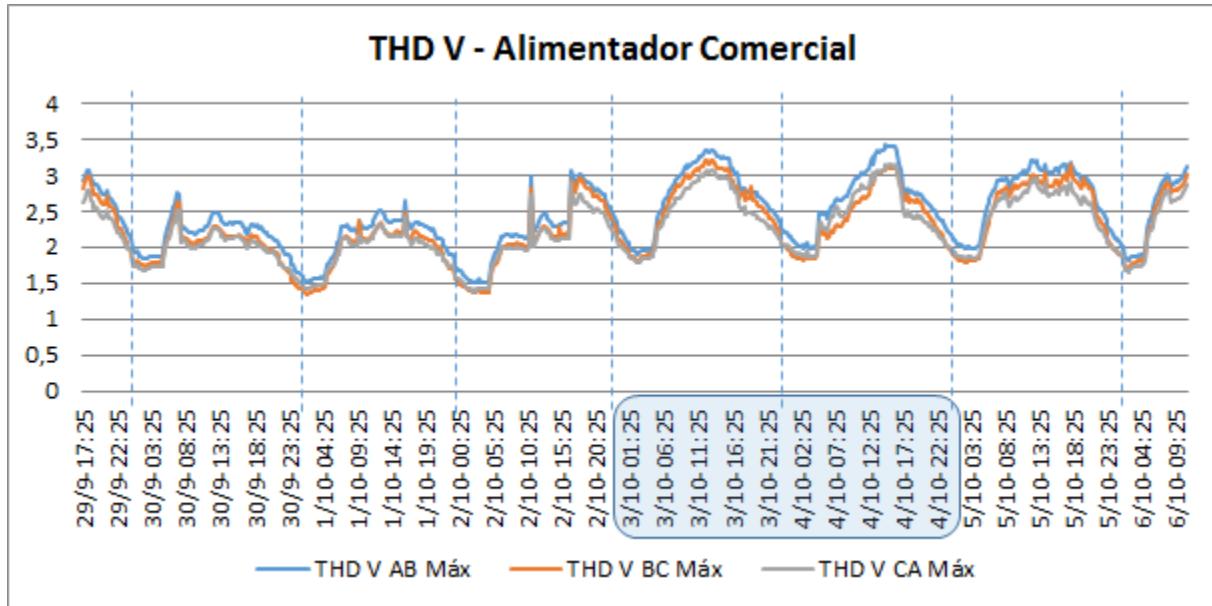
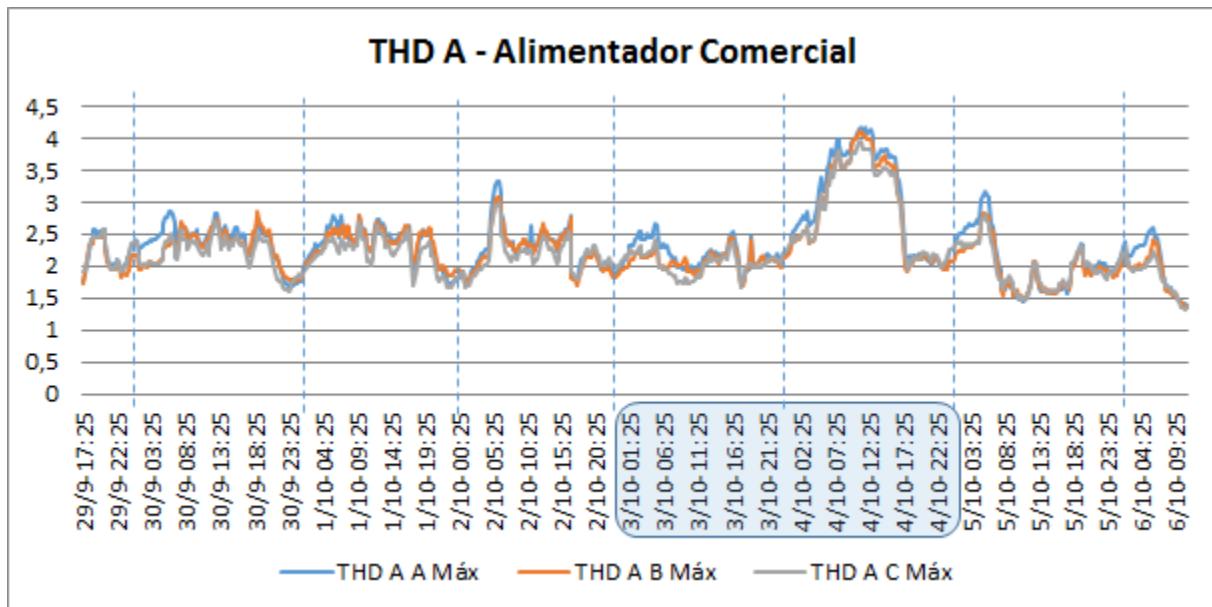


FIGURA 25 - THD A – ALIMENTADOR COMERCIAL



Como no alimentador industrial o comportamento da distorção de tensão em dias de semana é uniforme, apresentando leve diferença no final de semana (destaque na figura). O THD de corrente, por sua vez, não apresenta periodicidade alguma, revelando que não há relação direta entre THD de corrente e carga. Com o intuito de avaliar a proporcionalidade da distorção harmônica com a potência

demandada, as Figuras 26 e 27 comparam cada uma das distorções com a Potência Ativa suprida no período.

FIGURA 26 - THD V X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR COMERCIAL

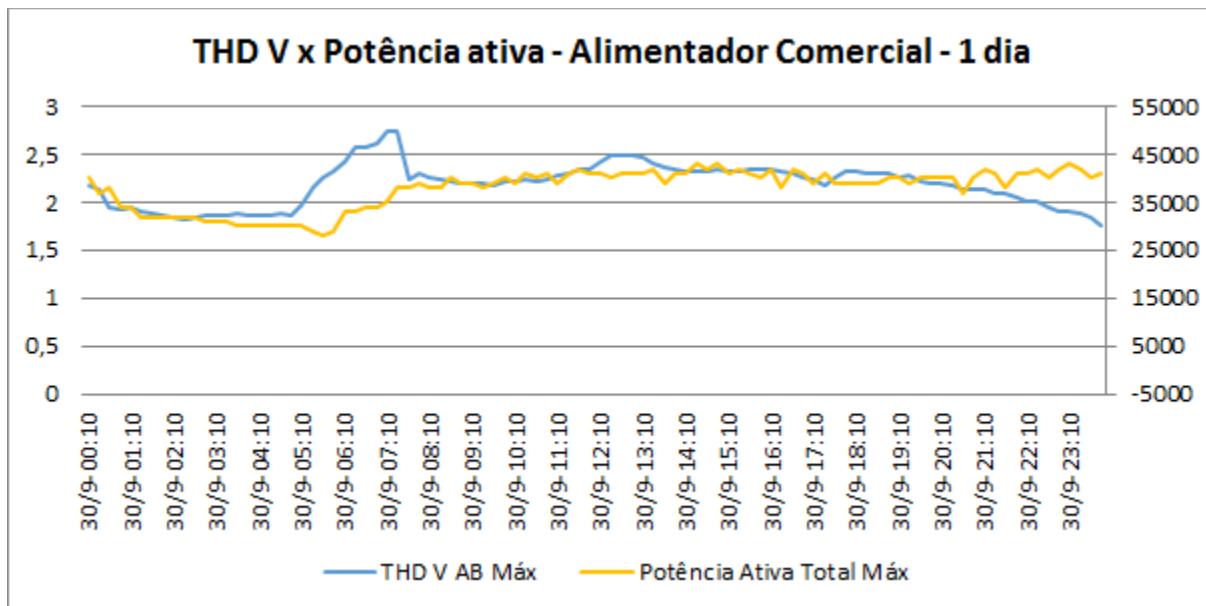
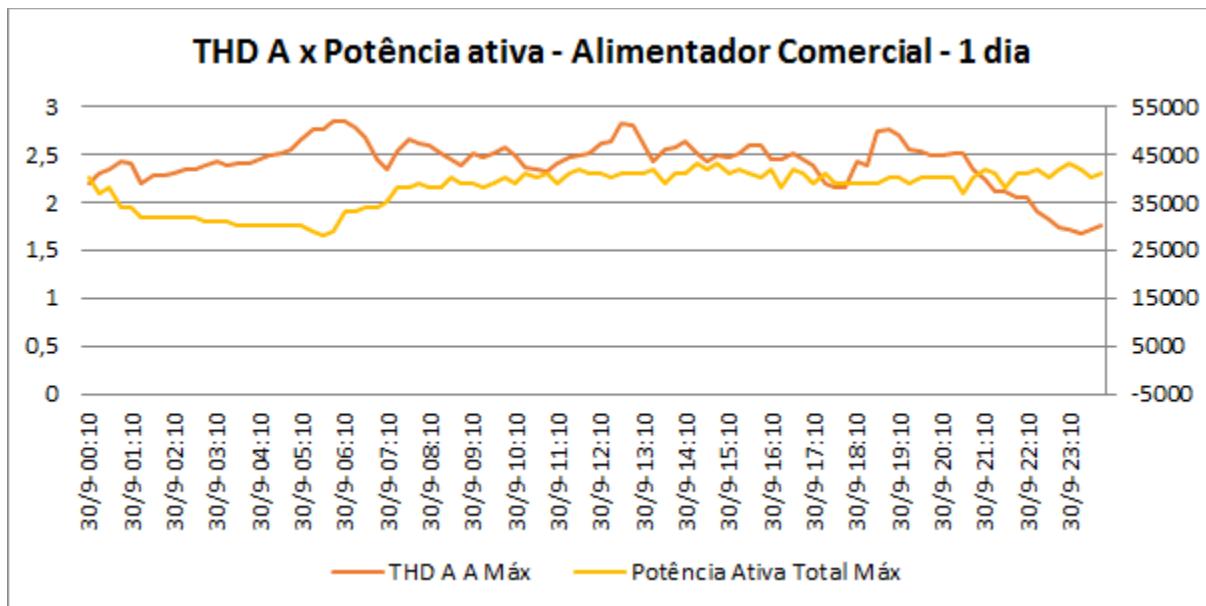


FIGURA 27 - THD A X POTÊNCIA ATIVA – ALIMENTADOR COMERCIAL



As Figuras 26 e 27 revelam a evolução de THD de tensão e corrente ao longo de um dia, assim como, a evolução da potência ativa demandada pelo alimentador no mesmo período. Constatase que a potência ativa permanece estável durante o dia, enquanto as distorções sofrem variações, novamente revelando a não proporcionalidade da potência demandada com a THD infligido.

4.4 RESIDÊNCIA UNIFAMILIAR

Após as medições nos alimentadores da Energisa apresentados acima, com o intuito de aprofundar no estudo de um desses alimentadores em busca das fontes geradoras de harmônicas, tendo o alimentador residencial revelado os valores mais uniformes e, por ter este, a maior facilidade de acesso dentre os demais; escolheu-se medir o conteúdo de harmônicas em uma residência. Serão apresentados a seguir os resultados obtidos durante as medições na residência unifamiliar em questão.

A Tabela 12 abaixo resume os valores máximos, médios e mínimos encontrados durante os quatro dias de medição:

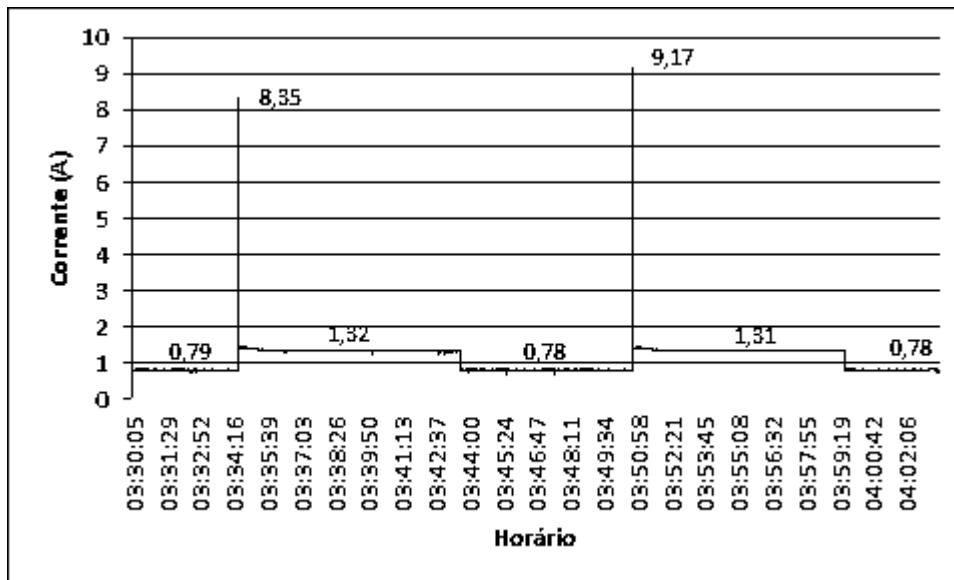
TABELA 12 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO PROJETO PILOTO

Tabela Resumo	Mínimo	Médio	Máximo
Tensão (V rms)	207,46	212,88	216,81
Corrente (A rms)	0,1	0,96	9,17
Frequência	59,873	60,00	60,085
Fator de potência	-0,24	0,30	0,68
THD V	1,61	2,14	2,84
THD A	1,69	6,14	27,63

Observa-se que os valores de tensão são ligeiramente inferiores aos 220V contratados, entretanto ainda acima dos limites inferiores exigidos pela ANEEL que é de 201V. O valor apresenta variação máxima de 2,54% em relação à média.

A corrente máxima medida apresentou valor bem acima da média, por meio da Figura 28 percebe-se que se trata da corrente de pick-up do condicionador de ar durante os ciclos de funcionamento do equipamento (durante a madrugada).

FIGURA 28 - CORRENTE MÁXIMA NA RESIDÊNCIA DURANTE O PERÍODO



Em relação à frequência, esta apresenta uma variação ínfima de no máximo 0,21%, estando dentro dos limites estabelecidos pela ANEEL que é de 0,5HZ em relação aos 60Hz.

Entretanto, o fator de potência medido apresenta graves resultados: em períodos passa de indutivo a capacitivo e revela valores incoerentes com a realidade da carga instalada na residência (na sua maioria resistiva). O fator de potência apresentado pelo aparelho é a razão de potência real pela potência aparente do rms total, incluindo harmônicas. Segundo Conroy (2001) a medição direta do fator de potência por intermédio de medidores pode ser distorcida pela presença de harmônicas, alterando o resultado da medição. O mais indicado seria o cálculo do fator de potência através das potências.

