



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica
Campus João Monlevade



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

Caracterização de harmônicas em equipamentos residenciais

Ítalo Girardelli Giacomini

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

JOÃO MONLEVADE

Julho de 2016



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
Universidade Federal de Ouro Preto – UFOP
Colegiado do Curso de Engenharia Elétrica
Campus João Monlevade



ÍTALO GIRARDELLI GIACOMIN

Caracterização de Harmônicas em Equipamentos Residenciais

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Professor orientador: Wilingthon Guerra Zvietcovich

JOÃO MONLEVADE,
Julho 2016

ATA DE DEFESA

Aos 28 dias do mês de julho de 2016, às 11 horas, no bloco C deste instituto, foi realizada a defesa do Trabalho de Conclusão de Curso pelo formando Italo Girardelli Giacomini, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores:

WILLINGTON GUERRA ZVIETCOVICH
FRANCISCO RICARDO ABRANTES COUY BARACHO
SARAH NEGREIROS DE CARVALHO LEITE

O candidato apresentou o trabalho intitulado: Caracterização de Harmônicas em Equipamentos Residenciais. A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela APROVAÇÃO do candidato, com a nota média 7,0, de acordo com a tabela 1. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo formando.

Tabela 1 – Notas de avaliação da banca examinadora

| Banca Examinadora | Nota |
|--|------------|
| <u>Willington Guerra Zvietcovich</u> | <u>7,0</u> |
| <u>Francisco Ricardo A.C. Baracho</u> | <u>7,0</u> |
| <u>Sarah Negreiros de Carvalho Leite</u> | <u>7,0</u> |
| Média | 7,0 |

João Monlevade, 28 de Julho de 2016.

Willington Guerra Zvietcovich

Willington Guerra Zvietcovich

Francisco Ricardo A.C. Baracho

Francisco Ricardo Abrantes Couy Baracho

Sarah Negreiros de Carvalho Leite

Sarah Negreiros de Carvalho Leite

Italo Girardelli Giacomini

Italo Girardelli Giacomini

G429c Giacomini, Ítalo Girardelli.
Caracterização de harmônicas em equipamentos residenciais [manuscrito] /
Ítalo Girardelli Giacomini. - 2016.

108f.: il.: color; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Wilingthon Guerra Zvietcovich.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de
Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Energia Elétrica - Consumo. 2. Qualidade de Energia. 3. Distribuição e
controle da energia elétrica. I. Zvietcovich, Wilingthon Guerra. II.
Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 621.31

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br



ANEXO X - TERMO DE RESPONSABILIDADE

O texto do trabalho de conclusão de curso intitulado "Caracterização de Harmônicas em Equipamentos Residenciais" é de minha inteira responsabilidade. Declaro que não há utilização indevida de texto, material fotográfico ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem a devida citação ou consentimento dos referidos autores.

João Monlevade, 28 de julho de 2016.

ITALO Girardelli Giacomini
Italo Girardelli Giacomini

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter me dado força para nunca desistir perante os desafios que enfrentei em minha vida. A toda minha família que sempre me apoiou e me deu suporte para atingir meus objetivos com sucesso.

A todos os professores do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas UFOP, os quais contribuíram imensamente para a minha formação, através dos ensinamentos passados nestes anos de graduação. A todos os grandes amigos e colegas de curso e de república que tive a oportunidade de conhecer na cidade de João Monlevade. A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, em especial a Estevão, Guilherme, Leandro e Macson.

Agradeço de forma especial também ao professor Wilington Guerra Zvietcovich pelo apoio incondicional para início e término do Trabalho de Conclusão de Curso.

“A Qualidade de energia não é como uma receita de bolo, é preciso estudar, investigar por vários caminhos e encontrar o maior causador do problema, e encontrar uma maneira de resolver.”

(Edson Martinho)

RESUMO

Diante da necessidade da busca contínua de um consumo mais eficiente de energia elétrica e devido ao aumento da facilidade de compra de equipamentos eletrônicos mais eficientes pela classe de consumidores residenciais e de comércios, já é possível perceber e prever um significativo aumento das distorções harmônicas injetadas na rede elétrica por estes equipamentos. O aumento do número de equipamentos eletrônicos implica em uma elevação da taxa de distorção harmônica e conseqüentemente, num futuro, estes valores irão superar os limites indicados pela norma vigente, ocasionando efeitos danosos aos processos industriais e cargas elétricas. Este trabalho tem o objetivo de caracterizar a penetração de harmônicas injetadas na rede de distribuição devido à utilização de eletrodomésticos residenciais. Numa primeira etapa o trabalho trata aspectos conceituais, referentes ao comportamento de grandezas, tais como, tensão e corrente no contexto da Qualidade de Energia Elétrica. Posteriormente, são desenvolvidas duas metodologias de amostragem para a coleta de dados de medição de harmônicas em consumidores da cidade de João Monlevade/MG, as quais são comparadas com metodologias descritas na literatura técnica. Através de um exemplo teórico, avalia-se as variações de medição de harmônicas em diferentes pontos de uma rede elétrica.

Palavras-chave: Qualidade de Energia, Harmônicas, Amostragem, Medições de Campo.

ABSTRACT

Due to the requirement of achieving a more efficient electrical energy usage and the increased ease of more efficient electronic equipment purchase by residential and commercial consumers, it is possible to understand and predict a significant gain on harmonic distortion injected into the power grid caused by such equipments. Increasing the number of electronic equipment implies in a harmonic distortion raised rate, and consequently, these values will surpass the limits indicated by the current regulation, causing adverse effects on industrial processes and electrical charges. The present study aims to characterize the penetration of harmonics injected into the distribution network due to the use of residential appliances. In the first stage, this work brings conceptual aspects related to quantities behavior, such as voltage and current in the context of Quality of Electric Energy. Subsequently, two sampling methods are developed to collect harmonic measurement data on consumers' usage from João Monlevade. Harmonics measurements were compared to studies in the literature. Through a theoretical example, harmonic measurement variations at different points of a power grid are.

Key words: Power Quality, Harmonics, sampling , field measurements

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Qualidade de energia elétrica | 8 |
| Figura 2 - Principais distúrbios da QEE | 18 |
| Figura 3 - Harmônicas | 24 |
| Figura 4 – Representação da forma de onda gerada em circuito RL Monofásico..... | 26 |
| Figura 5 - (a) Lista de Harmônicas (b) Espectro harmônico no domínio da frequência de uma Carga RL Monofásica | 26 |
| Figura 6 - lâmpada fluorescente compacta..... | 32 |
| Figura 7 - - lâmpada mista | 32 |
| Figura 8 - lâmpada de sódio | 33 |
| Figura 9 - Circuito e corrente de um retificador monofásico com capacitor de saída | 37 |
| Figura 10 - Pontes retificadoras monofásicas..... | 38 |
| Figura 11 - Circuito, tensão e corrente de um retificador controlado monofásico com indutor série | 38 |
| Figura 12 - Harmônicos típicos de um retificador totalmente controlado | 39 |
| Figura 13 - Retificador trifásico controlado..... | 40 |
| Figura 14 - Espectro harmônico da corrente de um retificador trifásico não controlado | 41 |
| Figura 15 - (a) Retificador presente no circuito interno televisão (b) Forma de onda do retificador monofásico com filtro capacitivo..... | 42 |
| Figura 16 - (a) Forma de onda do televisor (b) Espectro harmônico do televisor | 42 |
| Figura 17 - (a) Forma de onda laptop (b) Espectrograma do laptop..... | 43 |
| Figura 18 - distribuição dos alimentadores na cidade de João Monlevade | 46 |
| Figura 19 - Tipos de amostragem..... | 48 |
| Figura 20 - Analisador de redes modelo ET-5061C | 54 |
| Figura 21 - Circuito implementado para aumento da corrente..... | 55 |

| | |
|--|----|
| Figura 22 – Eletrônico (a) vídeo game, (b) notebook | 56 |
| Figura 23 – Liquidificador | 57 |
| Figura 24 - Cafeteira | 57 |
| Figura 25 - (a) ALIMENTADOR JMLT 306 (b) ALIMENTADOR JMLT 307 | 58 |
| Figura 26 - (a) ALIMENTADOR JMLT 308 (b) ALIMENTADOR JMLT 309 | 58 |
| Figura 27 - (a) ALIMENTADOR JMLT 310 (b) ALIMENTADOR JMLT 311 | 59 |
| Figura 28 – Gráfico de harmônicas de corrente (notebook) | 60 |
| Figura 29 - Gráfico de harmônicas de tensão (notebook) | 61 |
| Figura 30 - (a) ALIMENTADOR JMLT 306 (b) ALIMENTADOR JMLT 307 | 63 |
| Figura 31 - (a) ALIMENTADOR JMLT 308 (b) ALIMENTADOR JMLT 309 | 63 |
| Figura 32 - (a) ALIMENTADOR JMLT 310 (b) ALIMENTADOR JMLT 311 | 64 |
| Figura 33 - Gráfico de harmônicas de corrente (Vídeo game) | 65 |
| Figura 34 - Gráfico de harmônicas de tensão (Vídeo game) | 66 |
| Figura 35 - (a) ALIMENTADOR JMLT 306 (b) ALIMENTADOR JMLT 307 | 68 |
| Figura 36 - (a) ALIMENTADOR JMLT 308 (b) ALIMENTADOR JMLT 309 | 68 |
| Figura 37 - (a) ALIMENTADOR JMLT 310 (b) ALIMENTADOR JMLT 311 | 69 |
| Figura 38 - Gráfico de harmônicas de corrente (Liquidificador) | 70 |
| Figura 39 - Gráfico de harmônicas de tensão (Liquidificador) | 71 |
| Figura 40 - (a) ALIMENTADOR JMLT 306 (b) ALIMENTADOR JMLT 307 | 73 |
| Figura 41 - (a) ALIMENTADOR JMLT 308 (b) ALIMENTADOR JMLT 309 | 73 |
| Figura 42 - (a) ALIMENTADOR JMLT 310 (b) ALIMENTADOR JMLT 311 | 74 |
| Figura 43 - Gráfico de harmônicas de corrente (Cafeteira) | 75 |
| Figura 44 - Gráfico de harmônicas de tensão (Cafeteira) | 76 |
| Figura 45 - Detalhamento da etapa de medições | 80 |
| Figura 46 – Ponto de medição A | 82 |

| | |
|--------------------------------------|----|
| Figura 47 – Ponto de medição B..... | 83 |
| Figura 48 – Ponto de medição C | 83 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Tipos de serviços e indicadores relacionados com a qualidade de atendimento . | 10 |
| Tabela 2 - Índices da qualidade de serviço..... | 11 |
| Tabela 3 - Tipos de serviços e indicadores relacionado com a qualidade do serviço | 11 |
| Tabela 4 - Tipos de distorções | 15 |
| Tabela 5 - Tipos de flutuações | 16 |
| Tabela 6 - Categorias de classificação dos distúrbios associados à qualidade da energia... | 18 |
| Tabela 7 - Terminologia..... | 21 |
| Tabela 8 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da onda fundamental) | 21 |
| Tabela 9 - Nível de distorção harmônica individual | 21 |
| Tabela 10 - Nível de distorção harmônica aceitável pela IEC 61000-3..... | 23 |
| Tabela 11 - Classificação das harmônicas..... | 25 |
| Tabela 12 - Sequencia de harmônicos e efeitos | 25 |
| Tabela 13 - Erros experimentais e simulados em medidores eletromagnéticos..... | 29 |
| Tabela 14 - Comparativo das lâmpadas em função do circuito interno..... | 33 |
| Tabela 15 – Principais equipamentos residenciais/comerciais geradores de harmônicas | 35 |
| Tabela 16 - Espectro harmônico da corrente de um retificador não controlado | 37 |
| Tabela 17 - Distribuição dos alimentadores da cidade de João Monlevade..... | 45 |
| Tabela 18 - Valores críticos associados ao grau de confiança na amostra..... | 49 |
| Tabela 19 – Distribuição dos alimentadores da cidade de João Monlevade (II)..... | 50 |
| Tabela 20 - Intervalo de amostragem (IA)..... | 52 |
| Tabela 21 – Parâmetros gerais das medições do notebook | 62 |
| Tabela 22 - Parâmetros gerais das medições do Vídeo game | 67 |
| Tabela 23 - Parâmetros gerais das medições do Liquidificador | 72 |

| | |
|--|----|
| Tabela 24 - Parâmetros gerais das medições do Cafeteira | 77 |
| Tabela 25 - Comparativo das medições realizadas com aquelas da referência (PIRES, 2006) | 78 |
| Tabela 26 - Aspectos do alimentador JMLT 308..... | 81 |
| Tabela 27 - Correntes harmônicas para o cenário simulado..... | 82 |
| Tabela 28 - DHT em função da variação do ponto de carga. | 85 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------------------|--|
| ANEEL | Agência Nacional de Energia Elétrica |
| BT | Baixa tensão |
| DER | Duração equivalente da reclamação |
| DGC | Desempenho global de continuidade |
| DHT _v | Distorção harmônica total de tensão |
| DIC | Duração de interrupção equivalente por unidade consumidora |
| DICRI | Duração de interrupção individual ocorrida em dia crítico |
| DMIC | Duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora |
| FER | Frequência equivalente de reclamação |
| FIC | Frequência de interrupção individual por unidade consumidora |
| IEC | International electrotechnical commission |
| MT | Média tensão |
| MVA | Mega volt ampere |
| PROCEL | Programa nacional de eficiência energética em edificações |
| QEE | Qualidade de energia elétrica |
| THD | Distorção harmônica total de tensão |
| THD _i | Distorção harmônica total de corrente |
| VTCD | Variações de tensão de curta duração |
| VTLD | Variações de tensão de longa duração |

SUMÁRIO

| | | |
|-------|---|----|
| 1 | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | Motivação e Objetivos | 3 |
| 1.2 | Estado da Arte | 3 |
| 1.3 | Organização do Manuscrito | 6 |
| 2 | Qualidade de Energia Elétrica | 8 |
| 2.1 | Condições Ideias de Operação de um Sistema Elétrico e Indicadores de Monitoramento..... | 9 |
| 2.1.1 | Qualidade do Atendimento..... | 9 |
| 2.1.2 | Qualidade do Serviço | 10 |
| 2.1.3 | Qualidade do Produto | 12 |
| 2.2 | Normas Nacionais e Internacionais Aplicáveis às Harmônicas | 20 |
| 3 | Harmônicas..... | 24 |
| 3.1 | Caracterização das Harmônicas | 24 |
| 3.2 | Efeito das Harmônicas nos Sistemas de Distribuição..... | 28 |
| 3.2.1 | Efeito das Harmônicas nos Sistemas de Distribuição..... | 29 |
| 3.2.2 | Condutores..... | 30 |
| 3.2.3 | Iluminação..... | 30 |
| 3.2.4 | Máquinas Rotativas..... | 34 |
| 3.2.5 | Equipamentos Eletrônicos..... | 35 |
| 3.2.6 | Transformadores..... | 43 |
| 3.2.7 | Relé..... | 44 |
| 4 | Metodologia para Seleção de Consumidores | 45 |
| 4.1 | Métodos de Amostragem | 47 |
| 4.1.1 | Método de Amostragem não Probabilística | 48 |
| 4.1.2 | Método de Amostragem não Probabilística | 51 |
| 5 | Medições de Campo..... | 54 |
| 5.1 | Equipamentos Utilizados..... | 54 |
| 5.1.1 | Analisador de Redes..... | 54 |
| 5.1.2 | Eletrodomésticos utilizados nas medições | 56 |
| 5.2 | Trabalho de Campo e Análise de Medições | 58 |
| 5.2.1 | Equipamento 1 (Notebook)..... | 58 |
| 5.2.2 | Equipamento 2 (Vídeo game)..... | 63 |

| | | |
|-------|---|----|
| 5.2.3 | Equipamento 3 (Liquidificador)..... | 68 |
| 5.2.4 | Equipamento 4 (Cafeteira) | 73 |
| 5.3 | Cálculo Teórico de Fluxo Harmônico..... | 80 |
| 6 | Conclusão | 86 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 88 |

1 Introdução

A evolução tecnológica sempre esteve presente na vida do homem e está relacionada à melhoria de qualidade de vida das pessoas, as quais vem buscando com frequência produtos cada vez mais sofisticados; seja em uma primeira aquisição ou para substituir os produtos antigos.

A sofisticação dos eletrodomésticos se deve à evolução da eletrônica de potência, que contribuiu de forma significativa para a crescente mudança no mercado brasileiro; principalmente na área de eletrônicos e eletrodomésticos, voltado aos consumidores residenciais.

Antes dessa evolução, a maioria das cargas residenciais eram lineares e se resumiam em resistências (aquecimento e iluminação). Alguns fatores foram determinantes para a mudança deste cenário, redundante por exemplo: a evolução da eletrônica de potência, a facilidade de compra do consumidor de todas as classes sociais (aumento do poder de compra) e a alta eficiência energética que esses aparelhos possuem; como é o caso das lâmpadas fluorescentes quando comparadas com as incandescentes.

As principais consequências dessa evolução tecnológica foram a disseminação do conhecimento correlatado, a redução dos custos dos produtos a valores acessíveis aos consumidores e a fabricação de novos e melhores produtos tais como: lâmpadas, máquinas, rádios, micro-ondas, DVDs, televisores, computadores e vídeo games, dentre outros. Visando uma maior comodidade e melhor custo benefício, apesar de estarem sujeitos a características de cargas não lineares, o que implica na geração de correntes harmônicas. Este aumento no conteúdo harmônico é proveniente dos circuitos internos que compõem os eletrodomésticos, uma vez que estes têm comportamento não linear.

A consequência deste efeito ficará ainda mais evidente ao longo dos próximos anos tendo-se em vista o aumento crescente das cargas não lineares em todos os setores da sociedade (industrial, comercial e residencial).

Atualmente, as classes de consumidores residencial e comercial representam cerca de 57% de toda a carga consumida no país, sendo que de 2005 a 2015 houve um aumento significativo das mesmas (ANEEL, 2015). Nesses 10 anos o consumo destas classes passou de 44% para 57%, sendo que este valor representa toda energia consumida no país por residências e comércios. Pelo que se pode observar: este crescente aumento de consumo é uma tendência mundial, consequência da evolução da tecnologia, que possibilitou dentre outras coisas, o surgimento de novas opções de lazer; A substituição de equipamentos em função do custo benéfico; o funcionamento de microempresas em residências; e etc.

Além das influências que a evolução tecnológica acarretou no comportamento das pessoas, ela também passou a influir de forma significativa na geração de correntes harmônicas, como ocorreu no setor industrial com relação à geração desse mesmo tipo de corrente (NUNES, 2008). Contribuindo para a distorção não-linear, e por outro lado, comprometendo a qualidade de energia elétrica (QEE).

Contribuindo sobremaneira para a distorção não-linear, e comprometendo a qualidade de energia elétrica (QEE).

A partir da constatação do crescente aumento do consumo residencial, torna-se necessária a realização de pesquisas que possibilitem, por exemplo, a determinação de curvas de carga, que revelem qual a participação dos eletrodomésticos no consumo residencial e que mostrem como ocorre a divisão do consumo energético.

O Programa Nacional de Eficiência Energética em Edificações (PROCEL) realizou estudos relacionados aos temas citados anteriormente (PROCEL, 2007). Através da análise dos dados obtidos, verificou-se que cerca de 73% dos eletrodomésticos utilizados em residências são fontes de cargas não lineares e que durante o horário de pico (17:00 horas as 22:00 horas) quatro eletrodomésticos se destacam no consumo (TV, Ar Condicionado, Chuveiro e Lâmpada). Dentre eles, três são equipamentos não lineares com exceção do chuveiro, o que evidencia a contribuição harmônica para esta classe de equipamentos.

Informações dessa natureza caracterizam a existência de campo de estudos com finalidade de identificação de quais os eletrodomésticos influenciam

negativamente na QEE, como também de procedimentos que possibilitem a mitigação de seus efeitos. Como, por exemplo: alocação de filtros bem dimensionados, bancos de correção ou até mesmo algum tipo de parceria com os fabricantes de eletrodomésticos, visando à eficiência de tais equipamentos.

1.1 Motivação e Objetivos

O interesse pela escolha do tema do presente trabalho surgiu da necessidade de se entender melhor os efeitos, causas e consequências dos fenômenos relacionados à QEE; os quais estão profundamente relacionados com a crescente demanda ocasionada pelo aumento do número de equipamentos não lineares presentes nas indústrias, residências, comércio e prédios públicos, como também pelo contínuo crescimento do sistema elétrico nacional. Quanto maior o número de equipamentos não lineares, maior será a degradação da QEE.

O principal objetivo é a realização de um estudo das cargas harmônicas (causas e efeitos) de uma forma conceitual, para em seguida, fazer medições de grandezas elétricas (harmônicas) em diferentes pontos da rede elétrica da cidade de João Monlevade e finalmente simular cenários na rede elétrica considerando cargas não lineares.

1.2 Estado da Arte

Em (Nelson Kagan et al., 2009) apresentado métodos para mensurar alguns parâmetros (indicadores) referente à QEE. Algumas formas alternativas de sua estimação são descritos, de modo a tornar os sistemas de monitoramento e gerenciamento da qualidade da energia elétrica bem mais capazes, eficientes e econômicos. São abordados quatro tipos de indicadores da QEE: indicadores de interrupção do fornecimento, variações de tensão de longa e de curta duração e com as distorções harmônicas.

Em (PIRES, 2006), é feito um estudo para avaliar as causas, efeitos e soluções da utilização de dispositivos de eletrônica de potência. Visto que o efeito dos harmônicos ainda não é tratado como uma prioridade pelas empresas concessionárias, mesmo com o aumento da demanda, estes efeitos irão se tornar cada vez maiores, ocasionando prejuízos para seus clientes e para as próprias redes de distribuição e transmissão. Em suma, este trabalho procura analisar, diagnosticar e solucionar problemas relacionadas com harmônicas em nível de distribuição para baixa tensão, mais especificamente nas áreas residencial e comercial. O mesmo também realiza medições nos aparelhos eletrodomésticos que são mais usuais nas residências e comércios, correlacionando o desempenho desses associados à geração de harmônicos. Desse modo, são apresentadas medições e simulações executadas na entrada dos transformadores de distribuição para várias classes de consumidores em diferentes cenários.

Em (NUNES, 2007), investiga-se o efeito de harmônicas em sistemas de distribuição por meio de uma modelagem empregando o software ATPDraw®. A modelagem das cargas residenciais é feita por meio de fontes de correntes. Adotando-se como informações para essa modelagem, valores adquiridos através de medições reais realizadas em equipamentos eletrodomésticos. O autor descreve uma avaliação dos resultados conseguidos nas simulações visando realizar dentro dos limites estipulados pelas legislações, em âmbito nacional e internacional. Enfim, ele realiza a simulação de um modelo de cargas com chuveiros eletrônicos e adverte que as distorções encontradas ultrapassam os limites estabelecidos pelas legislações.

Em (RIBEIRO, 2007), apresenta-se uma visão geral das perturbações harmônicas, conceitos, cálculos da distorção, principais fontes, efeitos em equipamentos, normas de regulamentação e as possíveis soluções para correção. O autor indica que os estudos e o conhecimento dos efeitos das harmônicas em equipamentos são recentes, em consequência da também recente evolução dos equipamentos eletrônicos (chaveados). Pois, com a ampla utilização dos

equipamentos não lineares, ficaram evidentes os efeitos de distorção harmônica. Conseqüentemente, passou-se a estudar este fenômeno com maior intensidade.

Em (ALONSO, 2008), realiza-se um estudo relacionado ao impacto das harmônicas nos medidores residenciais. O autor realizou simulações com diferentes cenários, com objetivo de identificar se o aumento do número de equipamentos não lineares provoca uma disfunção no valor estimado pelo medidor. Foi verificado que quanto maior o número de cargas não lineares (eletrodomésticos), maior é a distorção harmônica. Os resultados revelaram que, mesmo para consumidores com um perfil de carga com muitos equipamentos não-lineares, não notou-se uma influência que seja capaz de ocasionar perdas financeiras significativas para os mesmos. Para consumidores de consumo baixo, essa influência é quase nula.

Em (SANTOS et al, 2001), indica-se que os conversores estáticos de potência são as principais fontes de correntes harmônicas. Representando a maior preocupação na atualidade. Estes equipamentos englobam inversores e retificadores, podendo ser divididos em conversores de grande, de média e de baixa potência. Equipamentos de baixa potência são televisores, computadores e diversos outros eletrodomésticos. Os autores indicam que estes equipamentos constituem uma grande preocupação para o sistema elétrico, devido à sua utilização disseminada, ocasionando muitos problemas, como por exemplo, o mal funcionamento de outros equipamentos.

Em (PIRES, 2010), foram realizadas simulações para uma rede de distribuição primária de um sistema real. Nesta simulação foram realizados testes para quantificar as taxas de distorções harmônicas de tensão e corrente devido a cargas comerciais e residenciais. Após analisar as simulações, os autores concluíram que a taxa de distorção harmônica varia diretamente com a corrente demandada da rede. Ou seja, quanto maior o consumo, maior será a taxa de distorção da corrente e da tensão na rede. São mostradas tabelas que ilustram demandas e horários de consumo de transformadores. São considerados também os horários de pico de transformadores. Os transformadores, por possuírem características de não linearidade devido ao núcleo ferromagnético, injetam

harmônicas na rede. Em relação à distorção da tensão, os autores apontam que esta fica mais distorcida à medida que o circuito se distancia da subestação. Isso se deve às quedas de tensão harmônicas que vão ocorrendo no alimentador, conforme o mesmo se distancia da subestação.

