

UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

OBERDAN DA CONCEIÇÃO COSTA

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADVERSIDADES NA MEDIÇÃO DO
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

SÃO LUÍS
2018

OBERDAN DA CONCEIÇÃO COSTA

**INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADVERSIDADES NA MEDIÇÃO
DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão para a obtenção do grau de Engenheiro Eletricista.

Orientador: D.Sc José Eduardo O. Pessanha

SÃO LUÍS

2018

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Núcleo Integrado de Bibliotecas/UFMA

Costa, Oberdan da Conceição.

Investigação da influência de adversidades na medição
do consumo de energia elétrica / Oberdan da Conceição

Costa. - 2018.

94 f.

Orientador(a): José Eduardo O. Pessanha.

Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2018.

1. Erros de medição. 2. Harmônicos. 3. Medidor
digital. I. Pessanha, José Eduardo O. II. Título.

INVESTIGAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADVERSIDADES NA MEDIÇÃO DO
CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Monografia apresentada ao
curso de Engenharia Elétrica da
Universidade Federal do
Maranhão para a obtenção do
grau de Engenheiro Eletricista.

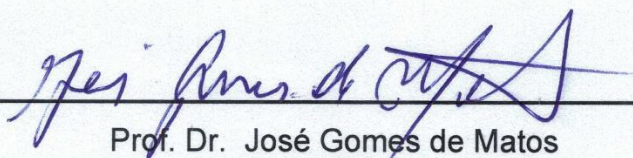
Orientador: D.Sc José Eduardo O. Pessanha

Aprovada em : 09/07/2018

BANCA EXAMINADORA



Prof. D. Sc José Eduardo Onoda Pessanha
UFMA



Prof. Dr. José Gomes de Matos
UFMA



Prof. M. Sc Antonio Dantas Maniçoba
UFMA

SÃO LUÍS
2018

A Deus que é fonte de vida e inspiração para mim e aos meus pais Maria Madalena R. da Conceição e Domingos Matos Costa, que sempre me deram todo apoio necessário para que eu chegasse até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus, o autor e consumidor da minha fé, que guia todos os meus passos em minha vida.

Aos meus pais Maria Madalena e Domingos Matos Costa pelos tantos ensinamentos de vida além do carinho, dedicação, educação, amor e companheirismo em todos os momentos.

A minha irmã Kaiane da C. Costa, companheira sempre presente, que sempre compartilha momentos preciosos comigo.

A minha namorada Sionnarah que sempre me motivou e demonstrou orgulho por mim.

Ao meu orientador, professor Pessanha, pela competência, incentivo e colaboração na elaboração deste trabalho.

E a todos meus amigos que estiveram comigo até aqui e que contribuíram direta e indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

O desenvolvimento de um país pode ser avaliado de acordo com o acesso da população aos serviços básicos de infraestrutura, tais como saneamento, transportes, telecomunicações e energia, sendo este último determinante para o desenvolvimento econômico e social. A energia elétrica em sua forma final de uso é entregue aos consumidores e medida para faturamento por parte da concessionária através de medidores de energia, geralmente do tipo disco magnético ou eletrônico. Estes dispositivos estão sujeitos a mau funcionamento e/ou fraudes cometidas pelos usuários, podendo ocasionar prejuízos a uma das partes. Em função das possíveis perdas comerciais por parte das concessionárias de energia elétrica ou do faturamento incorreto devido a erros dos medidores, o objetivo principal desta monografia é investigar o desempenho e a precisão de um medidor monofásico digital de energia elétrica, sob níveis variados de tensão na medição de cargas de iluminação. São descritas as principais características dos medidores analógicos e digitais bem como os fenômenos elétricos que influenciam na medição. Por fim são apresentados os resultados das investigações e análises conclusivas, oferecendo uma fonte de consulta a estudantes e profissionais da área de engenharia elétrica e/ou áreas correlatas, a respeito das influências na medição de energia elétrica.

Palavras-chave: Medidor digital, erros de medição, harmônicos.

ABSTRACT

The development of a country can be measured by the population's access to basic infrastructure services, such as sanitation, transport, telecommunications and energy, being the last determinant of economic and social development. The electric energy in the final form is delivered to consumers and measured for billing by the company with energy meters, usually electrical magnetic or electronic. These devices are exposed to defects and/or fraud committed by users, and can cause damage to any part. The main objective is to investigate the performance and accuracy of a single-phase digital meter of electric energy, under varying levels of voltage in the measurement of lighting loads. The main characteristics of the electrical magnetic and digital meters as well as the electrical interference that influence the measurement are described. Finally, the results of the investigations and analyzes are presented, offering a source of consultation to students and professionals in the area of electrical engineering regarding the influences in the measurement of electric energy.

Keywords: Digital Meters, measurements erros, harmonics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Medidor de Energia Elétrica Tipo Indução Monofásico	22
Figura 2.2 – Relação $V \times I$ (a); vista superior do disco do medidor (b e c)	24
Figura 2.3 – Diagrama de blocos, funcionamento medidor digital.....	28
Figura 2.4 – Forma de onda de corrente distorcida e suas componentes harmônicas	38
Figura 3.1 – Conversor.....	46
Figura 3.2 – Divisor de tensão com uma série de duas resistências.....	46
Figura 3.3 – Esquema de ligação do circuito de coleta de dados.	47
Figura 3.4 – Posição do sensor LDR no medidor.....	48
Figura 3.5 – Esquema de montagem do circuito de coleta.	49
Figura 3.6 – Bancada de Medição.....	49
Figura 3.7 – Detalhes e resultado parcial do teste de calibração.	50
Figura 3.8 – Resultado teste medidor sob iluminação ambiente.	50
Figura 3.9 – Resultado teste medidor sem iluminação ambiente.	51
Figura 3.10 – Esquema simplificado da topologia de uma lâmpada LED	52
Figura 3.11 – Diagrama unifilar geral do sistema de investigação.	55
Figura 4.1 – Ondas de corrente e tensão dos ensaio 1 (a), ensaio 2 (b) e ensaio 3 (c) - Exp1.....	61
Figura 4.2 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 1.	62
Figura 4.3 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 1.	62
Figura 4.4 – Consumo pelo medidor digital; Ensaio 1 (a), Ensaio 2 (b) e Ensaio 3 (c). Exp 1.	63
Figura 4.5 – Ondas de corrente e tensão dos ensaio 1(a), ensaio 2(b) e ensaio 3(c) - Exp 2.	65
Figura 4.6 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 2.	65
Figura 4.7 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 2.	66
Figura 4.8 – Consumo pelo medidor digital; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 2.	66

Figura 4.9 – Ondas de corrente e tensão dos Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c) - Exp 3.	68
Figura 4.10 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 3.	69
Figura 4.11 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 3.	69
Figura 4.12 – Consumo pelo medidor digital; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 3.	70
Figura 4.13 – Ondas de corrente e tensão dos Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c) - Exp 4.	72
Figura 4.14 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 4.	72
Figura 4.15 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 4.	73
Figura 4.16 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 1, Exp. 4.	73
Figura 4.17 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 2, Exp. 4.	74
Figura 4.18 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 3, Exp. 4.	74
Figura 4.19 – Ondas de corrente e tensão dos Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c) - Exp 5.	76
Figura 4.20 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 5.	76
Figura 4.21 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 5.	77
Figura 4.22 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 1, Exp. 5.	77
Figura 4.23 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 2, Exp. 5.	78
Figura 4.24 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 3, Exp. 5.	78
Figura 4.25 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 1.	79
Figura 4.26 – Consumo elétrico por equipamento de medição. Exp. 1.	80
Figura 4.27 – Potências Experimento 1.	80
Figura 4.28 – Consumo elétrico por equipamento de medição. Exp. 2.	81
Figura 4.29 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 2.	81
Figura 4.30 – Potências Experimento 2.	82
Figura 4.31 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 3.	82
Figura 4.32 – Consumo elétrico por equipamento de medição. Exp. 3.	83

Figura 4.33 – Potências Experimento 3.	83
Figura 4.34 – Consumo elétrico por equipamento de medição. Exp. 4.	84
Figura 4.35 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 4.	84
Figura 4.36 – Potências, Experimento 4.	85
Figura 4.37 – Consumo elétrico por equipamento, Experimento 5.....	85
Figura 4.38 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 5.	86
Figura 4.39 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 5.	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Terminologia Harmônica.	32
Tabela 2.2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).	32
Tabela 2.3 – Terminologia Desequilíbrio de Tensão.	33
Tabela 2.4 – Limites para os desequilíbrios de tensão.	33
Tabela 3.1 – Especificações técnicas.	53
Tabela 3.2 – Comparativo entre FP e THD: lâmpadas LED 6W.	53
Tabela 3.3 – Comparativo entre FP e THD: lâmpadas LED 8W – 9W.	53
Tabela 3.4 – Comparativo entre FP e THD: lâmpadas LED 12W – 16W.	54
Tabela 3.5 – Especificações técnicas das cargas.	55
Tabela 3.6 – Descrição do aglomerado de cargas.	56
Tabela 4.1 – Especificações técnicas das lâmpadas analisadas.	58
Tabela 4.2 – Parâmetros dos ensaios.	59
Tabela 4.3 – Especificações de suprimento e carga Experimento 1.	60
Tabela 4.4 – Resultados do Experimento 1.	61
Tabela 4.5 – Relação entre FP e THD Experimento 1.	63
Tabela 4.6 – Especificações de suprimento e carga Experimento 2.	64
Tabela 4.7 – Resultados do Experimento 2.	64
Tabela 4.8 – Relação entre FP e THD Experimento 2.	67
Tabela 4.9 – Especificações de suprimento e carga Experimento 3.	67
Tabela 4.10 – Resultados da Experimento 3.	67
Tabela 4.11 – Relação entre FP e THD Experimento 3.	70
Tabela 4.12 – Especificações de suprimento e carga Experimento 4.	71
Tabela 4.13 – Resultados do Experimento 4.	71
Tabela 4.14 – Relação entre FP e THD Experimento 4.	74
Tabela 4.15 – Especificações de suprimento e carga Experimento 5.	75
Tabela 4.16 – Resultados do Experimento 5.	75
Tabela 4.17 – Relação entre FP e THD Experimento 5.	78