O THD de tensão revelou valores dentro do limite estabelecido de 5% pela Norma IEEE Std 519 e de 10% pelo Módulo 8 do PRODIST, não apresentando distorções significativas. Em resumo, 100% das medições estavam abaixo dos 3%, sendo 50% entre 1 e 2 e os outros 50% entre 2 e 3.

Contudo, já o THD de corrente revelou valores bem acima dos estabelecidos pela Norma IEEE em qualquer nível estabelecido (o valor varia em função da corrente de curto circuito sobre a corrente de carga, no caso do apartamento a corrente de curto circuito é desconhecida). Já o módulo 8 do PRODIST não possui valores limites estabelecidos para THD A.

Na tabela 13 são apresentadas as harmônicas individuais de tensão e corrente até a 25^a harmônica, destacando-se em vermelho aquelas que apresentaram os maiores valores globais.

TABELA 13 - RESUMO DOS PARÂMETROS OBTIDOS NO PROJETO PILOTO

Residência Unifamiliar				Residência Unifamiliar			
THD V	Máximo	Médio	Mínimo	THD A	Máximo	Médio	Mínimo
2^a Harmônica	0,36	0,08	0,03	2^a Harmônica	18,19	0,75	0,16
3^a Harmônica	1,42	0,95	0,59	3^a Harmônica	24,09	5,45	0,86
4^a Harmônica	0,15	0,04	0,01	4^a Harmônica	6,85	0,29	0,05
5^a Harmônica	2,37	1,63	0,46	5^a Harmônica	11,16	2,31	0,66
6^a Harmônica	0,08	0,02	0,01	6^a Harmônica	4,37	0,15	0,03
7^a Harmônica	0,97	0,42	0,03	7^a Harmônica	5,42	0,76	0,05
8^a Harmônica	0,07	0,02	0,01	8^a Harmônica	3,23	0,10	0,02
9^a Harmônica	0,73	0,43	0,2	9^a Harmônica	3,11	0,43	0,03
10^a Harmônica	0,06	0,01	0,01	10^a Harmônica	2,58	0,08	0,01
11^a Harmônica	0,91	0,52	0,22	11^a Harmônica	2,39	0,34	0,05
12^a Harmônica	0,05	0,01	0,01	12^a Harmônica	2,07	0,07	0,01
13^a Harmônica	0,42	0,20	0,02	13^a Harmônica	1,95	0,24	0,04
14^a Harmônica	0,05	0,01	0	14^a Harmônica	1,74	0,06	0,01
15^a Harmônica	0,43	0,21	0,03	15^a Harmônica	1,64	0,14	0,02
16^a Harmônica	0,05	0,01	0	16^a Harmônica	1,52	0,05	0,01
17^a Harmônica	0,57	0,21	0,03	17^a Harmônica	1,42	0,10	0,01
18^a Harmônica	0,06	0,01	0	18^a Harmônica	1,32	0,04	0,01
19^a Harmônica	0,55	0,11	0,03	19^a Harmônica	1,25	0,09	0,01
20^a Harmônica	0,06	0,01	0	20^a Harmônica	1,18	0,04	0,01
21^a Harmônica	0,34	0,12	0,01	21^a Harmônica	1,13	0,06	0,01
22^a Harmônica	0,08	0,01	0	22^a Harmônica	1,06	0,03	0,01
23^a Harmônica	0,42	0,14	0,04	23^a Harmônica	1,03	0,05	0,01
24^a Harmônica	0,08	0,01	0	24^a Harmônica	0,96	0,03	0,01
25^a Harmônica	0,24	0,04	0	25^a Harmônica	0,93	0,04	0,01

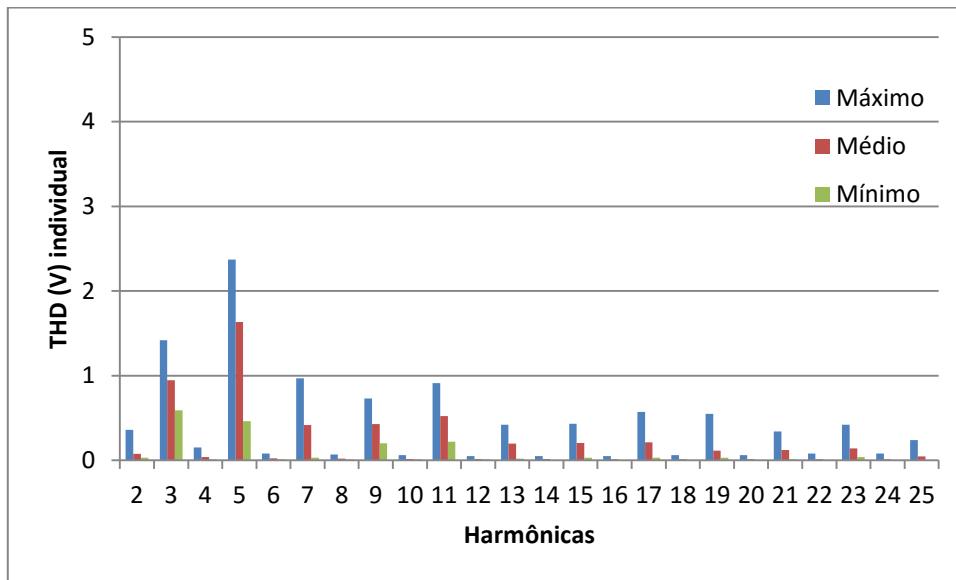
O maior THD de tensão (2,84) ocorreu em uma faixa de 4 minutos próximos das 23h do dia 14/06, através de fonte desconhecida, e acometida principalmente pela 5^a harmônica (2,37) e pela 3^a harmônica (1,42). Em relação às harmônicas individuais, não houve transgressão, em nenhum momento da medição, do limite dos 3% de THD de tensão individual estabelecido pela Norma IEEE 519 Std, nem pela Tabela 14 estabelecida pelo Modulo 8 do PRODIST.

TABELA 14 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO - MEDIÇÃO X LIMITE

Harmônica	Medida	Limite
1	100	-
2	0,36	2,50
3	1,42	6,50
4	0,15	1,50
5	2,37	7,50
6	0,08	1,00
7	0,97	6,50
8	0,07	1,00
9	0,73	2,00
10	0,06	1,00
11	0,91	4,50
12	0,05	1,00
13	0,42	4,00
14	0,05	1,00
15	0,43	1,00
16	0,05	1,00
17	0,57	2,50
18	0,06	1,00
19	0,55	2,00
20	0,06	1,00
21	0,34	1,00
22	0,08	1,00
23	0,42	2,00
24	0,08	1,00
25	0,24	2,00

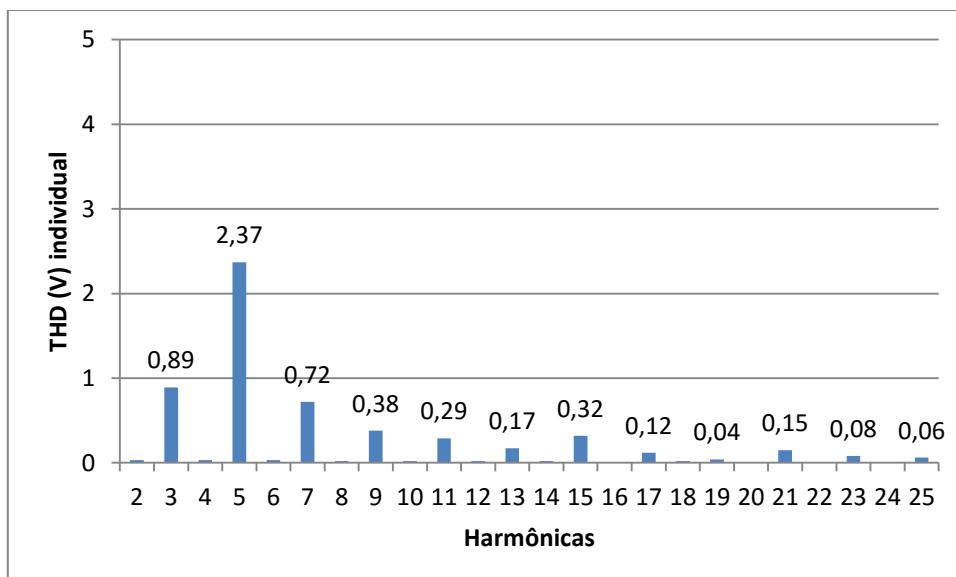
A Figura 29 apresenta as harmônicas individuais de tensão considerando os valores máximos, médios e mínimos de cada harmônica de forma coincidente. Observa-se que apesar da 5^a harmônica se sobressair em relação a 3^a, nos valores mínimos a 3^a harmônica supera a 5^a, evidenciando que aquela é a harmônica mais presente durante as medições, apesar de não ser a maior infratora.

FIGURA 29 - HÂRMONICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO COINCIDENTES



No momento de THD total máxima (2,84), a Figura 30 revela a distribuição das harmônicas individuais, apresentando maiores valores para as 5^a, 3^a e 7^a harmônicas, respectivamente. Conforme Shutter, Vollkommer e Kirkpatrick (1989), a 5^a harmônica é sempre a principal vilã no THD de tensão. Mesmo os limites estabelecidos pelo PRODIST atribuem a 5^a harmônica de tensão um limite superior em relação a 3^a e a 7^a (segundos maiores limites).

FIGURA 30 - HÂRMONICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO NO MOMENTO DE THD TOTAL MÁXIMO

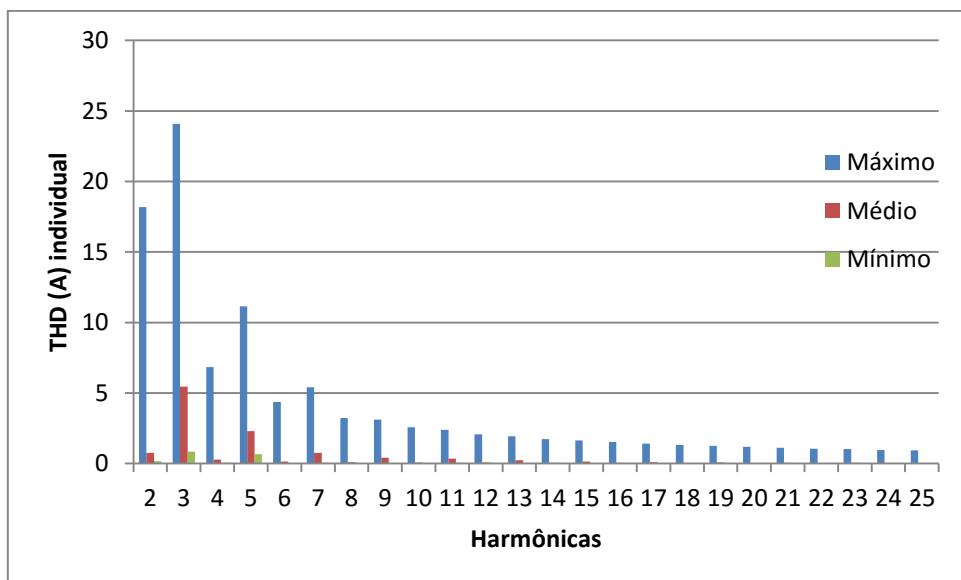


O cenário anterior difere bastante quando o foco se torna as harmônicas individuais de corrente (Tabela 13). O máximo valor de corrente foi de 9,17A no dia

15/06 as 03h50. Nesse pico de corrente, os valores de THD de tensão foram de apenas 1,78, com 3^a e 5^a harmônicas de tensão igual a 0,99 e 1,21, respectivamente. Já o THD de corrente foi igual a 7,35; próximo da média e entre a 2^a e 7^a harmônicas de corrente variando entre 4,78 e 1,16. Esse resultado indica que valores de altos de corrente não significam valor altos de THD.

Observa-se predominância da 2^a a 7^a harmônica, com destaque para a 3^a, 2^a e 5^a harmônica respectivamente. A Figura 31 apresenta as harmônicas individuais de corrente considerando os valores máximos, médios e mínimos de cada harmônica de forma coincidente. Observa-se predominância de harmônicas pares e ímpares, que posteriormente verificou-se tratar de dois momentos distintos, um com predominância de harmônicas pares e outro com predominância de harmônicas ímpares.

FIGURA 31 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE CORRENTE COINCIDENTES

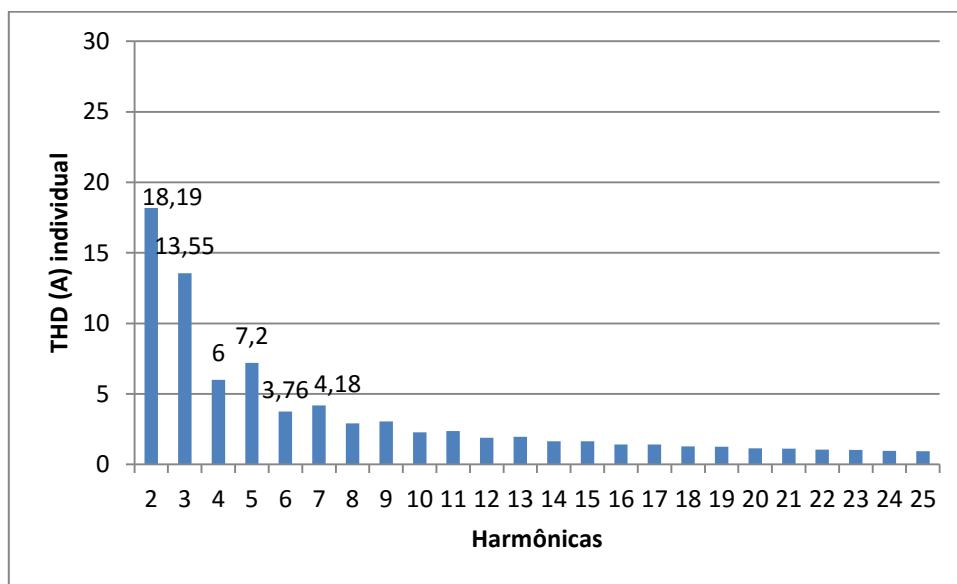


O maior THD de corrente (27,63) ocorreu em uma faixa de 10 segundos no início da madrugada do dia 15, quando a corrente era aproximadamente 2,4A e quando os eletrodomésticos ligados eram apenas o condicionar de ar, a geladeira e o bebedouro. Os maiores infratores foram a 3^a e 5^a harmônica, com valores de 24,09 e 11,11, respectivamente.