Em (CORREA, 2012), foram realizados estudos em função da penetração em massa de equipamentos eletrodomésticos de maior eficiência. Foi evidenciado que tais equipamentos resultaram em um significativo aumento da taxa de distorção harmônica de tensão e corrente no sistema elétrico. O estudo utilizou técnicas probabilísticas para avaliar o impacto das harmônicas injetadas na rede elétrica, modelando individualmente as distorções injetadas. Com a utilização de métodos estocásticos, a partir da probabilidade de cada aparelho residencial estar ligado à rede, foi possível fazer a caracterização e o comportamento da carga. O trabalho propôs duas formas de mitigação de harmônicas, sendo a primeira é a adoção dos padrões da IEC relacionado às harmônicas. Já na segunda, utilizou-se filtros de harmônicas do lado primário do transformador para eliminação do efeito. Em suma, no estudo também foi possível verificar que pontos produtores de cargas não lineares são de pequena magnitude, quando se tem por base apenas um ponto da rede. Porém, quando analisadas no sistema de uma forma global, verifica-se que seus efeitos são de grandes proporções e distribuídas em um grande espaço. Os métodos aplicados no trabalho foram validados através de simulações. Propor-se algumas sugestões para mitigação dos efeitos indesejáveis como: Investigar outros modelos para representação dos aparelhos residenciais em simulações (por exemplo, Norton equivalente, modelo de fonte de tensão); Desenvolver uma teoria ou diretrizes para decidir os melhores locais para alocação dos filtros de harmônicas.

1.3 Organização do Manuscrito

Como descrito no item Estado da Arte, são mostrados os estudos acerca dos harmônicos e seus efeitos no sistema elétrico. Pode-se verificar que, na maioria dos casos, são causados por cargas indutivas ou que possuem algum tipo de chaveamento.

Este trabalho se divide em seis etapas, apresentando no primeiro capítulo uma introdução aos conceitos de QEE e suas relações com a conservação de energia. No segundo capítulo são abordados os itens que não se referem somente à energia, mas os outros componentes, que juntos dão forma a todo o sistema elétrico, formando um produto que é a energia elétrica. Também são abordados: as definições de QEE, condições de operação, critérios de avaliação, razões do monitoramento da QEE, como monitorar e as normas vigentes referentes a harmônicas. Posteriormente, no terceiro capítulo expõe-se uma abordagem mais detalhada sobre a caracterização dos harmônicos, seus efeitos e formas de mitigação. Ilustra-se diferentes componentes residenciais. No quarto capítulo, dois métodos estatísticos para caracterizar uma população de dimensões grandes são apresentados com o intuito de aplicador no trabalho, Em seguida, no quinto capítulo, são exibidas as informações de medições levantadas em diferentes pontos (residências) na cidade de João Monlevade MG. Através de gráficos obtidos pelo aparelho de medição foram efetuadas comparações com a bibliografia. Subsequentemente, é desenvolvido um exemplo teórico para efeitos de comparação com os valores medidos. Por fim, no sexto capítulo, apresenta-se a conclusão do estudo realizado.

2 Qualidade de Energia Elétrica

A Qualidade de Energia Elétrica pode ser conceituada como uma medida de quão bem a energia elétrica pode ser utilizada pelos consumidores (PIRES, 2006). Essa medida contém atributos de confiabilidade, de conformidade e de prestação de serviço, que visam garantir os parâmetros adequados do fornecimento. Entre os critérios conceituados desejáveis para uma operação segura e que atendam as normas da (ANEEL- PRODIST, 2009), tanto do sistema fornecedor como das cargas elétricas, tem-se:

- Tensões e correntes alternadas, com formas senoidais;
- Amplitudes constantes, nos valores nominais;
- Frequência constante, no valor síncrono;
- Tensões trifásicas equilibradas;
- Fator de potência dentro dos limites estabelecidos nas cargas;

A QEE não se limita somente aos parâmetros de continuidade de serviço (interrupções) e qualidade do produto (forma de onda do sinal). Atualmente se inclui a qualidade do atendimento (satisfação do cliente com as condições técnicas e comerciais do fornecimento de energia elétrica). A Figura 1 ilustra a intercessão entre esses atributos, o que representa o equilíbrio para operação do sistema elétrico.

Figura 1 - Qualidade de energia elétrica



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

2.1 Condições Ideais de Operação de um Sistema Elétrico e Indicadores de Monitoramento

A ANEEL é o órgão regulador e fiscalizador, cuja função principal é garantir o atendimento da demanda com qualidade de energia elétrica. Isso significa manter o padrão de operação tanto em regime permanente quanto em regime transitório. Estes padrões buscam, por exemplo, diminuir as perdas econômicas e reduzir o número de manutenções. Não operar dentro dos padrões traz prejuízos econômicos, por exemplo, nos consumidores industriais (interrupção de processos industriais). Portanto, a junção dos três itens ilustrados na Figura 1 (qualidade do atendimento, qualidade do serviço e qualidade do produto) são os pilares para as condições ideais da operação do sistema elétrico. Sendo estes aspectos explicados nas subseções 2.1.1 a 2.1.3.

2.1.1 Qualidade do Atendimento

A Qualidade do Atendimento se concentra no relacionamento técnico comercial entre o cliente e a empresa. Está regulamentada na resolução 414/2010 (ANEEL, 2010), a qual se divide em dois grupos: os serviços comerciais (rotineiros) e os serviços emergenciais. Ela aborda a consistência do monitoramento, presteza do atendimento, punição e prazos de serviços (vistorias, ligações, religação, elaboração de estudos, orçamentos, projetos, aferição de medidores e ressarcimento de danos elétricos). Se não cumpridos os prazos indicados na regulamentação, prevê-se uma penalização, a ser creditada na próxima fatura do cliente.

A resolução 574/2013 estabelece metas anuais no que tange à frequência equivalente de reclamação - FER e à duração equivalente da reclamação – DER para atendimento às reclamações dos consumidores. A Tabela 1 apresenta um quadro resumo com os tipos de serviço que prejudicam a operação, no que concerne à qualidade do atendimento e seus respectivos indicadores.

Tabela 1 - Tipos de serviços e indicadores relacionados com a qualidade de atendimento

| Tipos de serviços que influenciam as condições ideais de operação | |
|---|---|
| Rotineiros | Emergências |
| Estudos de cargas, novas ligações, religações, faturamentos | Serviços realizados pelas concessionárias com base nas reclamações dos clientes devido às ocorrências na rede de fornecimento que estão associados a interrupção no fornecimento. |
| Indicadores | |
| FER (Frequência equivalente de reclamação) | |
| DER (Duração equivalente de reclamação) | |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

2.1.2 Qualidade do Serviço

A Qualidade de Serviço compreende a continuidade de fornecimento, lidando basicamente com as interrupções no sistema elétrico, provocadas por falhas no sistema corrigidas por meio de (manutenção corretiva) e por atividade de programada (manutenções preventiva e preditiva). No que compete às condições ideais da qualidade de serviço, o ponto de vista ideal, ter-se-ia que conceder continuidade plena ou seja, sem interrupção do fornecimento de energia elétrica.

Quanto aos indicadores, estes têm como finalidade exigir que as concessionárias mantenham um padrão de continuidade. São monitorados através do DEC (Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora) e FEC (Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora), conforme definido no modulo 8 do PRODIST (ANEEL, 2009).

Estes indicadores são calculados através de um desempenho global de continuidade (DGC). Após extrair os valores do DGC, faz-se uma comparação dos valores estabelecidos pela ANEEL com os valores apurados do DEC e FEC das concessionárias. Anualmente, é publicado um ranking com os índices de DEC e

FEC referente a todas concessionárias, visando incentivar as concessionárias a buscarem a melhoria contínua da qualidade de serviço.

Além dos indicadores apresentados (DEC e FEC), a ANEEL também prevê outros quatro indicadores que têm o objetivo de avaliar individualmente os padrões de continuidade. Caso estes indicadores sejam superiores aos valores limites estabelecidos pela ANEEL, a concessionária deverá fazer uma compensação para os clientes, cujos valores variam para cada cidade e podem ser encontrados no site (ANEEL, 2016). Como exemplo destes indicadores, ilustra-se na tabela 2 os valores para a cidade de João Monlevade em 2015. Já na Tabela 3 os tipos de atividades que influenciem de forma negativa os indicadores de Qualidade de Serviço são mostrados. Sendo os mesmos:

- FIC – Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora;
- DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora;
- DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora;
- DICRI – Duração de Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico.

Tabela 2 - Índices da qualidade de serviço

| Índices de qualidade de serviço urbano da cidade de João Monlevade 2015 | | | | | | | | | | |
|---|-----|-----|---------|-------|--------|------------------------------|-------|--------|----------|-------------|
| CEMIG | | | DIC (h) | | | FIC (número de interrupções) | | | DMIC (h) | DICRI (h) |
| Conjunto | DEC | FEC | ANUAL | TRIM. | MENSAL | ANUAL | TRIM. | MENSAL | MENSAL | INTERRUPÇÃO |
| João Monlevade | 9 | 7 | 19,82 | 9,91 | 4,95 | 12,7 | 6,35 | 3,17 | 2,77 | 12,22 |

Fonte: (ANEEL, 2016).

Tabela 3 - Tipos de serviços e indicadores relacionado com a qualidade do serviço

| Tipos de serviços que influenciam as condições ideais de operação | |
|---|----------------------|
| Rotineiros | Emergências |
| Manutenção programada | Manutenção corretiva |
| Indicadores | |
| DEC; FEC; FIC; DIC; DMIC; DICRI | |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

2.1.3 Qualidade do Produto

A Qualidade do Produto é caracterizada, basicamente, pela forma da onda de tensão que é entregue aos clientes. Do ponto de vista ideal, é a disponibilidade de energia elétrica com tensões senoidais, equilibradas e com amplitude e frequência constantes (PAULILO, 2012). Desse modo, estabelece-se padrões elementares das condições ideais de operação, sendo:

- Forma de onda senoidal

A escolha da função senoidal como padrão se deve ao princípio básico da conversão eletromagnética de energia (Faraday).

$$e(t) = \frac{d\Phi(t)}{dt} \quad (2.1)$$

$$\Phi(t) = \int e(t) dt \quad (2.2)$$

Sendo:

$\Phi(t)$ =fluxo magnético variando em uma região envolvida por um condutor elétrico;

$e(t)$ =tensão elétrica induzida nos terminais do condutor.

As relações apresentadas garantem o princípio da conversão eletromagnética, gerando formas de ondas de fluxo e tensão permanentes. Devido a estas relações as variações temporais são senoidais. Dessa maneira, o padrão de qualidade da tensão suprida em sistemas de corrente alternada passa pela preservação da forma de onda senoidal. A expressão matemática é:

$$e(t) = A \sin(2\pi ft + \theta) \quad (2.3)$$

Onde:

A = amplitude da onda senoidal;

f = frequência da onda;

θ = ângulo de fase relativo a referência temporal.

- Amplitude constante

A variação da potência das cargas no sistema elétrico ocorre a todo tempo. Devido a isso, é necessário que as empresas geradoras, transmissoras e distribuidoras possuam recursos de controle em todos os níveis, para fazer as correções quando necessário, visando garantir a amplitude constante da tensão. Estes recursos frequentemente estão nos geradores, (variação do campo de excitação da máquina); em transformadores (variação dos TAPs) e de outros dispositivos que possuem controle eletrônico.

- Frequência constante

O controle da frequência está relacionando com a potência gerada e a potência solicitada. Este tipo de parâmetro busca o ponto de equilíbrio ou sincronismo do sistema. Sendo, então, necessário o controle deste parâmetro através de pequenos ajustes.

- Fases equilibradas

É necessário garantir que a corrente se distribua igualmente entre as três fases, de modo que a tensão seja equilibrada. Tais condições são satisfeitas de acordo com as equações descritas abaixo:

$$V_a(t) = A \operatorname{sen}(2\pi ft + \theta) \quad (2.4)$$

$$V_b(t) = A \operatorname{sen}\left(2\pi ft + \theta - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (2.5)$$

$$V_c(t) = A \operatorname{sen}\left(2\pi ft + \theta - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.6)$$

- Fator de potência

O fator de potência relaciona a energia ativa com a energia aparente total. Quanto mais próximo de um, maior é a eficiência da instalação. Caso contrário, menor é a eficiência.

Todos os parâmetros e valores relativos à conformidade de tensão em regime permanente e às perturbações na forma de onda de tensão estão apresentados na seção 8.1 do PRODIST (ANEEL, 2009). Os indicadores relacionados à Qualidade do Produto durante perturbações são complexos e muitos deles de difícil tratamento. Sendo os mesmos detalhados como se segue:

- Transitórios

Os transitórios são manifestações eletromagnéticas, provenientes de variações súbitas nas condições operacionais de um sistema de energia elétrica. Em geral, o intervalo de tempo de um transitório é breve; no entanto, de ampla relevância, visto que submetem os equipamentos a amplas solicitações de tensão e/ou corrente. Ocorrem dois tipos de transitórios: os impulsivos, causados por descargas atmosféricas, e os oscilatórios, acarretados por chaveamentos (Gilson PAULILO, 2012).

- Variações de tensão de curta duração (VTCD)

As alterações de tensão de curta duração podem ser qualificadas por variações rápidas, momentâneas ou temporárias. Estas variações de tensão são comumente geradas pela energização de grandes cargas que demandam altas correntes de partida ou condições de curto-circuito.

Dependendo do ponto da falha e das circunstâncias do sistema, a consequência pode ser um afundamento instantâneo de tensão (do inglês sag) ou uma elevação instantânea de tensão (do inglês swell), inclusive, uma interrupção do fornecimento.

- Variações de tensão de longa duração (VTLD)

As oscilações de tensão de longa duração são manifestações equivalentes aos de curta duração. Contudo, com a peculiaridade de permanecerem no sistema elétrico por períodos superiores a três minutos. Elas são produzidas por saídas de um aglomerado de carga, perdas de fase, dentre outras.

- Desequilíbrios

Os desequilíbrios podem ser definidos como os desvios máximos da média das correntes ou tensões trifásicas, expressos em percentual (PAULILO, 2012). As fontes de desequilíbrios situam-se frequentemente nos sistemas de distribuição, que contém em sua maioria cargas monofásicas conectadas em diferentes fases. Esta característica provoca tensões de sequência negativa, o que traz prejuízos aos consumidores que possuem cargas trifásicas equilibradas.

- Distorções da forma de onda (harmônicos, cortes de tensão e ruídos)

A distorção da forma de onda é fixada como uma alteração, em modo contínuo, da forma de onda senoidal e na frequência fundamental. É qualificada basicamente pelo seu conteúdo espectral (PAULILO, 2012). Quatro fenômenos relevantes são encontrados na Tabela 4:

Tabela 4 - Tipos de distorções

| | |
|------------|--|
| Harmônicos | Tensões ou correntes senoidais de frequências múltiplas inteiras da frequência fundamental (50 Hz ou 60 Hz) em que opera o sistema de energia elétrica. Estes harmônicos distorcem as formas de onda da tensão e corrente e são provenientes de equipamentos e cargas com atributos não lineares instaladas no sistema de energia. |
| Nível CC | A existência de tensão ou corrente CC em um sistema elétrico CA é intitulado "DC offset". Este fato pode advir do efeito da operação |

| | |
|----------|--|
| | ideal de retificadores de meia-onda. O nível CC em redes de corrente alternada pode induzir à saturação de transformadores, sucedendo em danos extras e diminuição da vida útil. |
| Notching | Distúrbio de tensão gerado pela operação padrão de equipamentos de eletrônica de potência cada vez que a corrente é comutada de uma fase para outra. Este evento pode ser identificado pelo conteúdo harmônico da tensão afetada. As componentes de frequência referentes aos "notchings" são de grande relevância. Não podem ser mensuradas pelos equipamentos geralmente aplicados para investigação harmônica. |
| Ruído | É um sinal elétrico indesejado, incluindo uma ampliação da faixa espectral com frequências inferiores a 200 kHz, que são sobrepostas às tensões ou correntes de fase; ou aparecem em condutores neutro. Os ruídos em sistemas de potência podem ser provocados por equipamentos eletrônicos, circuitos de controle, retificadores a estado sólido e fontes chaveadas; que, usualmente, estão associados com aterramentos impróprios. |

Fonte: (PAULILO, 2012).

- Flutuação de tensão

As flutuações de tensão se referem às alterações sistemáticas dos valores eficazes da tensão de suprimento, entre a faixa contida entre 0,95 pu e 1,05 pu. Em geral, são provocadas por cargas industriais e se materializa de diversas formas, ressaltadas na tabela 5.

Tabela 5 - Tipos de flutuações

| | |
|------------------------|---|
| Flutuações aleatórias | Ocasionadas por fornos a arco, nas quais as amplitudes das variações dependem do estado do material e do nível de curto-circuito da instalação. |
| Flutuações repetitivas | Ocasionadas por máquinas de solda, laminadores, elevadores de minas e ferrovias. |
| Flutuações esporádicas | Ocasionadas pela partida direta de grandes motores. |

Fonte: (PAULILO, 2012).

Os efeitos relevantes nos sistemas elétricos, resultados das oscilações geradas pelos equipamentos citados na tabela 5, são variações de potência e torque das máquinas elétricas, decaimento de eficiência dos equipamentos elétricos, distorção nos sistemas de proteção e efeito "flicker".

- Variações de frequência

Mudanças na frequência de um sistema elétrico são determinadas pelo distanciamento no valor da frequência fundamental deste sistema (50 Hz ou 60 Hz). A frequência do sistema de potência está totalmente relacionada à velocidade de rotação dos geradores que abastecem o sistema. Mudanças mínimas de frequência conseguem ser percebidas como consequência do desequilíbrio entre carga e geração (oscilações na faixa de $60 \pm 0,5\text{Hz}$). Falhas em sistemas de transmissão, saída de um grande aglomerado de carga ou saída de operação de uma ampla fonte de geração resultam em oscilações da frequência.

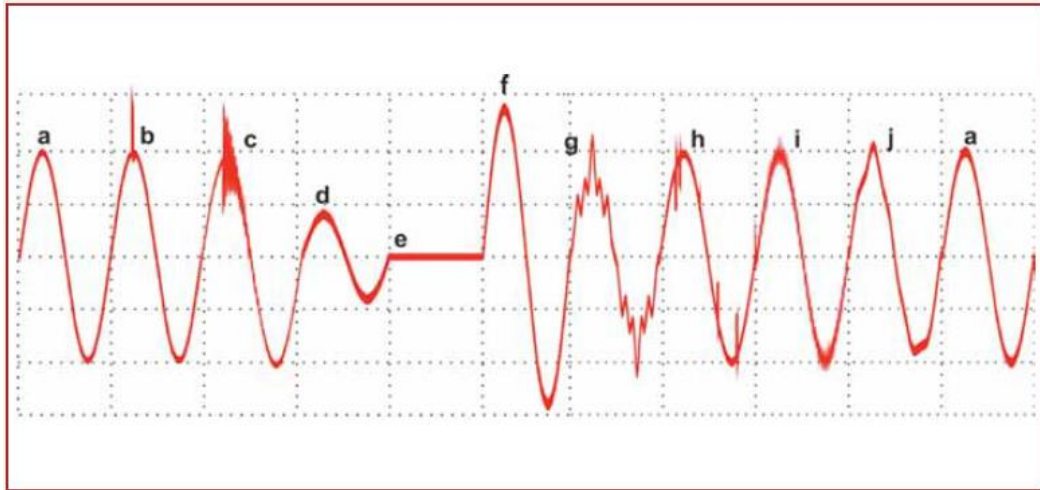
Em grupos isolados, no entanto, como é a situação da co-geração nas indústrias, uma falha altera a velocidade das máquinas, provocando desvios da frequência em intensidades mais expressivas.

Um resumo do que foi descrito até esse ponto é ilustrado na Figura 2. Os distúrbios citados foram os seguintes:

- a. Tensão senoidal
- b. Transitório impulsivo
- c. Transitório oscilatório
- d. Afundamento de tensão
- e. Interrupção
- f. Salto de tensão
- g. Harmônico
- h. Corte de tensão
- i. Ruídos

j. inter-harmônicos

Figura 2 - Principais distúrbios da QEE



Fonte: (PAULILO, 2012).

A Tabela 6 apresenta as classes mais recorrentes de distúrbios, suas causas e algumas soluções praticadas.

Tabela 6 - Categorias de classificação dos distúrbios associados à qualidade da energia

| Distúrbios | Causas | Efeitos | Soluções |
|---------------------------|---|---|---|
| Transitórios impulsivos | Descargas atmosféricas; Chaveamentos de cargas e/ou dispositivos de proteção. | Excitação de circuitos ressonantes; Redução da vida útil de motores, Geradores, Transformadores, etc.; Erros de processamento e perdas de sinais. | Filtros; Supressores de surtos; Transformadores isoladores. |
| Transitórios oscilatórios | Descargas atmosféricas; Chaveamentos de capacitores, linhas, cargas e transformadores; Transitórios impulsivos. | Mau funcionamento de equipamentos controlados eletronicamente, conversores de potência, etc.; Redução da vida útil de motores, geradores, etc. | Filtros; Supressores de surtos; Transformadores isoladores. |
| Sub e sobretensões | Partidas de motores; Variações de cargas; | Pequena redução na velocidade dos motores de indução e no reativo | Reguladores de tensão; Chaves |

| | | | |
|------------------|--|---|--|
| | Chaveamento de capacitores; TAPs de transformadores ajustados incorretamente. | dos bancos de capacitores; Falhas em equipamentos eletrônicos; Redução da vida útil de máquinas rotativas, transformadores, cabos, disjuntores, TPs e TCs; Operação indevida de relés de proteção, motores, geradores, etc. | estáticas; No-breaks. |
| Interrupções | Curto-circuito; Operação de disjuntores; Manutenção. | Falha de equipamentos eletrônicos e de iluminação; Desligamento de equipamentos; Interrupção do processo produtivo (altos custos). | Fontes de energia sobressalentes; Sistemas “no-break”. |
| Desequilíbrios | Fornos a arco; Cargas monofásicas e bifásicas; Assimetrias entre as impedâncias; Falta de transposição de linhas de transmissão. | Redução da vida útil de motores de indução e máquinas síncronas; Geração, pelos retificadores, de 3º harmônico e seus múltiplos. | Operação simétrica; Dispositivos de compensação. |
| Nível CC | Operação ideal de retificadores de meia onda, etc. | Saturação de transformadores; Corrosão eletrolítica de eletrodos de aterramento e de outros conectores. | |
| Harmônicos | Cargas não lineares. | Sobreaquecimento de cabos, transformadores e motores de indução; Danificação de capacitores; Operação indevida de disjuntores. | Filtros; Transformadores isoladores; Reatores de linhas. |
| Inter-harmônicos | Conversores estáticos de potência; Cicloconversores; Motores de indução. | Interferência na transmissão de sinais Carrier; Indução de flicker visual no display de equipamentos. | |
| Notching | Equipamentos | Operação indevida de | |

| | | | |
|------------------------|--|--|--|
| | eletrônicos de potência. | dispositivos de medição e proteção. | |
| Ruídos | Chaveamento de equipamentos eletrônicos de potência; Radiações eletromagnéticas. | Distúrbios em equipamentos eletrônicos (computadores e controladores programáveis). | Aterramento das instalações; Filtros. |
| Flutuações de tensão | Cargas intermitentes; Fornos a arco; | Flicker; Oscilação de potência e torque nas máquinas elétricas; Queda de rendimento de equipamentos elétricos; Interferência nos sistemas de proteção. | Sistemas estáticos de compensação de reativos; Capacitores em série. |
| Variação de frequência | Perda de geração, perda de linhas de Transmissão, etc. | Danos severos nos geradores e nas palhetas das turbinas, etc. | Sistemas especiais de proteção |

Fonte: (PAULILO, 2012).

2.2 Normas Nacionais e Internacionais Aplicáveis às Harmônicas

A verificação e fiscalização da QEE contidas nos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), é um documento elaborado e emitido pela ANEEL, encarregada pela regulação de quem gera, transmite, distribui e consome energia elétrica.

No módulo 8 do PRODIST, expõe-se os aspectos pertencente a qualidade do produto em regime permanente ou transitório, tais como: tensão em regime permanente; fator de potência; harmônicos; desequilíbrio de tensão; flutuação de tensão; variação de tensão de curta duração; variação de frequência. Todos estes itens são classificados como parâmetros de verificação pela ANEEL. Também no mesmo módulo, define-se a terminologia, e o conceito de distorção harmônica, a metodologia de medição e os valores de referência para as distorções harmônicas.

Na tabela 7 indicam-se as grandezas e os parâmetros utilizados para fiscalização referente aos harmônicos. Sendo o mais utilizado a distorção harmônica total (THD). Contudo, a ANEEL efetua a verificação dos parâmetros de distorção

harmônica por meio dos valores de distorção harmônica individual de tensão (DITH) e distorção harmônica total de tensão (DTT). Estes valores são ilustrados nas tabelas 8 e 9.

Tabela 7 - Terminologia

| Identificação da Grandeza | Símbolo |
|---|------------------|
| Distorção harmônica individual de tensão de ordem h | $DIT_h\%$ |
| Distorção harmônica total de tensão | DTT % |
| Tensão harmônica de ordem h | V_h |
| Ordem harmônica | H |
| Ordem harmônica máxima | h _{máx} |
| Ordem harmônica mínima | h _{min} |
| Tensão fundamental medida | V_1 |

Fonte: (ANEEL, 2009).

Tabela 8 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais (em porcentagem da onda fundamental)

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

Fonte: (ANEEL, 2009).

Tabela 9 - Nível de distorção harmônica individual

| Ordem Harmônica | Distorção Harmônica Individual de Tensão [%] | | | | |
|------------------------|---|-----|---------------------------|----------------------------|------------------------|
| | $V_n \leq 1 kV$ | | $1 kV < V_n \leq 13,8 kV$ | $13,8 kV < V_n \leq 69 kV$ | $69 kV < V_n < 230 kV$ |
| Ímpares não | 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 |

| | | | | | |
|----------------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Múltiplas de 3 | | | | | |
| | 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 | 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 |
| Múltiplas de 3 | | | | | |
| Pares | 2 | 2,5 | 2 | 1,5 | 1 |
| | 4 | 1,5 | 1 | 1 | 0,5 |
| | 6 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | 8 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | 10 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | 12 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| | >12 | 1 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |

Fonte: (ANEEL, 2009).

Além dessas normas, também se utiliza normas internacionais como referência, tal como a IEEE 519. Essa norma estadunidense é bastante abrangente, e aborda temas como, por exemplo: definições e notação simbólica; normas relacionadas e referências bibliográficas; geração de harmônicas; características de resposta do sistema; efeitos das harmônicas; compensação reativa e controle de harmônicas; métodos de análise e medições. Além disso, descreve observações para as práticas recomendadas aos consumidores individuais e concessionárias. Por fim, prescreve metodologias recomendáveis para análise de novas fontes harmônicas.