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLA

A/D – Analógico/Digital

ANEEL – Agência Nacional de Engenharia Elétrica

CIGRÉ – *Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*

DFT – *Discrete Fourier Transform*

DIHI – Taxa de Distorção Harmônica Individual de Corrente

DSP – *Digital Signal Processor*

DVHI – Taxa de Distorção Harmônica de Tensão Individual

FDV – Fator Desequilíbrio de Tensão

FFT – *Fast Fourier Transform*

FP – Fator de Potência

KH – Constante de Calibração

LCD - *Liquid Crystal Display*

LDR – *Light Dependent Resistor*

LED – *Light Emitting Diode*

PRODIST – Procedimentos de Distribuição

PU – Por Unidade

QEE – Qualidade de Energia Elétrica

THD – *Total Harmonic Distortion*

THDi – Taxa de Distorção Harmônica Total de Corrente

THDv – Taxa de Distorção Harmônica Total de Tensão

UC – Unidade Consumidora

SUMÁRIO

1. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E MEDIDOR DIGITAL	16
1.1 Objetivos	17
1.2 Estrutura da Monografia	17
2. POSSÍVEIS ADVERSIDADES NA MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	19
2.1 Relevância do Assunto	19
2.2 Medidor de Energia Elétrica.....	21
2.2.1 Medidores Eletromecânicos de Potência Ativa.....	22
2.2.2 Medidor Digital de Energia Elétrica.....	25
2.2.2.1 Medidor baseado em microprocessador	26
2.2.2.2 Método de integração discreta	27
2.2.2.3 Princípio de funcionamento do medidor digital de energia ativa	28
2.2.2.4 Erros e Incertezas de Medidores Digitais	29
2.3 Limites de Distorções Harmônicas e Desequilíbrio de Tensão - ANEEL.....	31
2.4 Interferência de Fenômenos Elétricos na Medição do Consumo de Energia Elétrica	33
2.5 Desequilíbrio de Tensão	36
2.6 Distorções Harmônicas.....	37
2.7 Fator de Potência	39
2.7.1 Desvantagens do baixo fator de potência (FP) e da alta distorção da corrente.....	41
2.8 Conclusões	41
3. MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE INTERESSE	43
3.1 Extração de Informação do Medidor Digital	44
3.2 Desenvolvimento do Circuito de Coleta de Dados do Medidor Digital	45
3.3 Estudo da Influência da Iluminação Ambiente Sobre a Coleta de Dados pelo Microcontrolador.....	48
3.3.1 Coleta de Dados pelo Microcontrolador Sob Iluminação Ambiente	50
3.3.2 Coleta de Dados pelo Microcontrolador com redução de iluminação incidente.....	51
3.4 Análise dos Harmônicos em lâmpadas de LED.....	52
3.4.1 Taxa de distorção harmônica em lâmpadas de LED	52
3.5 Ensaio em Laboratório	54
3.6 Conclusões.....	57

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES	58
4.1 Ensaio Laboratoriais	58
4.2 Resultados Obtidos	60
4.2.1 Experimento 1.....	60
4.2.2 Experimento 2.....	63
4.2.3 Experimento 3.....	67
4.2.4 Experimento 4.....	70
4.2.5 Experimento 5.....	75
4.3 Análise dos Resultados	79
4.3.1 Experimento 1.....	79
4.3.2 Experimento 2.....	80
4.3.3 Experimento 3.....	82
4.3.4 Experimento 4.....	83
4.3.5 Experimento 5.....	85
4.4 Considerações Finais	86
5 CONCLUSÕES GERAIS.....	88
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

1. QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA E MEDIDOR DIGITAL

Uma das formas de se medir o desenvolvimento de um país é a facilidade de acesso da população aos serviços de infraestrutura, tais como saneamento básico (saúde pública), transportes (integração nacional), telecomunicações (integração nacional) e energia, sendo este último fator determinante para o desenvolvimento econômico e social, pois fornece apoio a setores importantes da economia, como indústria e comércio, além do lazer e do conforto das pessoas [1].

Esta característica faz com que o setor de energia conviva com dois extremos: um associado ao desenvolvimento tecnológico que visa atingir maior qualidade e eficiência tanto na produção quanto na aplicação dos recursos energéticos, por exemplo, pesquisas sobre novas fontes (eólica, solar, etanol, dentre outras); e o outro que visa aumentar o número de pessoas com acesso às fontes mais eficientes de energia, mesmo que por meio de instalações simples e de baixo custo.

A energia elétrica em sua forma final de uso é entregue aos consumidores e medida para faturamento por parte da concessionária através de medidores de energia, geralmente do tipo disco magnético ou eletrônico [2]. Estes dispositivos estão sujeitos as mais diversas intempéries, desde mau funcionamento às fraudes cometidas pelos usuários. Portanto, dependendo da situação, um dos lados pode estar sendo prejudicado. Em função das possíveis perdas comerciais por parte das concessionárias de energia elétrica ou do faturamento incorreto devido a erros dos medidores.

O grande avanço tecnológico possibilitou o desenvolvimento de diversos segmentos da indústria, dentre estes, o setor de materiais elétricos, que possibilitou a geração de diversos equipamentos, otimizando seu consumo energético. Na maioria dos casos por meio de lógica eletrônica, que por sua vez produz grandes efeitos no sistema elétrico devido seu principio de funcionamento chaveado, no qual gera distorções nos sinais elétricos de tensão e corrente, modificando os padrões senoidais para os quais, por exemplo, equipamentos de medição são projetados, o que resultaria em erros no processo de medição.

Com isso, esta linha de investigação e de pesquisa tem despertado bastante interesse nas últimas duas décadas. Sendo fonte de estudos em diversas pesquisas,

inclusive neste trabalho monográfico, no intuito de ampliar os conhecimentos a respeito dos fenômenos oriundos da eletricidade e os impactos destes para medição eficiente, levando ao desenvolvimento de análises investigativas a respeito das influências de cargas de iluminação, amplamente aplicadas às residências e representando boa parte da carga energética, no processo de medição do consumo elétrico por equipamentos de medição convencionais. Ainda para a contribuição com maiores dados à literatura a respeito das interferências geradas por novas tecnologias presentes nos dispositivos de iluminação e suas consequências no sistema elétrico, visando à manutenção de um padrão de qualidade de energia elétrica (QEE).

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta monografia é investigar o desempenho e a precisão de um medidor monofásico digital de energia elétrica, típico de um sistema real de distribuição. Como objetivos secundários destacam-se: avaliação de desempenho do medidor na presença de cargas de iluminação e geradoras de harmônicos; avaliação de desempenho do medidor em condições de subtensão e sobretensão.

O desenvolvimento de um documento que forneça base teórica e prática, a respeito de influências de fenômenos elétricos na medição do consumo de energia elétrica, com os principais resultados das investigações.

Portanto, o objetivo deste trabalho é oferecer uma fonte de consulta a estudantes e profissionais da área de engenharia elétrica e/ou áreas correlatas, a respeito das influências na medição de energia elétrica.

1.2 Estrutura da Monografia

Para uma melhor compreensão das informações contidas nesta monografia decidiu-se adotar a divisão em 5 capítulos.

O presente capítulo destina-se a contextualizar a área de estudo mostrando a importância do tema e o porquê deste trabalho.

No Capítulo 2 faz-se uma revisão bibliográfica dos temas importantes para o desenvolvimento do trabalho, tratando dos medidores analógico e digital, bem como uma apresentação dos resultados de um estudo a respeito de alguns fenômenos

elétricos e suas influências no processo de medição no medidor analógico, tal estudo baseia os ensaios deste trabalho, no medidor digital.

O Capítulo 3 apresenta a metodologia utilizada para a realização dos ensaios investigativos, detalhando os equipamentos utilizados para variar os níveis de tensão, criando os perfis de sobretensão e subtensão, e o esquema proposto para um sistema de obtenção de dados registrado pelo medidor sob ensaio.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados laboratoriais obtidos e as análises dos mesmos.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes ao trabalho e as propostas para futuros trabalhos.

2. POSSÍVEIS ADVERSIDADES NA MEDIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A medição de energia elétrica é um processo realizado pelas concessionárias de energia para se obter o faturamento adequado, a partir de uma tarifa estabelecida, da quantidade de energia elétrica consumida por cada Unidade Consumidora (UC). Nesse processo, toda a energia fornecida é quantificada através de um equipamento conhecido como medidor de energia. No Brasil, a maioria dos medidores instalados ainda é do tipo indução, devido ao seu baixo custo, simplicidade e robustez [3]. Contudo, esse número vem diminuindo com o desenvolvimento dos medidores digitais.

O medidor de energia surgiu na década de 1990 [4]. Hoje em dia, possibilita a mensuração de diversas grandezas elétricas, além de permitir a detecção de eventos que ocorrem nos sistemas elétricos. Em alguns modelos conta-se com um sistema de armazenamento de dados, no qual são armazenados pulsos relativos às grandezas medidas. Também podem apresentar canais de leitura remota com saída via cabo e/ou porta ótica e com funções mais complexas, como maior classe de exatidão [4].