Na Figura 32 é apresentado o momento em que a 2^a harmônica é predominante no THD, semelhante ao estudo de Shutter, Vollkommer e Kirkpatrick (1989), que também observaram majoração da segunda harmônica, sem explicação

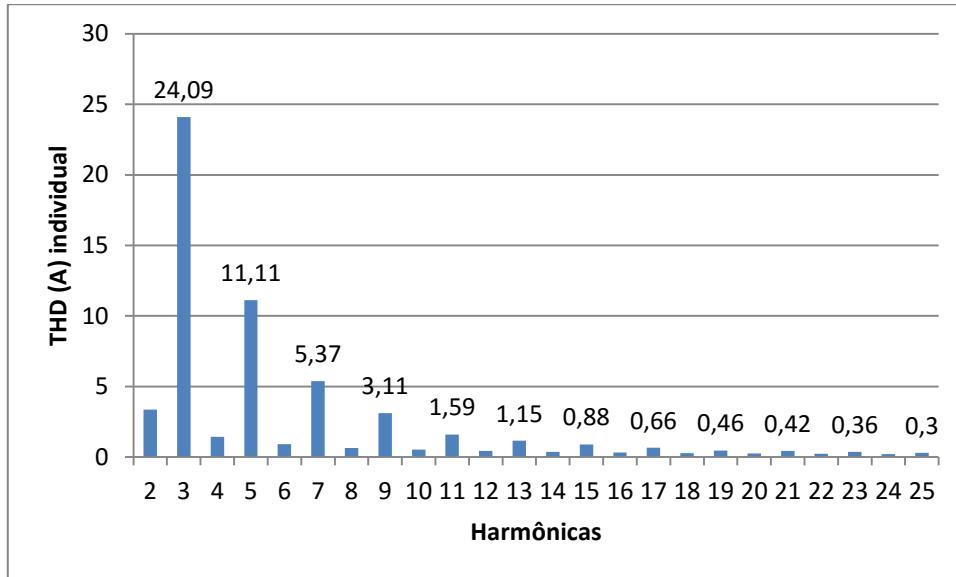
plausível. Os referidos autores afirmam que a introdução da componente DC pela superposição da 2^a harmônica, provoca nos transformadores das fontes de alimentação o que chamam de "rattle hum" ou ruído de vibração das chapas dos transformadores, que são incômodos aos ouvidos pela emissão em baixa frequência, e provoca, também, sobreaquecimento. Coincidência ou não, o bebedouro da residência apresenta forte vibração durante os momentos em que está em funcionamento.

FIGURA 32 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE CORRENTE EM MOMENTO MAIORES INFRAÇÕES POR HARMÔNICAS PARES



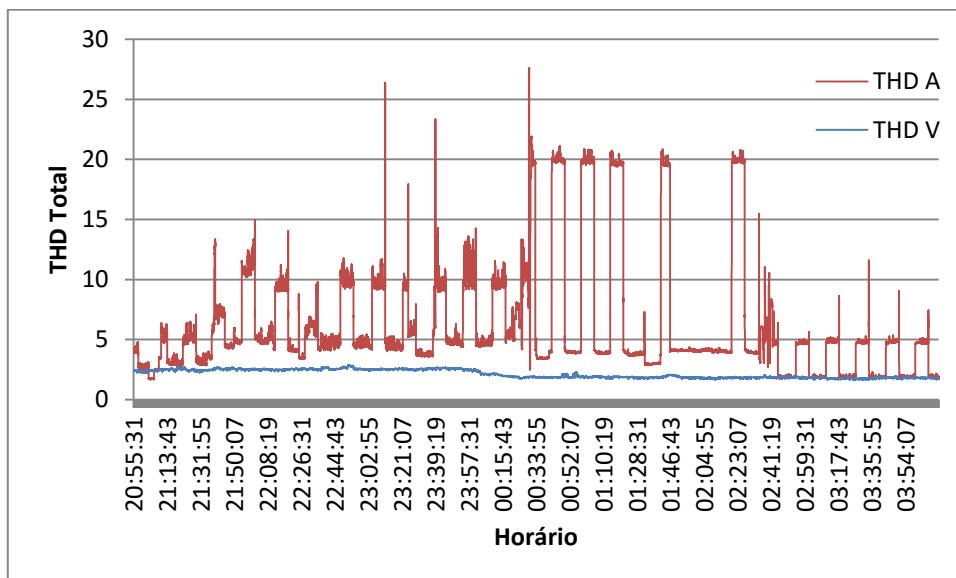
Entretanto, os momentos de sobreposição das harmônicas pares é ínfimo em comparação com a predominância das harmônicas ímpares como é mostrado na Figura 33. Principais vilões são a 3^a, 5^a, 7^a e 9^a harmônica; respectivamente.

FIGURA 33 - HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE CORRENTE EM MOMENTO MAIORES INFRAÇÕES POR HARMÔNICAS IMPARES



Um THD como o da Figura 33 foi observado durante vários momentos nos quatro dias de medição, não sendo possível atribuir a um determinado equipamento específico como fonte gerador das harmônicas. A Figura 34 revela a evolução dos THD's de tensão e corrente no primeiro dia de medição e também, como eles se apresentam ao longo do tempo. O THD de tensão permaneceu praticamente estável, enquanto que o THD de corrente varia intensamente.

FIGURA 34 - EVOLUÇÃO DOS THD'S NO TEMPO



Em relação às transgressões, houve várias transgressões de THD de corrente, na maioria dos casos compostos pelas 3^a, 5^a e 7^a harmônica. Contudo, também houve transgressões cometidas pelas harmônicas pares 2^a, 4^a e 6^as harmônicas. Estatisticamente, 87% das medições apresentaram THD inferior a 10, 11% entre 10 e 20, ficando apenas 2% acima dos 20.

4.5 CARACTERIZAÇÃO INDIVIDUAL POR EQUIPAMENTO GERADOR DE HARMÔNICA

Após a análise das distorções harmônicas da residência unifamiliar, buscou-se caracterizar individualmente quais equipamentos podiam ser as fontes geradoras das harmônicas detectadas. Para tanto, utilizando o osciloscópio citado no Capítulo 3, mensurou-se individualmente os diversos equipamentos existentes na residência em pleno funcionamento, priorizando as harmônicas de corrente em detrimento das harmônicas de tensão, em função daquelas serem as transgressoras dos limites estabelecidos em norma.

O comportamento em forma de onda de tensão e corrente e as harmônicas detectadas em cada um dos equipamentos são evidenciados na tabela abaixo:

TABELA 15 - RESUMO DOS ELETRODOMESTICOS DA RESIDÊNCIA

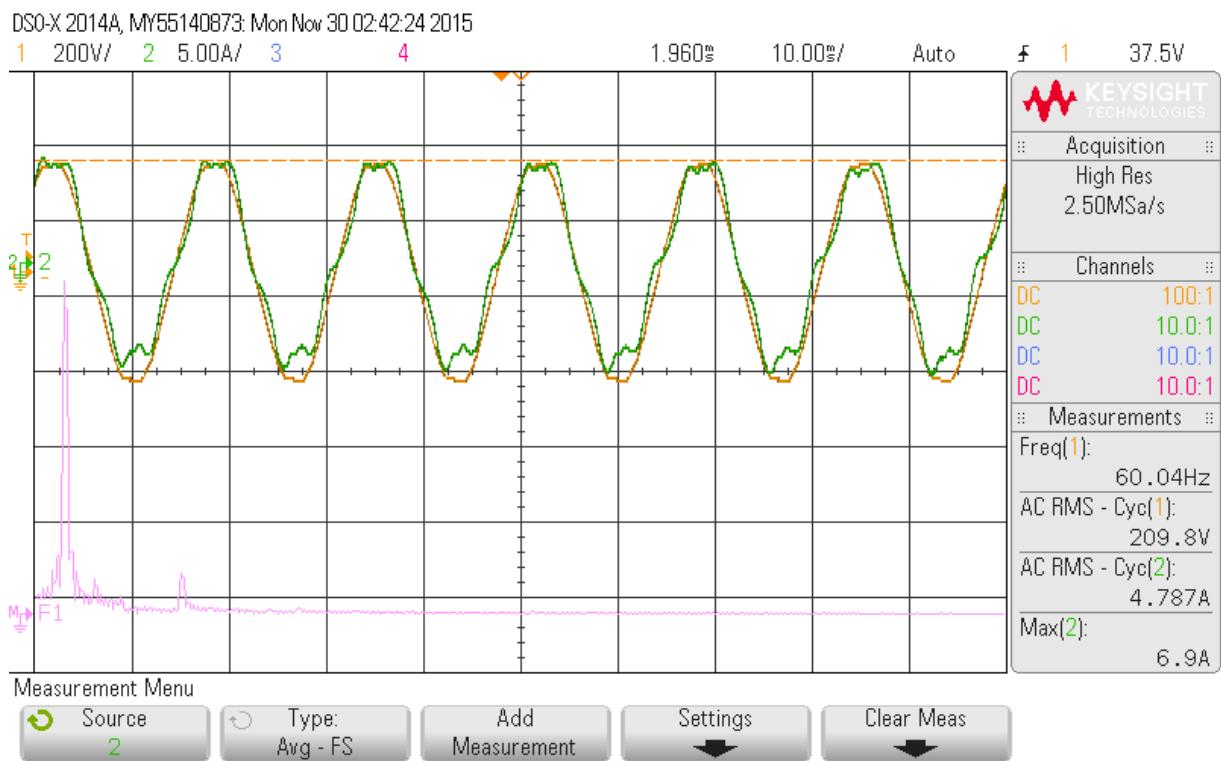
Equipamento	Qtd	Tempo de funcionamento	Potência Ativa (W)
Condicionador de ar	1	Noturno	1096W
Geladeira	1	Initerrupto	200W
Micro-ondas	1	Esporádico	900W
Televisor LED	2	Parcial	100W
Carregador de celular	2	Parcial	32W
Notebook	2	Parcial	60W
Ventilador	1	Initerrupto	126W
Gelágua	1	Initerrupto	150W
Máquina de lavar roupa	1	Esporádico	1030W
Lâmpada compacta	13	Noturno	15W

4.5.1 Condicionador de ar

Foi analisado um condicionador de ar de 12mil btus instalado na residência, que funciona no período noturno entre as 22h até as 06h da manhã. Este equipamento não possui inversor agregado e funciona no sistema de termostato com partida e desligamento do compressor.

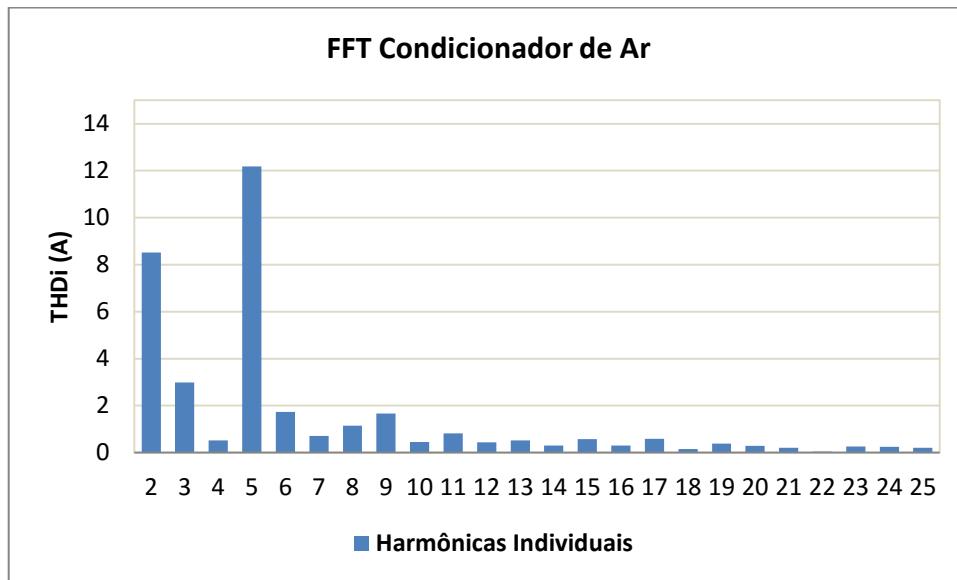
A Figura 35 revela como se ocorre as formas de onda de tensão e corrente de um condicionador de ar desse porte e a Figura 36 a FFT do equipamento analisado quando em operação.

FIGURA 35 - FORMAS DE ONDA DE UM CONDICIONADOR DE AR



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 36 - FFT DE UM CONDICIONADOR DE AR



Percebe-se pela Figura 35 uma pequena distorção na forma de onda de corrente, onde a Figura 36 revela a presença da 2^a (8,52%), 3^a (2,99%) e em especial da 5^a harmônica de corrente, onde está representada uma THD individual de 10,12%.

4.5.2 Geladeira

Analizando a geladeira da residência, que funciona ininterruptamente, a Figura 37 revela como ocorre as formas de onda de tensão e corrente de uma geladeira desse porte e a Figura 38 a FFT do equipamento quando em operação.