Devido à extensão desse assunto, destacam-se apenas alguns pontos principais, como limites de correntes harmônicas para o consumidor e limites de tensões harmônicas globais para o sistema (concessionárias), limites para notching e interferência telefônica.

A utilização destas normas internacionais ocorre devido ao Brasil ainda não possuir estudos na área nem legislação vigente. Então, são adotados os limites utilizados por estas normas. Outras duas normas que devem ser citadas são: a IEC 61000-3-2 e a IEC 610003-4. Tais normas também relacionam os limites de THD. São impostas na construção dos equipamentos elétricos que são produzidos.

Tabela 10 - Nível de distorção harmônica aceitável pela IEC 61000-3

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

Fonte: (PIRES et al, 2006).

Além disso, na atual NBR5410/2004 anexo F, existe uma citação sobre harmônicas, em relação a correção da corrente de projeto.

3 Harmônicas

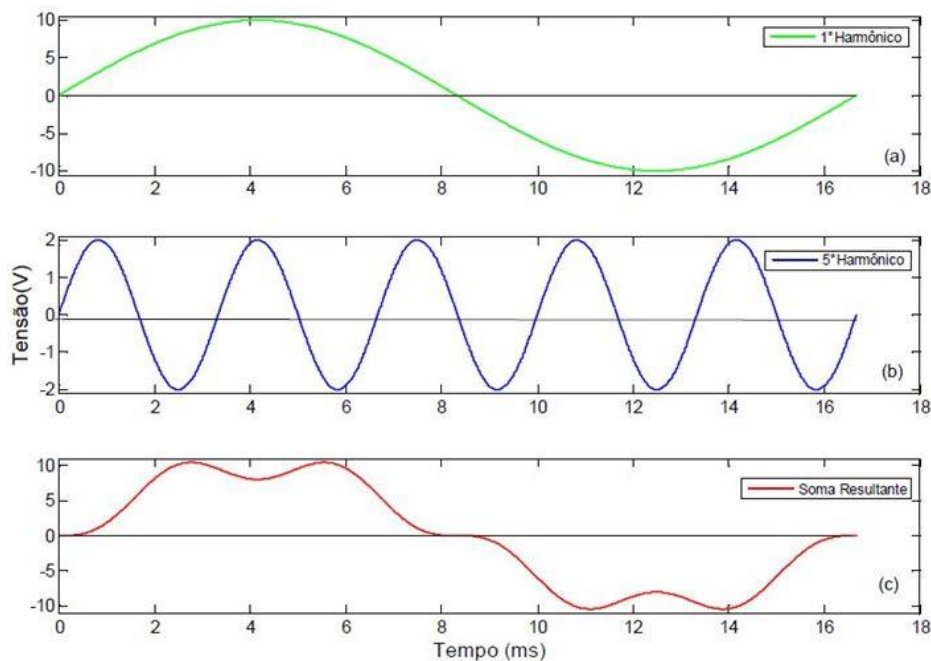
3.1 Caracterização das Harmônicas

- Definição

Harmônicas são ondas de corrente ou tensão que possuem frequências múltiplas da frequência fundamental. Onde as ondas resultantes (não senoidais) são obtidas através de um somatório de ondas senoidais em diferentes frequências. Estas ondas senoidais nas diferentes frequências são denominadas de componentes harmônicos da onda original (RIBEIRO, 2007).

A Figura 3 ilustra o perfil da onda de tensão em uma instalação “poluída” com harmônicas. Analisando, percebe-se que o sinal deformado figura 3 (c) não é mais do que a somatória ponto a ponto do sinal fundamental figura 3 (a) com o sinal sinusoidal de quinta ordem figura 3 (b), que contêm amplitudes e frequências diferentes. Entende-se que um sinal periódico inclui harmônicas sempre que a forma de onda está deformada em relação ao sinal fundamental (60Hz).

Figura 3 - Harmônicas



Fonte: (RIBEIRO, 2007).

- Ordem, frequência e sequência das harmônicas.

Os sinais harmônicos são identificados conforme a sua ordem, frequência e sequência, como ilustrado na tabela 11. Estas harmônicas são agrupadas em pares e ímpares. Frequentemente as harmônicas de ordem ímpar são produzidas nas instalações elétricas e as de ordem par são encontradas nas situações onde exista assimetrias do sinal, em razão da presença da componente contínua. Além disso, também é perceptível na Tabela 11 que as harmônicas possuem uma sequência, podendo ser positiva, negativa e zero. As de sequência nula são as mais perturbantes. Em razão das correntes harmônicas nas fases se somarem no condutor neutro, ocasionando diversas perturbações para instalações e equipamentos ligados à rede elétrica. A tabela 12 indica, de forma geral, alguns efeitos relacionados a cada tipo de sequência harmônica.

Tabela 11 - Classificação das harmônicas

| Ordem | Fund. | 2° | 3° | 4° | 5° | 6° | 7° |
|------------|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Freq. (Hz) | 60 | 120 | 180 | 240 | 300 | 360 | 420 |
| Sequencia | + | - | 0 | + | - | 0 | + |

Fonte: (RIBEIRO, 2007).

Tabela 12 - Sequencia de harmônicos e efeitos

| Sequencia | Efeitos |
|-----------|--------------------------------------|
| Positiva | Sobreaquecimentos |
| Negativa | Sobreaquecimentos e menor rendimento |
| Zero | Somam-se no condutor neutro |

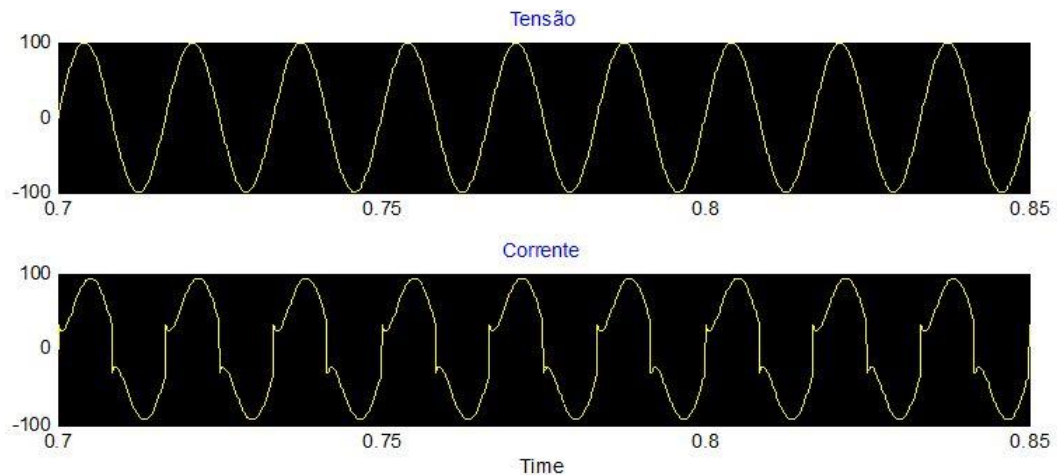
Fonte: (RIBEIRO, 2007).

- Espectro harmônico

O espectro harmônico retrata a decomposição de um sinal nas suas componentes harmônicas e é expresso por meio de um gráfico de barras no domínio da frequência. Mediante norma, é usual medir somente até ordem 30°, visto que, infreqüentemente, não há vestígios relevantes de ordem superior a esta que possa alterar o desempenho de uma instalação elétrica.

As Figuras 4 e 5 ilustram a forma de onda de tensão e corrente consumida por uma carga RL monofásica e a decomposição do sinal da corrente, respectivamente. Na parte figura 5(a) se exhibe as frequências harmônicas presentes no sinal e suas respectivas magnitudes. Na figura 5(b) da mesma figura, mostra-se o espectro harmônico na forma de barras.

Figura 4 – Representação da forma de onda gerada em circuito RL Monofásico.

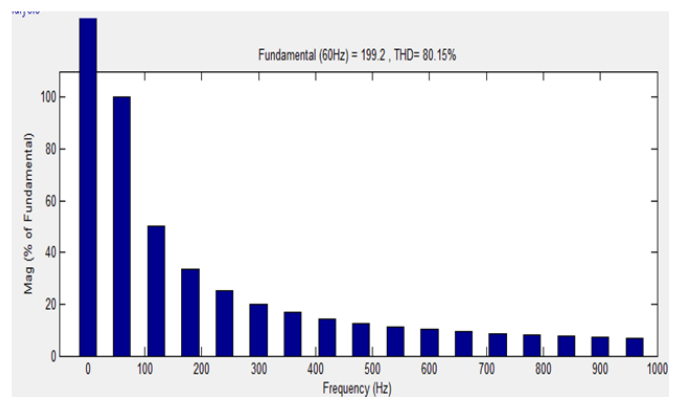


Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 5 - (a) Lista de Harmônicas (b) Espectro harmônico no domínio da frequência de uma Carga RL Monofásica

| | | | |
|--------|---------|-----------|--------|
| 0 Hz | (DC) : | 12458.68% | 270.0° |
| 60 Hz | (Fnd) : | 100.00% | 182.2° |
| 120 Hz | (h2) : | 50.04% | 184.3° |
| 180 Hz | (h3) : | 33.40% | 186.5° |
| 240 Hz | (h4) : | 25.09% | 188.7° |
| 300 Hz | (h5) : | 20.12% | 190.8° |
| 360 Hz | (h6) : | 16.81% | 193.0° |
| 420 Hz | (h7) : | 14.45% | 195.2° |
| 480 Hz | (h8) : | 12.69% | 197.3° |
| 540 Hz | (h9) : | 11.33% | 199.5° |
| 600 Hz | (h10) : | 10.24% | 201.7° |
| 660 Hz | (h11) : | 9.36% | 203.9° |
| 720 Hz | (h12) : | 8.62% | 206.0° |
| 780 Hz | (h13) : | 8.01% | 208.2° |
| 840 Hz | (h14) : | 7.49% | 210.4° |
| 900 Hz | (h15) : | 7.04% | 212.5° |
| 960 Hz | (h16) : | 6.65% | 214.7° |

(a)



(b)

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

- Taxa de distorção harmônica

A taxa de distorção harmônica descreve numericamente o conjunto das harmônicas contidas em um determinado local da instalação. O método de calcular a Taxa de distorção harmônica (THD) de corrente e tensão é através das equações:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} V_h^2}}{V_1} \quad (3.1)$$

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2}}{I_1} \quad (3.2)$$

Onde:

THD_V = Distorção harmônica total da tensão

THD_I = Distorção harmônica total da corrente

I_h = Corrente harmônica de ordem n

I_1 = Corrente fundamental

V_h = Tensão harmônica de ordem n

V_1 = Tensão fundamental

Também é possível se calcular a distorção de demanda total, através da equação 3.3:

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_2^{\infty} I_h^2}}{I_L} \quad (3.3)$$

TDD = Distorção de demanda total

I_h = Corrente harmônica de ordem n

I_L = Valor eficaz de corrente de demanda no ponto de conexão comum

- Fator de potência ($\cos\Phi$)

É a relação entre a potência ativa e a potência aparente utilizadas pelos equipamentos de uma instalação elétrica.

O $\cos\Phi$ em uma rede contendo correntes harmônicas é a relação entre a potência ativa fundamental e a potência aparente, caso não haja componentes harmônicas na tensão se utiliza a equação 3.4 e se houver harmônicas aplica-se a equação 3.5. Segue:

$$pf_{tot} = \frac{I_1 \cdot V_1 \cos\phi_1}{I_{rms} V_{rms}} = \frac{I_1 \cos\phi_1}{I_{rms}} \quad (3.4)$$

$$P = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \cdot i(t) \cdot dt = \sum_{k=1}^{\infty} I_k \cdot V_k \cdot \cos\phi_k \quad (3.5)$$

Ao investigar alguma instalação que apresente uma quantia relevante de harmônicas, calculando o $\cos\Phi$ da componente fundamental e o fator de potência do sinal deformado, naturalmente constata-se que valores encontrados são diferentes entre si. Por fim, é notado que quanto maior for essa discrepância entre ambos, maior constituirá a distorção harmônica.

3.2 Efeito das Harmônicas nos Sistemas de Distribuição

Quando pensamos em harmônicos, idealizamos o conceito de “perda”, mas é fundamental entendermos o porquê dessas perdas. Quais os motivos que levam a estes fatos? Quais são as consequências? Quais são os órgãos fiscalizadores e normas regulamentadoras destes parâmetros? E claro, quais as soluções para correção? Nessa etapa ilustra-se as curvas características e os valores do THD de tensão e corrente, harmônicas e o fator de potência de equipamentos que são mais usuais em nosso dia a dia. Assim sendo, estes questionamentos e também quais os efeitos em diversos tipos de componentes que compõem o sistema elétrico são abordados.

3.2.1 Efeito das Harmônicas nos Sistemas de Distribuição

Os medidores são equipamentos em constante uso. É de suma importância a operação deles em condições aceitáveis para execução da sua função.

Pensando nisso, (VASCONCELOS et al, 2003) desenvolve um modelo matemático de um medidor de watt-hora indutivo para avaliar a influência de harmônicas. As características do medidor indutivo são: 1 elemento, 2 fios, 1 fase, classe 2, 60 Hz, 220 V, 15-100 A e $K_d = 3,6 \text{ Wh/h}$. Os testes em medidores reais para validação do modelo desenvolvido, apontaram que para se ter uma diferença na tarifação da energia elétrica, seriam necessários valores elevados das THDs de tensão e corrente, da ordem de 20%. A tabela 13 ilustra os resultados dos autores, tanto no experimento de medição como em simulações. Os erros são relativos aos valores medidos para tensão e corrente com THDs iguais a zero.

Tabela 13 - Erros experimentais e simulados em medidores eletromagnéticos

| THD Tensão (%) – experimental e simulação | THD Corrente (%) – experimental e simulação | Erro experimental (%) | Erro Simulação (%) |
|---|---|-----------------------|--------------------|
| 3,6 | 117 | -1,86 | -1,97 |
| 5 | 30 | 0,56 | 0,61 |
| 9 | 26 | 1,45 | 1,37 |
| 11 | 113 | -4,31 | -4,56 |
| 11,9 | 11,9 | 1,10 | 1,08 |
| 21 | 32 | 3,97 | 4,10 |
| 22 | 22 | 4,10 | 3,95 |
| 37,1 | 37,1 | 9,54 | 9,61 |

Fonte: (VASCONCELOS et al, 2003).

O método pode ser aplicado com taxas de distorções de tensão de até 5%. Acima deste valor, ocorrerá discrepâncias. Como a rede elétrica apresenta normalmente uma taxa de distorção de 2%, não há erros significativos nas medições. Em (IEEE, 1993) é dito que para se ter um erro de medição nos medidores eletromagnéticos é necessário existir uma taxa de distorção da tensão

em torno de 20%. Conseqüentemente, uma alta distorção da tensão traz uma alta distorção da corrente, produzindo assim altos níveis de THD, o que afetaria a aferição das medidas elétricas.

3.2.2 Condutores

Em sistemas trifásicos equilibrados, as tensões fase-neutro estão defasadas 120° umas das outras e quando cada fase é carregada igualmente, a corrente que passa pelo condutor neutro é nula. Em circunstâncias de desequilíbrio entre as tensões, as correntes somadas no neutro resultante diferente de zero. No entanto, apesar das correntes fundamentais se anularem, o mesmo não acontece com a presença de correntes harmônicas, particularmente as de 3º ordem e suas múltiplas (SANTOS, 2007).

Este fenômeno ocorre principalmente onde há existência de muitas cargas eletrônicas, sendo que estas proporcionam altas taxas de THD. As correntes harmônicas de 3º ordem implicam em um aquecimento elevado no cabo neutro, podendo chegar a ser 1,7 vezes a corrente de fase, pois ao invés de se anularem acabam se somando no neutro.

Por fim, pode-se amenizar este efeito através do condutor neutro, dimensionado o mesmo com pelo menos 2 vezes a bitola da fase. Garantindo que o mesmo não fique sujeito a altas temperaturas, no que diz respeito às harmônicas.

3.2.3 Iluminação

Até o começo do ano 2000, as lâmpadas eram basicamente resistências, e por se tratarem de cargas lineares não interferiam na QEE. Mas este panorama teve mudança devido ao cenário energético de 2001 (acionamento de energia). As lâmpadas fluorescentes (FLCs) começaram a surgir com grande força no mercado, por serem bem mais econômicas do que as lâmpadas incandescentes. As LFC's apresentam um custo benefício melhor. Porém, esta tecnologia não trouxe apenas

soluções econômicas. Após a adesão do mercado nacional às lâmpadas fluorescentes, o país obteve um singelo alívio em relação ao consumo de energia relacionado com iluminação. Ao mesmo tempo em que o consumo energético foi reduzido, ocorreu uma depreciação na QEE.

As lâmpadas fluorescentes possuem reatores eletrônicos ou reatores eletromagnéticos, caracterizando-as como cargas do tipo não lineares; ou seja, cargas que distorcem a características da onda fundamental.

Nas lâmpadas de descargas, é possível identificar que a QEE entregue nas residências sofre um efeito de depreciação, causando um ruído audível, devido aos capacitores agregados em seus reatores eletromagnéticos que corrigem o fator potência. Geram uma ressonância na faixa de 75 a 80Hz, sendo possível ouvir esse ruído. Não há como tratar esses tipos de ruído no consumidor (residência), pois a distorção que estas lâmpadas podem causar depende da energia entregue pela rede. Vale ressaltar que em (CHEN et al., 1997) foram realizados testes nos quais foram aplicadas tensões distorcidas a lâmpadas com reatores eletromagnéticos e reatores eletrônicos. Concluiu-se que as lâmpadas com reatores eletrônicos são mais imunes aos harmônicos presentes na rede do que os reatores eletromagnéticos, no que diz respeito ao fator de potência, eficiência e luminosidade.

Nas Figuras 6, 7 e 8 são ilustrados a forma de onda e o espectrograma de três tipos de lâmpadas frequentemente utilizadas em residências e na iluminação pública. Dessa forma, uma avaliação da taxa de distorção harmônica total de corrente - DHT_i , com o propósito de quantificar estes valores, é efetuada. Os seguintes parâmetros são apresentados nas respectivas imagens:

I_1 = Corrente fundamental da carga

V_1 = Tensão aplicada à carga

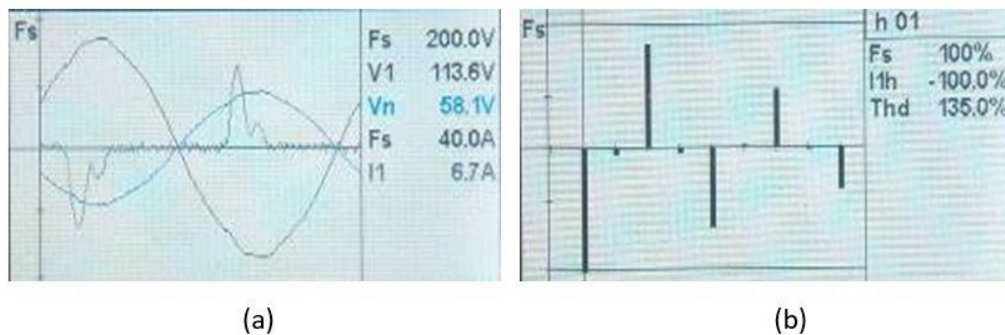
V_n = Tensão fase/neutro

Thd = Distorção total harmônica

- Lâmpada fluorescente

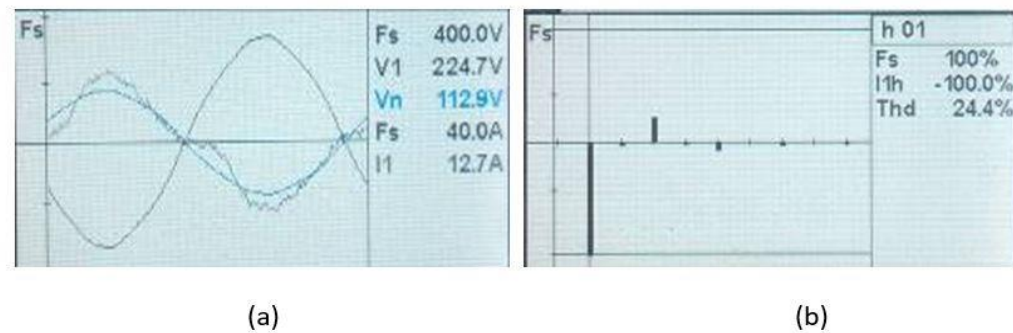
As lâmpadas fluorescentes podem ser do tipo convencional ou compacta (LFC). As LFCs variam quanto ao tipo de reator que as compõem, sendo reatores eletromagnéticos ou reatores eletrônicos. Em (GONZALEZ et al, 2005) cita-se que a LFC com reator eletromagnético não possui alta DHTi, sendo este valor próximo de 10%. Já para a LFC com reator eletrônico, a DHTi chega a 100%. Apresenta-se, abaixo, o comparativo da LFC com lâmpadas que não possuem reatores em seu acionamento.

Figura 6 - lâmpada fluorescente compacta



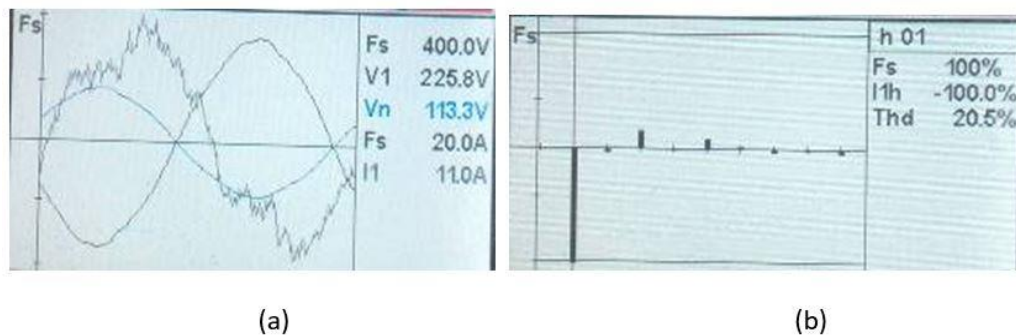
Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 7 - - lâmpada mista



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 8 - lâmpada de sódio



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

É notório na tabela 14 que as lâmpadas com reatores (fluorescentes) apresentam uma significativa diferença no conteúdo harmônico em relação às outras lâmpadas, provando o efeito de distorção devido às pontes retificadoras.

Tabela 14 - Comparativo das lâmpadas em função do circuito interno

| Equipamento | Circuito interno gerador de harmônico e componentes | DHTi (%) |
|----------------------|---|----------|
| Lâmpada Fluorescente | Reator eletrônico (retificador) | 135% |
| Lâmpada Mista | Gás de mercúrio (não possui reator) | 24,4% |
| Lâmpada de Sódio | Vapor de sódio (não possui reator) | 20,5% |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Em suma, é perceptível que as lâmpadas mencionadas acima provocam distorções harmônicas no sistema elétrico. Contudo, as lâmpadas fluorescentes com reator eletrônico são as que mais se sobressaem. Tal efeito é causado devido à utilização do retificador, promovendo a distorção harmônica em função do chaveamento das correntes. As lâmpadas são um objeto como outro qualquer; portanto, estão sujeitas a produzir e sofrer os efeitos das distorções harmônicas. Entretanto, os efeitos das distorções harmônicas percebido nas lâmpadas é muito inferior ao que estas provocam.

3.2.4 Máquinas Rotativas

A ocorrência de tensões não senoidais em máquinas elétricas pode acarretar sobreaquecimento, torques pulsantes ou ruídos. Além disso, devem-se incluir os harmônicos provenientes da rede elétrica. Reguladores de velocidade são supridos por meio de inversores que propiciam a geração de harmônicos, resultando uma notável distorção de tensão. Uma disfunção que aparece em função de harmônicos é um ruído perceptível relacionado com a excitação não senoidal. Os harmônicos, de fato, geram um fluxo distorcido no entreferro, que consegue promover duas manifestações: “*cogging*” (rejeição a partida suave) e “*crawling*” (amplo escorregamento).

Detalhando as harmônicas em relação à componentes simétricas, verifica-se que o fluxo proveniente de cada corrente harmônica no estator produz uma força magnética no entreferro, que provocará uma indução de fluxo de corrente no rotor da máquina. Dado que os harmônicos essenciais podem ser determinados em seqüências positiva, negativa e zero. Efeitos destes harmônicos podem ser:

Seqüência zero: Quando predominante no circuito, ocasionará uma corrente que poderá ser de até 3 vezes a corrente de fase, que circulara no neutro, provocando um aquecimento no condutor.

Seqüência positiva: As harmônicas de seqüência positiva possuem rotação no sentido horário, em outras palavras, quando aplicada em um motor de indução trifásico terá sentido de giro favorável ao rotor, provocando um sobreaquecimento nos enrolamentos do motor.

Seqüência negativa: O campo magnético produzido por uma seqüência de harmônicas negativa tende a anular o campo produzido pela fundamental, em virtude de possuir sentido de giro contrário ao da máquina. Esta manifestação pode causar a queima de motores de indução trifásicos.

3.2.5 Equipamentos Eletrônicos

Os equipamentos eletrônicos representam a evolução da tecnologia nas últimas décadas. É comum encontrarmos nos circuitos destes equipamentos muitos transistores, retificadores, diodos, microprocessadores, circuitos integrados e outros. A presença destes componentes promove a deterioração da QEE.

A deterioração aparece em virtude das características de funcionamento dos componentes citados, pois estes funcionam por chaveamento das correntes, que pode ser através de conversores eletrônicos, pontes retificadoras, dentre outros.

Conta-se que os eletrodomésticos atingiram uma ampla utilização devido as várias necessidades que estão presentes no cotidiano, como: a automatização de processos, o conforto em carros, residências, hospitais, escritórios no campo, etc. Em vista disso, percebe-se que os televisores e computadores são um dos itens mais comuns nas residências, diante desse fato, se faz imprescindível análises da distorção harmônica causada por estes equipamentos. É importante evidenciar que os televisores e computadores servem de parâmetro para analisar, de forma geral, uma grande gama de equipamentos eletrônicos presentes no cotidiano, uma vez que o funcionamento da grande maioria é semelhante. Analisando apenas estes equipamentos, é possível caracterizar e entender de forma geral o porquê destes eletrodomésticos injetarem altas taxas de distorções harmônicas. Na tabela 15, especifica-se, de forma simples, quais componentes compõem a parte interna de alguns equipamentos.