Neste capítulo, busca-se apresentar os principais problemas enfrentados pelos medidores analógicos e digitais em função de uma baixa qualidade de energia elétrica, bem como destacar a importância destes na melhoria do processo de medição e da manutenção do padrão de qualidade energética. Para isso, faz-se necessário uma revisão teórica a respeito da qualidade da energia elétrica, destacando os principais fenômenos que a afetam, como harmônicos e desequilíbrios de cargas.

Além disso, é realizado um estudo acerca das características técnicas, construtivas, normas e padrões de erro e precisão dos equipamentos utilizados no processo de medição de energia elétrica, a fim de se obter uma análise segura da interferência dos distúrbios na medição.

2.1 Relevância do Assunto

O crescimento exponencial do interesse em obter QEE está relacionado, principalmente, ao grande avanço tecnológico dos equipamentos

eletroeletrônicos, hoje presentes em diversos setores de atuação, seja industrial, comercial ou residencial. Estudos mostram que antigamente não era comum os equipamentos sofrerem falhas com as variações da QEE, fato que tem se tornado frequente nos últimos anos, gerando transtornos e prejuízos as concessionárias e aos consumidores.

Dessa forma, tornou-se imprescindível o desenvolvimento de técnicas para manutenção, em padrões aceitáveis, da qualidade de energia elétrica, garantindo assim o bom funcionamento dos equipamentos.

O Brasil, juntamente com a França e a Inglaterra, foi um dos pioneiros a desenvolver trabalhos na área de QEE, nas décadas de 1970 e 1980 [5], através de grandes projetos como a “Ferrovia Carajás” e o “Sistema de Transmissão de Itaipu”, os quais exigiram a formação de corpos técnicos capazes de solucionar os desafios no que diz respeito à manutenção do padrão de energia elétrica. Pode-se destacar alguns fatores que interferem negativamente na QEE [5]:

- Equipamentos eletrônicos, de processamento de dados e de comunicação, são responsáveis por uma crescente categoria de cargas (residencial, comercial e industrial) sensíveis aos distúrbios provenientes da fonte de alimentação;
- A eletrônica de potência tem produzido uma nova geração de equipamentos de alta capacidade e baixo custo, o que tem disseminado sua aplicação. Em contrapartida, estes equipamentos são responsáveis pela geração de alguns distúrbios da QEE (harmônicos, por exemplo), o que afeta seu funcionamento;
- O interesse pela racionalização e conservação da energia elétrica, por parte das concessionárias e dos consumidores, tem resultado em adoção de medidas, que além de proporcionar economia e maior eficiência energética, causam perdas na QEE.

O processo de modernização do setor industrial e a implantação de processadores eletrônicos de energia elétrica (fontes chaveadas, controladores de velocidade, equipamentos de solda, conversores, etc.), atuando como cargas não lineares, juntamente com os demais dispositivos presentes nos setores comercial e residencial, tais como computadores pessoais, instrumentação eletrônica, dispositivos de entretenimento, reatores eletrônicos, entre outros, provocam um aumento significativo do nível de distorção harmônica de corrente e tensão nas redes de distribuição de energia elétrica [6].

No Brasil, os medidores de energia elétrica são fabricados e calibrados para operar com formas de ondas de corrente e tensão puramente senoidais, livres de distorções harmônicas, em sistemas equilibrados [6].

Entretanto, os sistemas reais de distribuição não apresentam condições ideais em suas formas de ondas, expondo os medidores de energia elétrica a sistemas não equilibrados com formas de ondas não senoidais, com altas taxas de distorções harmônicas e com desequilíbrios de tensão.

Assim sendo, operar nessas condições, principalmente quando se trata de elevados montantes de energia, o desempenho dos medidores de energia elétrica pode ser comprometido, gerando erros de medição e conseqüentemente um provável erro de faturamento, podendo resultar em perdas econômicas para as concessionárias ou para o consumidor.

2.2 Medidor de Energia Elétrica

Medidor de energia elétrica é um dispositivo ou equipamento eletromecânico e/ou eletrônico capaz de mensurar o consumo de energia elétrica [7]. A unidade comumente utilizada é kWh. Está presente na maioria das residências e habitações no mundo moderno. Pode ser ligado diretamente entre a rede elétrica e a carga (UC) ou através de transformadores de acoplamento de tensão e/ou corrente [7].

Normalmente este tipo de ligação é utilizado em indústrias e consumidores de média (13,8 kV a 34,5 kV) e alta tensão (69 kV a 230 kV) [7]. Seus erros podem variar de 0,02% a 2,00% em condições controladas (25°C +/- 5°C, tensão nominal e corrente nominal). Nas residências são comumente utilizados medidores de classe 2 (erro relativo percentual de +/- 2,00 %) [7].

O primeiro medidor desenvolvido à mensuração do consumo de energia elétrica foi desenvolvido e patenteado por Samuel Gardiner, em 1872 [7]. Tratava-se de um medidor de lâmpada-hora para aplicação em corrente contínua, que indicava o período que uma lâmpada permanecia acesa [7]. Por ser uma carga conhecida, com corrente praticamente constante, o cálculo do consumo resumia-se ao produto do tempo ligado pela potência nominal da carga.

A necessidade de equipamentos com tecnologia mais fina se deu devido à evolução industrial, apresentando cargas com diversas características elétricas, e para acompanhar essas evoluções pode-se contar atualmente com equipamentos

de mensuração analógicos e digitais. Não se restringindo a apenas medição do consumo de energia elétrica, podendo dispor de ferramentas para registro de diversas outras grandezas elétricas, tais como demanda ativa, potência reativa, fator de potência, dentre outras, no intuito da manutenção de um padrão de qualidade energético.

2.2.1 Medidores Eletromecânicos de Potência Ativa

Nesta seção é apresentada uma breve descrição a respeito do funcionamento dos medidores de energia elétrica tipo indução, porém, antes deve-se conhecer a estrutura dos mesmos. A Figura 2.1 apresenta as partes componentes do medidor Watt-Hora tipo indução monofásico, que podem ser estendidas para o entendimento de todos os tipos de medidores tipo indução, tanto bifásico, quanto trifásicos [3].

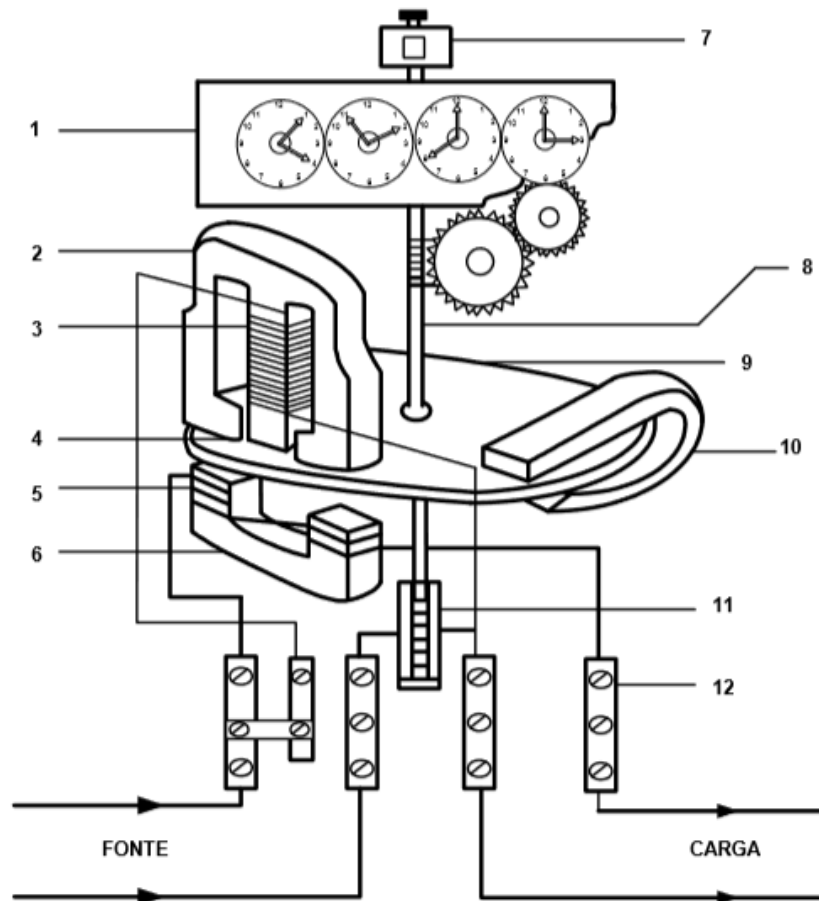


Figura 2.1 – Medidor de Energia Elétrica Tipo Indução Monofásico

Fonte [3]

Onde,

- | | |
|---------------------------|---------------------------------|
| 1. Contador; | 7. Rolamento de Eixo Superior |
| 2. Eletroímã de Tensão; | 8. Eixo de Suspensão de Disco; |
| 3. Bobina de Tensão; | 9. Disco; |
| 4. Bobina de Frenagem; | 10. Ímã Permanente; |
| 5. Bobina de Corrente; | 11. Rolamento de Eixo Inferior; |
| 6. Eletroímã de Corrente; | 12. Parafuso Terminal. |

O medidor eletromecânico de energia elétrica do tipo indução funciona como um motor elétrico cuja interação de fluxos magnéticos produz movimento no rotor com a passagem de correntes elétricas. Este medidor é composto basicamente por um estator, um rotor e uma carcaça de proteção contra interferências mecânicas externas [8]. Este dispositivo está baseado no princípio de Ferraris: “Um condutor percorrido por uma corrente elétrica, na presença de um campo magnético externo, fica submetido a uma força”. Este fenômeno é conhecido como interação eletromagnética e é através dessa interação que se tem o funcionamento do medidor de energia tipo indução [8]. Em (2.1) apresenta-se a equação matemática que descreve o princípio de Ferraris [9].

$$F = B \cdot I \cdot L \cdot \sin \alpha \quad (2.1)$$

Onde,

F é o módulo da força cujo sentido é dado pela regra da mão direita;

B é o campo magnético gerado pela bobina de tensão;

L é o comprimento do condutor sob ação do campo magnético;

α é ângulo entre a corrente e o campo magnético.