FIGURA 37 - FORMAS DE ONDA DE UMA GELADEIRA

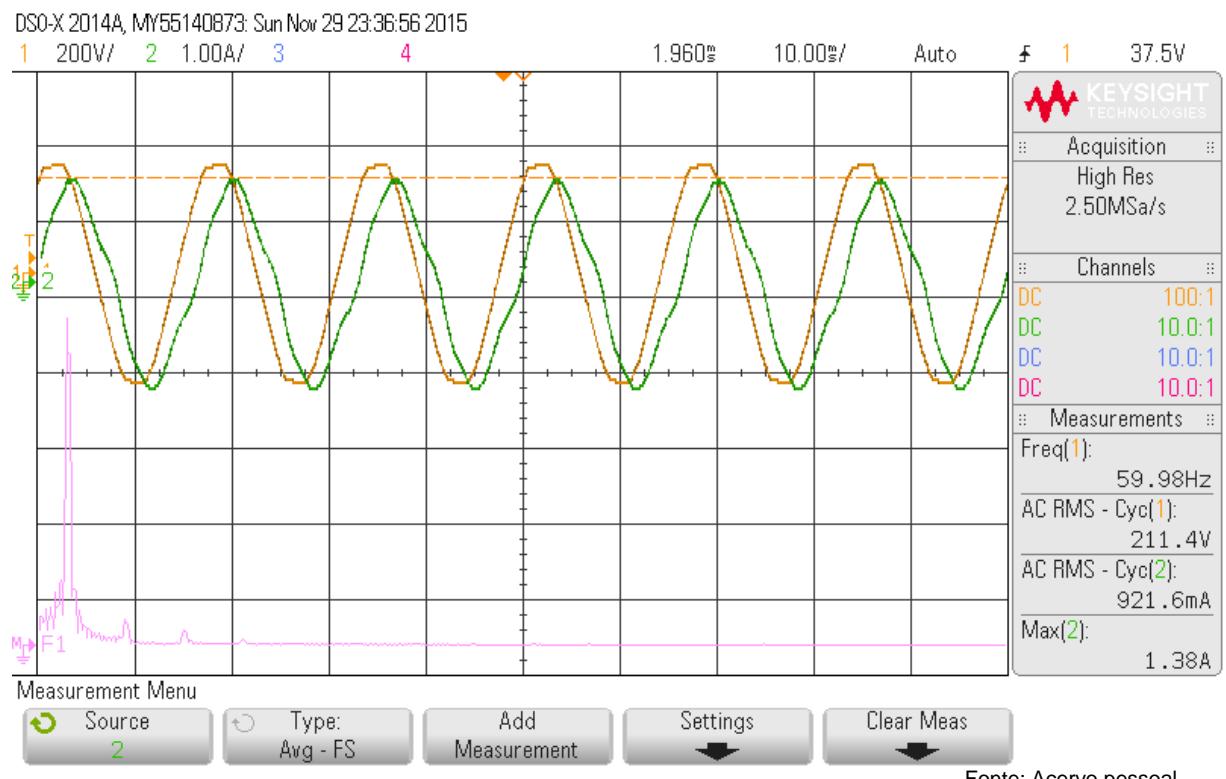
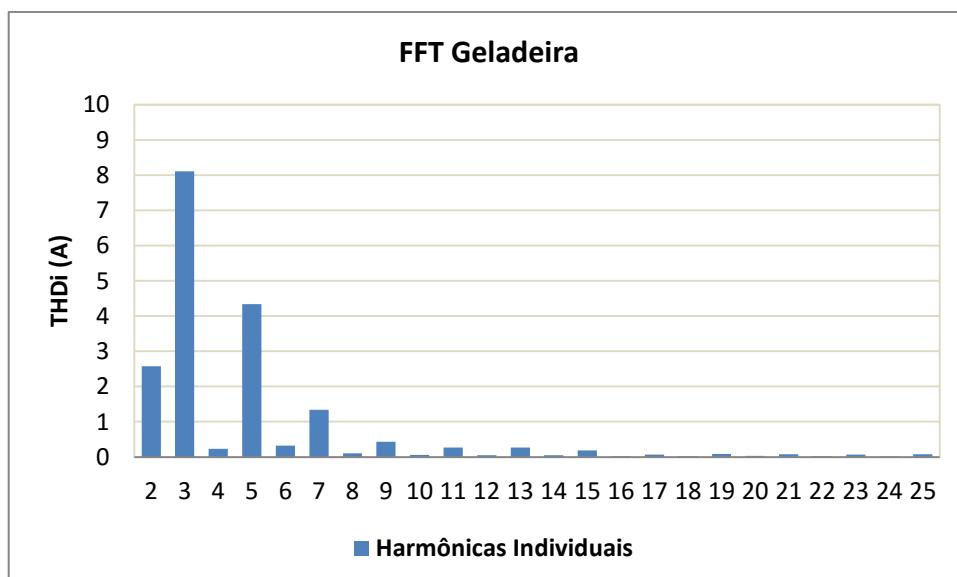


FIGURA 38 - FFT DE UMA GELADEIRA



Percebe-se pela Figura 37 uma baixa distorção na forma de onda de corrente, apesar da defasagem em relação a tensão provocada pelo motor do equipamento,

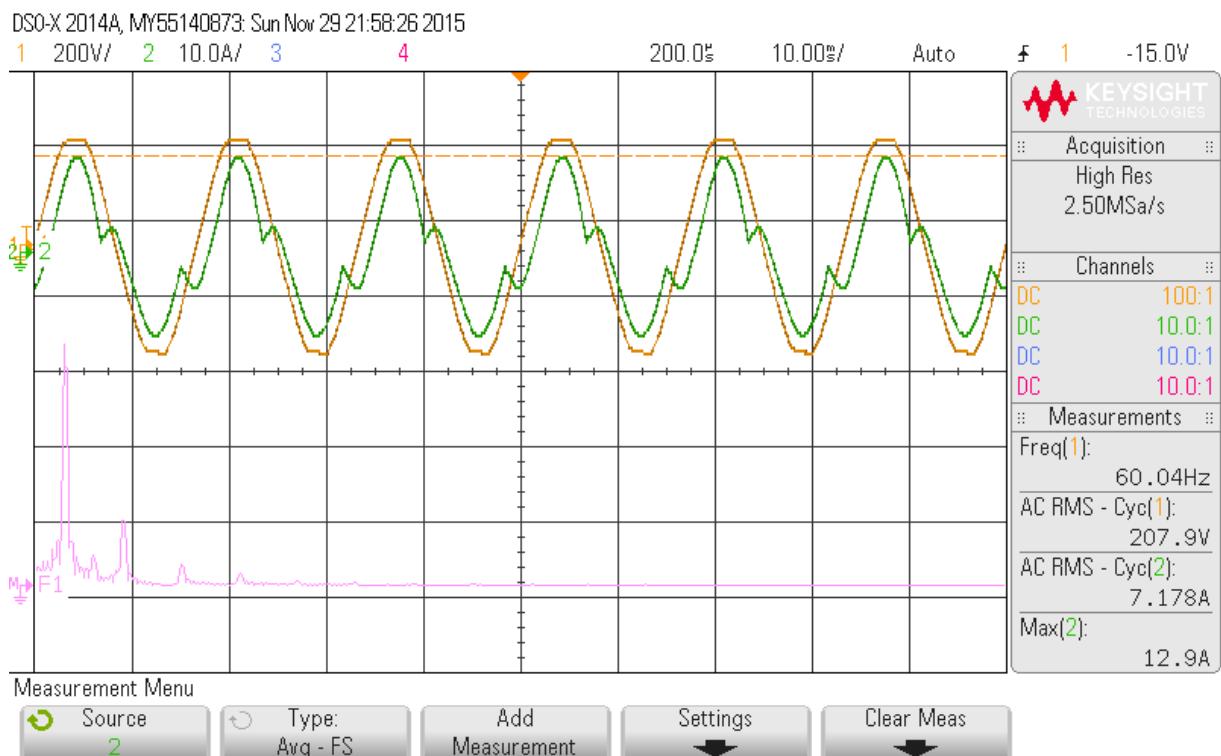
onde na Figura 38 revela a presença da 2^a (2,58%), 3^a (8,11%), 5^a (4,34%) e 7^a (1,34%) harmônicas; com destaque para as ímpares 3^a e 5^a.

4.5.3 Micro-ondas

O micro-ondas da residência funciona ocasionalmente em alguns poucos dias, durante um intervalo de tempo reduzido.

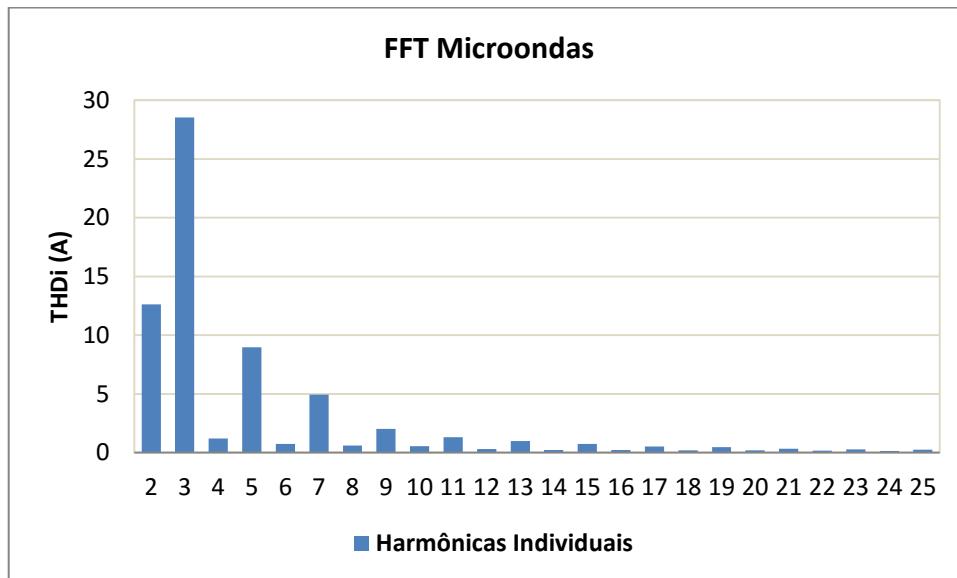
A Figura 39 revela as formas de onda de tensão e corrente desse micro-ondas e a Figura 40 a FFT do equipamento quando em funcionamento.

FIGURA 39 - FORMAS DE ONDA DE UM MICROONDAS



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 40 - FFT DE UM MICROONDAS



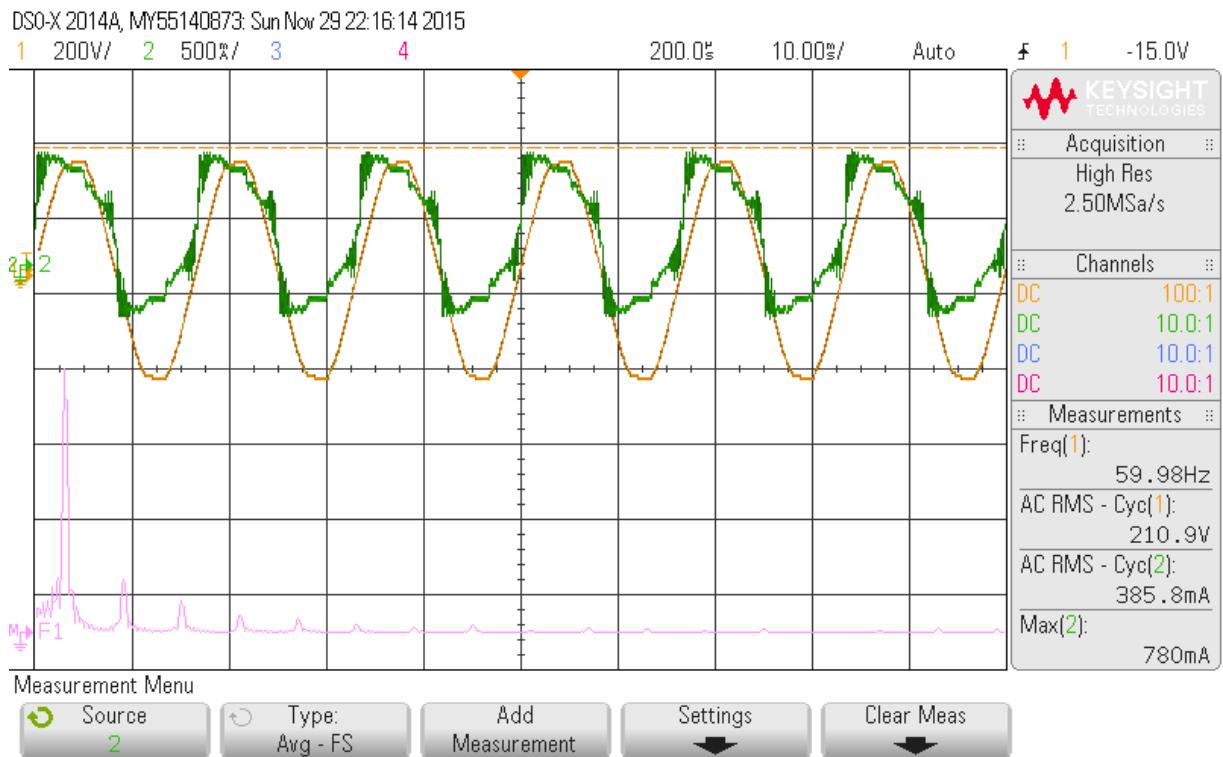
Percebe-se pela Figura 39 uma distorção significativa na forma de onda de corrente em relação a tensão provocada pelas ondas pulsadas emitidas pelo equipamento, onde a Figura 40 revela na FFT a presença da 2^a (12,61%), 3^a (28,56%), 5^a (8,98%) e 7^a (4,95%) harmônicas; com destaque para a 3^a harmônica.

4.5.4 Televisor LED

A residência possui um televisor led de 50", que funciona durante 1h pelo período da manhã, 1h pelo período da tarde e 3h no período noturno.

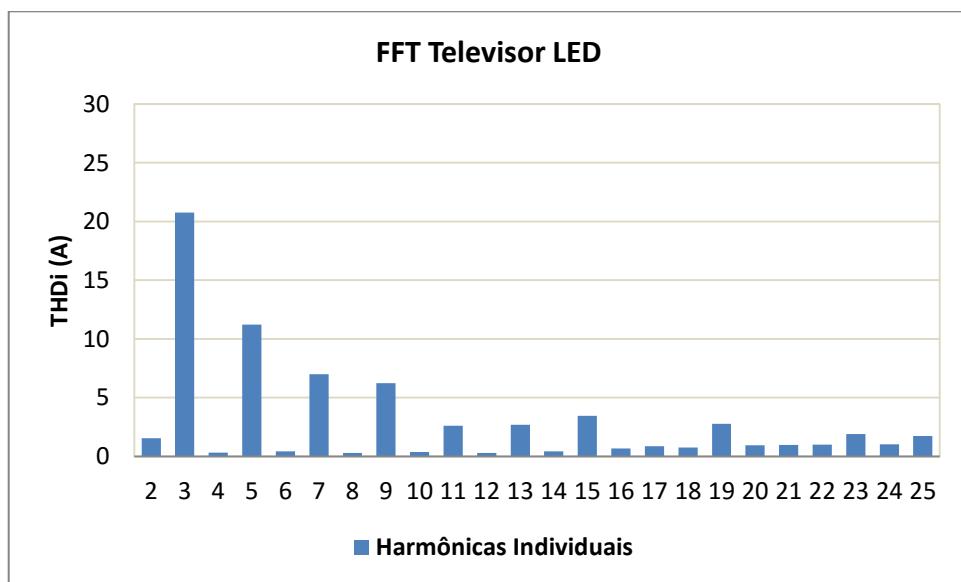
A Figura 41 apresenta as formas de onda de tensão e corrente desse televisor e a Figura 42 a FFT do equipamento quando ele se encontra em operação.