Tabela 15 – Principais equipamentos residenciais/comerciais geradores de harmônicas

| Equipamento | Circuito interno gerador de harmônico e componentes |
|---------------------|---|
| Televisor | Fonte de alimentação (retificador) |
| Laptop e computador | Fonte de alimentação (retificador) |
| Chuveiro eletrônico | Triac |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

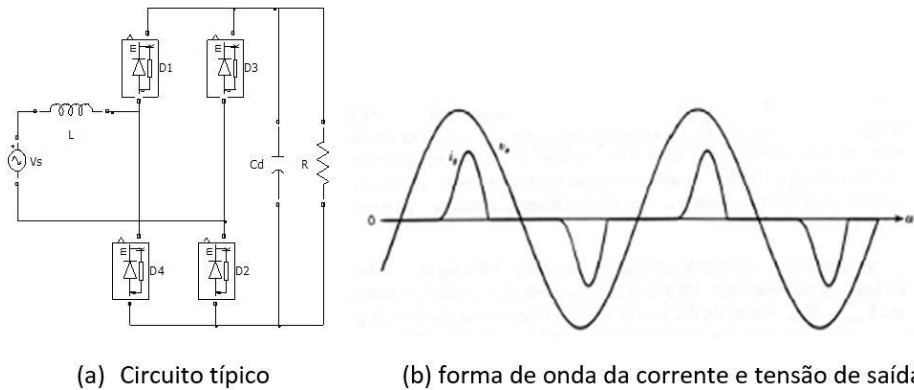
Pode-se ver através da tabela 15, que os equipamentos presentes nas residências possuem circuitos internos em comum, evidenciando a razão de grande parte dos eletrodomésticos injetarem harmônicas. A seguir, é explicado o porquê de os circuitos retificadores possuírem características de alta distorção harmônica.

- Retificadores

Os retificadores são conversores estáticos. Eles convertem tensão alternada em tensão contínua sendo, monofásicos ou trifásicos. A Figura 9 (a) ilustra o circuito de um retificador monofásico, que é composto por uma ponte de diodos suprida por uma fonte alternada V . Em paralelo com a carga R existe um capacitor C . Por fim, possui uma indutância na entrada L , que representa a indutância equivalente da rede.

Segundo (NUNES, 2007) o circuito possui esses componentes por questões de operação. Quando a fonte V alimenta o circuito, e está no semiciclo positivo, os diodos $D1$ e $D2$ conduzem, alimentando a carga R . Quando a fonte V está no semiciclo negativo os diodos $D1$ e $D2$ deixam de conduzir e a carga é alimentada através dos diodos $D3$ e $D4$. Desta forma, a carga sempre se mantém alimentada positivamente. Essa retificação implica na geração de uma componente contínua e ondulação de tensão “ripple” elevadas. O “ripple” é um distúrbio indesejável. Devido a isto, utiliza-se um filtro com a função de minimizar este efeito, para equipamentos de baixa potência, é usualmente utilizado um capacitor, que está em paralelo com a carga R , e tem a função de alimentar a carga quando a tensão da rede fica menor do que a tensão no capacitor. Neste instante, os diodos não conduzem e a corrente da rede se anula, sendo a corrente da carga suprida integralmente pelo capacitor (NUNES, 2007).

Figura 9 - Circuito e corrente de um retificador monofásico com capacitor de saída



Fonte: (NUNES, 2007).

A corrente suprida pelo capacitor se caracteriza por possuir harmônicas ímpares que são injetadas na rede. Os valores são apresentados na tabela 16.

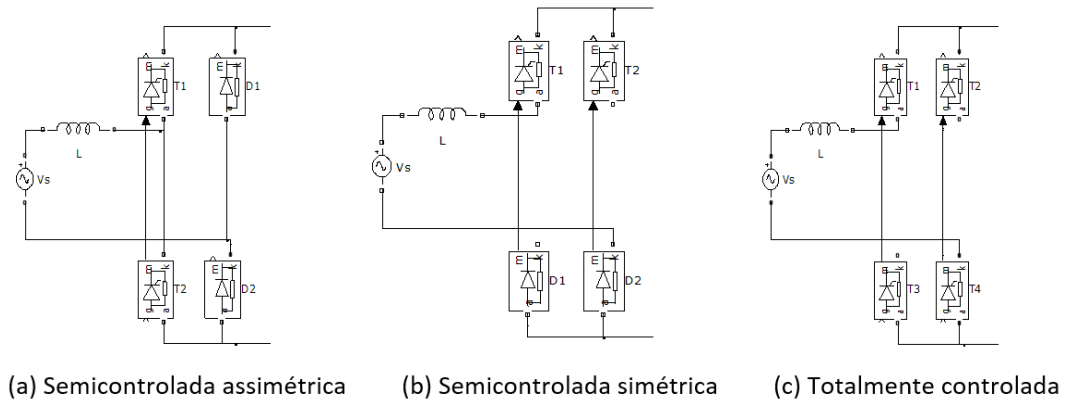
Tabela 16 - Espectro harmônico da corrente de um retificador não controlado

| Ordem harmônica | Magnitude (%) |
|-----------------|---------------|
| 1 | 100 |
| 3 | 81 |
| 5 | 60,6 |
| 7 | 37 |
| 9 | 15,7 |
| 11 | 2,4 |
| 13 | 6,3 |
| 15 | 7,9 |

Fonte: (IEEE, 1993).

O circuito da figura 9 (a) não caracteriza todos os tipos de equipamentos eletrônicos existentes. Pois, existem outros equipamentos que demandam uma maior complexidade, como ilustra a figura 10.

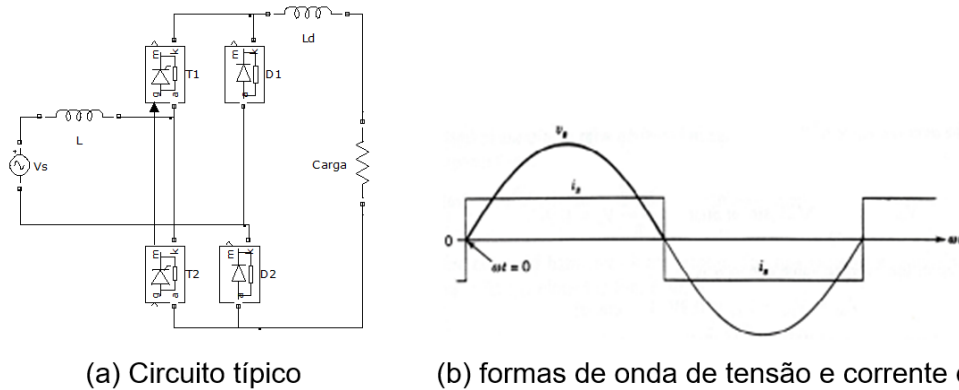
Figura 10 - Pontes retificadoras monofásicas



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Na figura acima, as pontes retificadoras possuem a capacidade de controlar a tensão contínua de saída, variando-se o ângulo de disparo dos tiristores. Estes circuitos possuem em sua saída um filtro indutivo de alto valor de impedância (MOHAN, 2003). Inclusive na Figura 11 (a) é ilustrada uma ponte retificadora totalmente controlada, na qual existe um indutor na saída do retificador. Na Figura 11 (b), mostra-se a forma de onda da tensão e corrente com ângulo de disparo dos tiristores em 0° graus.

Figura 11 - Circuito, tensão e corrente de um retificador controlado monofásico com indutor série



Fonte: (NUNES, 2007).

Analisando a figura 11(b), verifica-se que a corrente de entrada da ponte retificadora é quadrada, dado que o indutor possui um valor elevado. Utilizando a equação 3.6, é possível encontrar os valores para as taxas de distorções harmônicas de corrente individuais para este equipamento (MOHAN, 2003).

$$I_h = \frac{I_1}{h} \quad (3.6)$$

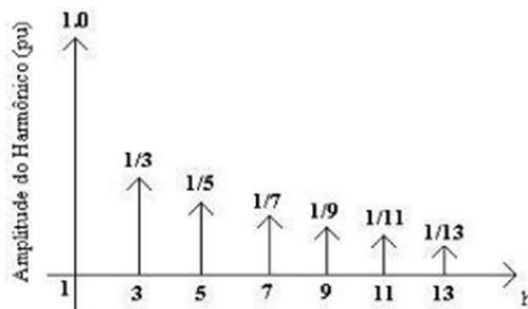
I_h = valor da corrente harmônica individual

I_1 = valor da corrente harmônica fundamental

h = ordem do harmônica desejado

Em (NUNES, 2007), cálculos da magnitude dos harmônicos de corrente individual para ponte retificadora totalmente controlada foram realizados. O resultado é ilustrado figura 12.

Figura 12 - Harmônicos típicos de um retificador totalmente controlado



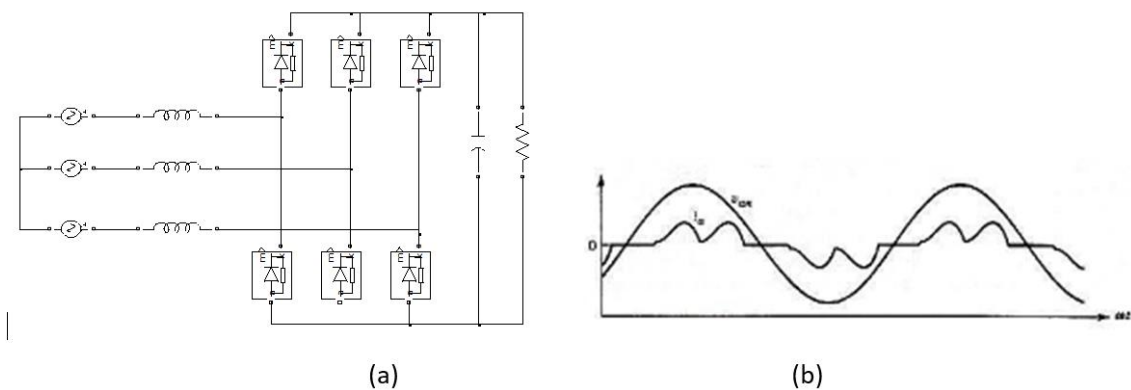
Fonte: (NUNES, 2007).

Através da comparação dos dois tipos de ponte retificadora apresentados (não controlada e controlada) e analisando os componentes dos circuitos e a taxa de distorção harmônica total, pode-se verificar que a distorção harmônica no circuito com filtro indutivo é bem menor do que no circuito com filtro capacitivo. Sendo, em percentual, de 45% para o retificador com indutor na saída e 100% para o retificador com capacitor na saída (NUNES, 2007).

Além dos retificadores citados anteriormente, também existem os retificadores trifásicos, que são utilizados para aplicações em que as cargas demandam uma potência maior. No que se refere a geração de harmônicas, este tipo de retificador não difere dos retificadores monofásicos, porém possuem algumas peculiaridades que devem ser citadas, como se segue:

- Vantagens do retificador trifásico em relação ao monofásico
 - Não possui harmônicos de 3º ordem e seus múltiplos;
 - Menor taxa de distorção harmônica de corrente, devido à utilização de número maior de pulsos do retificador (número de transistores ou tiristores utilizados)
 - Menor ripple de tensão de saída
- Desvantagens do retificador trifásico em relação ao monofásico
 - Um número maior de pulsos do retificador aumenta a quantidade de componentes, aumentando o custo.

Figura 13 - Retificador trifásico controlado



Fonte: (NUNES, 2007).

Na Figura 13 (a), ilustra-se o circuito do retificador trifásico. Este é constituído por uma impedância da rede na entrada, uma ponte de retificação trifásica, um capacitor de saída e uma carga R. Já em (b), ilustra-se a forma de onda de saída da corrente (distorcida) e tensão senoidal. Para o cálculo das distorções harmônicas individuais do circuito da figura 13, utiliza-se a equação 3.5. Já para o caso em que é utiliza-se um indutor em serie com a carga como filtro, aplica-se a equação 3.6.

$$H_c = (n * K) \pm 1 \quad (3.7)$$

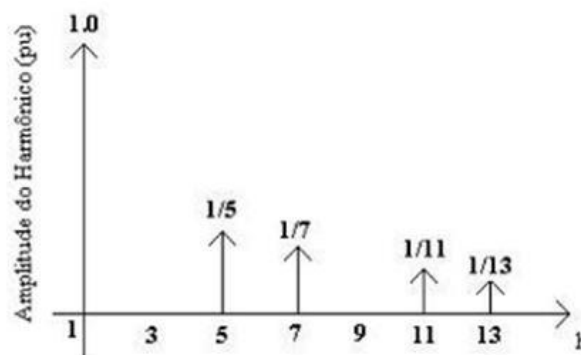
onde:

n = número de pulsos

K = valor inteiro

Em (NUNES, 2007), exibe-se o gráfico com as amplitudes das harmônicas geradas pelo retificador trifásico não controlado (figura 14). Nota-se que as harmônicas de terceira ordem e suas múltiplas não aparecem. Conseqüentemente, este tipo de retificador possui uma distorção harmônicas de corrente menor, em torno de 30%.

Figura 14 - Espectro harmônico da corrente de um retificador trifásico não controlado



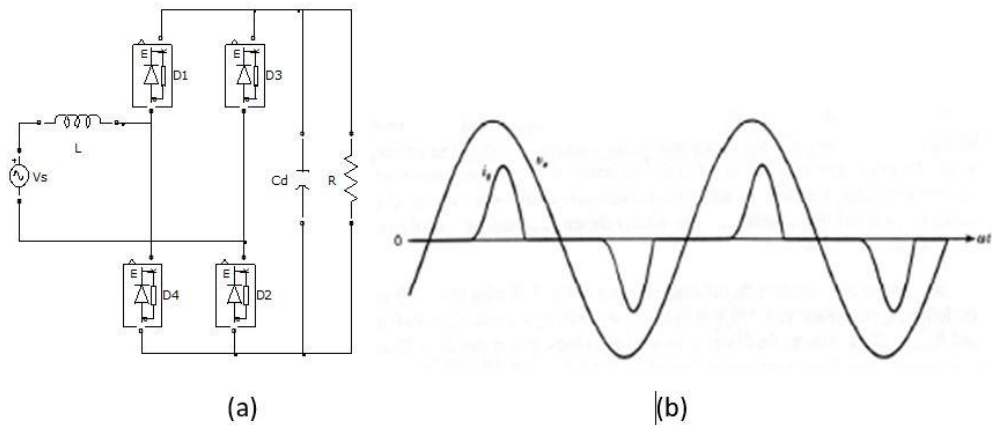
Fonte: (NUNES, 2007).

A abordagem feita acima, sobre os tipos de retificadores existentes, foi com o objetivo de mostrar os efeitos de distorções que estes componentes causam. Sendo responsáveis pelas correntes harmônicas injetadas pelos equipamentos eletrônicos (eletrodomésticos). Com base nisso, são apresentados os efeitos e as conseqüências da aplicação dos circuitos retificadores em televisores e laptops.

- Televisores

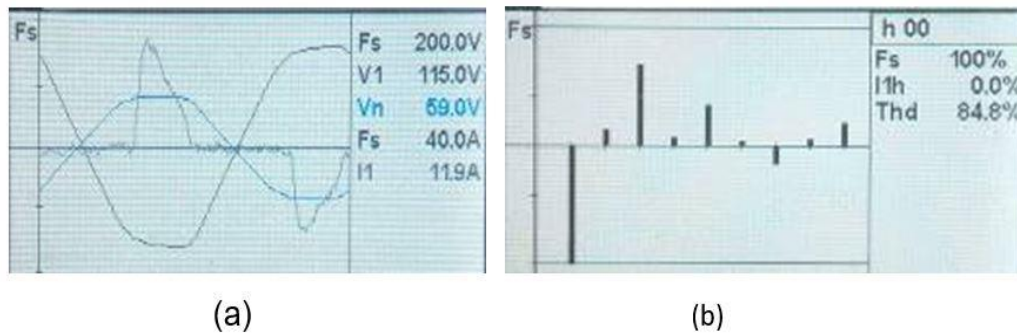
O circuito interno dos televisores é composto por um retificador monofásico com filtro capacitivo na saída, como ilustrado na figura 15 (a). Como dito anteriormente, este tipo de circuito possui a característica de injetar harmônicas de ordem ímpar, ocasionando uma alta distorção harmônica de corrente. Na figura 16, exibe-se a forma de onda (a) e o espectro harmônico (b) de um televisor de 29 polegadas.

Figura 15 - (a) Retificador presente no circuito interno televisão (b) Forma de onda do retificador monofásico com filtro capacitivo



Fonte: (NUNES, 2007).

Figura 16 - (a) Forma de onda do televisor (b) Espectro harmônico do televisor



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

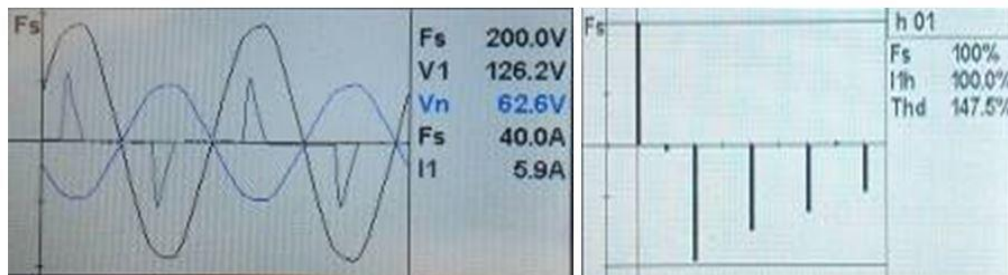
Deve-se notar que a forma de onda do retificador monofásico com filtro capacitivo figura 15 (b) é similar à forma de onda da figura 16 (a), comprovando que a descrição do circuito dos televisores está correto, como mencionado anteriormente. Além disto, também é ilustra-se o valor da THDi, sendo que este valor varia de acordo com o tipo do televisor utilizado. Para este caso, o valor encontrado do THDi é de 84,8%.

- LAPTOP

Os laptops são eletrônicos comuns nas residências e escritórios. Estes equipamentos funcionam através de tensão contínua. Basicamente, são alimentados

pela rede alternada passando por uma ponte retificadora monofásica que está presente no próprio equipamento. O mesmo efeito visto anteriormente nos televisores é observado nos laptops e computadores, o que implica em THDi típica de aproximadamente 147,5%, como observado na figura 17.

Figura 17 - (a) Forma de onda laptop (b) Espectrograma do laptop



(a)

(b)

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

3.2.6 Transformadores

Os transformadores são de grande importância em todo o sistema elétrico, dada a necessidade da transmissão e distribuição de energia. O sistema elétrico brasileiro é bem extenso e está em grande parte interligado e para tal grandeza há necessidade de inúmeros transformadores. Por esse motivo é essencial executar a análise referente aos efeitos que as harmônicas podem causar nos transformadores. Através de estudos realizados em (DELAIBA et al, 1995) constatou-se que os harmônicos influenciam na vida útil dos transformadores, causando efeitos como aparecimento de vibrações, ruído, sobreaquecimento do núcleo ferromagnético, dentre outros. As harmônicas de correntes causam perdas no cobre e perdas devido ao aumento do fluxo de dispersão. Já as harmônicas de tensão irão aumentar perdas no ferro (POMILIO, 2010).

3.2.7 Relé

Os relés de proteção são afetados quando imersos em sistemas que contém harmônicas, acarretando o mal funcionamento dos mesmos, seja por uma operação indevida ou até mesmo a não operação quando necessário. As harmônicas causam alterações nos valores de pico de corrente da onda senoidal fundamental, gerando um valor diferente do que é esperado pelo relé, sendo que este é dimensionado para operar com uma onda senoidal. Outro fato, é que, com a distorção da onda fundamental também se tem um deslocamento no ângulo da mesma, interferindo a performance do relé.

Em (IEEE, 1993), verificou-se que a existência de terceiro harmônico pode acarretar a operação inadequada das proteções do fio terra, por causa de equivalerem às correntes e tensões de sequência zero. Sendo assim, os relés pendem a trabalhar mais devagar ou com valor de corrente superior na existência de harmônicos.

Normalmente, o nível de harmônicos necessário para originar os distúrbios previamente mencionados está entre 10% a 20% de THD de corrente (IEEE, 1993b). Uma opção para relés eletromecânicos e eletromagnéticos que são mais vulneráveis a estes distúrbios, é a aplicação de relés digitais que computem valores RMS em ondas com presença de conteúdo harmônico (BROZEK, 1990).

4 Metodologia para Seleção de Consumidores

A partir dos dados fornecidos pela empresa concessionária de energia elétrica – CEMIG, foi construída a figura 18 e a tabela 17. A primeira ilustra 6 alimentadores saindo da Subestação de João Monlevade. Estes fornecem energia para toda a cidade (23 bairros), totalizando 41093 residências, comércios, indústrias e prédios públicos. Já a segunda indica os bairros atendidos por cada alimentador.

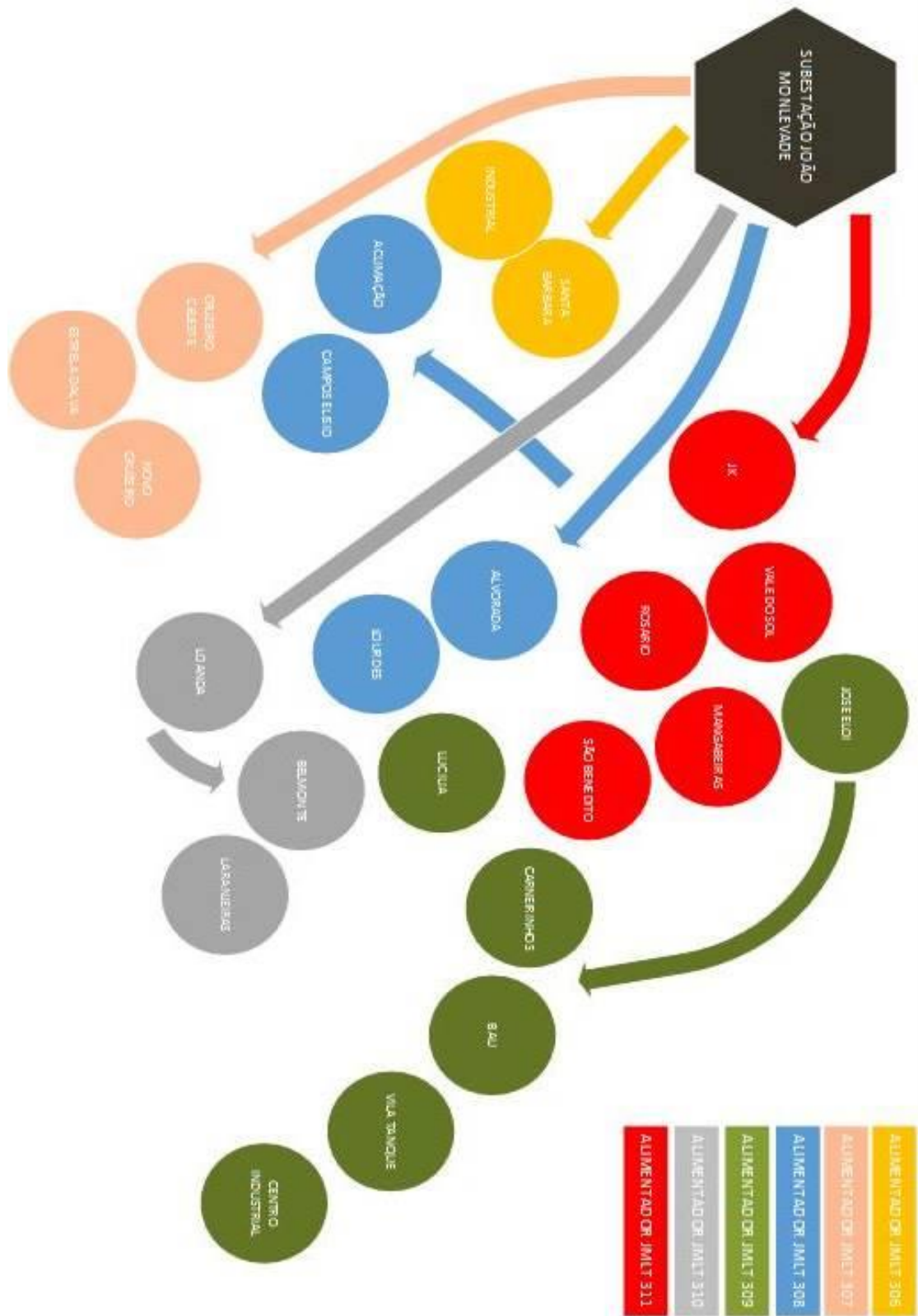
Dada a inviabilidade de fazer medições em todos os consumidores, foi necessário realizar um estudo de amostragem cujos resultados deverão refletir a representação de medições em todos os consumidores. É importante salientar que nenhum dos métodos de amostragem foi utilizado na pesquisa de campo, devido ao recurso limitado de tempo, difícil acesso às residências dos consumidores e restrições na utilização do medidor de energia (analisador de redes).

Tabela 17 - Distribuição dos alimentadores da cidade de João Monlevade

| Alimentadores de 13,8 kV | Bairros | Projeção | Números de clientes |
|--|---|----------|---------------------|
| Alimentador JMLT 306 | Santa Bárbara e Industrial | 390 Km | 5537 |
| Alimentador JMLT 307 | Cruzeiro Celeste, Novo Cruzeiro Estrela Dálva | 177 Km | 10560 |
| Alimentador JMLT 308 | Aclimação, De Lourdes, Alvorada, Campos elisios | 34 Km | 5767 |
| Alimentador JMLT 309 | Av Getulio Vargas, Bairro Carneirinhos, Lucília, José Eloi, Bau, Vila Tanque, Centro Industrial | 51 Km | 9671 |
| Alimentador JMLT 310 | Av. Wilson Alvarenga, Bairro Loanda, Belmonte, Laranjeiras | 25 Km | 3433 |
| Alimentador JMLT 311 | Av Wilson Alvarenga, Bairro JK, Rosário, Mangabeiras, Vale Sol, São benedito | 64 Km | 6125 |
| Total de clientes em João Monlevade-MG | | 741 Km | 41093 |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 18 - distribuição dos alimentadores na cidade de João Monlevade.