A força proporciona um conjugado em relação ao eixo, fazendo girar o disco de alumínio. Para melhor compreensão do sentido das forças e conjugado, usaremos de um exemplo onde para uma carga puramente resistiva, a tensão e a corrente aplicada à carga estão em fase, conforme Figura 2.2(a) [10]. O fluxo da bobina de tensão está atrasado de 90° em relação ao fluxo de bobina de corrente, devido a corrente ser proporcional ao fluxo, diferentemente da tensão e o respectivo fluxo produzido.

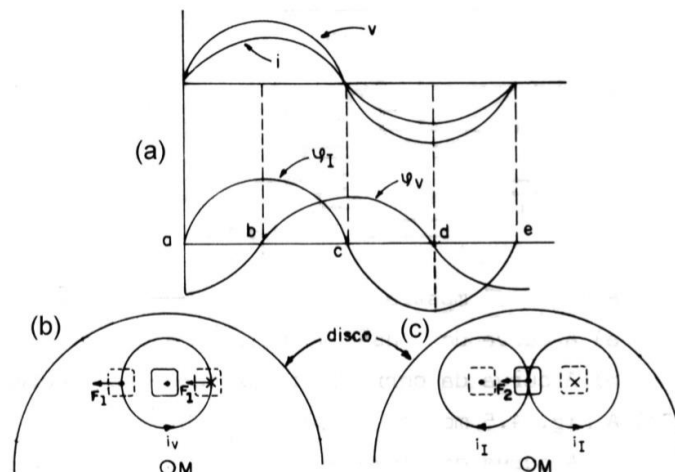


Figura 2.2 – Relação $V \times I$ (a); vista superior do disco do medidor (b e c)

Fonte: [10]

As Figuras 2.2(b) e 2.2(c) apresentam vistas superiores do disco do medidor. A bobina de potencial é representada por uma linha contínua circular, e as bobinas de corrente nas extremidades laterais, representadas por linhas tracejadas, pois estão situadas a baixo do disco. Os símbolos (-) e (x) correspondem a saída e entrada do fluxo em relação ao disco [10].

No intervalo a-b da Figura 2.2(a), o fluxo produzido pela bobina de potencial (ψ_v) está saindo e diminuindo em magnitude, produzindo uma corrente no disco. Esta corrente se opõe ao decréscimo do fluxo e pela regra da mão direita, faz o disco girar no sentido anti-horário, conforme Figura 2.2(b). Esta corrente interage com fluxo produzido pela bobina de corrente produzindo duas forças de mesmo sentido e magnitude (F_1) [10]. Uma força F_2 com o mesmo sentido de F_1 é produzida a partir de duas correntes que interagem com o fluxo ψ_v , uma de sentido anti-horário e outra de sentido horário, geradas pela elevação em magnitude do fluxo originado na bobina de corrente. Estas forças possuem o mesmo sentido para os trechos b-c, c-d e d-a, segundo [10], fazendo o disco girar.

O que determina a quantidade de energia elétrica consumida pela carga é a velocidade de rotação do disco, que é ajustada de tal modo que o número de rotações durante um intervalo de tempo seja proporcional à energia solicitada pela carga durante esse intervalo [3]. Essa velocidade resulta da interação dos conjugados atuantes no disco. Além do conjugado motor, existe também o conjugado resistente que tem o sentido de oposição ao conjugado motor, com o propósito de estabelecer uma condição de equilíbrio ao medidor [9]. A necessidade

deste conjugado reside no fato de que somente a aplicação de um conjugado de condução no disco, levaria o mesmo a uma velocidade proporcional à frequência de rede e não a uma velocidade proporcional à energia consumida. Este conjugado se dá através de um ímã permanente acoplado ao sistema, e, conforme se verifica na Figura 2.1. Este ímã tem a função ainda de evitar deslocamentos bruscos da parte móvel, ao partir da posição em repouso, como também voltar a ela, uma vez cessado o conjugado de condução [8].

Os medidores de energia elétrica tipo indução são submetidos a uma análise metrológica para que se possa definir a conveniência do instrumento para realizar medições em uma determinada faixa e com exatidão conhecidas, e, assim, obtendo-se um valor mensurado e estimando-se sua incerteza [3]. Isto requer que os medidores de energia sejam submetidos a inúmeros testes e condições de operação para posterior comercialização. Para isso, condições de aferição baseiam-se em normas específicas, havendo órgãos para fiscalização e certificação.

Porém, com o aumento das cargas lineares nos sistemas de energia elétrica, fenômenos como distorções harmônicas de corrente e tensão têm aumentado gradativamente, levantando o debate a respeito das possíveis interferências no atual sistema de medição. Muitos estudos foram realizados a respeito das consequências de uma energia de baixa qualidade no processo de medição para fins de faturamento. Diante disso, na seção 2.4 são expostos os principais resultados de pesquisas a respeito da interferência de fenômenos elétricos na medição do consumo de energia elétrica.

Devido ao baixo custo e a disponibilidade no mercado, o medidor eletromecânico representou por muito tempo a tecnologia de medição dominante no setor elétrico brasileiro. Todavia, outra tecnologia metrológica está cada vez mais ganhando espaço no mercado de medição de consumo de energia elétrica, os chamados medidores eletrônicos.

2.2.2 Medidor Digital de Energia Elétrica

Os medidores digitais de energia ativa já foram considerados inviáveis para a medição do consumo de energia elétrica em unidades consumidoras residenciais, devido ao seu elevado custo, uma vez que chegavam a equivaler o preço de um automóvel [8]. Entretanto, nos dias de hoje essa realidade mudou e, com o

aprimoramento da tecnologia, esses medidores digitais passaram a contar com novas funções para análises de perfis de consumo, coleta remota de dados, automação do processo de aquisição e tratamento de dados dos consumidores para fins de faturamento. Houve então uma redução do custo destes equipamentos, tornando-os mais acessíveis, chegando a custar no ano de 2015 entre R\$60 e R\$80 para UCs residenciais e entre R\$500 e R\$1.000, para industriais [11].

A tecnologia atual de medição eletrônica garante melhor exatidão que os medidores eletromecânicos, oferecendo informações detalhadas sobre o consumo. O medidor ainda pode ser monitorado a distância através de uma linha telefônica, ou mesmo via modem, dependendo do modelo [11]. A partir da aquisição destes dados, as concessionárias podem melhor dimensionar seu sistema de distribuição e o consumidor receber energia elétrica com maior qualidade e com menos interrupção. Contudo, essa nova tecnologia deve garantir confiabilidade e robustez ao medidor eletrônico. Para tanto, a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, publicou a Resolução Normativa nº502, de 7 de agosto de 2012, que regulamenta sistemas de medição de energia elétrica de unidades consumidoras do Grupo B, grupamento composto por UCs com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, caracterizado pela tarifa monômnia.

Diferentemente do medidor de energia elétrica tipo indução, o medidor eletrônico possui diversos métodos para garantir o registro do consumo de energia elétrica com maior precisão, dentre estes pode-se destacar o método a microprocessador e o método de integração discreta.

2.2.2.1 Medidor baseado em microprocessador

Uma das vantagens de um sistema baseado em amostragem digital é o fato de ser mais simples de calibrar, além disso, sua multiplicação digital é precisa e não causa problemas de linearidade, os quais poderiam ocorrer em medidores baseados na multiplicação analógica [12]. Esse tipo de sistema também permite medições com novos conceitos de potência para condições não senoidais, incluindo separação adequada de grandezas fundamentais e não fundamentais, ou de componentes ativas e não ativas [13].

Há pouco tempo, a aplicação da técnica de amostragem digital ainda apresentava problemas de velocidade e de precisão necessária para a conversão

analógico/digital (A/D) e problemas de velocidade de cálculo [12]. Entretanto, os avanços nessas técnicas têm sido significativos e rápidos, aumentando a precisão e a taxa de amostragem desse processo [12 e 14].

A medição de todas as harmônicas até uma determinada ordem exige que os princípios de amostragem de sinais periódicos sejam seguidos. Contudo, quando se trata de medição de potência ou energia ativa total, existem outros princípios que podem possibilitar o processo a partir de condições menos exigentes [14]. Em medição digital, a forma de onda contínua é representada por uma sucessão de valores discretos. Para converter forma de onda contínua de tensão em uma sucessão de amostras de tensão, é usado um sistema de amostragem e um conversor A/D [14]. Usualmente, a potência é medida multiplicando amostras digitalizadas de corrente e tensão.

Uma das vantagens de um sistema baseado em amostragem digital é o fato de ser mais simples de calibrar, além disso, sua multiplicação digital é precisa e não causa problemas de linearidade, os quais poderiam ocorrer em medidores baseados na multiplicação analógica [12 e 14].

2.2.2.2 Método de integração discreta

A integral para o cálculo da potência ativa pode ser aproximadamente obtida pela soma dos valores amostrados [12]:

$$P = \frac{1}{N} \sum_0^{N-1} u(n) \cdot i(n) \quad (2.2)$$

Onde $u(n)$ e $i(n)$ são amostras simultâneas de tensão e corrente igualmente espaçadas no tempo, e N é o número de amostras tomadas num período de tempo. As amostras não precisam ser tomadas sobre um período simples da forma de onda, mas podem ser estendidas sobre m períodos (sendo m um inteiro), possibilitando que o intervalo de amostragem seja aumentado [12 e 15].