FIGURA 41 - FORMAS DE ONDA DE UM TELEVISOR LED



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 42 - FFT DE UM TELEVISOR LED



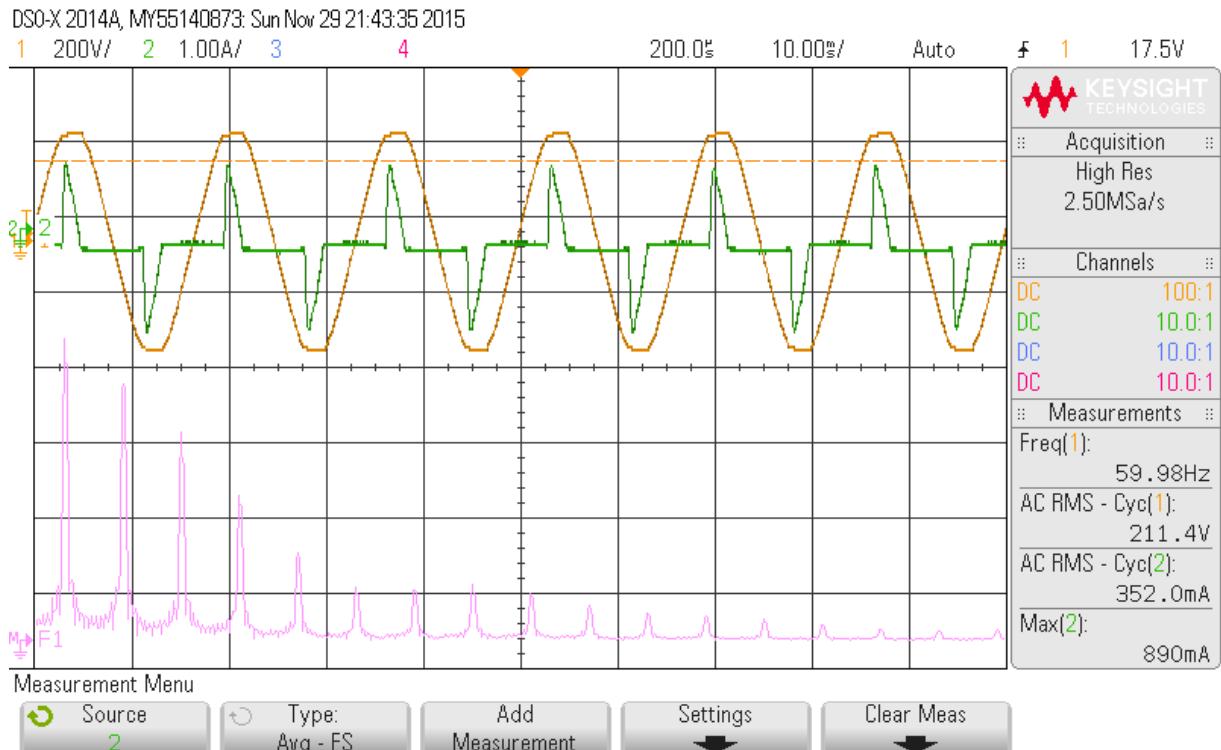
Percebe-se pela Figura 41 uma grande distorção na forma de onda de corrente em relação a tensão e a introdução de um nível CC até então desconhecido, apesar da baixa corrente mensurada (0,3A). Identificou-se após as medições um componente em falha na TV responsável por introduzir o nível CC na rede. A Figura 42 revela na FFT a presença da 3^a (20,74%), 5^a (11,21%), 7^a (6,99%), 9^a (6,24%) e 11^a (2,62%) harmônicas; com destaque para a 3^a harmônica.

4.5.5 Carregador de celular

A residência possui dois carregadores de celular, que funcionam normalmente no período noturno até a carga completa dos equipamentos.

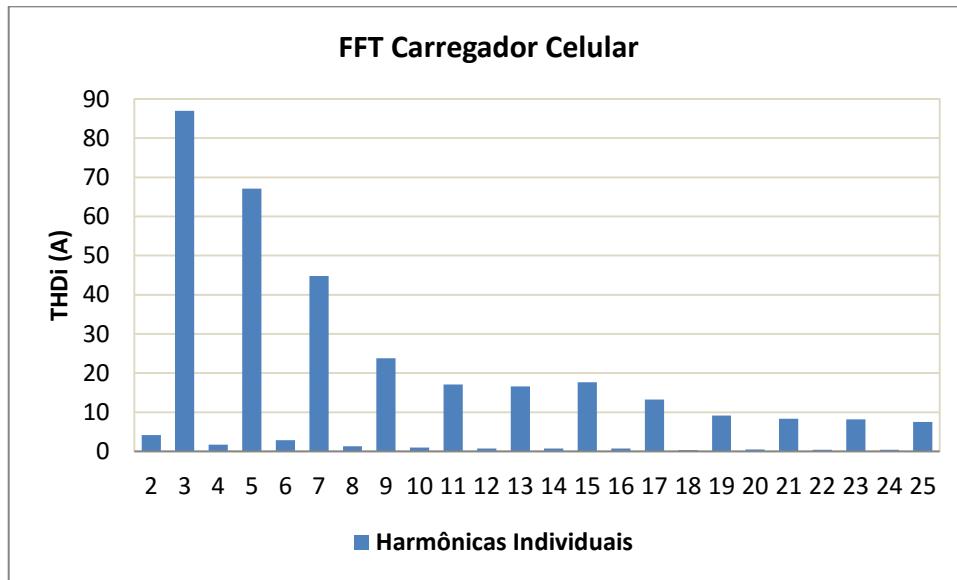
A Figura 43 revela como ocorre as formas de onda de tensão e corrente de um desses carregadores e a Figura 44 a FFT do equipamento quando ele está em funcionamento.

FIGURA 43 - FORMAS DE ONDA DE UM CARREGADOR DE CELULAR



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 44 - FFT DE UM CARREGADOR DE CELULAR



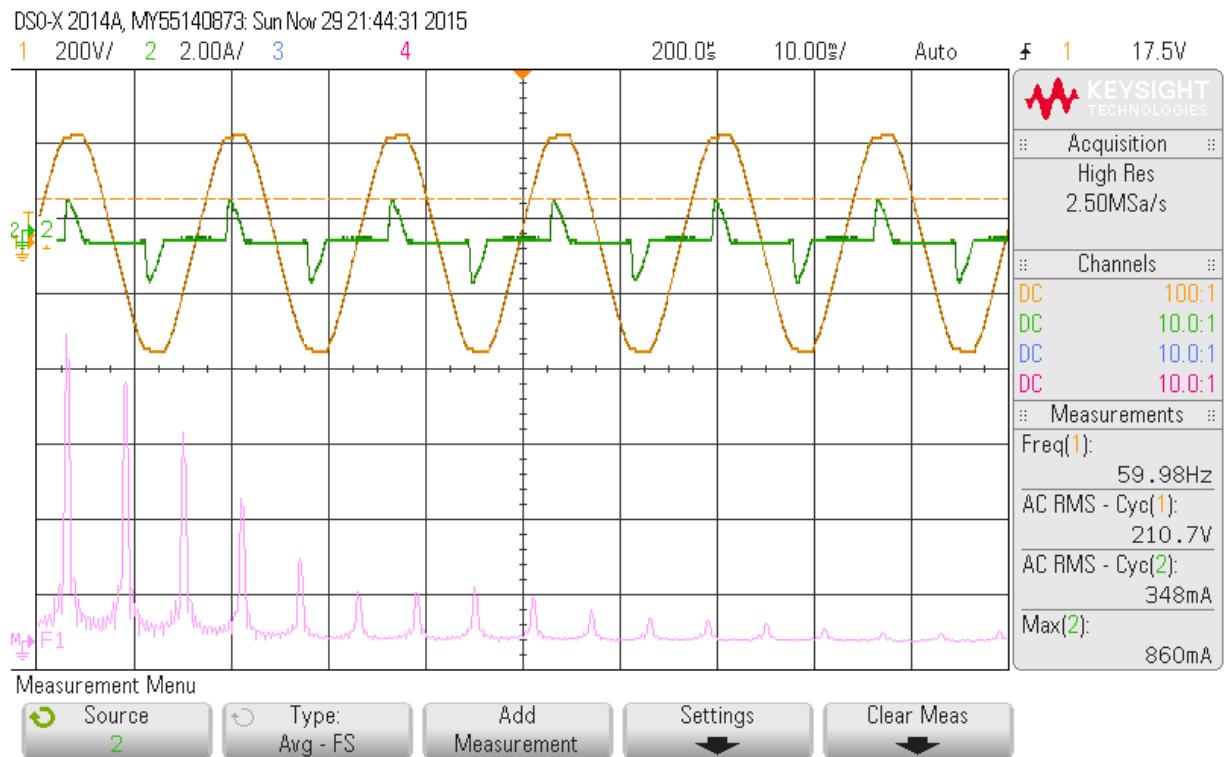
Percebe-se pela Figura 43 uma forma de onda de corrente típica de chaveamento a qual provoca forte distorção harmônica conforme revela a Figura 44 cuja FFT apresenta a 3^a (86,98%), 5^a (67,16%), 7^a (44,81%), 9^a (23,82%), 11^a (17,10%), 13^a (16,60%), 15^a(17,67) e todas as harmônicas ímpares subsequentes até a 25^a (última mensurada).

4.5.6 Notebook

Na residência são utilizados dois Notebooks, onde um deles funciona quase que ininterruptamente e o outro é ligado ocasionalmente no período noturno.

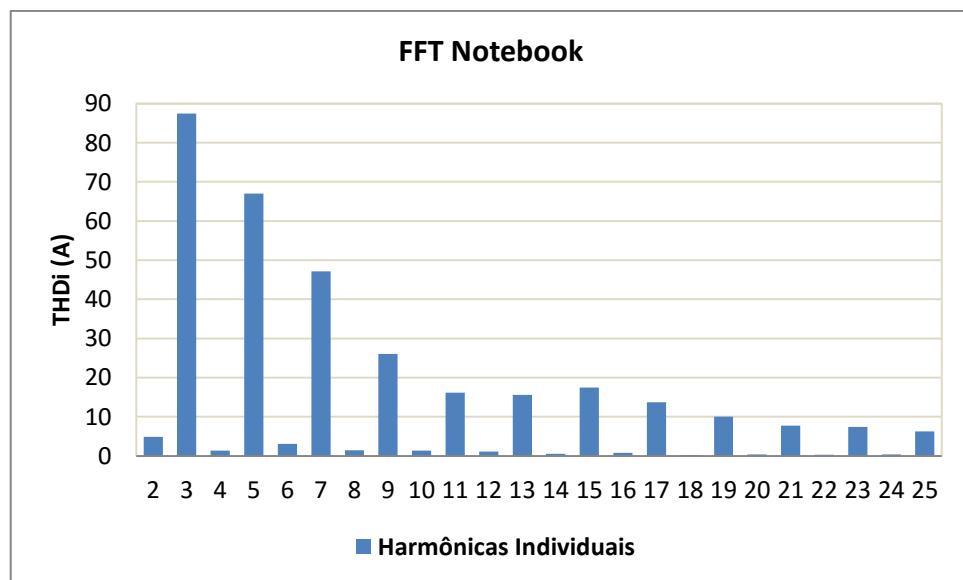
A Figura 45 revela como ocorre as formas de onda de tensão e corrente de um desses computadores e a Figura 46 a FFT do equipamento quando ele se encontra em operação.

FIGURA 45 - FORMAS DE ONDA DE UM NOTEBOOK



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 46 - FFT DE UM NOTEBOOK



Percebe-se pela Figura 45 uma forma de onda de corrente semelhante ao carregador de celular, cuja fonte chaveada provoca forte distorção harmônica conforme revela a Figura 46 cuja FFT apresenta a 3^a (87,49%), 5^a (67,00%), 7^a

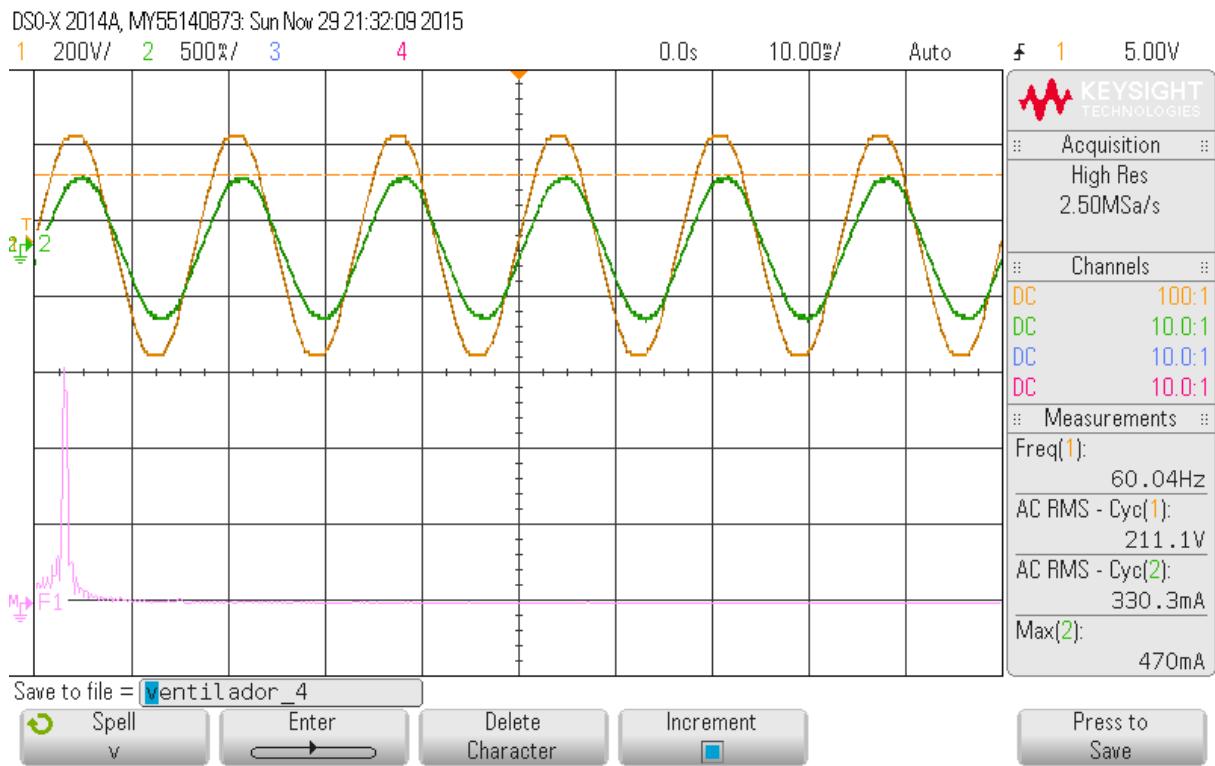
(47,14%), 9^a (26,05%), 11^a (16,16%), 13^a (15,6%), 15^a (17,48) e todas as harmônicas ímpares subsequentes até a 25^a (última mensurada).

4.5.7 Ventilador

A residência apresenta o uso de um ventilador que funciona durante quase todo o dia, mas é desligado durante a noite.