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

4.1 Métodos de Amostragem

Como mencionado, é inviável fazer medições com grandes populações, devido aos custos relacionados e ao tempo. Desta forma, com a aplicação do método estatístico correto, obtém-se uma pequena fração que represente a população total a qual se deseja analisar.

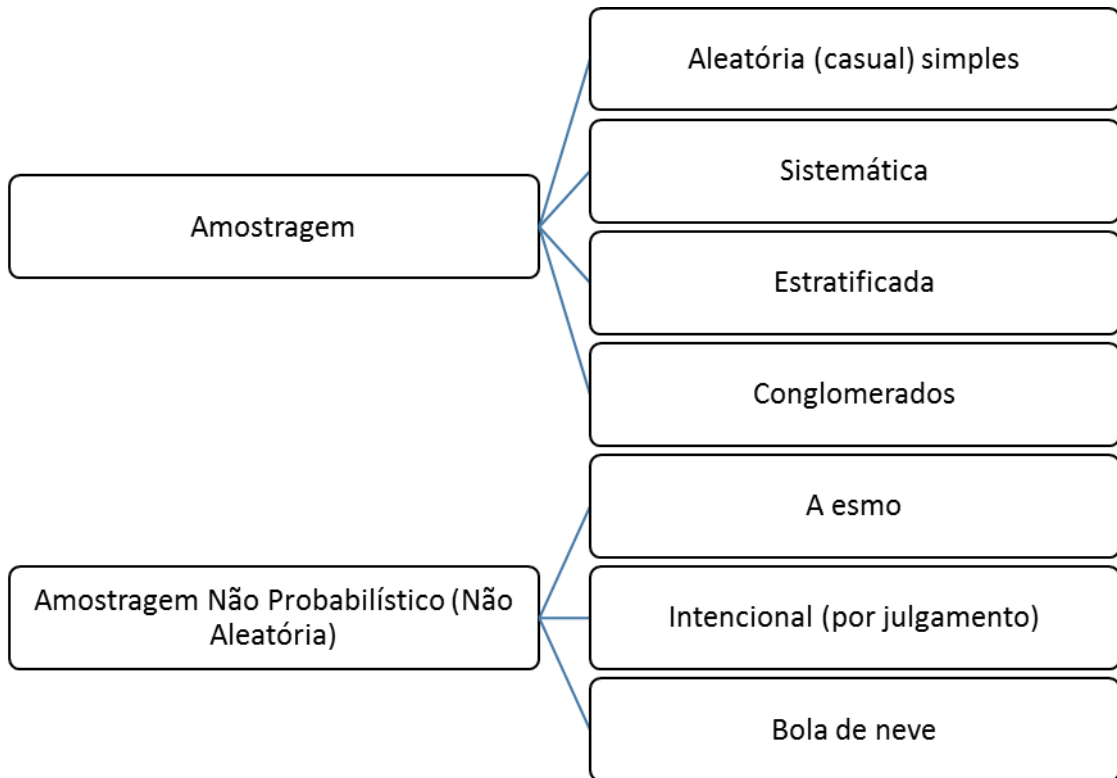
A amostragem é um processo importante na definição e validação de dados de pesquisas. A idéia básica é a coleta de dados, relativos a alguns elementos da população e à sua análise. Esta última pode proporcionar informações relevantes sobre toda a população (LEVINE et al, 2000).

Os métodos de amostragem encontrados na literatura, podem ser divididos em dois grandes grupos que são detalhados a seguir.

Amostragem probabilística. Esta é regida por leis estatísticas e expressões matemáticas de acordo com métodos complexos. Precisa-se de um maior número de dados. Tem a característica de prover maior confiabilidade aos resultados obtidos. Desta forma, é possível extrair conclusões que podem ser generalizadas para toda uma população.

Amostragem não probabilística. Este tipo utiliza critério e julgamento definidos pelo pesquisador para se obter uma amostra. É um método mais rápido e menos oneroso. Usualmente, é a técnica mais utilizada no âmbito de pesquisa de trabalhos acadêmicos, devido à velocidade com que a pesquisa pode ser realizada (tempo) e em função dos custos associados. Na figura 19, estratifica-se os tipos de amostragem que podem ser empregados em pesquisas.

Figura 19 - Tipos de amostragem



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Parâmetros como margem de erro e nível de confiança são essenciais para a qualidade da pesquisa. O primeiro parâmetro é o intervalo no qual se espera encontrar o dado que se deseja medir, do universo em estudo. Este dado pode ser do tipo média ou proporção. Por outro lado, o segundo parâmetro expressa a certeza de que o dado que buscamos realmente está dentro da margem de erro.

Por fim, a escolha deste método impacta significativamente nos resultados da pesquisa, no grau de confiabilidade, na originalidade e na margem de erro das informações obtidas. São parâmetros para uma aproximação dos valores reais.

4.1.1 Método de Amostragem não Probabilística

Depois de realizar o levantamento dos dados do município, foi escolhido o método de amostragem para realização dos cálculos do número de residências nas que devem ser realizadas as medições (testes). Para este caso, foi utilizado o

método quantitativo, com uma margem de confiança de 95% e margem de erro de 5%. Os valores associados ao alfa e valor crítico estão apresentados na Tabela 18, estes parâmetros são definidos em (LEVINE et al, 2000).

Tabela 18 - Valores críticos associados ao grau de confiança na amostra

| Grau de confiança | α (alfa) | Valor crítico $\frac{Z_{\alpha}}{2}$ |
|-------------------|-----------------|--------------------------------------|
| 90% | 0,10 | 1,645 |
| 95% | 0,05 | 1,96 |
| 99% | 0,01 | 2,575 |

Fonte: (LEVINE et al, 2000).

Uma vez definido o tamanho do universo de estudo; o grau de confiança e a margem de erro, é aplicado o método para populações finitas, definido pela seguinte expressão matemática:

$$n = \frac{N \cdot \hat{p} \cdot \hat{q} \cdot \left(\frac{Z_{\alpha}}{2}\right)^2}{\hat{p} \cdot \hat{q} \cdot \left(\frac{Z_{\alpha}}{2}\right)^2 + (N-1) \cdot E^2} \quad (4.1)$$

Onde:

n = Número de indivíduos na amostra

N = Número total de indivíduos do universo em estudo.

$Z_{\alpha/2}$ = Valor crítico que corresponde ao grau de confiança desejado.

p = Proporção populacional de indivíduos que pertence a categoria de interesse.

q = Proporção populacional de indivíduos que não pertence à categoria de interesse ($q = 1 - p$).

A Equação 4.2 exige que se substituam os valores populacionais p e q , por valores amostrais \hat{p} e \hat{q} , mas se estes forem desconhecidos, substituímos \hat{p} e \hat{q} por 0,25 (LEVINE et al., 2000). Após realizar os cálculos foi encontrado o seguinte valor mínimo de amostras necessárias para aplicação da pesquisa:

$$n = \frac{41093 * 0,25 * 1,96^2}{0,25 * 1,96^2 + (41093 - 1) * 0,05^2} = 384 \text{ amostras} \quad (4.2)$$

Baseado no número total de clientes que a cidade possui (41.093), o valor da amostragem encontrada foi de 384 amostras. Porém, os alimentadores são divididos aplicando a proporcionalidade, dividindo o número de amostras de forma proporcional. Na Tabela 19 são indicados os valores encontrados.

Tabela 19 – Distribuição dos alimentadores da cidade de João Monlevade (II)

| Alimentadores 13,8 kV | Bairros | Números de clientes | Percentual representativo | Nº de amostras por alimentador |
|--|--|---------------------------|------------------------------|--------------------------------------|
| Alimentador JMLT 306 | Santa Bárbara e Industrial | 5537 | 13% | 52 |
| Alimentador JMLT 307 | Cruzeiro Celeste, Novo Cruzeiro Estrela Dálva | 10560 | 26% | 99 |
| Alimentador JMLT 308 | Acimação, De Lourdes, Alvorada, Campos elisios | 5767 | 14% | 54 |
| Alimentador JMLT 309 | Av Getulio Vargas, Bairro Carneirinhos, Lucília, José Eloi, Bau, Vila Tanque, Centro Industrial | 9671 | 24% | 90 |
| Alimentador JMLT 310 | Av. Wilson Alvarenga, Bairro Loanda, Belmonte, Laranjeiras | 3433 | 8% | 32 |
| Alimentador JMLT 311 | Av Wilson Alvarenga, Bairro JK, Rosário, Mangabeiras, Vale Sol, São benedito | 6125 | 15% | 57 |
| Total de clientes em João Monlevade-MG | | 41093 | 100% | 384 |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Para este método, aplica-se a amostragem por julgamento (intencional), na qual o pesquisador deliberadamente seleciona o número de elementos que irá compor a amostra (384 clientes). Com base na sua avaliação, são selecionados os elementos que seriam de maior relevância da população estudada. Ou seja, os elementos são definidos diretamente pelo pesquisador, de forma que elementos escolhidos atendam aos requisitos desejáveis para sua pesquisa.

4.1.2 Método de Amostragem não Probabilística

No que se refere à amostragem probabilística, esta não se diferencia quanto à quantidade de amostra necessária em relação à amostragem não probabilística. Portanto, o número mínimo de amostras continua sendo 384. No entanto, a forma de acordo com a qual são selecionados os elementos é diferente. Nesta etapa, foi escolhido o método de amostragem aleatória sistemática. Trata-se de uma técnica em que se elege os elementos a integrar a amostra empregando uma norma (um período entre elementos escolhidos); o que é executado de forma ordenada em uma lista com os nomes dos elementos selecionados na população.

Nesta categoria de amostragem aleatória existem dois fundamentos relevantes: o **intervalo de amostragem** e o **ponto de início da amostragem**. O primeiro delimita o período entre um elemento escolhido e o elemento seguinte, por exemplo: de 8 em 8 elementos escolhe-se um e o segundo caracteriza o ponto em que se inicia a contagem desse intervalo, como por exemplo: inicia-se a escolha a partir do 2º elemento da lista (ANTUNES, 2011).

O **intervalo de amostragem** (IA) é obtido dividindo o total de elementos da população pelo número de elementos que foi encontrado para a amostra, como indicadona equação 4.3.

$$IA = \frac{N}{n} \quad (4.3)$$

onde:

N= Numero de elementos da população estudada

n= Numero de amostras

De posse dos dados da tabela 19, foram feitos os cálculos para determinar (IA). Sendo que na mesma tabela é apresenta-se o valor da população referente a cada alimentador (N) e seu respectivo número de amostra; valores que deve ser coletadas (n). Portanto, aplicando-se a equação (4.2) obtém-se o intervalo entre os elementos para execução da pesquisa.

Tabela 20 - Intervalo de amostragem (IA)

| Alimentadores 13,8 kV | Números de clientes (n) | Nº de amostras por alimentador (N) | Intervalo de amostragem (IA) |
|--------------------------|-------------------------------|--|------------------------------------|
| Alimentador JMLT 306 | 5537 | 52 | 106 |
| Alimentador JMLT 307 | 10560 | 99 | 107 |
| Alimentador JMLT 308 | 5767 | 54 | 107 |
| Alimentador JMLT 309 | 9671 | 90 | 108 |
| Alimentador JMLT 310 | 3433 | 32 | 108 |
| Alimentador JMLT 311 | 6125 | 57 | 107 |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Com o cálculo realizado, construiu-se a tabela 20. Através da mesma, podemos concluir que é escolhido um elemento para a amostragem em cada grupo de 106 elementos da população no caso do alimentador JMLT 306; ou seja, a cada 106 elementos escolhemos um.

O segundo passo é definir o ponto de início da amostragem. Isto é, qual o elemento a ser escolhido no primeiro intervalo de amostragem. Aplicando-se ao caso acima, tem-se que o intervalo de amostragem (IA) é de 106. Desta forma, é feita uma escolha aleatória de um número entre 1 e 106. Supondo que o número selecionado seja 3, conseqüentemente é feito a seleção de um elemento a cada 106, iniciando-se no 3º elemento da lista. A partir do 1º elemento selecionado se conta mais 106 elementos, isto é, até o 109º elemento da lista e esse é o 2º selecionado. Em seguida, conta-se mais 106 elementos e o 215ª elemento é o 3º selecionado e assim sucessivamente até ao fim da lista (3, 109, 215, 321, 427...5512). O mesmo procedimento é aplicado para os outros alimentadores.

Por fim, pode-se notar que ambos os métodos possuem o mesmo número de amostras e se diferem apenas na forma de escolha dos elementos. Sendo que o método de maior confiabilidade depende do tipo de pesquisa a ser realizada.

Para este estudo o método mais viável é o não probabilístico, pois a escolha dos elementos fica a critério do pesquisador, o que permite a escolha de residências que atendam aos requisitos da pesquisa. Como, por exemplo: número de eletrodomésticos na residência, consumo de energia e a distância da residência à subestação, sendo que estes parâmetros influenciam diretamente no resultado do estudo.

5 Medições de Campo

5.1 Equipamentos Utilizados

5.1.1 Analisador de Redes

O equipamento utilizado para as medições dos eletrodomésticos foi um analisador de redes, marca MINIPA, modelo ET-5061C, pertencente à Universidade Federal de Ouro Preto, Campus João Monlevade. O analisador mostrado na figura 20 possui canais de medição de diversas grandezas elétricas. Sendo indispensável o uso deste para o desenvolvimento da pesquisa. O equipamento segue as normas internacionais para a realização dos testes de QEE (MINIPA, 2016).

Figura 20 - Analisador de redes modelo ET-5061C



Fonte: (MINIPA, 2016).

As medições foram realizadas nos eletrodomésticos selecionados em diferentes pontos (consumidores) dos alimentadores da tabela 17. Os canais de medição selecionados para o estudo foram: tensão; corrente; THD de tensão; THD de corrente; fator de potência; potências ativa, reativa e aparente.

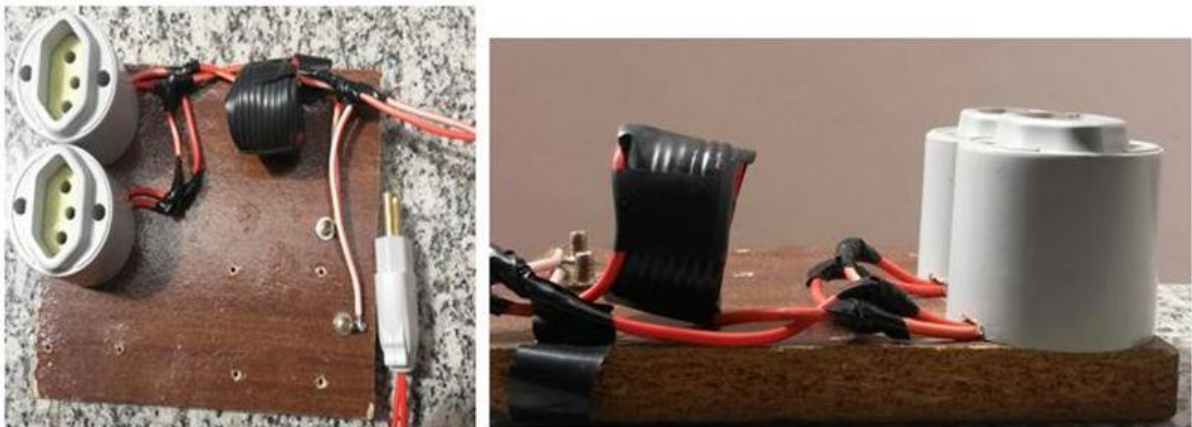
Como o objetivo do estudo é caracterizar as harmônicas, os resultados são apresentados em função da tensão e corrente, mostrando sua forma de onda, harmônicos individuais, valor eficaz, THD de corrente e o THD de tensão no instante de medição.

Para análise de dados, foram armazenados os harmônicos de tensão até a 7º ordem, já para análise da corrente optou-se até a 15º ordem. Esta escolha foi feita em função dos equipamentos (cargas) medidas. Os equipamentos eletrodomésticos possuem correntes baixas, conseqüentemente harmônicas com ordem superior a 15º não terão muita influência. Desta forma, são apresentados os harmônicos mais significativos, que estão presentes até 15º harmônica.

São considerados harmônicos significativos aqueles que apresentam magnitude maior que 1% da fundamental. Isto acontece na maioria de eletrodomésticos, no que se refere a harmônicos ímpares. Os pares aparecem somente quando o ciclo positivo for diferente do ciclo negativo da onda analisada, o que ocorre com poucos eletrodomésticos, sobretudo com os condicionadores de ar e refrigeradores. Os ângulos dos harmônicos que serão apresentados são referenciados ao ângulo da tensão fundamental da fase A, sendo este valor adotado como 0.

Como a corrente dos eletrodomésticos é muito pequena $I < 1,0$ ampère, foi necessário utilizar o circuito apresentado na figura 21, que possui uma bobina de dez voltas, para aumentar o valor da corrente em dez vezes. Pois a precisão do instrumento é para cargas com correntes $I > 1,0$ ampères.

Figura 21 - Circuito implementado para aumento da corrente



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

5.1.2 Eletrodomésticos utilizados nas medições

Como mencionado, um dos objetivos do trabalho é verificar se existem variações nos valores das harmônicas registradas em diferentes pontos dos alimentadores. Para verificar tal característica, foram considerados quatro eletrodomésticos: notebook; vídeo game; liquidificador e cafeteira. De acordo com estudo realizado pelo (PROCEL, 2007), os equipamentos escolhidos representam a maioria das cargas que são utilizadas nas residências.

- Notebook e Vídeo Game

O notebook e o vídeo game estão representando a classe dos equipamentos eletrônicos, porém não estão contidos na pesquisa realizada pela (PROCEL, 2007), pois em 2005 (ano da pesquisa) estes eletrônicos não eram tão comuns na maioria das residências. No entanto, representam a classe dos eletrônicos como os sons, rádios, micro-ondas, TVs, DVDs, dentre outros. Caracterizando 13% na participação do consumo residencial diário. É provável que hoje este valor seja maior, em função do crescimento do setor de eletrônicos.

Figura 22 – Eletrônico (a) vídeo game, (b) notebook



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

- Liquidificador

O liquidificador pertence à classe dos motores monofásicos, e no estudo do (PROCEL, 2007) pode ser considerado similar à geladeira, ao freezer, e à máquina de lavar, todos estes apresentam 28% na participação do consumo residencial

diário. Trata-se de uma carga indutiva e devido a saturação magnética que ocorre no seu núcleo ferromagnético, gera correntes harmônicas, o que a caracteriza como uma carga não linear.

Figura 23 – Liquidificador



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

- Cafeteira

A cafeteira é um equipamento basicamente constituído por uma resistência. Embora simples, este equipamento representa grande parte das cargas residenciais, pois demandando grande potência. Na pesquisa do (PROCEL, 2007) pode ser representada de forma similar às lâmpadas, aos chuveiros, e ao ferro de passar. Todos representam 48% na participação do consumo residencial diário. Apesar de demandarem muita potência e serem maioria nas residências, estes equipamentos não geram distorções harmônicas, pois são constituídos de resistência e é sabido que a resistência possui característica de linearidade, o que implica na não contribuição harmônica.

Figura 24 - Cafeteira



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

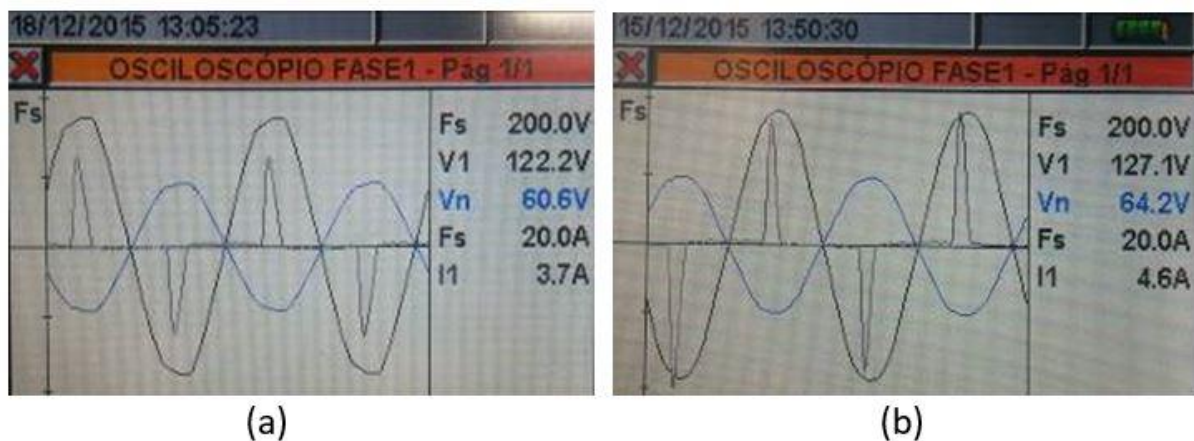
5.2 Trabalho de Campo e Análise de Medições

Foram realizadas 6 medições. Nas quais foram utilizados os quatro eletrodomésticos mencionados anteriormente, variando-se apenas o ponto de medição nos alimentadores (em baixa tensão). Estes equipamentos foram escolhidos de forma que representem os tipos de cargas que são utilizadas usualmente nas residências. Cabe mencionar que estes equipamentos foram selecionados tendo por base a logística nos diferentes locais de medição.

5.2.1 Equipamento 1 (Notebook)

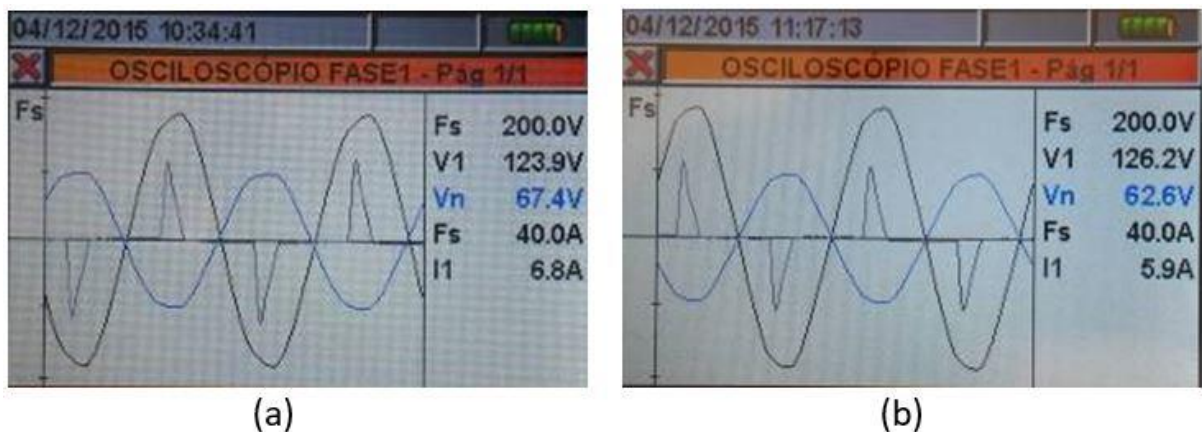
- Forma de onda instântanea

Figura 25 - (a) ALIMENTADOR JMLT 306 (b) ALIMENTADOR JMLT 307



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 26 - (a) ALIMENTADOR JMLT 308 (b) ALIMENTADOR JMLT 309



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

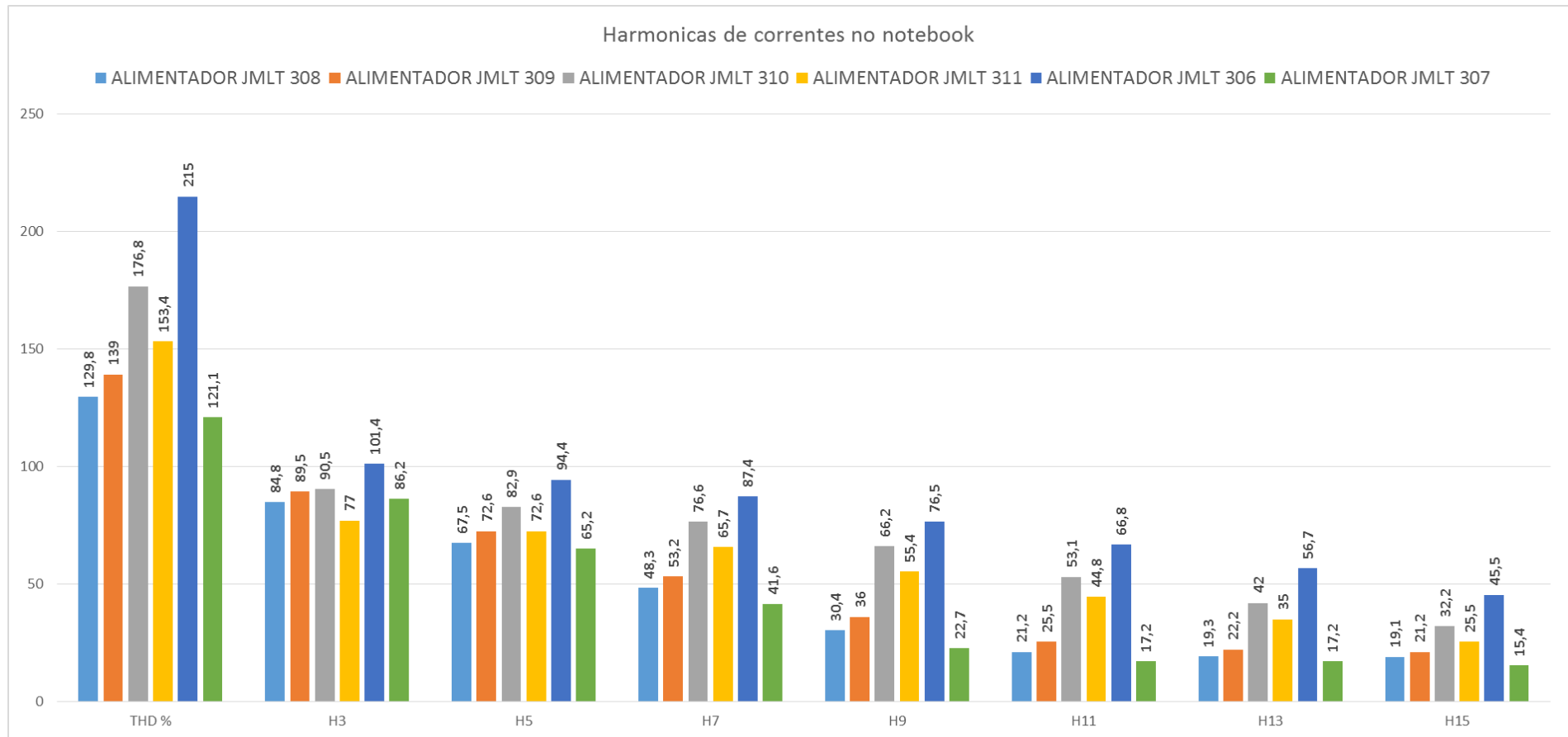
Figura 27 - (a) ALIMENTADOR JMLT 310 (b) ALIMENTADOR JMLT 311