As condições requeridas são [15]:

- A amostragem deve ocorrer sobre um número inteiro da forma de onda;
- A forma de onda deve ser estacionária no período medido.

Completa-se a capacidade de medição de watt-hora usando um clock, que é iniciado quando a função watt-hora é selecionada. Cada vez que dados são processados, o clock é lido, e o intervalo de tempo, desde a última atualização da

medição, é computado [12 e 15]. Essa diferença é multiplicada pela última atualização de potência, e o resultado, somado à medição watt-hora, é acumulado. Esse procedimento admite que a potência se mantenha essencialmente constante entre as atualizações [15].

O medidor digital de energia elétrica sob ensaio possui método de registro do consumo de energia através de microprocessador presente em sua placa lógica [16]. Em seguida são apresentadas as etapas desde a amostragem dos dados de tensão e corrente ao registro do consumo da energia elétrica consumida.

2.2.2.3 Princípio de funcionamento do medidor digital de energia ativa

Diferentemente dos medidores eletromecânicos, os digitais não possuem processos mecânicos, que se constitui no mecanismo primário da medição tradicional do consumo de energia elétrica [17].

Os medidores digitais possuem como método de medição, transdutores de corrente e de tensão, alimentados por sinais de entrada, conforme se pode observar na Figura 2.3, os componentes básicos necessários para fazer a medição da energia elétrica.

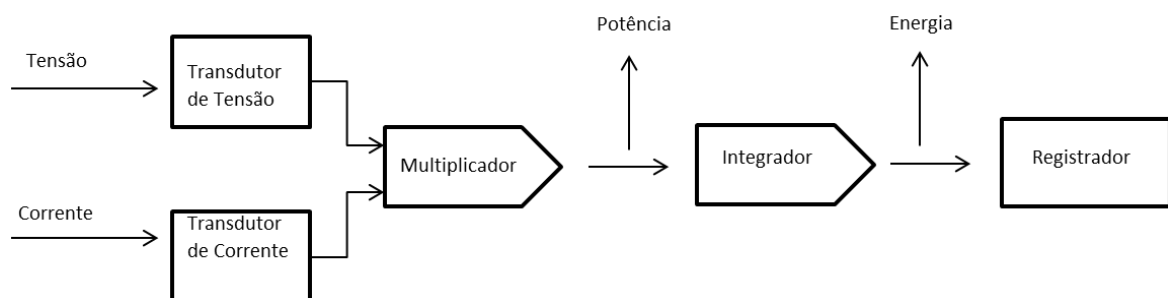


Figura 2.3 – Diagrama de blocos, funcionamento medidor digital.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os transdutores de tensão e corrente são responsáveis por receber os sinais de entrada do medidor e adequá-los de modo a serem multiplicados. A potência é obtida através do bloco multiplicador e a energia através do bloco integrador. Finalmente esse valor é armazenado e registrado no bloco registrador. Normalmente, a informação do instante de tempo a partir do período de amostragem é determinada pelo cruzamento do sinal de tensão no número zero [17].

Recentemente, um dos avanços mais significativos em eletrônica se deu no processador digital de sinal (Digital Signal Processor - DSP) [12]. Esse dispositivo de

chip simples é um microprocessador de alto desempenho, com hardware interno especialmente projetado para executar rapidamente multiplicações e operações de acumulação sucessivas. O DSP é adequado para implementar filtros digitais, Fast Fourier Transform (FFT), processamento de voz ou imagem ou algoritmos mais complexos de processamento de dados [12].

O uso de DSP possibilita grandes vantagens e benefícios para medições e sistemas de controle. Medições de corrente podem ser realizadas medindo a queda de tensão sobre um shunt resistivo, ou por meio de transdutor de corrente, ou por sensor de efeito Hall [12].

2.2.2.4 Erros e Incertezas de Medidores Digitais

As questões aqui apresentadas se restringem aos possíveis erros do medidor de energia elétrica, não sendo objetivo tratar dos erros de transformação de tensão ou corrente existente entre a rede elétrica e o medidor.

Seguem algumas fontes de possíveis erros na medição digital [15].

a. Erro no método de transformada de Fourier

Na aplicação de decomposição de Fourier, para que seja possível reconstruir um sinal periódico a partir de amostras de uma janela de amostragem, devem ser satisfeitas as seguintes condições (Teorema de Nyquist): a duração da janela deve ser exatamente igual a um número inteiro do período do sinal, a frequência de amostragem deve ser maior do que 2 vezes a máxima frequência contida no sinal. Isto significa que, se as condições acima forem satisfeitas, não haverá nenhum erro na aplicação da transformada discreta de Fourier (DFT) [15].

Quando a janela não for exatamente um múltiplo inteiro do período do sinal, ocorrem o erro de vazamento (leakage) e o erro de efeito cerca (picket fence effect) [15]. É possível que o medidor apresente – nos intervalos de tempo de amostragem fixos, independente da frequência fundamental do sistema de potência – uma eventual diferença entre o período considerado pelo medidor e o período da forma de onda do sinal de tensão do sistema elétrico. Caso aconteça essa diferença, o processo pode conter erros.

Quando o sinal revela uma frequência acima da máxima admissível pelas condições de Nyquist, ocorre o recobrimento (ou rebatimento) do espectro [12]. Um componente de frequência f maior do que $f_a/2$ é interpretado como tendo a frequência $f_a - f$, causando erro de medição de harmônica.

b. Erro no método de integração discreta

Clark e Stockton [18] mostraram que, se a tensão e a corrente não contiverem harmônicas superiores a um número inteiro n , é suficiente uma taxa de amostragem de cerca de 3 amostras por período. Esse raciocínio vale se o número de amostras em cada sequência N for superior a $2n$ [10]. O importante é tomar essas amostras (igualmente espaçadas) durante exatamente M períodos e certificar-se de que M e N não possuem fatores comuns [12]. Mostrou-se que isso é equivalente a tomar N amostras em um período se o sinal for estável. Também vale ressaltar a possibilidade de erros nas medições, caso o medidor tenha intervalos de tempo de amostragem fixos e se o período da forma de onda do sinal de tensão do sistema elétrico não for igual ao período considerado pelo medidor [12].

c. Erro de quantização

Na conversão A/D, o número finito de passos de amplitude causa um erro de quantização que depende do tamanho do passo de quantização Δ [12]. Para um conversor A/D de n -bit com faixa dinâmica D , o máximo erro poderia ser calculado como a amplitude de um passo [12]:

$$e_{\max} = \Delta = D/2^n \quad (2.3)$$

Esse erro introduz um ruído na medição. O conversor A/D é de 12 bits e esse ruído é de cerca de 0,02%. Trata-se de um nível pequeno, comparado às classes de exatidão dos medidores para faturamentos utilizados normalmente [12].

d. Erro de flutuação do instante de amostragem (“time-jitter”)

Se houver erro de tempo Δt no instante em que o sinal de corrente ou tensão é amostrado, surgirá um erro na amplitude da amostra [12]. Para um sinal com forma

de onda próxima a uma senóide, que estiver usando toda a faixa dinâmica do conversor A/D, o erro resultante da amostra é [12]:

$$e \approx \Delta t \frac{du}{dt} = D\omega \cdot \Delta t \cdot \cos(\omega \Delta t) \leq D\omega \cdot \Delta t \quad (2.4)$$

O time-jitter causa um ruído na amplitude que depende da derivada do sinal medido [12].

Estes são os principais tipos de erros que podem ocorrer durante a medição do consumo de energia elétrica pelos medidores digitais. Diversos são os fatores que podem levar a ocorrência dessas falhas durante o processo de medição. A exemplo, interferências provenientes de cargas não-lineares e/ou perturbações causadas por estas no sistema elétrico, alterando os padrões das ondas de corrente e tensão para os quais estes equipamentos foram projetados.

Por isso, a Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL, por meio dos Procedimentos de Distribuição (PRODIST), estabelece limites máximos para distorções harmônicas e desequilíbrios de tensão presentes no sistema elétrico, no intuito de manutenção de um padrão de qualidade energético.

2.3 Limites de Distorções Harmônicas e Desequilíbrio de Tensão - ANEEL

As distorções harmônicas presentes nas redes elétricas, de acordo com [12], são fenômenos associados a deformações na onda das tensões e nas correntes. Este é o caso da tecnologia eletrônica e de outras, a exemplo do emprego de equipamentos baseados na saturação magnética e arcos elétricos. Em vista dos impactos negativos relacionados com a operação sob tais condições, esta subseção tem por propósito apresentar as premissas necessárias a assegurar o controle desses distúrbios.

A Resolução Normativa nº 728/2016, estabelece procedimentos relativos à qualidade de energia elétrica. A Tabela 2.1 apresenta uma síntese da terminologia aplicável para a formulação do cálculo de valores de referência às distorções harmônicas.

Tabela 2.1 – Terminologia Harmônica.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica individual de tensão de ordem h	$DTT_h\%$
Distorção harmônica total de tensão	$DTT\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3	$DTT_p\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	$DTT_i\%$
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	$DTT_3\%$
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
Valor do indicador $DTT\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{95\%}$
Valor do indicador $DTT_p\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{p95\%}$
Valor do indicador $DTT_i\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{i95\%}$
Valor do indicador $DTT_3\%$ que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	$DTT_{395\%}$

Fonte: [20]

Os limites de distorções harmônicas totais são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
$DTT_{95\%}$	10,0%	8,0%	5,0%
$DTT_{p95\%}$	2,5%	2,0%	1,0%
$DTT_{i95\%}$	7,5%	6,0%	4,0%
$DTT_{395\%}$	6,5%	5,0%	3,0%

Fonte: [20]

O desequilíbrio de tensão é o fenômeno caracterizado por qualquer diferença verificada nas amplitudes entre as três tensões de fase de um determinado sistema trifásico, e/ou na defasagem elétrica de 120° entre as tensões de fase do mesmo sistema [20].