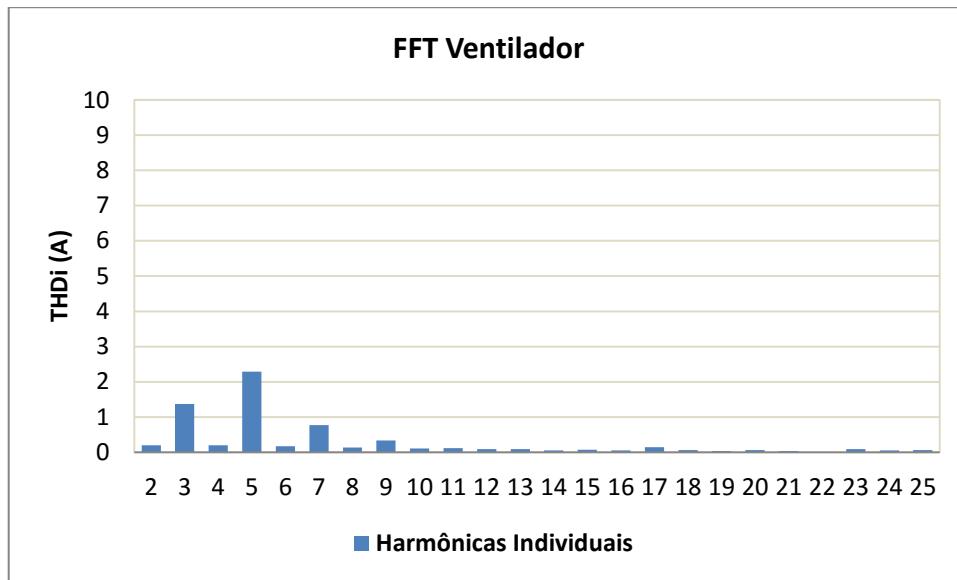
A Figura 47 revela como se dá as formas de onda de tensão e corrente desse ventilador e a Figura 48 a FFT do equipamento quando ele se encontra em operação.

FIGURA 47 - FORMAS DE ONDA DE UM VENTILADOR



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 48 - FFT DE UM VENTILADOR



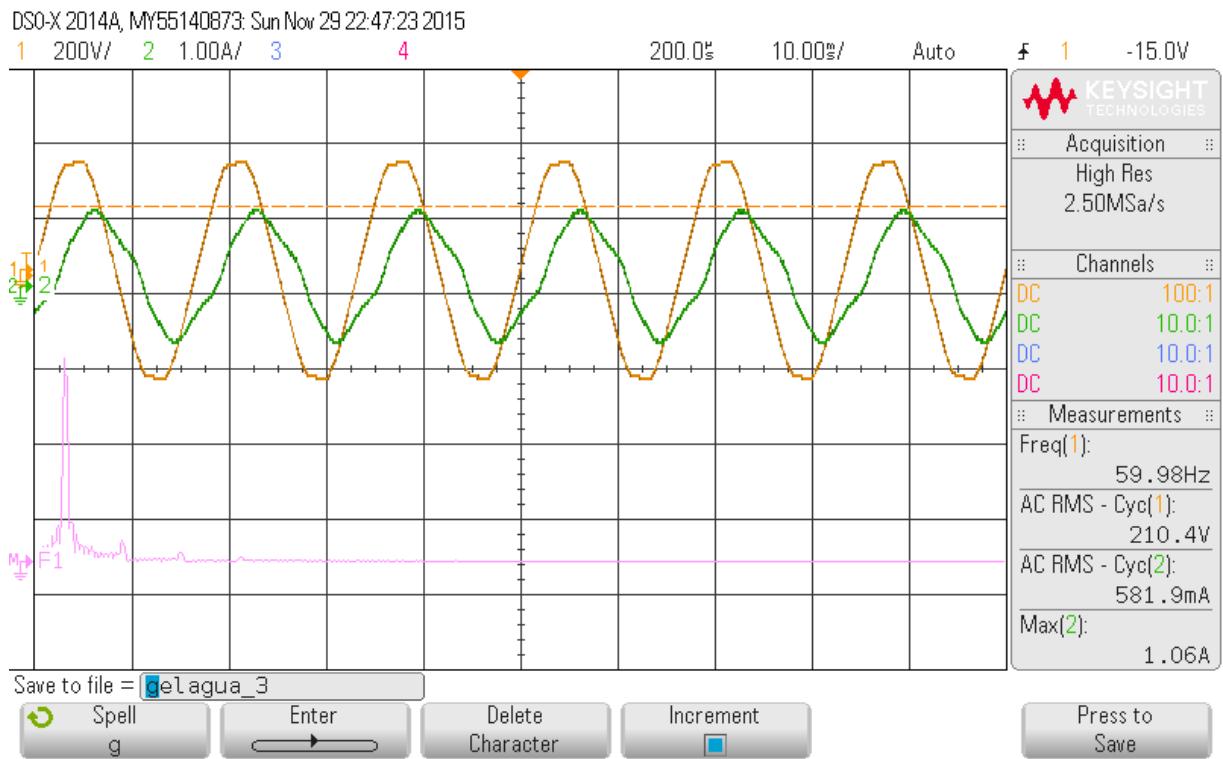
Percebe-se pela Figura 47 uma forma de onda sem distorção, como é esperando quando se trata de um equipamento puramente resistivo e linear, onde a Figura 48 praticamente não apresenta THD, com uma 3^a (1,37%) e 5^a (2,29%) harmônica apenas.

4.5.8 Gelágua

Na residência existe um gelágua, que assim como a geladeira funciona ininterruptamente, disparando de acordo com o acionamento do termostato a partida do motor para gelar a água armazenada e posteriormente seu desligamento.

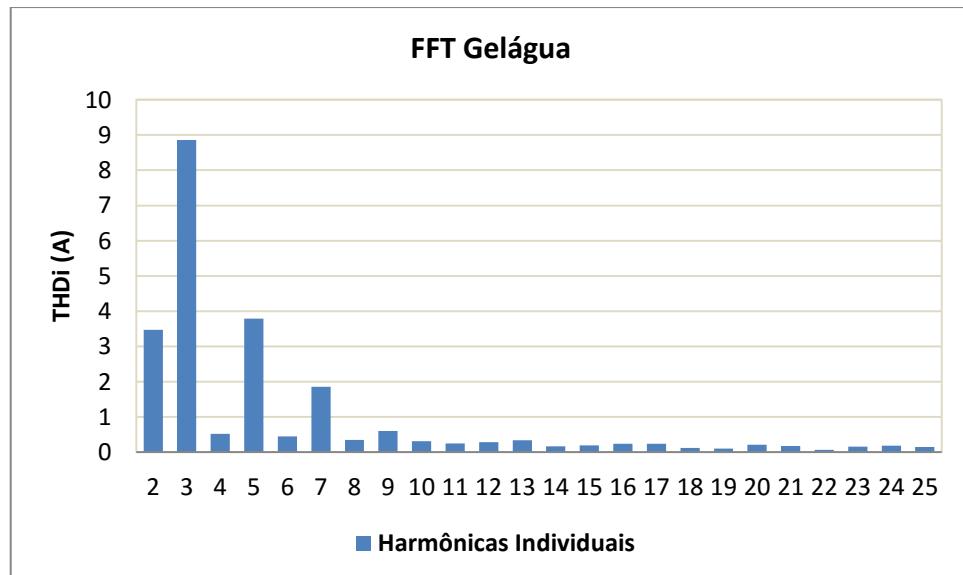
A Figura 49 revela como ocorre as formas de onda de tensão e corrente desse gelágua e a Figura 50 a FFT do equipamento quando ele se encontra em operação.

FIGURA 49 - FORMAS DE ONDA DE UM GELÁGUA



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 50 - FFT DE UM GELÁGUA



Percebe-se pela Figura 49 uma forma de onda de corrente semelhante ao da geladeira, defasada em relação a tensão, mas sem distorções consideráveis,

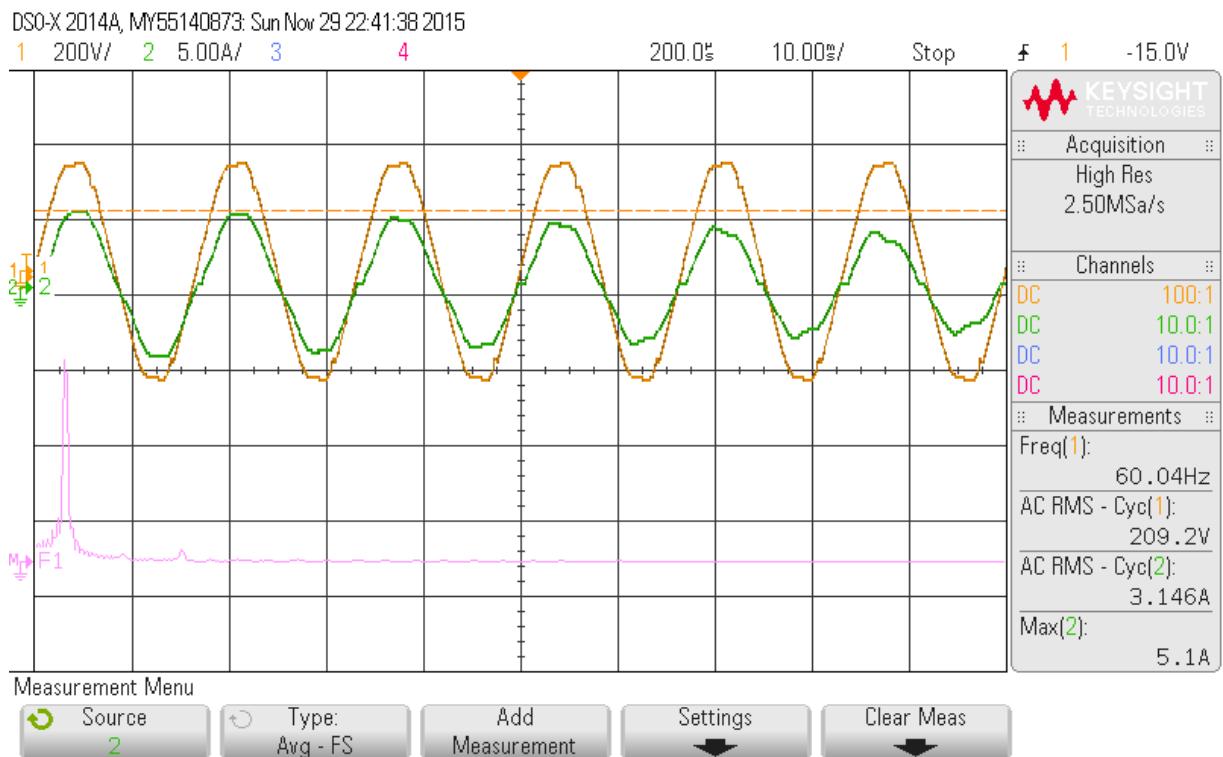
onde a Figura 50 cuja FFT apresenta a 3^a (8,85%), 5^a (3,79%), 7^a (1,86%) harmônicas com maior importância.

4.5.9 Máquina de Lavar Roupa

A residência possui uma máquina de lavar roupa que funciona 2 ou 3 vezes por semana, durante 2h.

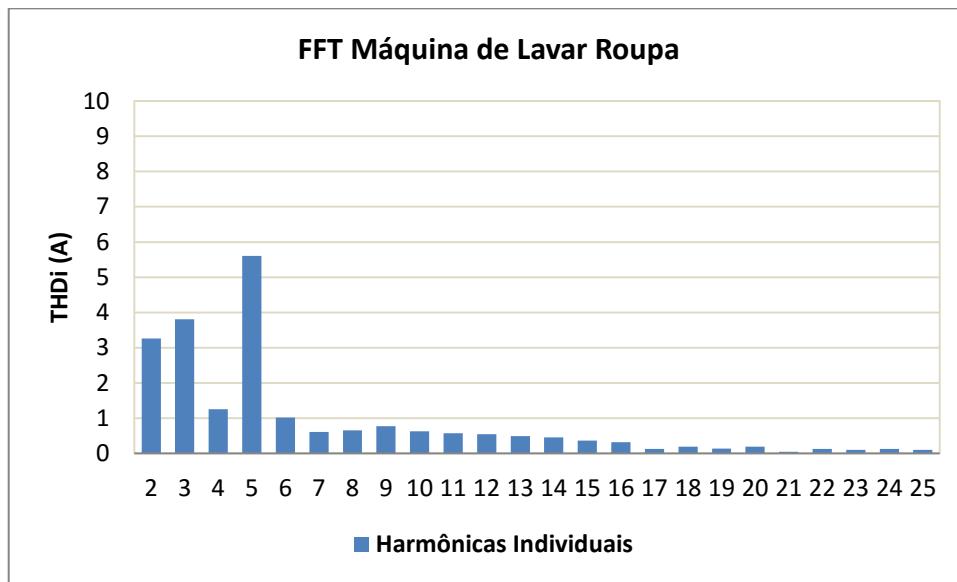
A Figura 51 revela como se dão as formas de onda de tensão e corrente de uma máquina de lavar desse porte e a Figura 52 a FFT do equipamento quando ele se encontra em funcionamento.