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

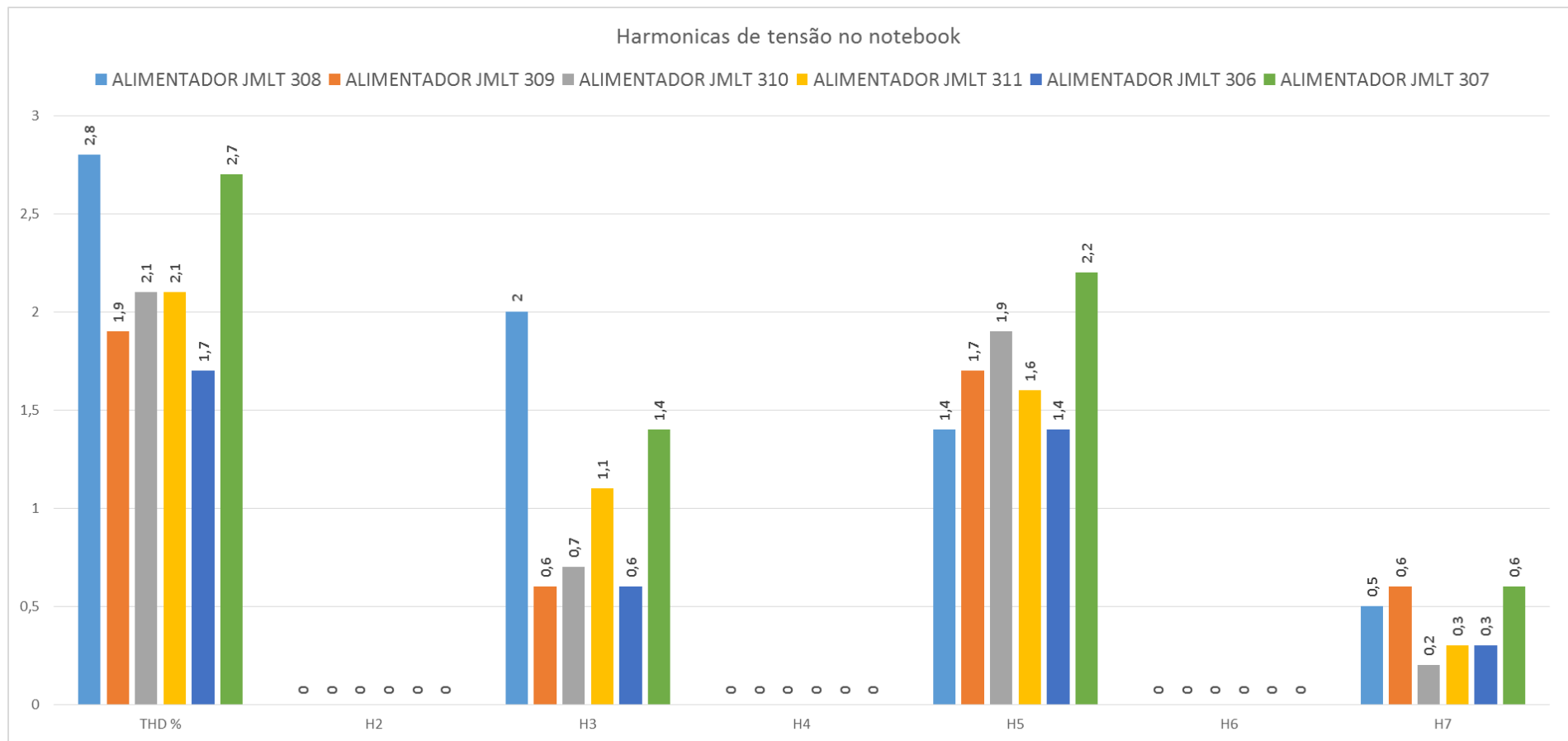
- Gráficos das harmônicas de corrente e tensão

Figura 28 – Gráfico de harmônicas de corrente (notebook)



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 29 - Gráfico de harmônicas de tensão (notebook)



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

- Tabela de parâmetros gerais e harmônicas

Tabela 21 – Parâmetros gerais das medições do notebook

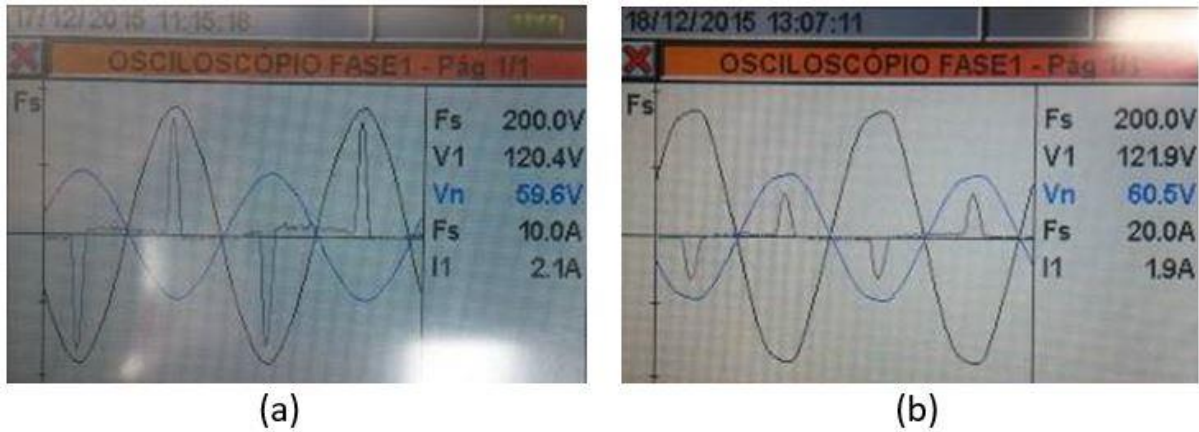
| Equipamento 1 (Notebook hp pavilion) | | | | | | |
|--------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| DADOS | ALIMENTADOR JMLT 308 | ALIMENTADOR JMLT 309 | ALIMENTADOR JMLT 310 | ALIMENTADOR JMLT 311 | ALIMENTADOR JMLT 306 | ALIMENTADOR JMLT 307 |
| V1N | 123,4 V | 126 V | 127 V | 126,5 V | 120,8 V | 122,3 V |
| VNPE | 67,5V | 62,4V | 64,2V | 64,7V | 59,7V | 60,7V |
| FREQUÊNCIA | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ |
| I1 | 0,72 A | 0,63 A | 0,43 A | 0,2 A | 0,45 A | 0,37 A |
| POT. ATIVA | 53 W | 45 W | 27 W | 14 W | 23 W | 25 W |
| POT. REAT. | -71 Var | -65 VAr | 48 VAr | -22 Var | 50 VAr | -38 VAr |
| POT. APAR. | 89 VA | 79 VA | 55 VA | 26 VA | 55 VA | 45 VA |
| FP | 0,6 c | 0,56 c | 0,49 c | 0,53 c | 0,42 c | 0,55 c |
| HARMÔNICAS DE TENSÃO | | | | | | |
| THD % | 2,8% | 1,9% | 2,1% | 2,1% | 1,7% | 2,7% |
| H1 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H2 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H3 | 2% | 0,6% | 0,7% | 1,1% | 0,6% | 1,4% |
| H4 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H5 | 1,4% | 1,7% | 1,9% | 1,6% | 1,4% | 2,2% |
| H6 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H7 | 0,5% | 0,6% | 0,2% | 0,3% | 0,3% | 0,6% |
| HARMÔNICAS DE CORRENTE | | | | | | |
| THD % | 129,8% | 139% | 176,8% | 153,4% | 215% | 121,1% |
| H1 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H2 | 0,7% | 0,8% | 1,7% | 1,4% | 0,7% | 1,1% |
| H3 | 84,8% | 89,5% | 90,5% | 77% | 101,4% | 86,2% |
| H4 | 0,8% | 0,4% | 1,4% | 0,1% | 0,6% | 0,5% |
| H5 | 67,5% | 72,6% | 82,9% | 72,6% | 94,4% | 65,2% |
| H6 | 1,2% | 0,5% | 1% | 0,9% | 1,6% | 0,1% |
| H7 | 48,3% | 53,2% | 76,6% | 65,7% | 87,4% | 41,6% |
| H8 | 0,9% | 0,5% | 1% | 0,8% | 1,2% | 0,3% |
| H9 | 30,4% | 36% | 66,2% | 55,4% | 76,5% | 22,7% |
| H10 | 0,8% | 0,4% | 1,1% | 0,5% | 1,6% | 0,4% |
| H11 | 21,2% | 25,5% | 53,1% | 44,8% | 66,8% | 17,2% |
| H12 | 1,2% | 0,3% | 0,9% | 0,5% | 0,2% | 1% |
| H13 | 19,3% | 22,2% | 42% | 35% | 56,7% | 17,2% |
| H14 | 1,3% | 0,3% | 0,8% | 0,6% | 0,2% | 0,8% |
| H15 | 19,1% | 21,2% | 32,2% | 25,5% | 45,5% | 15,4% |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

5.2.2 Equipamento 2 (VÍdeo game)

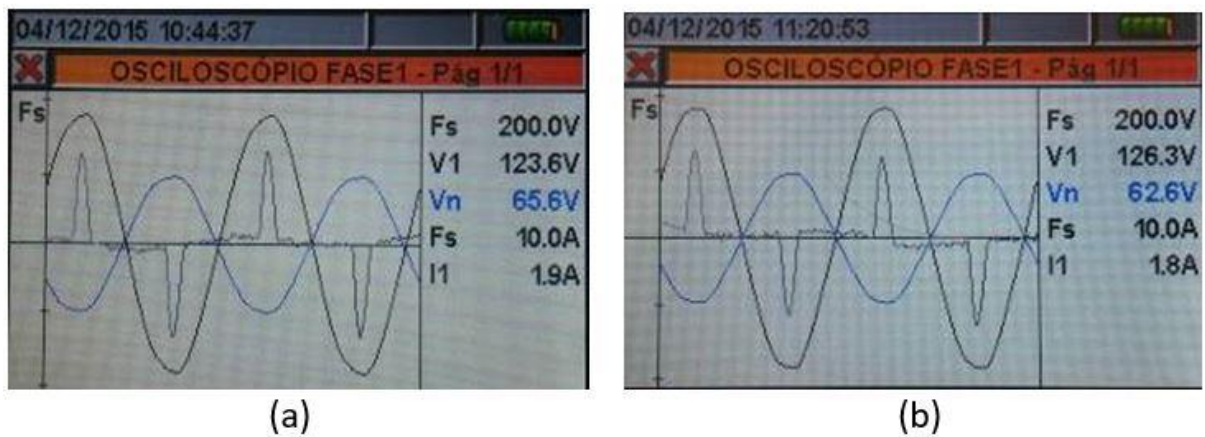
- Forma de onda instântanea

Figura 30 - (a) ALIMENTADOR JMLT 306 (b) ALIMENTADOR JMLT 307



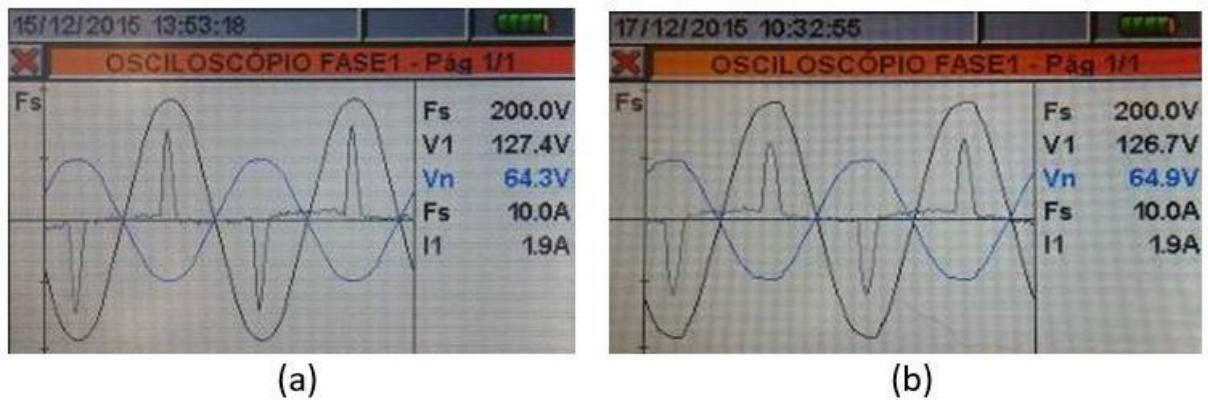
Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 31 - (a) ALIMENTADOR JMLT 308 (b) ALIMENTADOR JMLT 309



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

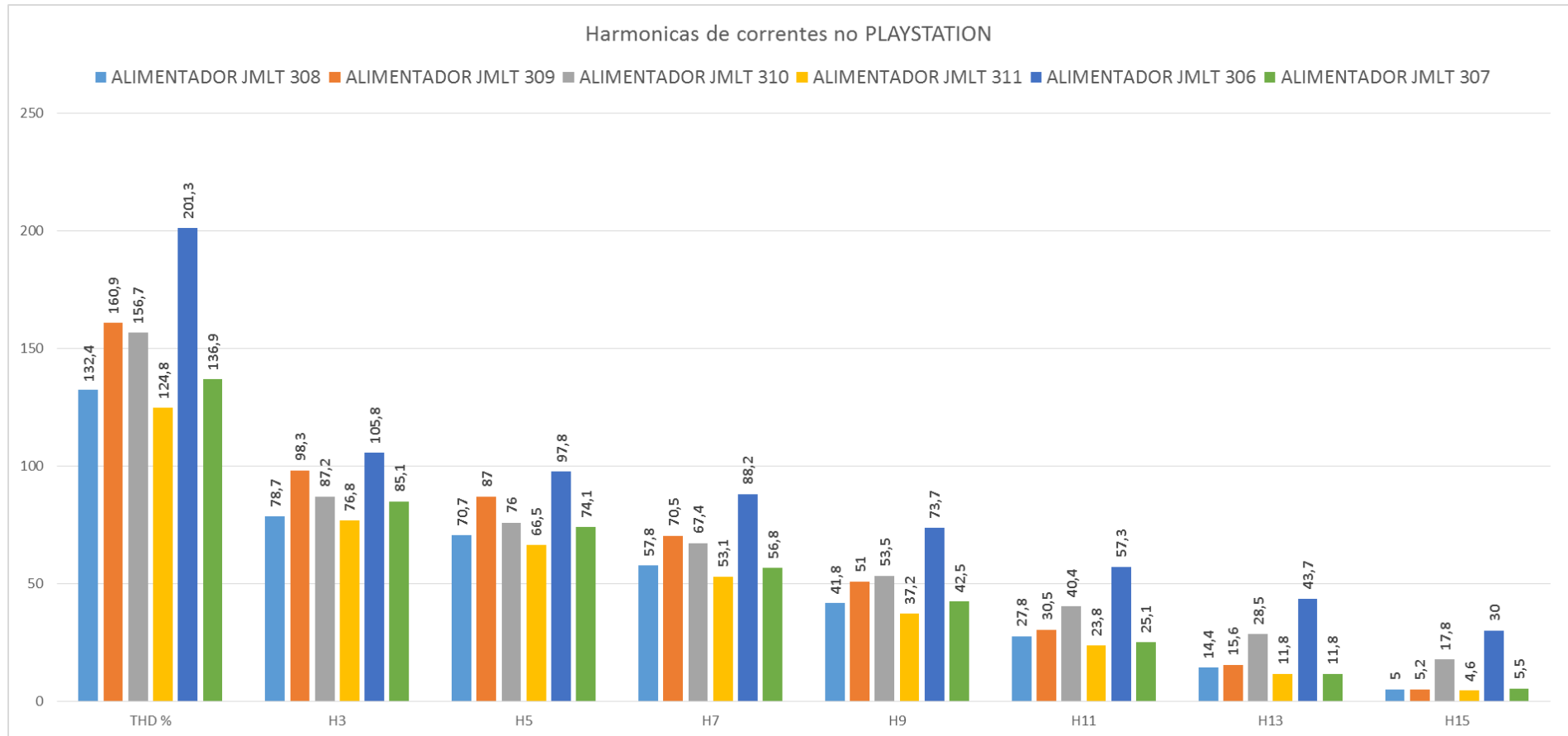
Figura 32 - (a) ALIMENTADOR JMLT 310 (b) ALIMENTADOR JMLT 311



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

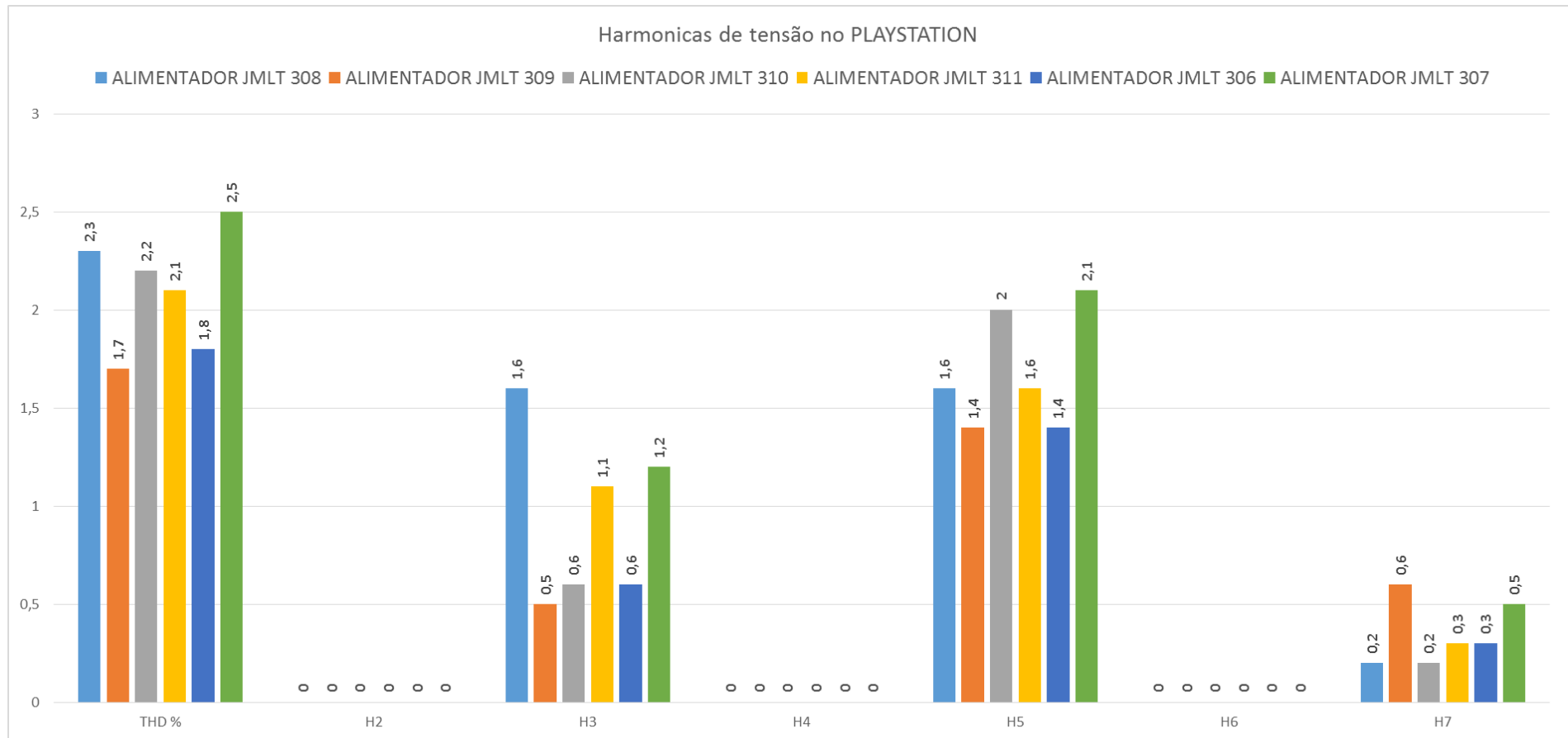
- Gráficos das harmônicas de corrente e tensão

Figura 33 - Gráfico de harmônicas de corrente (Vídeo game)



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 34 - Gráfico de harmônicas de tensão (Vídeo game)



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

- Tabela de parâmetros gerais e harmônicas

Tabela 22 - Parâmetros gerais das medições do Vídeo game

| Equipamento 2 (PLAYSTATION 2) | | | | | | |
|--------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| DADOS | ALIMENTADOR JMLT 308 | ALIMENTADOR JMLT 309 | ALIMENTADOR JMLT 310 | ALIMENTADOR JMLT 311 | ALIMENTADOR JMLT 306 | ALIMENTADOR JMLT 307 |
| V1N | 123,5 V | 126,3 V | 127,1 V | 126,4 V | 120,3 V | 122,1 V |
| VNPE | 65,5V | 62,6V | 64,2V | 64,8V | 59,5V | 60,6V |
| FREQUÊNCIA | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 59,9 HZ | 60 HZ | 60 HZ |
| I1 | 0,2 A | 0,17 A | 0,19 A | 0,18 A | 0,22 A | 0,18 A |
| POT. ATIVA | 14 W | 11 W | 12 W | 13 W | 12 W | 12 W |
| POT. REAT. | -20 VAr | -18 VAr | -20 VAr | -18 VAr | 24 VAr | 18 VAr |
| POT. APAR. | 24 VA | 21 VA | 24 VA | 22 VA | 26 VA | 22 VA |
| FP | 0,59 c | 0,5 c | 0,51 c | 0,59 c | 0,45 c | 0,57 c |
| HARMÔNICAS DE TENSÃO | | | | | | |
| THD % | 2,3% | 1,7% | 2,2% | 2,1% | 1,8% | 2,5% |
| H1 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H2 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H3 | 1,6% | 0,5% | 0,6% | 1,1% | 0,6% | 1,2% |
| H4 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H5 | 1,6% | 1,4% | 2% | 1,6% | 1,4% | 2,1% |
| H6 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H7 | 0,2% | 0,6% | 0,2% | 0,3% | 0,3% | 0,5% |
| HARMÔNICAS DE CORRENTE | | | | | | |
| THD % | 132,4% | 160,9% | 156,7% | 124,8% | 201,3% | 136,9% |
| H1 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H2 | 3,4% | 3,3% | 1,1% | 1,1% | 1,6% | 1,5% |
| H3 | 78,7% | 98,3% | 87,2% | 76,8% | 105,8% | 85,1% |
| H4 | 1,1% | 0,7% | 0,5% | 0,5% | 1,1% | 0,7% |
| H5 | 70,7% | 87% | 76% | 66,5% | 97,8% | 74,1% |
| H6 | 1,1% | 0,7% | 0,4% | 0,7% | 1,5% | 0,5% |
| H7 | 57,8% | 70,5% | 67,4% | 53,1% | 88,2% | 56,8% |
| H8 | 1,2% | 1% | 0,4% | 0,7% | 1,6% | 0,4% |
| H9 | 41,8% | 51% | 53,5% | 37,2% | 73,7% | 42,5% |
| H10 | 1% | 1% | 0,2% | 0,2% | 1,1% | 0,1% |
| H11 | 27,8% | 30,5% | 40,4% | 23,8% | 57,3% | 25,1% |
| H12 | 0,1% | 0,3% | 0,4% | 0,2% | 0,7% | 0,3% |
| H13 | 14,4% | 15,6% | 28,5% | 11,8% | 43,7% | 11,8% |
| H14 | 0,1% | 0,4% | 0,2% | 0,4% | 0,9% | 0,5% |
| H15 | 5% | 5,2% | 17,8% | 4,6% | 30% | 5,5% |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