A Tabela 2.3 apresenta uma síntese da terminologia aplicável para a formulação do cálculo de valores de referência ao desequilíbrio de tensão.

Tabela 2.3 – Terminologia Desequilíbrio de Tensão.

IDENTIFICAÇÃO DA GRANDEZA	SÍMBOLO
Fator de desequilíbrio de tensão	FD
Magnitude da tensão eficaz de sequência negativa – frequência fundamental	V-
Magnitude da tensão eficaz de sequência positiva – frequência fundamental	V+
Magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental	V_{ab}, V_{bc} e V_{ca}
Valor do indicador FD% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	FD95%

Fonte: [20]

Os limites para o indicador de desequilíbrio de tensão são apresentados na Tabela 2,4 a seguir:

Tabela 2.4 – Limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão nominal	
	V_n ≤ 1,0 kV	1 kV < V_n < 230kV
FD95%	3,0%	2,0%

Fonte: [20]

Os limites correspondem ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

2.4 Interferência de Fenômenos Elétricos na Medição do Consumo de Energia Elétrica

Há, na literatura, referências que abordam possíveis erros em medições de potência ou de energia ativa e reativa de medidores analógicos e digitais em condições não senoidais. De acordo com [12], testes realizados com medidores monofásicos e trifásicos eletromecânicos e digitais usando formas de onda reais registradas indicaram erros de até 10%, inclusive em medição de potência ativa com medidor digital.

Outras pesquisas [3 e 6] demonstram a possibilidade de erros consideráveis na medição de potência ativa com um medidor eletromecânico, mas não com medidor digital. Além disso, constataram-se erros nas medições da potência reativa.

As propostas de [3 e 6], analisam a influência de harmônicos e desequilíbrios nos erros de medição de energia elétrica em medidores de energia tipo indução, classe de precisão 2%. O presente trabalho dedica-se a análise de medidor eletrônico monofásico, classe B com classe de precisão 1%. Entretanto, os resultados de [3 e 6] fornecem dados com perfil comparativo. Dentre os fenômenos elétricos, pode-se citar os que apresentaram maior influência para a elevação dos erros de medição, verificado em [3]: distorção harmônica de tensão e corrente, fator de potência e desequilíbrios de tensão [3, 6, 12 e 21]. Todos os ensaios submetidos a variações nos níveis de distorção harmônica de corrente e tensão apresentaram erros de medição, porém, se intensificavam com o aumento do nível de distorção harmônica da corrente [3]. Medidores bifásicos apresentaram maiores erros nas medições quando submetidos a níveis de distorção harmônica de corrente entre 24,7% a 46,8% [3]. Já nos medidores trifásicos, erros de medição foram percebidos com índices menores de distorção harmônica, a partir de 7%, sendo mais significativos e frequentes com o aumento do nível de distorção harmônica de corrente, de 18,4% e 46,8%. Considera-se erros significativos, erros acima de 2% (limite de precisão dos medidores sob ensaios), em relação ao modelo referência Yokogawa [3].

Observou-se que, com o aumento do nível de distorção harmônica da corrente, os erros dos medidores, tanto bifásicos quanto trifásicos, tendem a ser negativos, ou seja, os medidores de energia elétrica tipo indução registraram valores menores que aqueles registrados pelo padrão Yokogawa [3 e 6]. Nos ensaios em que os medidores bifásico e trifásico foram submetidos a distorções harmônicas, juntamente com desequilíbrios de tensão, verificou-se que os maiores erros também ocorreram onde os perfis de corrente apresentavam o maior índice de distorção harmônica [3]. Foi observada a proporcionalidade da elevação dos erros com o aumento dos desequilíbrios. Porém, esse padrão não se propagou em todos os pares perfis ensaiados em [3].

Os parâmetros que mais influenciaram na medição de energia elétrica ativa em [3, 6, 9 e 21] foram o nível de distorção harmônica da corrente e o ângulo de

defasagem entre a forma de onda de tensão e corrente, considerando-se os limites (5%) impostos aos sinais de tensões analisados.

Em [22], foram realizados testes em medidores do tipo indução trifásicos, em que foram utilizadas duas fontes geradoras de harmônicos para aplicação de formas de onda de tensões e correntes independentes. Foi concluído que, as medições são afetadas com a presença de harmônicos no sistema. Observou-se ainda que os erros de medição tornavam-se maiores quando as harmônicas de tensão e corrente estavam em fase. Isto implica em operação com distorções harmônicas e cargas resistivas, não contribuindo para uma análise rigorosa, não sendo uma equivalente das cargas típicas presentes nos sistemas elétricos.

A referência [23] teve o objetivo de analisar medidores watt-hora sob condições não senoidais. Realizou-se a modelagem dos medidores de indução monofásicos. Os modelos resultantes foram simulados em software específico e os resultados confrontados e validados através de resultados experimentais. Dos resultados, os autores verificaram que os erros de medição apresentaram desvios positivos, ou seja, registrando valores maiores do que o realmente consumido, para tensão de alimentação distorcida e cargas passivas e lineares. Porém, no caso de cargas indutivas e não lineares os erros tenderam a ser negativos, com o medidor watt-hora tipo indução registrando valores menores que os registrados pelo equipamento padrão para os ensaios.

Na referência [24] o autor realizou ensaios em medidores eletrônicos monofásico e trifásico com classe de exatidão 1%, distorcendo sistematicamente as formas de onda de tensão e corrente para frequências específicas, variação na DIHI e DVHI, na medição de cargas de iluminação. Percebeu-se um aumento dos erros à medida que a ordem dos harmônicos aumenta. O medidor trifásico saiu de sua classe de exatidão (1%) com injeção de 20% do 43º harmônico, já o medidor monofásico permaneceu dentro da classe de exatidão mesmo após injeção no 49º harmônico. Diante de cargas de iluminação que correspondem a 79 W, sob tensão nominal (120 V), não apresentando distorção harmônica total de tensão (THDv) e distorção harmônica total de corrente (THDi) de 116,86%. O medidor trifásico permaneceu dentro de sua classe de exatidão (erro = 0,046%), porém, o medidor monofásico apresentou erro superior a 4,5%. Percebe-se que apenas com a distorção harmônica da corrente o medidor monofásico apresentou erros

significativos, ressaltando a influência desse fenômeno para a medição do consumo elétrico.

Portanto, considerando-se as referências bibliográficas investigadas, ficou demonstrado que os medidores de energia elétrica, podem apresentar erros de medição consideráveis, quando estão operando sujeitos às formas de onda de correntes e tensões com distorções harmônicas, além de desequilíbrios de tensão, havendo a necessidade de uma análise experimental mais aprofundada do tema, justificando-se a proposta desta monografia. Com isso, uma rápida definição dos principais fenômenos influentes na medição do consumo elétrico, se faz necessário.

2.5 Desequilíbrio de Tensão

De acordo com [25], os desequilíbrios de tensão ou corrente são produzidos nos sistemas trifásicos quando existem diferenças significativas entre os valores eficazes das tensões presentes na instalação. Ocorrem quando as intensidades que circulam pelas três fases não são iguais, provocando uma corrente diferente de zero no condutor neutro [25]. O resultado desta circulação de corrente é o sobreaquecimento nos componentes da instalação. Geralmente, admite-se um desequilíbrio de corrente máximo de 10% e de tensão entre 2 e 3% [19].

O cálculo do nível do desequilíbrio de tensão - fator K e, em algumas literaturas, também definido como Fator de Desequilíbrio de Tensão (FDV), pode ser feito através de diferentes métodos. Porém, com o objetivo de se regulamentar o setor elétrico brasileiro e buscar a normalização dos indicadores de Qualidade da Energia Elétrica, a ANEEL encomendou estudos a grupos de trabalhos que, sugeriram propostas para o estabelecimento dos índices de conformidade relativos a desequilíbrios, bem como, padronização da nomenclatura e metodologia para o cálculo do fator [26]. Dentre todas as expressões encontradas, cujo resultado mais se aproxima daquela considerada ideal para o cálculo do fator de desequilíbrio, definida pelas componentes simétricas, corresponde à proposta oriunda da CIGRÉ (Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension) e utilizada pelas recomendações/normas GCOI/GCPS e NRS - 048 [27].

As expressões (2.5) e (2.6) apresentam o fator de desequilíbrio a partir de uma grandeza adimensional que correlaciona as tensões de linha [26].

$$FDV(\%)=100 \cdot \frac{\sqrt{1-\sqrt{3-6 \cdot \gamma}}}{\sqrt{1+\sqrt{3-6 \cdot \gamma}}} \quad (2.5)$$

Onde:

$$\gamma = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (2.6)$$

As perturbações nas formas de onda são deformações na forma de onda presentes nas instalações elétricas, o que resulta nas chamadas tensões e correntes harmônicas.

2.6 Distorções Harmônicas

Geralmente, ocorrem quedas de tensão em cada componente harmônica, resultando numa queda de tensão no barramento, bem como uma distorção na forma de onda senoidal. Essa distorção gerada na tensão e/ou corrente pode ser especificada e expressa matematicamente com base no estudo das ondas não senoidais periódicas, através da série de Fourier [3 e 12]. O teorema de Fourier afirma que qualquer função que seja periódica e não senoidal pode ser representada na forma de uma série, ou seja, uma soma de expressões composta por [12]:

- Um valor médio;
- Uma expressão senoidal/cossenoidal em frequência fundamental;
- Expressões senoidais/cossenoidais cujas frequências são múltiplos inteiros da fundamental (harmônicas).