FIGURA 51 - FORMAS DE ONDA DE UMA MÁQUINA DE LAVAR ROUPA



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 52 - FFT DE UMA MÁQUINA DE LAVAR ROUPA



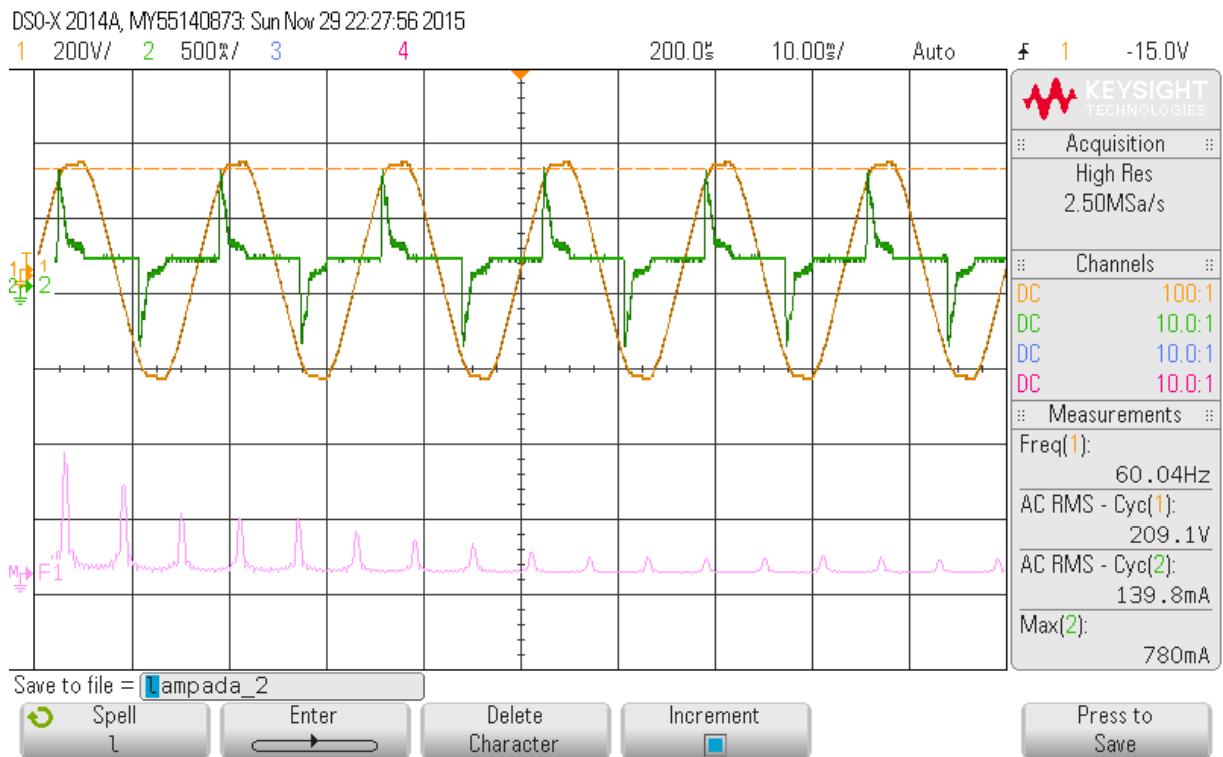
Percebe-se pela Figura 51 uma forma de onda de corrente sem distorções consideráveis, onde na Figura 52 cuja FFT apresenta harmônicas pares e ímpares, tais como 2^a (3,26%), 3^a (3,80%), 4^a (1,25%), 5^a (5,60%), 6^a (1,01%) e 7^a (0,61%).

4.5.10 Lâmpada compacta eletrônica

A residência possui 13 lâmpadas compactas eletrônicas, funcionando prioritariamente no período noturno, algumas delas passando longos períodos em funcionamento.

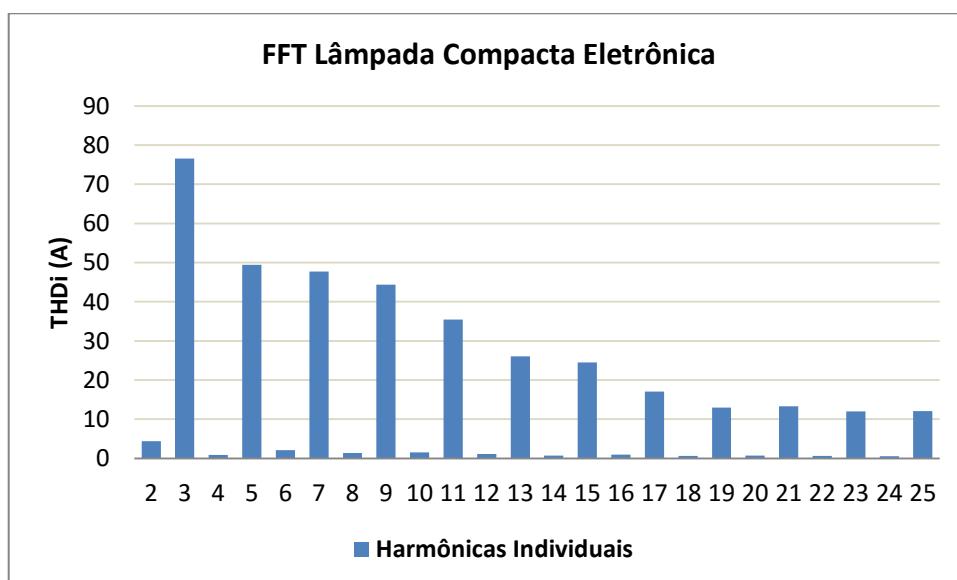
A Figura 53 revela como ocorre as formas de onda de tensão e corrente de uma dessas lâmpadas e a Figura 54 a FFT do equipamento quando ele se encontra em operação.

FIGURA 53 - FORMAS DE ONDA DE UMA LÂMPADA COMPACTA ELETRÔNICA



Fonte: Acervo pessoal

FIGURA 54 - FFT DE UMA LÂMPADA COMPACTA ELETRÔNICA



Percebe-se pela Figura 53 uma forma de onda de corrente cujo reator chaveado provoca forte distorção harmônica conforme revela a Figura 54 cuja FFT

apresenta a 3^a (76,54%), 5^a (49,44%), 7^a (47,70%), 9^a (44,37%), 11^a (35,47%), 13^a (26,02%), 15^a (24,54) e todas as harmônicas ímpares subsequentes até a 25^a (última mensurada).

5 DISCUSSÃO

5 DISCUSSÃO

Este estudo revela que apesar da grande quantidade de harmônicas encontradas nos eletrodomésticos e na residência unifamiliar, essas harmônicas não evoluíram até a média tensão e consequentemente até a subestação de energia. O fato pode ser atribuído a três possibilidades:

A primeira delas é que os transformadores de distribuição funcionam como filtros, atenuando a passagem das distorções da baixa para média tensão. Essa possibilidade foi confirmada com a instalação do analisador diretamente na alta e na baixa tensão de um transformador de distribuição, com o objetivo de comparar as harmônicas de tensão e corrente no mesmo instante em cada lado do transformador e verificar se há ou não atenuação nessas harmônicas. Foram obtidos os resultados das Figuras 55 e 56.

FIGURA 55 - COMPARAÇÃO THD V ENTRE O LADO DE ALTA E BAIXA TENSÃO DE TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO

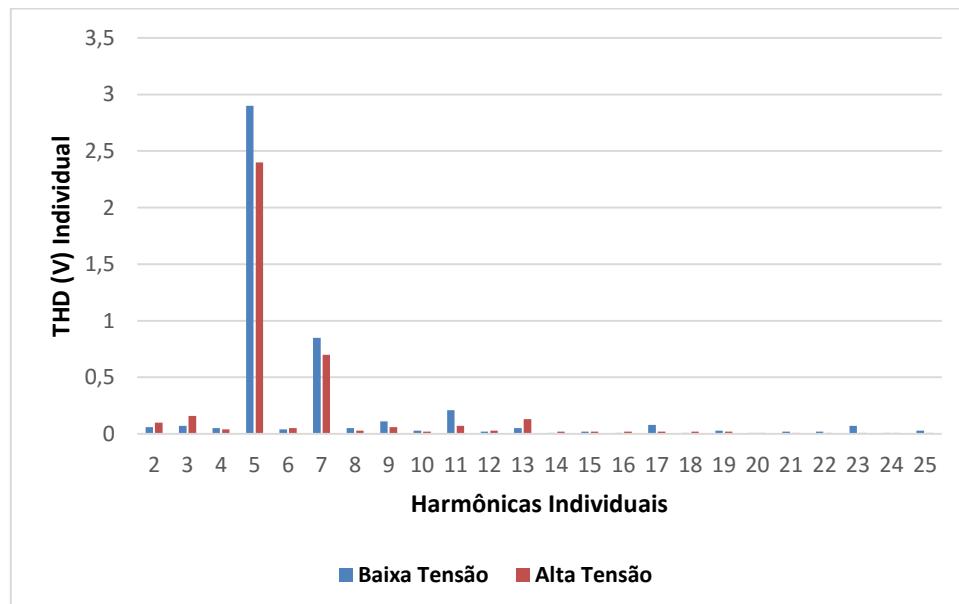
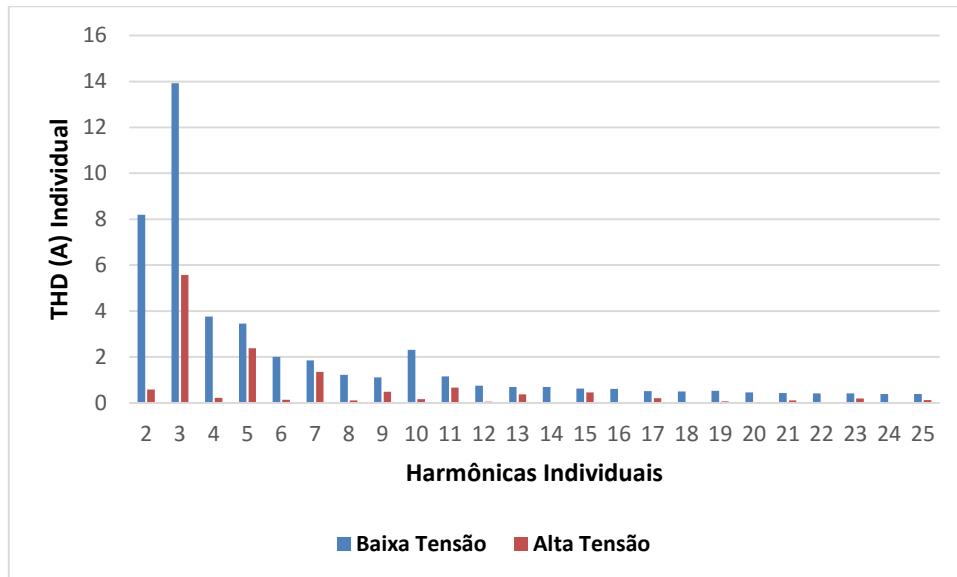


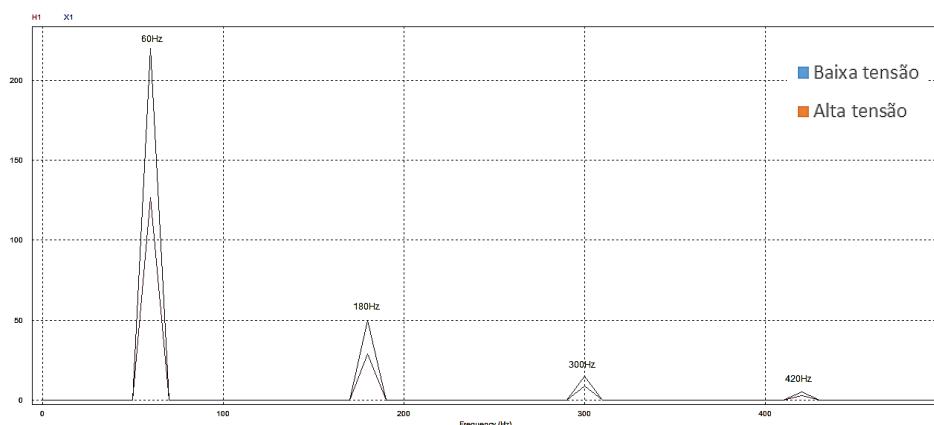
FIGURA 56 - COMPARAÇÃO THD A ENTRE O LADO DE ALTA E BAIXA TENSÃO DE UM TRANSFORMADOR DE DISTRIBUIÇÃO



Nas Figuras 55 e 56 constata-se que as harmônicas individuais de tensão e corrente da baixa tensão são reduzidas quando passam para o lado de alta tensão. Com esse teste, se confirma a função de filtro exercido pelos transformadores de distribuição, entretanto não justifica a elevada redução observada quando comparadas as harmônicas nas residências e na subestação, não sendo suficiente apenas o efeito de filtro exercido pelos transformadores.

Realizou-se ainda a simulação no software PSIM revelada no Anexo 3, com o intuito de observar a redução das harmônicas constatadas na experiência anterior e a permanência da 3^a harmônica dita de sequência zero no lado de alta do transformador. Foram obtidos os resultados das Figuras 57.

FIGURA 57 - SIMULAÇÃO DE HARMÔNICAS EM UM TRANSFORMADOR



Na Figura 57 constata-se que as harmônicas individuais de tensão e corrente, sejam elas harmônicas ímpares ou pares, são reduzidas quando passam do lado de baixa tensão do transformador para o lado de alta tensão, assim como observado com o analisador no caso prático. Constatou-se também que as harmônicas de terceira ordem continuam presentes do lado de alta do transformador, onde este não as bloqueia totalmente; conforme foi constatado nas medições práticas ao longo desse trabalho.

A segunda possibilidade é de que as harmônicas produzidas pelas diferentes unidades consumidoras se anulam ao longo da rede de baixa tensão, assim como ao longo do alimentador. Esta possibilidade dificilmente se confirma, visto que, a probabilidade da somatória das componentes harmônicas se aproximar de zero, em três diferentes alimentadores, é quase nula. Além disso, de forma análoga as diferentes harmônicas poderiam se somar e intensificar a distorção na subestação.

A terceira possibilidade, e mais concreta entre elas, revela que as harmônicas de tensão e corrente representam a distorção da forma de onda em relação a fundamental, independentemente da potência em questão. Dessa forma, apesar da grande distorção encontrada em baixa tensão, ela apresenta uma pequena potência, diferente de quando se analisa diretamente o alimentador, esse com maior potência suprida, aquelas harmônicas de baixa potência nas residências tem pequena representatividade. Dessa forma, as harmônicas presentes nas residências representam assim um baixo risco para as subestações de energia.

Após realizar as medições e compará-las com a literatura, obteve-se resultados coerentes com o que se vem encontrando nos estudos ao redor do mundo, apesar de não haver nenhum estudo que integre baixa e média tensão como este, existindo apenas a análise isolada de cada segmento. Chegou-se a conclusão que não existe relação entre a magnitude da corrente e as harmônicas geradas, por exemplo, os picos de corrente em torno de 9A apresentou valores baixos de harmônicas, diferentemente do afirmado por Indra et al. (2011).

Shutter, Vollkommer e Kirkpatrick (1989), mesmo que 27 anos atrás, confirmaram que as harmônicas aumentam durante a madrugada, como aconteceu na residência unifamiliar. Devido a diminuição da carga nessas horas, consequentemente houve um aumento de tensão, o que pode ocasionar um aumento

nas harmônicas devido a corrente de excitação dos transformadores quase em vazio. Enquanto que na subestação, durante a madrugada se obteve os valores mínimos de THD de tensão e valores máximos de THD de corrente.

As principais harmônicas de tensão reveladas pela literatura são as 3^a e 5^a harmônicas, assim como ocorreu nas medições realizadas, apesar de não haver transgressões aos limites estabelecidos por norma. Além disso, as principais harmônicas de corrente na literatura são as ímpares, 3^a, 5^a e 7^a, assim como se mostrou durante as aquisições realizadas.

Foi encontrada, em vários momentos, a presença de harmônicas pares, em especial a 2^a e a 4^a, com valores absolutos acima do esperado. Nas medições nos alimentadores da subestação, por exemplo, o valor máximo de 2^a harmônica, tanto de tensão como de corrente, é superior ao máximo valor encontrado de 3^a harmônica; o fato acontece em todos os três alimentadores analisados; o que está associado a presença de motores nas instalações e ao desequilíbrio comumente encontrado em alimentadores de média tensão.