5.2.3 Equipamento 3 (Liquidificador)

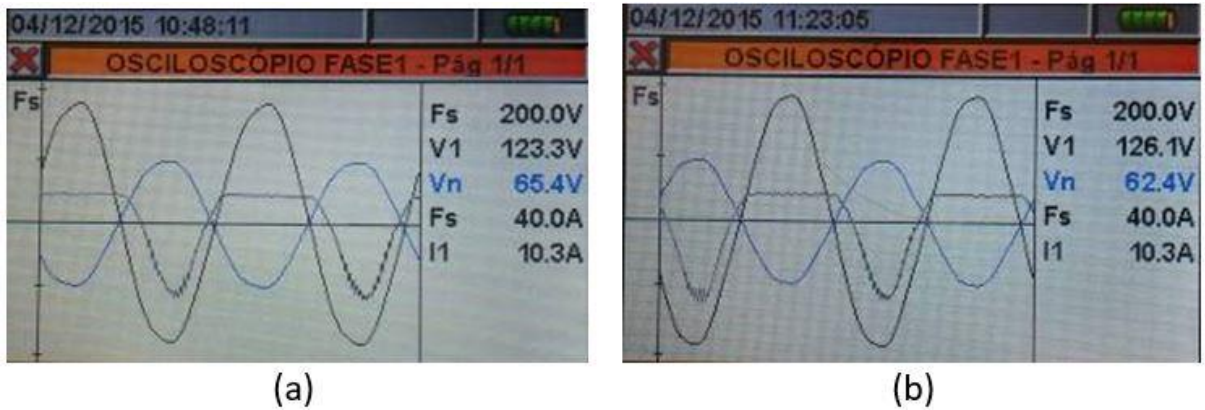
- Forma de onda instântanea

Figura 35 - (a) ALIMENTADOR JMLT 306 (b) ALIMENTADOR JMLT 307



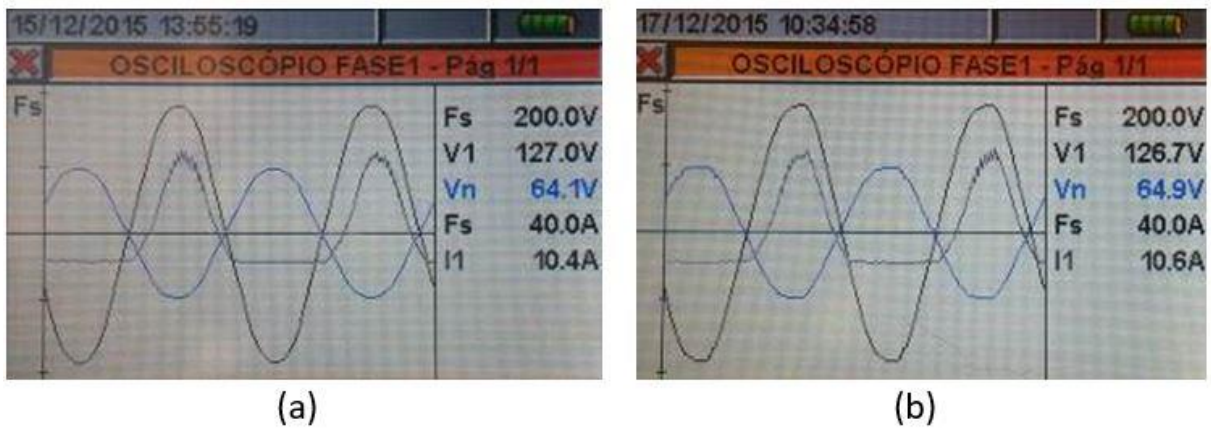
Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 36 - (a) ALIMENTADOR JMLT 308 (b) ALIMENTADOR JMLT 309



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

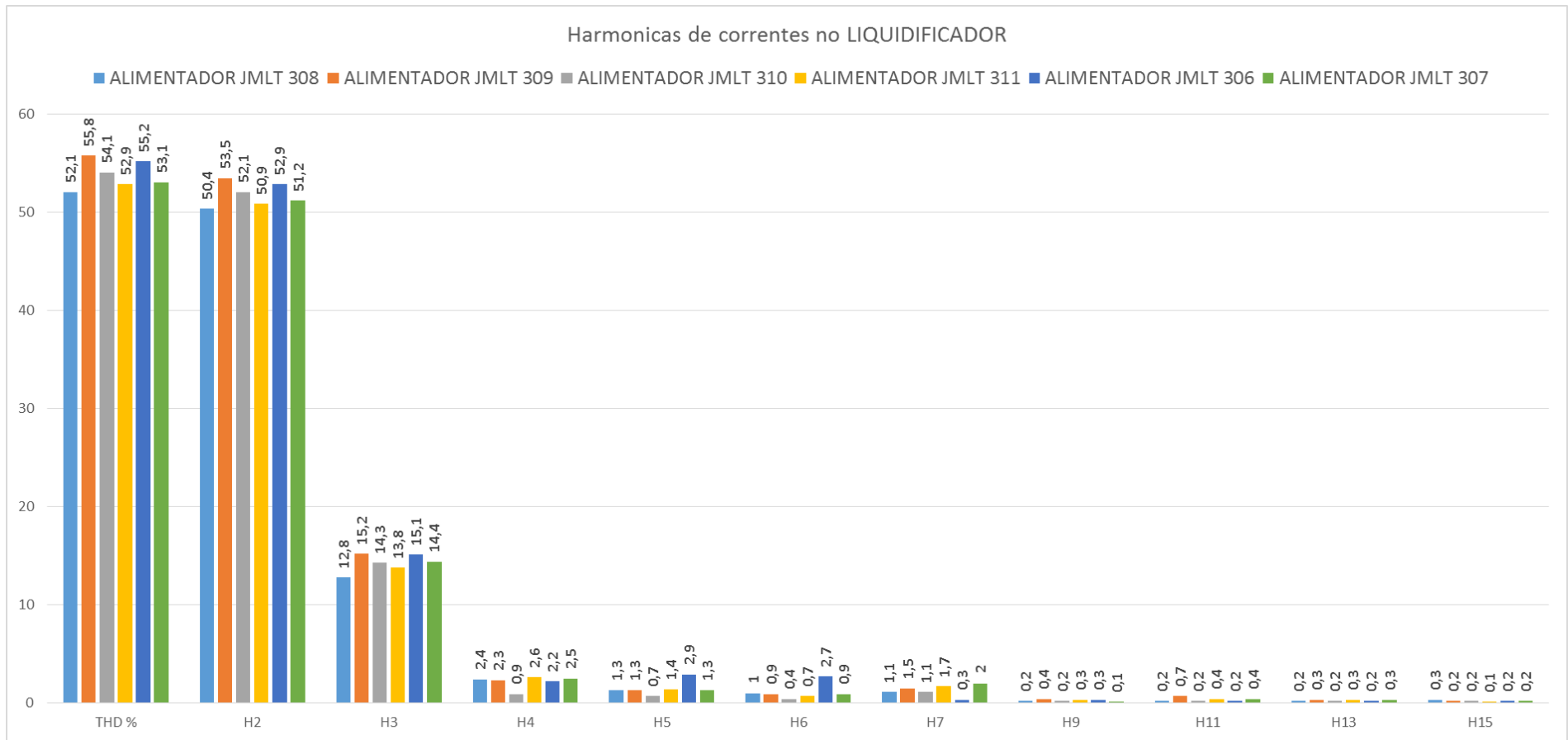
Figura 37 - (a) ALIMENTADOR JMLT 310 (b) ALIMENTADOR JMLT 311



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

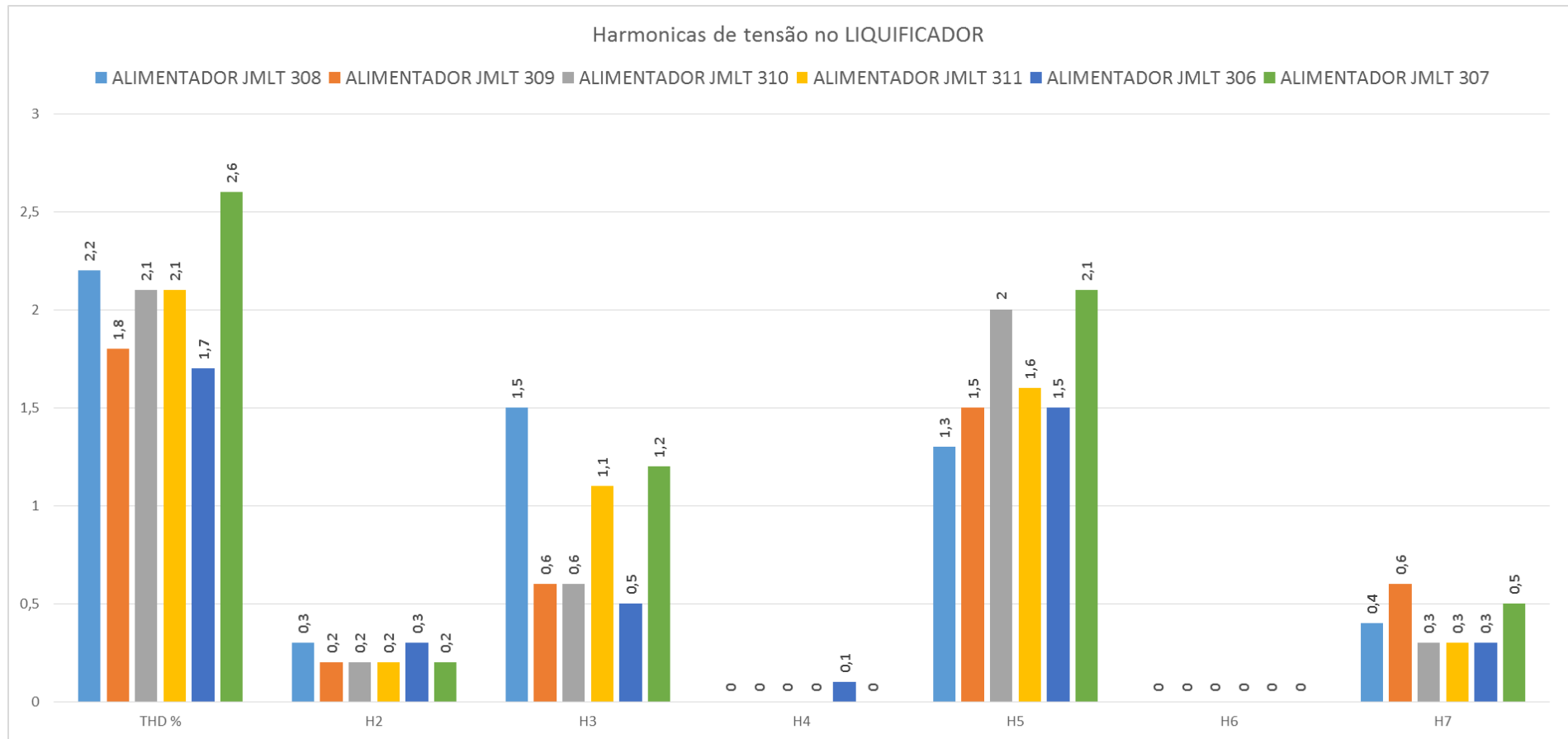
- Gráficos das harmônicas de corrente e tensão

Figura 38 - Gráfico de harmônicas de corrente (Liquidificador)



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 39 - Gráfico de harmônicas de tensão (Liquidificador)



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

- Tabela de parâmetros gerais e harmônicas

Tabela 23 - Parâmetros gerais das medições do Liquidificador

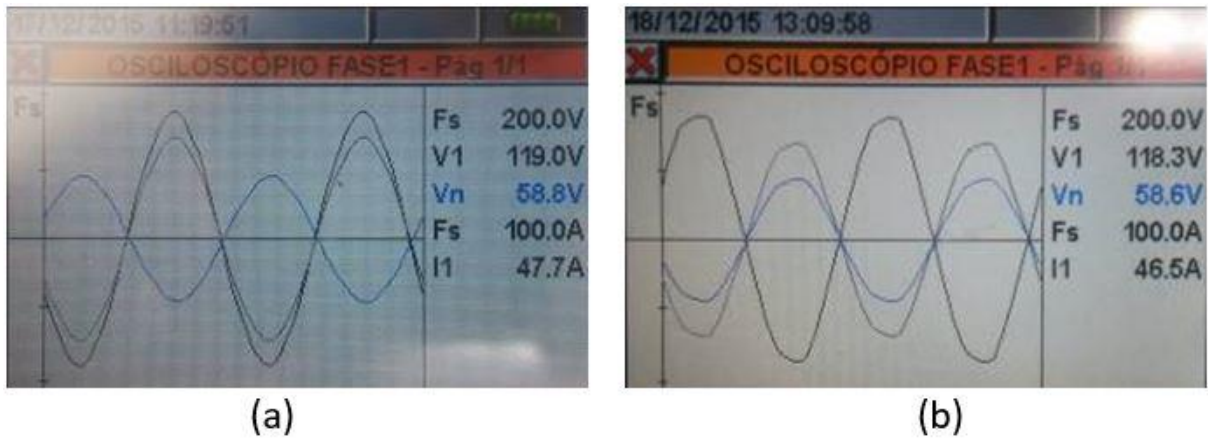
| Equipamento 3 (LIQUIFICADOR) | | | | | | |
|------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| DADOS | ALIMENTADOR JMLT 308 | ALIMENTADOR JMLT 309 | ALIMENTADOR JMLT 310 | ALIMENTADOR JMLT 311 | ALIMENTADOR JMLT 306 | ALIMENTADOR JMLT 307 |
| V1N | 123,2 V | 126,2 V | 127 V | 126,5 V | 120,4 V | 121,2 V |
| VNPE | 65,3V | 62,4V | 64,1V | 64,8V | 59,5V | 60,1V |
| FREQUÊNCIA | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ |
| I1 | 1,03 A | 1,02 A | 1,04 A | 1,05 A | 1,03 A | 0,99 A |
| POT. ATIVA | 110 W | 110 W | 114 W | 115 W | 106 W | 103 W |
| POT. REAT. | 63 VAR | 66 VAR | 67 VAR | 67 Var | 64 VAR | 60 Var |
| POT. APAR. | 126 VA | 129 VA | 133 VA | 133 VA | 123 VA | 120 VA |
| FP | 0,87i | 0,86i | 0,86i | 0,87i | 0,86i | 0,86i |
| HARMÔNICAS DE TENSÃO | | | | | | |
| THD % | 2,2% | 1,8% | 2,1% | 2,1% | 1,7% | 2,6% |
| H1 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H2 | 0,3% | 0,2% | 0,2% | 0,2% | 0,3% | 0,2% |
| H3 | 1,5% | 0,6% | 0,6% | 1,1% | 0,5% | 1,2% |
| H4 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0,1% | 0% |
| H5 | 1,3% | 1,5% | 2% | 1,6% | 1,5% | 2,1% |
| H6 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H7 | 0,4% | 0,6% | 0,3% | 0,3% | 0,3% | 0,5% |
| HARMÔNICAS DE CORRENTE | | | | | | |
| THD % | 52,1% | 55,8% | 54,1% | 52,9% | 55,2% | 53,1% |
| H1 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H2 | 50,4% | 53,5% | 52,1% | 50,9% | 52,9% | 51,2% |
| H3 | 12,8% | 15,2% | 14,3% | 13,8% | 15,1% | 14,4% |
| H4 | 2,4% | 2,3% | 0,9% | 2,6% | 2,2% | 2,5% |
| H5 | 1,3% | 1,3% | 0,7% | 1,4% | 2,9% | 1,3% |
| H6 | 1% | 0,9% | 0,4% | 0,7% | 2,7% | 0,9% |
| H7 | 1,1% | 1,5% | 1,1% | 1,7% | 0,3% | 2% |
| H8 | 1,3% | 1,8% | 1,1% | 1,5% | 1,1% | 1,8% |
| H9 | 0,2% | 0,4% | 0,2% | 0,3% | 0,3% | 0,1% |
| H10 | 0,6% | 0,2% | 0,8% | 0,5% | 0,4% | 0,5% |
| H11 | 0,2% | 0,7% | 0,2% | 0,4% | 0,2% | 0,4% |
| H12 | 0,3% | 0,6% | 0,3% | 0,6% | 0,4% | 0,4% |
| H13 | 0,2% | 0,3% | 0,2% | 0,3% | 0,2% | 0,3% |
| H14 | 0,1% | 0,3% | 0,1% | 0,3% | 0,3% | 0,3% |
| H15 | 0,3% | 0,2% | 0,2% | 0,1% | 0,2% | 0,2% |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

5.2.4 Equipamento 4 (Cafeteira)

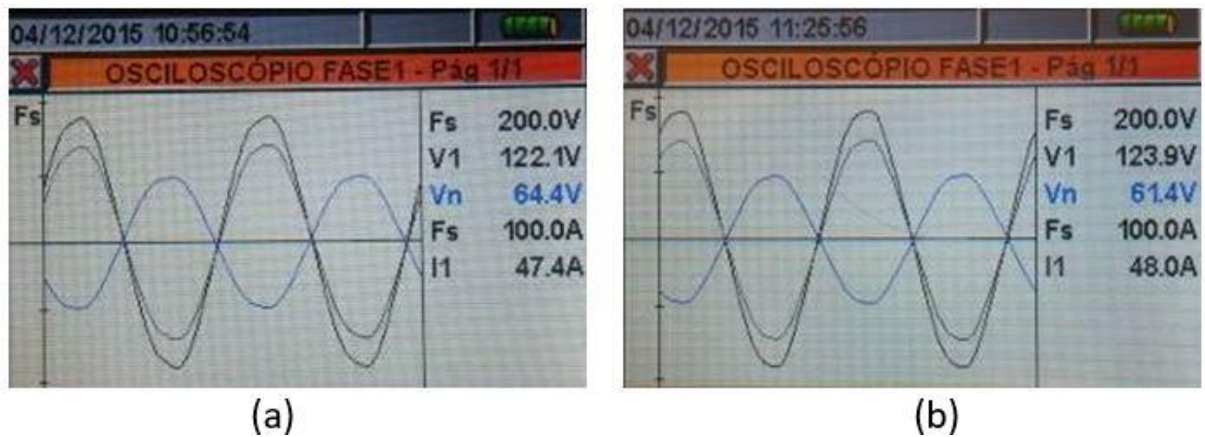
- Forma de onda instântanea

Figura 40 - (a) ALIMENTADOR JMLT 306 (b) ALIMENTADOR JMLT 307



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 41 - (a) ALIMENTADOR JMLT 308 (b) ALIMENTADOR JMLT 309

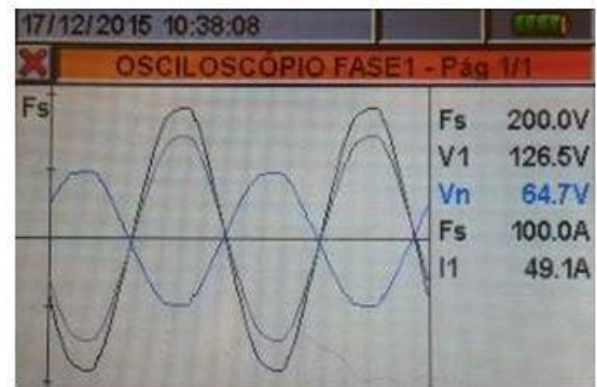


Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 42 - (a) ALIMENTADOR JMLT 310 (b) ALIMENTADOR JMLT 311



(a)

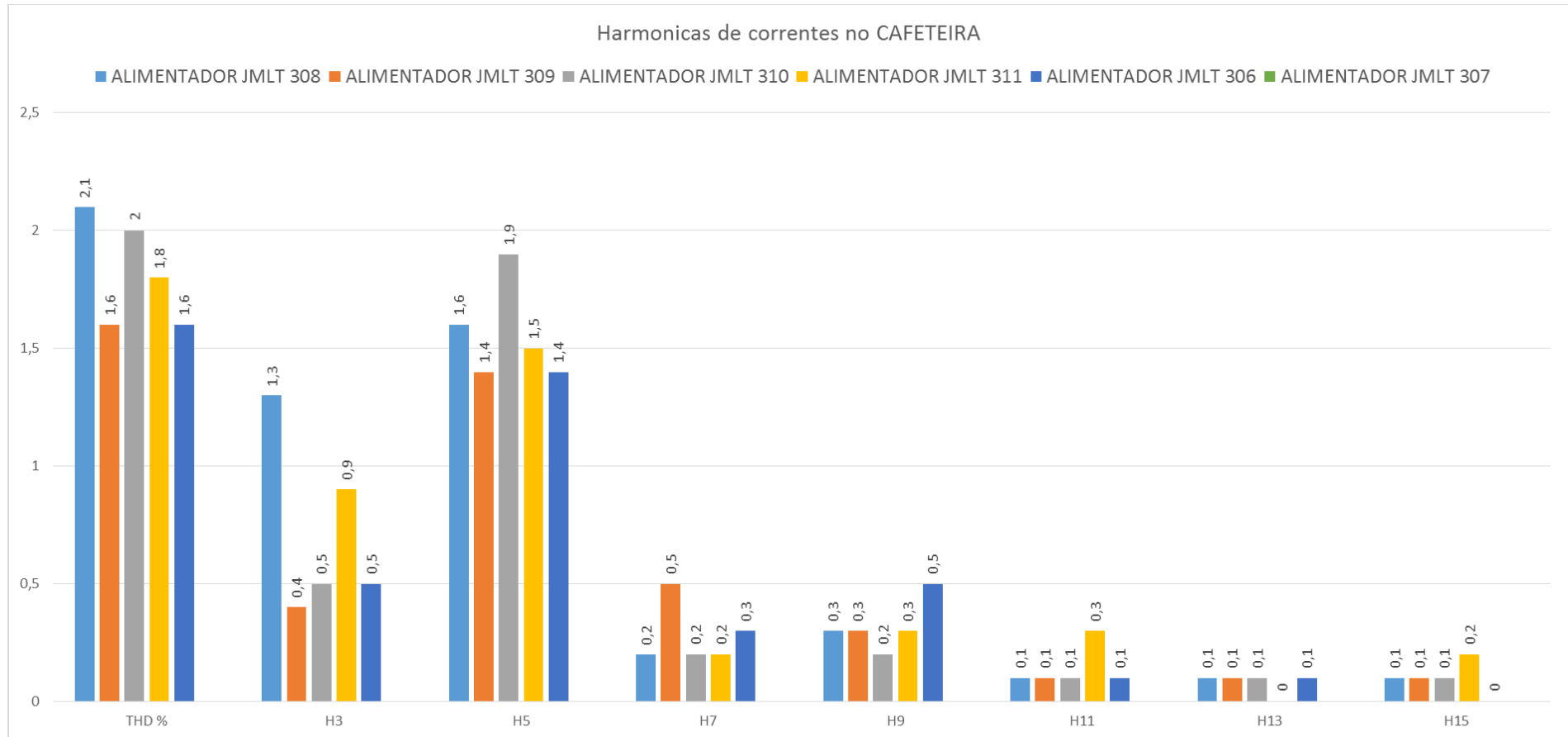


(b)

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

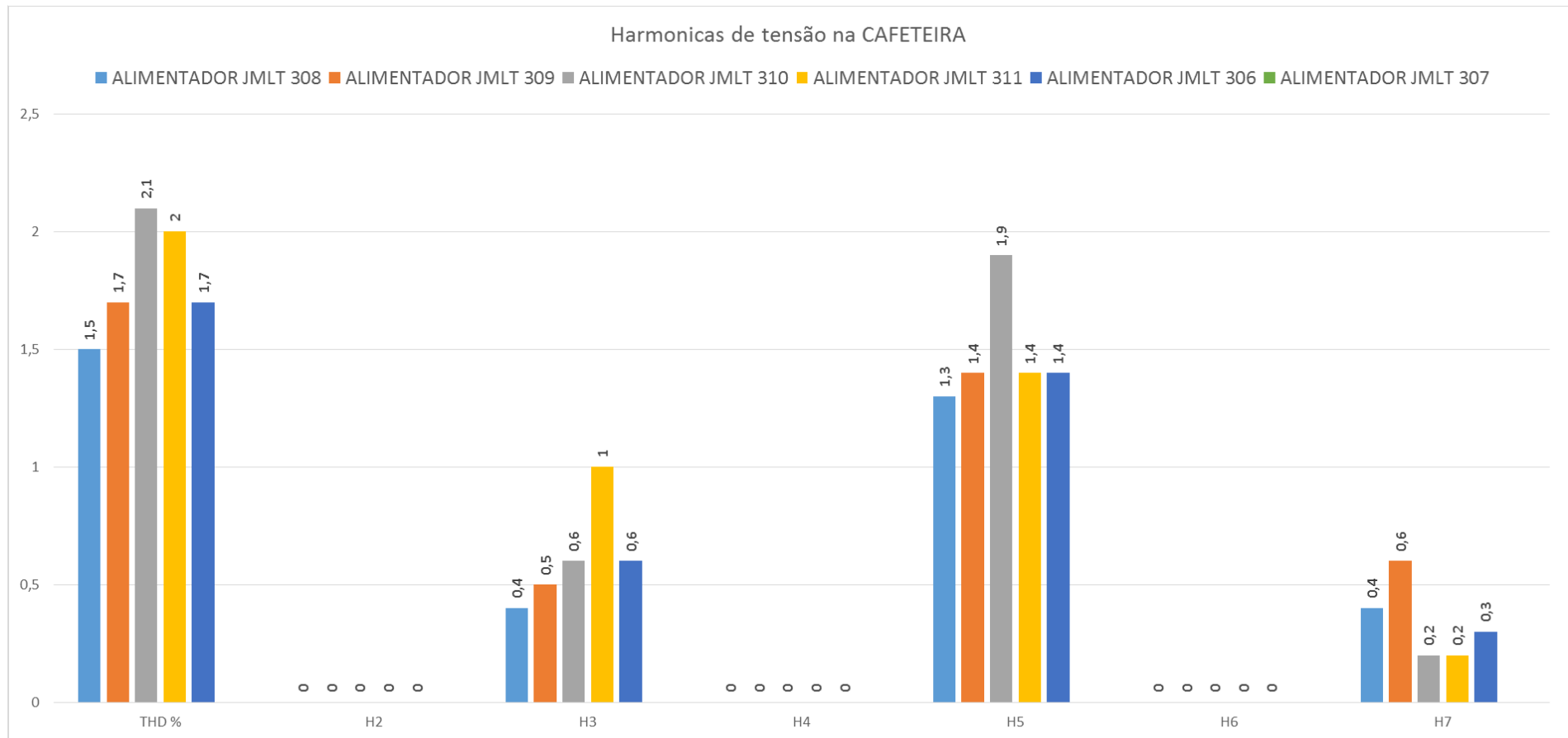
- Gráficos das harmônicas de corrente e tensão

Figura 43 - Gráfico de harmônicas de corrente (Cafeteira)



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 44 - Gráfico de harmônicas de tensão (Cafeteira)



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

- Tabela de parâmetros gerais e harmônicas

Tabela 24 - Parâmetros gerais das medições do Cafeteira

| Equipamento 4 (CAFETEIRA) | | | | | | |
|---------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| DADOS | ALIMENTADOR JMLT 308 | ALIMENTADOR JMLT 309 | ALIMENTADOR JMLT 310 | ALIMENTADOR JMLT 311 | ALIMENTADOR JMLT 306 | ALIMENTADOR JMLT 307 |
| V1N | 122 V | 124 V | 124,5 V | 126,6 V | 118,9 V | 118,3 V |
| VNPE | 64,4V | 61,4V | 62,9V | 64,7V | 58,8V | 58,6V |
| FREQUÊNCIA | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ | 60 HZ |
| I1 | 4,74 A | 4,82 A | 4,88 A | 4,96 A | 4,8 A | 4,66 A |
| POT. ATIVA | 578 W | 597 W | 607 W | 628 W | 571 W | 551 W |
| POT. REAT. | 0 VAr | 0 VAr | 0 VAr | 0 VAr | 0 VAr | 0 VAr |
| POT. APAR. | 578 VA | 597 VA | 607 VA | 628 VA | 571 VA | 551 VA |
| FP | 1i | 1i | 1i | 1i | 1i | 1i |
| HARMÔNICAS DE TENSÃO | | | | | | |
| THD % | 1,5% | 1,7% | 2,1% | 2% | 1,7% | 2,5% |
| H1 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H2 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H3 | 0,4% | 0,5% | 0,6% | 1% | 0,6% | 1,3% |
| H4 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H5 | 1,3% | 1,4% | 1,9% | 1,4% | 1,4% | 2% |
| H6 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H7 | 0,4% | 0,6% | 0,2% | 0,2% | 0,3% | 0,5% |
| HARMÔNICAS DE CORRENTE | | | | | | |
| THD % | 2,1% | 1,6% | 2% | 1,8% | 1,6% | 2,5% |
| H1 | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| H2 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H3 | 1,3% | 0,4% | 0,5% | 0,9% | 0,5% | 1,3% |
| H4 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H5 | 1,6% | 1,4% | 1,9% | 1,5% | 1,4% | 2% |
| H6 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H7 | 0,2% | 0,5% | 0,2% | 0,2% | 0,3% | 0,5% |
| H8 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H9 | 0,3% | 0,3% | 0,2% | 0,3% | 0,5% | 0,3% |
| H10 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H11 | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,3% | 0,1% | 0,1% |
| H12 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H13 | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0% | 0,1% | 0,2% |
| H14 | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% | 0% |
| H15 | 0,1% | 0,1% | 0,1% | 0,2% | 0% | 0,3% |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Com o intuito de comparar os resultados com os relatos da literatura, foi construída a tabela 25. Um resumo das principais características dos três conjuntos dos equipamentos utilizados (eletrônicos, aquecimento e motor) é feita a seguir.