Matematicamente, a série de Fourier é dada por:

$$Y(t) = Y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{\max,n} (n\omega t - \phi_n) \quad (2.7)$$

Onde,

Y_0 = Componente DC;

$Y_{\max,n}$ = amplitude máxima da componente harmônica n ;

ω = frequência angular;

ϕ_n = deslocamento de fase inicial da componente harmônica em $t = 0$.

A grande vantagem de se usar a série de Fourier para representar uma onda distorcida é a facilidade no estudo e análise de onda senoidal/cossenoidal. Assim, nessas condições, as técnicas usuais de cálculo de circuitos elétricos podem ser

aplicadas. A desvantagem é que o sistema deve ser analisado para cada frequência separadamente.

Dessa forma, um sinal de tensão ou corrente periódico não senoidal pode ser expresso sob as formas [12]:

$$v(\omega t) = V_0 + V_{\max} \sin(\omega t + \phi_1) + V_{2\max} \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots + V_{n\max} \sin(n\omega t + \phi_n) \quad (2.8)$$

$$i(\omega t) = I_0 + I_{\max} \sin(\omega t + \phi'_1) + I_{2\max} \sin(2\omega t + \phi'_2) + \dots + I_{n\max} \sin(n\omega t + \phi'_n) \quad (2.9)$$

A Figura 2.2, apresenta forma de onda distorcida de corrente, bem como suas componentes harmônicas. A onda distorcida nada mais é que a soma de todas as componentes harmônicas com a fundamental, como definido pela série de Fourier.

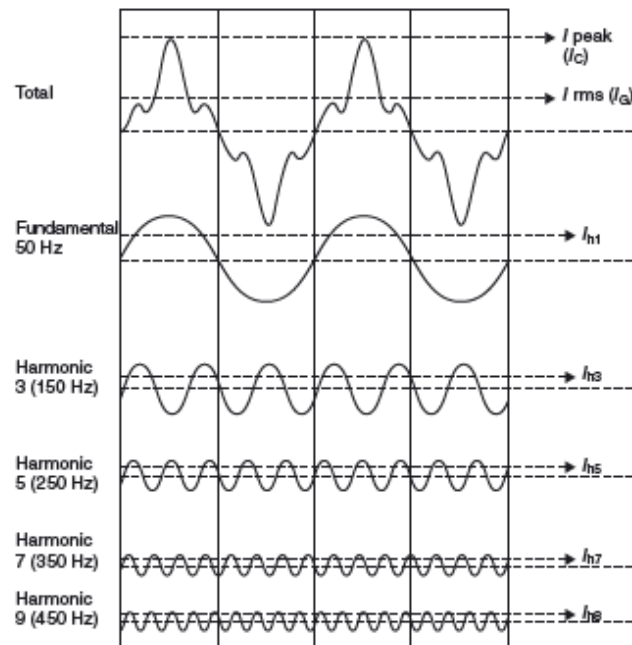


Figura 2.4 – Forma de onda de corrente distorcida e suas componentes harmônicas
Fonte: [28]

Conhecidos os valores de tensões ou correntes harmônicas presentes no sistema, pode-se utilizar procedimentos quantitativos para expressar a influência do conteúdo harmônico em uma forma de onda. Um dos mais utilizados é a “Distorção Harmônica Total”, que pode ser empregado tanto para sinais de tensões como para correntes, de acordo com as equações (2.10) e (2.11), respectivamente [12].

- Taxa de Distorção Harmônica Total de Tensão (THDv)

$$THDV = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h_{\max}} V_h^2}{V_1^2}} * 100\% \quad (2.10)$$

- Taxa de Distorção Harmônica Total de Corrente (THDI)

$$THDI = \sqrt{\frac{\sum_{h>1}^{h_{max}} I_h^2}{I_1^2}} * 100\% \quad (2.11)$$

Onde,

V_h - Valor eficaz da tensão de ordem h ;

I_h - Valor eficaz da corrente de ordem h ;

V_1 - Valor eficaz da tensão fundamental;

I_1 - Valor eficaz da corrente fundamental;

h - Ordem da componente harmônica.

Pode-se verificar, também, a influência de uma ordem harmônica individual, em relação a fundamental, utilizando a Distorção Harmônica Individual, conforme (2.12) e (2.13).

- Taxa de Distorção Harmônica Individual de Tensão (DVHI)

$$DVHI = \frac{V_h}{V_1} * 100\% \quad (2.12)$$

- Taxa de Distorção Harmônica Individual de Corrente (DIHI)

$$DIHI = \frac{I_h}{I_1} * 100\% \quad (2.13)$$

Usualmente, consideram-se harmônicos de até 50° ordem, em relação à fundamental. A partir desse valor são consideradas desprezíveis na análise de sistemas elétricos de distribuição de energia. Apesar de poderem causar interferências em dispositivos eletrônicos de baixa potência, não representam maiores problemas aos sistemas de potência de distribuição.

2.7 Fator de Potência

Segundo [20], no Brasil, a atual regulamentação estabelece o menor valor aceitável para fator de potência (FP) de 0,92 para unidades consumidoras do grupo A, grupamento composto por UC com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV, ou atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição em tensão secundária, caracterizado pela tarifa binômica [29]. É cobrado do consumidor o consumo da potência reativa que excede o valor permitido (0,425 VARh/Wh). Entre as 06:00 e 24:00 horas, a cobrança ocorre se a energia absorvida for indutiva e das 00:00 às 06:00 horas, se for capacitiva [11].

Pode-se definir fator de potência como a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) que um determinado dispositivo ou equipamento consome, como dado por (2.14), independentemente das formas como as ondas de tensão e corrente se apresentam, desde que sejam periódicas (período T) [11].

$$FP = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int v_i(t) \cdot i_i(t) \cdot dt}{V_{RMS} \cdot I_{RMS}} \quad (2.14)$$

Em um sistema elétrico onde as formas de ondas são senoidais, (2.14) pode ser escrita como o cosseno da diferença entre os ângulos de tensão e corrente [11]:

$$FP_{\text{seno}} = \cos \phi \quad (2.15)$$

Para um sistema onde apenas a tensão possui uma forma de onda senoidal, o FP é expresso por [11]:

$$FP_{V_{\text{seno}}} = \frac{I_1}{I_2} \cdot \cos \phi_1 \quad (2.16)$$

Onde,

I_1 é o valor eficaz da componente fundamental;

ϕ_1 é a defasagem entre a fundamental de corrente e a onda de tensão.

Neste caso, a potência ativa de entrada é dada pela média do produto da tensão (senoidal) por todas as componentes harmônicas da corrente (não senoidal). Esta média é nula para todas as harmônicas exceto para a fundamental, devendo-se ponderar tal produto pelo cosseno da defasagem entre a tensão e a primeira harmônica da corrente. Desta forma, o fator de potência é expresso como a relação entre o valor eficaz da componente fundamental da corrente e a corrente eficaz de entrada, multiplicada pelo cosseno da defasagem entre a tensão e a primeira harmônica da corrente [30]. A relação entre as correntes é chamada de fator de forma e o termo em cosseno é denominado de fator de deslocamento.

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + \sum_{N=2}^{\infty} I_n^2} \quad (2.17)$$

Em (2.10) e (2.11) tem-se THDi e THDv. Assim se obtém a relação entre o FP e a THD:

$$FP = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (2.18)$$

Através (2.18) percebe-se que para uma carga quanto menor seu FP, maior a THD da corrente. Logo, há normas internacionais que regulamentam os valores

máximos das harmônicas de corrente que um dispositivo ou equipamento pode injetar na rede de distribuição. Esse estudo teórico é utilizado para embasar os resultados obtidos durante os ensaios realizados no capítulo 4.

2.7.1 Desvantagens do baixo fator de potência (FP) e da alta distorção da corrente

Anteriormente, foi visto que a taxa de distorção harmônica é inversamente proporcional ao fator de potência, ou seja, dispositivos elétricos com baixo fator de potência resulta em elevada taxa de distorção harmônica na forma de onda da corrente. Sendo assim, a carga apresenta características não lineares e na ausência de dispositivos de filtragem das componentes harmônicas, principalmente de 3ª e 5ª ordem, apresentam nível eficaz de corrente tendendo ao valor da componente fundamental, resultando em uma alta interferência harmônica na corrente total. Segundo [27], as desvantagens de um sistema com baixo FP e conseqüentemente uma alta distorção, pode ser relacionada pelos itens a seguir:

- A potência ativa absorvida da rede é consideravelmente limitada pelo FP;
- Em termos de projeto, há necessidade de sobre dimensionamento das seções dos condutores devido à presença das harmônicas, bem como dos transformadores, além de aumentar as perdas (efeito pelicular). Isso reflete em altos custos;
- A componente de 3ª harmônica da corrente, em sistemas trifásicos com a presença do neutro, pode ser bem maior que o normal;
- Deformação da onda de tensão, devido ao pico da corrente, além da distorção da forma de onda, pode causar mau-funcionamento de outros equipamentos conectados à mesma rede;
- Ressonâncias no sistema de potência podem ser causadas por excitações das componentes harmônicas, levando a picos de tensão e de corrente, podendo danificar dispositivos conectados à linha.

2.8 Conclusões

Neste capítulo foram apresentados os objetivos que regem o desenvolvimento desta pesquisa, uma breve introdução evidenciou os efeitos causados no sistema

elétrico com a evolução tecnológica de dispositivos eletroeletrônicos, e a relevância de estudos a respeito da QEE para a manutenção de um padrão de qualidade para consumidores e concessionárias, no que diz respeito ao faturamento de energia elétrica. A produção de interferências elétricas devido a operações chaveadas de dispositivos presentes nos setores residenciais e indústrias levou ao questionamento do funcionamento dos equipamentos de medição sob condições não senoidais nos perfis de onda de tensão e corrente. Assim, foram apresentados os principais componentes e estrutura de funcionamento dos medidores de energia elétrica tipo digital e indução.