Nas medições da residência unifamiliar, a 2^a harmônica de corrente possui valor máximo representativo, mas o fato não se repete com a 2^a harmônica de tensão que apresenta amplitude baixa. Analisando as FFT's dos equipamentos eletrodomésticos, percebe-se a presença de 2^a harmônica em vários deles: condicionador de ar, geladeira, micro-ondas, máquina de lavar roupas; confirmando a geração dessas componentes harmônicas pelos motores dos referidos equipamentos.

Ressalta-se que quando analisado o valor médio de cada harmônica, as harmônicas pares apresentaram baixa representatividade, o que demonstra pontualidade nos máximos extraídos de cada aquisição.

6 CONCLUSÕES

6 CONCLUSÕES

Esta dissertação de mestrado assumiu como objetivo conhecer as distorções harmônicas, originadas pelos consumidores, que degradam a qualidade de energia das redes de distribuição de uma concessionária de energia, bem como analisar como essas harmônicas evoluem até as subestações de energia.

Constatou-se a presença de componentes harmônicas de tensão e corrente, de baixa amplitude em três diferentes alimentadores (residencial, comercial e industrial), não caracterizando distorção harmônica acima dos limites estabelecidos nas normas vigentes. Dentre as componentes harmônicas encontradas, as harmônicas ímpares de 3^a, 5^a e 7^a ordem apresentaram maior contribuição no cálculo de THD de cada alimentador, assim como relatado pela rara literatura cujas medições ocorreram na média tensão.

Nas medições do alimentador residencial, provavelmente pelo tipo de carga instalada, o THD de tensão se mostrou diretamente proporcional a potência demandada enquanto o THD de corrente se mostrou inversamente proporcional. Enquanto que nos outros alimentadores a Distorção Harmônica Total não demonstrou ter relações com a potência ativa demandada na instalação, nem em amplitude, nem em perfil de evolução ao longo do dia. Em vários momentos de baixa potência, as componentes harmônicas apresentaram altos valores; mas em outros momentos, com o incremento de potência, as componentes harmônicas também cresciam.

Na vertente de medições em baixa tensão, 2^a aquisição desse estudo, após análise das medições realizadas, concluiu-se que em uma residência unifamiliar de porte médio com equipamentos eletrodomésticos usuais em uma residência – sejam eles: geladeira, ventilador, computadores, condicionador de ar, bebedouro, chuveiro elétrico, máquina de lavar, micro-ondas, forno elétrico e televisores – não são encontradas distorções de tensão acima dos limites estabelecidos por norma.

Apesar do Módulo 8 do PRODIST não apresentar limites para as harmônicas de corrente, a Norma IEEE Std 519 possuiu tais limites, no caso da residência analisada, esses limites foram superados com altas e sucessivas ultrapassagens. Tais transgressões aos limites de norma não ocorreram quando das medições em média tensão nos alimentadores.

Na residência unifamiliar, as principais componentes harmônicas de tensão e corrente encontradas foram a 3^a e 5^a harmônica, como esperado e descrito na literatura. Entretanto, em valores máximos, se destacaram harmônicas pares que não eram esperadas, como a 2^a e 4^a harmônica, que apenas Shutter, Vollkommer e Kirkpatrick (1989) haviam detectado há décadas atrás.

Analisando os eletrodomésticos existentes nessa residência unifamiliar, constatou-se que os maiores geradores de harmônicas são os equipamentos eletrônicos que possuem fontes chaveadas, tais como: televisor de LED, carregador de celular, notebook's e lâmpadas compactas eletrônicas. Estes apresentam majoritariamente componentes harmônicas ímpares, com destaque para 3^a, 5^a, 7^a e 9^a harmônicas, mas com participação até a 25^a harmônica (limite do osciloscópio), apesar da baixa potência.

Equipamentos que apresentam motores de indução com eletrônica associada, tais como geladeira, condicionador de ar, gelágua, microondas e máquina de lavar roupa, estes com maior potência do que os do primeiro grupo, apresentaram componentes harmônicas ímpares de 3^a, 5^a e 7^a ordem em destaque, mas, também, com valores inferiores das anteriores, harmônicas pares de 2^a ordem. O ventilador foi o único equipamento que apresentou quase que exclusivamente componente fundamental.

Concluiu-se que as harmônicas oriundas do sistema de baixa tensão de uma concessionária de energia, se enquadrando clientes atendidos de baixa tensão, e que apresentam alimentadores com as mesmas características dos analisados, não evoluem até as subestações de média tensão, estando os equipamentos presentes nessas resguardados dos possíveis danos que as harmônicas podem acarretar na operação destes equipamentos.

Observa-se que este estudo não se esgota apenas com os resultados apresentados nessa dissertação, é preciso aumentar e diversificar os pontos de medição, refazendo-os em outras subestações, com outros clientes e, principalmente, em outros níveis de tensão, como, por exemplo, em indústrias de médio/grande porte que são atendidos por linhas ou alimentadores exclusivos. Clientes com outros tipos de cargas instaladas, com atividades de outra natureza de ocupação, podem acarretar resultados diferentes dos obtidos e precisam ser analisados.

Recomenda-se a criação de um índice de qualidade de energia que leve em consideração a potência instalada e assim a potência harmônica, diferentemente da Distorção Harmônica Total (THD) que é bastante utilizado, mas que analiza apenas a distorção presente na forma de onda estudada. Com esse novo índice, será possível comparar a real degradação da qualidade de energia em diferentes instalações e, principalmente, mensurar ações de bloqueio para evitar danos ao sistema.

Estabelecer um sistema de supervisão, monitoramento e medição periódica deve ser incorporado na rotina da distribuidora de energia, de forma a avaliar continuamente as harmônicas injetadas na rede e como essas se distribuem ao longo do sistema, especialmente na baixa tensão onde foram encontradas as maiores distorções, apesar da baixa potência.

O Módulo 8 do PRODIST precisa ser atualizado de forma a exigir que as campanhas de medições sejam realizadas e que os indicadores de qualidade de energia sejam criados, mensurados e acompanhados.

Por fim, este estudo não mostrou necessidade de instalação de filtros, sejam eles ativos ou passivos, na média tensão da concessionária, contudo, na baixa tensão onde 98% dos clientes estão instalados, as componentes harmônicas de corrente se mostraram com valores significativos, necessitando de um aprofundamento da análise e possível dimensionamento de filtros a fim de evitar danos às instalações dos consumidores.

REFERÊNCIAS

- CHAMPMAN, D. **Harmônicas, causas e efeitos.** Guia de aplicação de qualidade de energia. Procobre, 2002. Disponível em: <http://procobre.org/pt/wp-content/uploads/sites/2/delightful-downloads/2014/07/QE07_GUIA_3_1_HARM%C3%94NICAS_CAUSAS_EFEITOS.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2015.
- CONROY, E. Power monitoring and harmonic problems in the modern building. **Power Engineering Journal**, 2001. Vol. 15, p. 101-107.
- CURRENCE, E.; PLIZGA, J.; NELSON, H. **Harmonic Resonance at a Medium-sized Industrial Plant.** In: Industry Applications Society Annual Meeting, 1994. Conference Record of the 1994 IEEE, 1994. vol 3, p. 2275 – 2284.
- DECKMANN, S. M.; POMILIO, J. A. **Curso Avaliação da Qualidade de Energia.** Curso de graduação DSCE-FEEC-UNICAMP. 2013. Cap. 4. p 1 -20.
- ENGEMATEC. **Harmônicos em Sistemas de Potência: Entenda os Fundamentos.** Disponível em: <http://www.engematec.com.br/site/downloads/harmonicos_fundamentos.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2015.
- FALVO, M. C et al. **Harmonics monitoring survey on office LV appliances.** In: 14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2010. p. 1 – 6.
- FRANCO, E. **Qualidade de Energia – Causas, Efeitos e Soluções,** 2013. Disponivel em: <<http://www.macoem.com.br/pub1.html>>. Acesso em: 07 jun 2015.
- HOEVENAARS, T.; LEDOUX, K.; COLOSINO, M. **Interpreting IEEE Std 519 and Meeting its Harmonic Limits in VFD Applications.** In: Petroleum and Chemical Industry Conference, 2003, p. 145-150.
- Hooman, E. M.; Wilsun, X.; Biao, H. **Determining the Harmonic Impacts of Multiple Harmonic-Producing Loads.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 26, no. 2, p 1187-1195. 2011.
- IEEE STANDARS BOARD. **IEE Std 519 – 1992:** Recommended Practices and Requeriments for Harmonic Control in Electrical Power Systems. 1992.
- INDRA, N. et al. Harmonic Monitoring at UniMAP Distributed Campus. In: **5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO)**, 2011, p. 318-322.
- JUNIOR, O. H. A. **Desenvolvimento de uma metodologia para identificar e quantificar distúrbios da qualidade da energia elétrica.** 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

LAMEDICA, R.; SORBILLO, C.; PRUDENZI, A. **The continuous harmonic monitoring of single-phase electronic appliances: desktop .PC and printers.** In: Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2000. Vol 2, p. 697 – 702.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST:** Módulo 8 – Qualidade de Energia Elétrica. Brasília, DF, 2007. Nota Técnica nº 0029/2011-SRD/ANEEL, de 30/06/2011.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Resolução nº 414, de 9 de setembro de 2010. Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 15 Set. 2010. Seção 1, p.115.

PAULILO, G. TEIXEIRA, M. D; BACCA, I. Capítulo XI - Transitórios. **Revista O Setor Elétrico**, ed 94, Novembro, 2013, p. 42-47.

RIBEIRO, F.S. **Eletrificação rural de baixo custo.** São Paulo, 1993. 157p. Tese de livre docência - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 1993.

SHUTTER, T., VOLLMOMMER, H.; KIRKPATRICK, T. **Survey of harmonic levels on the American Electric Power distribution system.** In: *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 4, No. 4, 1989. p. 2204-2213.

SUNNY, R.; ANTO, R. **Harmonics Control and Performance Analysis of a Grid Connected Photovoltaic System.** In: International Conference on Advanced Computing and Communication Systems (ICACCS), 2013 , p. 1 – 6.

TAVARES, P. H. **Harmônicos em instalações elétricas**, 2008. Disponível em: <http://www.engematec.com.br/site/downloads/harmonicos_em_Instalacoes_eletricas.pdf>. Acesso em: 12 mai. 2015.

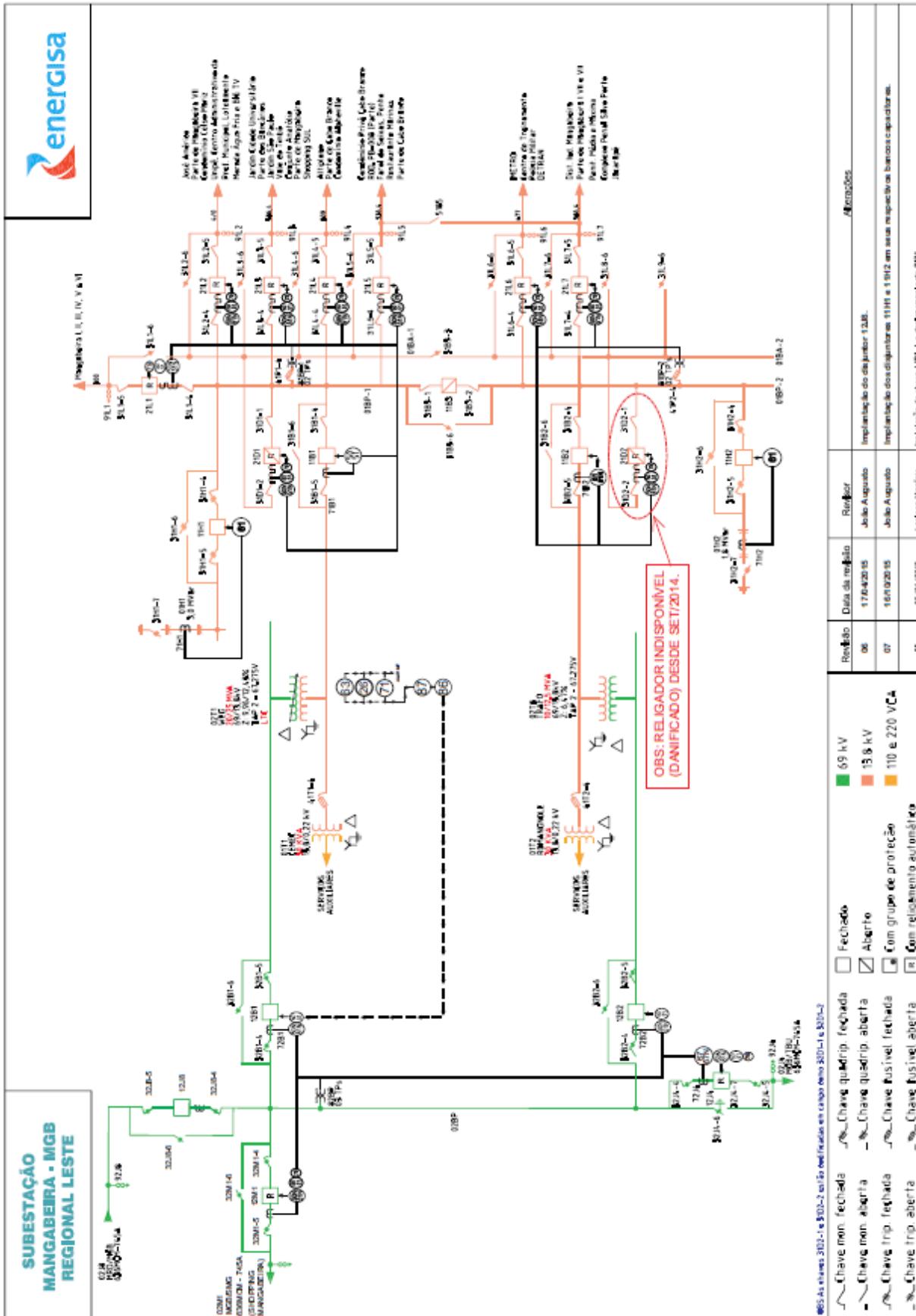
ANEXO 1

ANEXO 1 - NÍVEIS DE REFERÊNCIA PARA DISTORÇÕES HARMÔNICAS INDIVIDUAIS DE TENSÃO

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

ANEXO 2

ANEXO 2 - DIAGRAMA UNIFILAR DA SUBESTAÇÃO MANGABEIRA



ANEXO 3

ANEXO 3 - SIMULAÇÃO NO PSIM DE HARMONICAS EM TRANSFORMADOR