Os eletrônicos, em razão da ação da comutação CA-CC utilizado em suas fontes de alimentação, é um grupo que, em sua maior parte, irá exibir uma alta geração de harmônicos, principalmente os computadores e videogames, com THD médio de corrente de 121%.

Cargas de aquecimento, por serem em maior parte lineares, irão mostrar correntes com espectro harmônico e distorção similares aos verificados para a tensão, no momento da medição.

Os motores não níveis relevantes de harmônicos, apresentando um THD de corrente médio de 35%.

Observa-se das medições obtidas que os instrumentos de potência superior presentes nas residências são cargas lineares, ao passo que as cargas não lineares apresentam potência menor. Dessa maneira, nota-se uma ligação contrária entre a potência dos equipamentos eletrodomésticos e a distorção de corrente (PIRES et al., 2005).

Tabela 25 - Comparativo das medições realizadas com aquelas da referência (PIRES, 2006)

| Eletrodomésticos | Medições realizadas | | Referência | |
|--|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | THDi _{Min} (%) | THDi _{Max} (%) | THDi _{Min} (%) | THDi _{Max} (%) |
| Taxa de distorção harmônica total de corrente | | | | |
| Notebook | 121,1 | 215 | 89,27 | 119,26 |
| Videogame | 124,8 | 201,8 | 45,30 | 56,92 |
| Liquidificador | 52,1 | 55,8 | 13,51 | 16,85 |
| Cafeteira | 1,6 | 2,1 | - | 3,49 |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Da Tabela 25 depreende-se que os valores de THDiMin e THDimax quando comparados com valores de medições da bibliografia encontrada (dharmonicas) estão equivalentes. É notada uma pequena variação nos valores, que podem ser associadas a algumas diferenças na pesquisa realizada em relação a referência, como por exemplo:

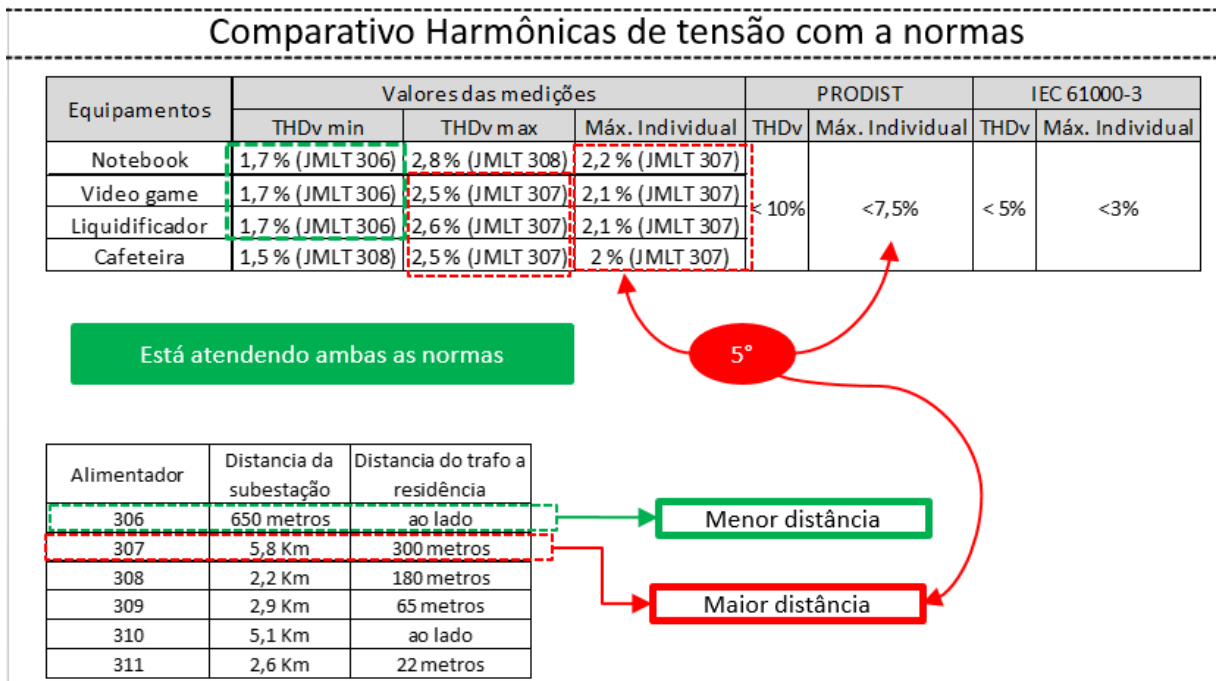
- diferença da potência dos eletrodomésticos utilizados;
- horário das medições diferentes;
- distância em que foi feito a medição do circuito de baixa potência em relação ao transformador que alimenta a carga (perdas do cabeamento).

Na figura 46 é exposta de uma maneira mais detalhada as conclusões desta etapa do trabalho de forma tornar mais compreensível para o leitor. Percebeu-se que:

- As THDv máximas ocorre na grande maioria no alimentador (JMLT 307) que possui maior distância entre a subestação e o ponto em que a carga está conectada e entre o transformador de MB/BT ao ponto em que a carga esta conectada (Linha tracejada em vermelho). Isso se deve as quedas de tensões harmônicas que vão ocorrendo pela alimentador, ou seja, quanto maior a distância maior a taxa de distorção harmônica e perdas.
- As THDv mínimas ocorre na grande maioria no alimentador (JMLT 306) que possui menor distância entre a subestação e o ponto em que a carga está conectada e entre o transformador de MB/BT ao ponto em que a carga esta conectada (Linha tracejada em verde). Isso se deve a menor distância entre ponto de alimentação até a fonte, desta forma, as quedas de tensões harmônicas são menores, conseqüentemente se tem um menor taxa de distorção harmônica de tensão.

- Foi notado que nas medições realizadas todos os equipamentos não extrapolaram os limites de THDv estipulados pelo PRODIST e a IEC 61000-3. Também foi verificado que dentre todas as medições, a harmônica individual de tensão que apresentou maior magnitude foi a de quinta ordem, sendo que, esta também não superou os limites das normas citadas.

Figura 45 - Detalhamento da etapa de medições



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

5.3 Cálculo Teórico de Fluxo Harmônico

O objetivo deste tópico é avaliar a distorção harmônica de tensão em diferentes pontos de um alimentador pertencente a uma rede de distribuição. Para isso utiliza-se um cálculo de fluxo harmônico em que são supostas cargas não lineares (aparelhos eletrodomésticos) em algum ponto do alimentador. Em

seguida, aloca-se estas cargas em outro ponto, com a finalidade de determinar a distorção harmônica de tensão nestas duas situações.

Foram feitas simulações com um cenário normalmente encontrado em residências, devido à influência das cargas presentes nas mesmas, variando-se as distâncias dos pontos (cargas conectadas) no alimentador em relação a subestação. Isto é, foram simuladas as influências das correntes harmônicas de alguns eletrodomésticos presentes nos consumidores residenciais (tabela 27) analisando seu efeito no lado de média tensão (13,8 kV).

O alimentador escolhido foi o JMLT 308, com as seguintes características: comprimento de 34 km; condutores 2/0 AWG; arranjo horizontal e distância entre condutores igual a 1 metro.

O alimentador inicia numa subestação de 30 MVA. Ao longo do alimentador tem-se transformadores (MT/BT) que alimentam a baixa tensão, cujas potências são 45 kVA e 75 kVA.

O alimentador fornece energia a 5767 consumidores conectados em suas ramificações no lado de baixa tensão (220V-127V). A seguir, na tabela 26, são exibidos todos os valores dos parâmetros utilizados para simulação (cálculos).

Tabela 26 - Aspectos do alimentador JMLT 308

| Alimentador de média tensão JMLT 308 | |
|--|------------------|
| S_{30} (Potência de curto trifásico) | 34,78 MVA |
| S_{0T} (Potência de curto fase/terra) | 27,24 MVA |
| I_{30} (Corrente de curto trifásico) | 2,527 kA |
| I_{0T} (Corrente de curto fase/terra) | 1,974 kA |
| Reatância de sequencia direta (Ω/Km) | 0,9558+j0,4513 |
| Reatância de sequencia zero (Ω/Km) | 1,4336+j1,6799 |
| Reatância de sequencia direta (pu/Km) | 0,00501+j0,00237 |
| Reatância de sequencia zero (pu/Km) | 0,00752+j0,00882 |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Os transformadores de distribuição 13,8 kV/ 220V possuem a configuração triângulo-estrela aterrada. Em (PIRES et al., 2005) são executadas simulações que

verificam que esta configuração, ocasiona uma redução na distorção de corrente, já que serve como um isolamento para um pequeno número de harmônicos.

Para determinar os dados de simulação, considerou-se um consumo entre 89 – 212 kWh/mês (consumidor residencial). A tabela 27 exhibe a situação das correntes harmônicas de um consumidor residencial de cada eletrodoméstico.

Tabela 27 - Correntes harmônicas para o cenário simulado

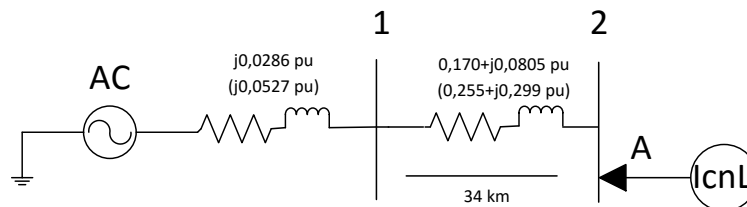
| Eletrodomésticos | I_{rms} | $I_{(3)}$ | $I_{(5)}$ |
|---------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Notebook | 0,72 A | 0,61 A | 0,486 A |
| Geladeira | 2,08 A | 0,11 A | 0,022 A |
| TV 29" | 1,30 A | 0,99 A | 0,170 A |
| Lâmpada fluorescente | 0,32 A | 0,26 A | 0,208 A |
| Ventilador pequeno | 1,20 A | 0,042 A | 0,324 A |
| Total para uma residência | 5,62 A | 2,015 A | 0,919 A |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Foram considerados os seguintes cenários:

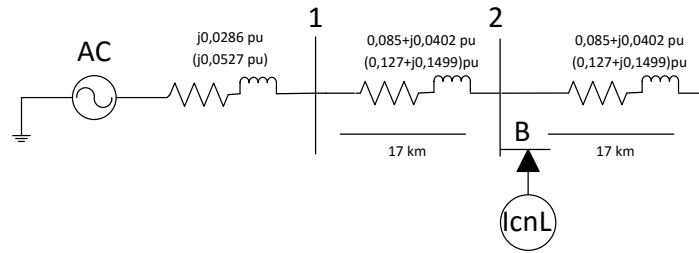
1. A carga não linear foi conectada no final de alimentador, como ilustrado na figura 46;
2. A carga não linear foi conectada no meio de alimentador, como ilustrado na figura 47;
3. A carga não linear foi conectada no início de alimentador, como ilustrado na figura 48;

Figura 46 – Ponto de medição A



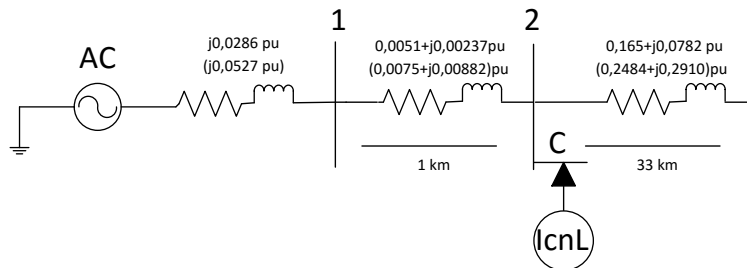
Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 47 – Ponto de medição B



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Figura 48 – Ponto de medição C



Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Para cada um destes cenários, os valores de tensão foram calculados da seguinte forma:

- Impedâncias equivalentes na barra 1 são calculadas através de:

$$Z_1 = \frac{S_b}{S_{3\phi}^*} = \frac{1MVA}{34,78MVA} = j0,0286 pu \quad (5.1)$$

$$Z_0 = \frac{3S_b}{S_{\theta T}^*} - \frac{2S_b}{S_{3\phi}^*} = \frac{3 * 1MVA}{27,24MVA} - \frac{2 * 1MVA}{34,78MVA} = j0,0527 pu \quad (5.2)$$

- Reatância da linha de sequência direta e zero. No ponto de medição 1, figura 45 (final do alimentador).

$$Z_{1 \text{ linha}} = 34km * 0,005018 + j0,00236 = 0,17064 + j0,0805 \frac{pu}{Km} \quad (5.3)$$

$$Z_{0 \text{ linha}} = 34km * 0,00752 + j0,008821 = 0,25594 + j0,2999 \frac{pu}{Km} \quad (5.4)$$

- Tensões de 3° harmônica nas barras 1

$$i^{(3)} = I^3 * \frac{\sqrt{3} * V_{base}}{S_{base}} = 2,0158 * \frac{\sqrt{3} * 13,8KV}{1MVA} = 0,0481pu \quad (5.5)$$

$$Z_{11}^{(3)} = Z_0 * 3 = j0,0527 * 3 = j0,1583 pu \quad (5.6)$$

$$V_1^{(3)} = I_3 * Z_{11} = 0,0481 * 0,1583 = j0,00762 pu \quad (5.7)$$

- Tensões de 3° harmônica na barra 2

$$Z_{22}^{(3)} = [(Z)_0 + Z_{0\text{linha}}] * 3 = (j0,0527 + j0,2999) * 3 = j1,0580 pu \quad (5.8)$$

$$V_2^{(3)} = I_3 * Z_{22} = 0,0481 * 1,0580 = j0,05098 pu \quad (5.9)$$

- Tensões de 5° harmônica nas barras 1

$$i^{(5)} = I^5 * \frac{\sqrt{3} * V_{base}}{S_{base}} = 0,9199 * \frac{\sqrt{3} * 13,8KV}{1MVA} = 0,02189pu \quad (5.10)$$

$$Z_{11}^{(5)} = Z_1 * 5 = j0,0286 * 5 = j0,1433 pu \quad (5.11)$$

$$V_1^{(5)} = I_5 * Z_{11} = 0,02189 * 0,1433 = j0,003152 pu \quad (5.12)$$

- Tensões de 5° harmônica nas barras 2

$$Z_{22}^{(5)} = [(Z)_1 + Z_{1\text{linha}}] * 5 = (j0,0286 + j0,0805) * 5 = j0,5462 pu \quad (5.13)$$

$$V_2^{(5)} = I_5 * Z_{22} = 0,02189 * 0,5462 = j0,01201 pu \quad (5.14)$$

- Distorção harmônica total de tensão nas barras 1 e 2

$$DTT_{Barra\ 1} = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2}}{V_1} * 100 = \frac{\sqrt{0,00762^2 + 0,00315^2}}{1} * 100 = 0,82\% \quad (5.15)$$

$$DTT_{Barra\ 2} = \frac{\sqrt{V_3^2 + V_5^2}}{V_1} * 100 = \frac{\sqrt{0,00509^2 + 0,01201^2}}{1} * 100 = 5,23\% \quad (5.16)$$

O mesmo procedimento foi feito para os dois seguintes cenários e mostradas na Tabela 28.

Tabela 28 - DHT em função da variação do ponto de carga.

| Valores de DTT em função da variação da posição carga no alimentador | | | |
|--|---------|---------|---------|
| Dados | Ponto A | Ponto B | Ponto C |
| Distância da carga à subestação | 34 km | 17 km | 1 km |
| Taxa de distorção total de tensão (DHT) na barra 1 | 0,825% | 0,825% | 0,825% |
| Taxa de distorção total de tensão (DHT) na barra 2 | 5,237% | 3,026% | 0,953% |

Fonte: (Elaborado pelo Autor).

Por fim, pode-se averiguar que, através das simulações, compreende-se que a tensão vai se tornando mais distorcida conforme a carga não linear se afasta da Subestação que supre o alimentador. Outra característica observada é que a pesar de conectar à mesma carga em diferentes pontos, os valores de DHT são ligeiramente diferentes, como registrados pelas medições.

6 Conclusão

O trabalho buscou descrever os harmônicos gerados por dispositivos eletroeletrônicos de clientes residenciais e a influência que estes harmônicos causam no sistema de distribuição de energia elétrica. Foi notada a necessidade de ponderar os efeitos em função da progressiva penetração das cargas não lineares, especialmente da melhora na eficiência energética dos equipamentos eletrodomésticos.

No primeiro capítulo as motivações e objetivos do trabalho foram apresentadas, juntamente com a organização do manuscrito, de forma a tornar mais compreensível a leitura.

No segundo capítulo foi expôs-se uma explicação das medidas da qualidade de energia, no que se refere à qualidade do atendimento, do serviço e do produto, enfatizando uma relação com a conservação de energia. A conservação de energia teria de incorporar em suas sugestões de eficiência energética a qualidade de energia, uma vez que dependendo das ações escolhidas, consegue-se danificá-la, sobretudo intensificando a quantidade de harmônicos presentes no sistema de distribuição de energia elétrica. Ademais, foram expostos os limites de maior relevância relacionados aos harmônicos, através de normas nacionais e internacionais. Observando estas limitações, em associação as consequências que os harmônicos promovem no sistema de distribuição, é admissível habituar-se com os harmônicos. Isto é, se estiverem dentro dos limites determinados.

No terceiro capítulo, indicaram-se os impactos que os harmônicos causam no sistema de distribuição e em seus componentes, sendo examinados os seguintes elementos: medidores de energia, condutores, iluminação, máquinas rotativas, equipamentos eletrônicos, transformadores, capacitores e relés de proteção. Verificou-se que alguns são mais vulneráveis que os demais. Também notou-se uma correlação inversa entre a corrente requerida e a taxa de distorção da corrente

No quarto capítulo, é expôs-se a disposição e o número de clientes e alimentadores que saem da Subestação que supre a cidade de João Monlevade M.G. Em seguida, foram apresentados dois métodos (probabilístico e não probabilístico) para eventuais pesquisas de campo, com intuito de tornar viável o trabalho para validação de dados. Observou-se que, para realização da pesquisa é necessita-se de uma disponibilidade maior do equipamento (Analisador de Redes) do Campus da Universidade Federal de Ouro Preto, juntamente com a mesma disponibilidade do pesquisador, pois são 384 clientes (residências) a se visitar.

No capítulo 5, dois tipos de simulação foram mostrados: simulação da corrente individual de quatro eletrodomésticos (notebook, vídeo game, liquidificador e cafeteira) no lado de baixa tensão (127 V) e uma simulação do efeito da distorção total de tensão (DHT) no alimentador de distribuição primário (13,8 kV) quando conectado um grupo de eletrodomésticos e variando-se as distancias dos pontos (cargas conectadas) no alimentador. Na primeira simulação, investigou-se qual era a corrente demandada por cada um dos eletrodomésticos e suas respectivas taxas de distorções harmônicas de corrente e tensão (THDI e THDV). O resultado desta verificação remete às considerações dos capítulos 3 e 5. Numa primeira simulação, ao ser introduzida uma carga não linear (grande porte) numa rede com existência de cargas não lineares, o resultado é uma corrente menos distorcida. Posteriormente, na segunda simulação, foram efetuados cálculos de cenários com um grupo de eletrodomésticos que integram uma residência. Este cenário foi modelado e inserido em um alimentador primário (13,8 kV) de 34 km de extensão com a finalidade de quantificar a distorção da tensão ao longo do alimentador. Constatou-se que, quanto maior for a distância do local da carga não linear em relação à subestação, maior será a distorção da tensão. Esta consideração é esclarecida como consequência das quedas de tensão harmônicas que acontecem por toda a extensão do circuito, provocando uma tensão resultante mais distorcida. Embora tenham sido encontradas distorções de tensão nas simulações, tanto no caso do circuito de media tensão (13,8 kV) como no de baixa tensão (220 V), as magnitudes de distorção mantiveram-se dentro dos valores das normas, que foram apresentadas no segundo capítulo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, F.L. *Influência de harmônicos em consumidores de baixa tensão*. 2008. 73 p. Dissertação (GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA) – Centro Federal de Educação Tecnológica da Bahia, Salvador, 2008
- ANEEL. *Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional – Prodist Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica*. [S.l.], 2009.
- ANEEL. *Consumo de energia elétrica nacional*. 2015. Disponível em: <http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampClasseCons.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=1>. Acesso em: 01 maio 2016.
- ANTUNES, R. *Amostragem aleatória sistemática*. 2011. Disponível em: <<https://sondagenseestudosdeopinio.wordpress.com/amostragem/amostras-probabilisticas-e-nao-probabilisticas/amostragem-aleatoria-sistemica/>>. Acesso em: 24 abril 2016.
- BROZEK, J. P. *The effects of harmonics on overcurrent protection devices*. IEEE Conference Record of the Industry Applications Society Annual Meeting, 1990.
- CHEN, M.T., FU, C.H., *Characteristics of Fluorescent Lamps under abnormal System Voltage Conditions*, Electric Power System Research, nº 41, 1997.
- CORREA, S. *Methodology for Evaluating the Collective Harmonic Impact of Residential Loads in Modern Power Distribution Systems* Título. 2012. 190 p. Tese (DOUTORADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA) – Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2012.
- GONZALEZ, M. L. *Correntes harmônicas em aparelhos eletrodomésticos*. VI SBQEE, Belém - Pará, 1-6 p, Agosto de 2005.
- PAULILO, G. *Conceitos gerais sobre qualidade da energia*. 2012. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br>>. Acesso em: 17 maio 2016.
- IEEE. IEEE Task Force on the Effects of Harmonics on Equipment, *Effects of Harmonics on Equipment*. IEEE Transactions on Power Delivery, v. 8, n. 2, Abril 1993.
- KAGAN, N. *Estimação de Indicadores de Qualidade da Energia Elétrica*. São Paulo: blucher, 2009. 240 P. ISBN 9788521204879.
- LEVINE, D. M.; BERENSON, M. L.; STEPHAN, D. *Estatística: Teoria e Aplicações usando Microsoft Excel em Português*. 6ª Edição. São Paulo: [S.l.: s.n.], 2000.

MINIPA. *Proposta Técnica: Analisador de Energia Modelo: ET-5061C*. Disponível em: <<http://www.minipa.com.br/Content/img/proposta/T5P5B9G9-ET-5061C-1305-BR.pdf>> . Acesso em: 24 maio 2016

MOHAN, N. *Power electronics and drives*. 1 edição. Mineapolis: MNPERE, 2003. 251 p. ISBN 0-9715292-2-1.

NUNES, R. V. *Análise da penetração harmônica em redes de distribuição desequilibradas devido às cargas residenciais e comerciais com a utilização do ATP*. 162 p. Dissertação (MESTRADO ENGENHARIA ELÉTRICA) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, BELO HORIZONTE, 2007.

PIRES, I. A. *caracterização de harmônicos causados por equipamentos eletrônicos residenciais e comerciais no sistema de energia elétrica*. 173 p. Dissertação (MESTRADO ENGENHARIA ELÉTRICA) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, BELO HORIZONTE, 2006.

PIRES, I. A. *Simulação de um sistema de distribuição em áreas residenciais e comerciais - Parte II*. In: MEGABARRE. *Simulação de um sistema de distribuição em áreas residenciais e comerciais - Parte II*. [S.l.]: Atitude, 2010. p. 40 – 43.

POMILIO; *Avaliação da qualidade da energia elétrica: Distorções harmônica: causas, efeitos e soluções*. 1 ed. Campinas: 2010. 37 p.

POMILIO, J. A. *Efeitos e causas de harmônicas no sistema de energia elétrica*. Campinas: [s.n.], 1997. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/htmlfile/harmo/fpcap4/cap4.html>>. Acesso em: 09 maio 2016

PROCEL. *Avaliação do mercado de eficiência energética no Brasil: Programa Nacional de Conservação de Energia*. 2007. 184 p.

RIBEIRO, C. F. *Influência dos harmônicos na qualidade de energia elétrica*. 56 p. Dissertação (GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

SANTOS, F. M. F. *Qualidade de Energia - Comparação das Normas IEC 61000-3-2 E IEEE 519*. 57 p. Dissertação (GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VASCONCELOS; ALLI, F. H. et. *Calibração de Medidores de Energia Elétrica Ativa em Condições Não Senoidais*. Metrologia 2003, Sociedade Brasileira de Metrologia, 01 a 05 de setembro de 2003, Recife – PE.