Também, foi apresentado resultados de pesquisas anteriores, onde verificou-se a forte influência da distorção harmônica da corrente nos erros de medições registradas por medidores do tipo digital e analógico. Além das distorções harmônicas da corrente, foi verificado que distorções harmônicas de tensão, bem como baixo fator de potência e desequilíbrio de tensão influenciam na produção de erros durante o registro do consumo elétrico pelos medidores de energia. Erros mais significativos ocorrem quando o equipamento de medição está submetido à taxas de distorção harmônica de corrente e desequilíbrio de tensão mais elevados.

Por fim, verificou-se os fenômenos elétricos, resultados de estudos laboratoriais, que contribui fortemente para a produção de erros em medições e foi realizado uma breve apresentação dos conceitos e definições de cada fenômeno evidenciado. Bem como as desvantagens de um sistema elétrico na presença elevada destes fenômenos.

3. MEDIÇÃO DE PARÂMETROS ELÉTRICOS DE INTERESSE

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada para a realização das investigações de adversidades nas medições do consumo de energia elétrica. No primeiro momento é estudado e desenvolvido, para os futuros ensaios, um sistema de obtenção do registro de consumo elétrico pelo medidor eletrônico. Esquemas de montagem, diagramas unifilar e de blocos também são apresentados. Em segundo momento testes com finalidade de calibração do sistema elaborado são realizados, a fim de se reduzir erros e fornecer resultados confiáveis.

Devido à limitação, no mercado local, para obtenção de dispositivos elétricos para o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados provenientes do medidor de energia tipo indução, esta pesquisa restringiu-se a análise apenas do medidor de energia elétrica tipo eletrônico. Para tal fim, utilizou-se o medidor digital de energia elétrica, ITRÓN, classe B, monofásico, tensão nominal 220 V, classe de precisão 1% e constante de calibração $K_h = 1 \text{ Wh/pulso}$ [16]. Este medidor foi gentilmente cedido pela Companhia Energética do Maranhão S.A. (CEMAR). Esse equipamento registra em seu display informação a cada 1000 Wh, para cargas de baixa potência, um elevado tempo de medição faz-se necessário para se verificar qualquer alteração no Display de Cristal Líquido (LCD).

O objetivo é efetuar ensaios investigativos verificando as influências de fenômenos que contribuem para baixa qualidade de energia, no processo de medição do consumo de energia elétrica. Faz-se uso de cargas de iluminação amplamente presentes nas residências e indústrias, a fim de simular condições semelhantes da rede elétrica em que os equipamentos de medição são submetidos. Cargas de iluminação, tais como lâmpadas incandescentes, fluorescentes e a Diodos Emissores de Luz (LED), compõem as cargas de ensaio. Esta última, por possuir características não-lineares e apresentar crescente parcela na composição da carga do sistema elétrico, se torna um elemento secundário para análise neste trabalho.

Para investigar as adversidades geradas pelas lâmpadas, foi usado o analisador de qualidade de energia Power Platform 4300 da DRANETZ-BMI [31]. Este equipamento foi ajustado para efetuar os registros das seguintes grandezas elétricas: potência ativa; potência reativa; potência aparente; fator de potência;

distorção harmônica de corrente; distorção harmônica de tensão e frequência. As formas de onda das correntes e tensões, bem como os espectros das distorções harmônicas da corrente e tensão podem ser visualizados pelo DranView 5, software desenvolvido pela fabricante do equipamento. Por fim, os valores registrados são comparados com as medições do medidor digital, e as formas de ondas e espectros harmônicos são apresentados e analisados no Capítulo 4 do presente trabalho monográfico.

Medições precisas do medidor digital, são necessárias para compor o registro de dados dos ensaios e, para isso, tornou-se necessário um sistema para coletar essas informações do medidor digital, uma vez que o mesmo não oferece acesso a sua massa de armazenamento.

Dessa forma, o estudo de um sistema para aquisição destes registros, no intuito de promover uma análise mais detalhada dos valores gerados durante o processo de medição, se torna fundamental.

3.1 Extração de Informação do Medidor Digital

Deve-se obter dados de medição do medidor digital, contudo, o mesmo não apresenta nenhuma interface disponibilizada pelo fabricante para leitura de dados. O medidor registra a energia a cada 1000 Wh e, como algumas cargas possuem demanda muito abaixo desse valor, seriam necessárias várias horas de registro para que se pudesse verificar alguma alteração no LCD do medidor. Apesar da medição contar com o analisador de qualidade de energia, sem os dados do medidor não há possibilidade de comparação entre os resultados dos dois equipamentos.

Diante do exposto, uma possível solução é a utilização da constante de calibração do medidor. A maioria dos medidores digitais possui um sistema que gera pulsos com uma determinada frequência, a qual é determinada pela constante de calibração (Kh). O medidor utilizado nesta pesquisa possui constante de calibração $K_h = 1 \text{ Wh/pulso}$, ou seja, a cada 1 Wh registrado, é gerado um pulso e este pulso é enviado a um LED, que fornece um sinal luminoso. A partir dos dados captados pelos transdutores de corrente e tensão do medidor digital, a informação da energia consumida em tempo real é gerada pelo bloco integrador e armazenada no registrador do equipamento. Quando registrado 1 Wh completo de consumo, um

sinal enviado a um LED gera uma informação luminosa de acesso externo, tendo como finalidade fornecer um método para sua aferição em ensaios laboratoriais.

Com a abordagem dessa interface, os pulsos luminosos, gerados pelo LED, são convertidos em informações da medição do equipamento e, em seguida, podem ser processados e levados à análise comparativa juntamente com os dados do analisador de qualidade de energia.

A utilização de um sensor para a captação desses pulsos luminosos se faz necessário, e este é instalado diretamente sobre a capa de proteção do medidor, exatamente onde se encontra o LED. Essa informação é traduzida em níveis digitais por um microcontrolador Arduíno Uno Rev 3, que é responsável por registrar os eventos ocorridos durante cada medição. Tais eventos podem ser lidos como valores numéricos que representam os níveis de iluminação oriundos do medidor digital de energia elétrica. Para preservar as informações adquiridas do medidor digital, dos efeitos de iluminação externa, adaptou-se a capa de proteção do medidor digital, com materiais de baixo custo. Esta proteção refere-se a uma capa de isolamento luminosa envolvendo toda a estrutura do medidor digital, provendo maior redução de ruídos captados por um resistor sensível a luz (LDR), reduzindo consideravelmente erros no sistema de coleta de dados do medidor digital.

A leitura dos dados se faz por meio do software Excel da Microsoft Office, possibilitando de forma prática a alimentação de dados para geração de gráficos para análise, e funções pré-programadas para contagem dos pulsos equivalentes ao consumo total de energia elétrica para cada medição realizada. Em seguida o circuito de coleta de dados do medidor digital de energia elétrica é apresentado, detalhando-se cada etapa do processo, bem como especificações e parametrização dos elementos utilizados.

3.2 Desenvolvimento do Circuito de Coleta de Dados do Medidor Digital

Esta etapa consistiu em criar um circuito que pudesse obter as informações geradas pela constante de calibração do medidor e transforma-las em gráficos analíticos. Para isso, utilizou-se um sensor LDR (do inglês Light Dependent Resistor). Este dispositivo funciona como um varistor, mas, a sua variação de resistência ocorre pela sensibilidade à luz, ou seja, quanto maior for a incidência luminosa nesse componente, menor a sua resistência.

O LDR é um transdutor fotoresistivo, elemento eletrônico composto por um material semiconductor, em geral sais, que fornecem uma alteração de resistência em resposta a uma alteração da intensidade luminosa [32]. A energia luminosa desloca elétrons da banda de valência para a de condução, aumentando o número destes, diminuindo a resistência [32]. Os usos mais comuns do LDR são em relés fotoelétricos e alarmes [33].

Utilizando o LDR no circuito simples de um divisor de tensão, foi desenvolvido um sistema que converte uma informação em forma luminosa para grandezas elétricas. Pode-se observar o esquema elétrico nas Figuras 3.1 e 3.2. A entrada A0, Figura 3.1, retorna a tensão resultante do divisor de tensão, com base no atual valor do LDR.

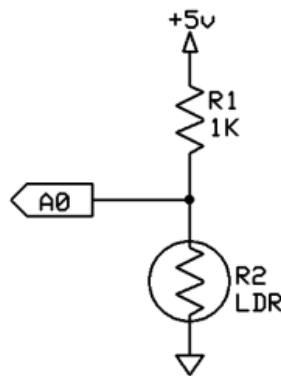


Figura 3.1 – Conversor.
Fonte: [32]

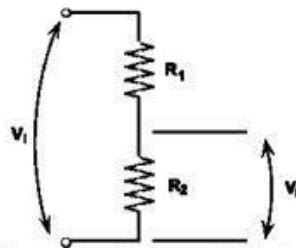


Figura 3.2 – Divisor de tensão com uma série de duas resistências.
Fonte: [32]

Para processar essas informações, utilizou-se um microcontrolador, parametrizado para realizar a coleta dos dados fornecidos pelos pulsos luminosos no LED do medidor digital. Diante disso, como não é necessário um alto poder de processamento, utilizou-se o Arduíno UNO REV3, com um microcontrolador ATMEGA328P-PU da ATMEL, para processar os dados coletados pelo circuito de aquisição do LDR. O esquema da montagem é mostrado na Figura 3.3.

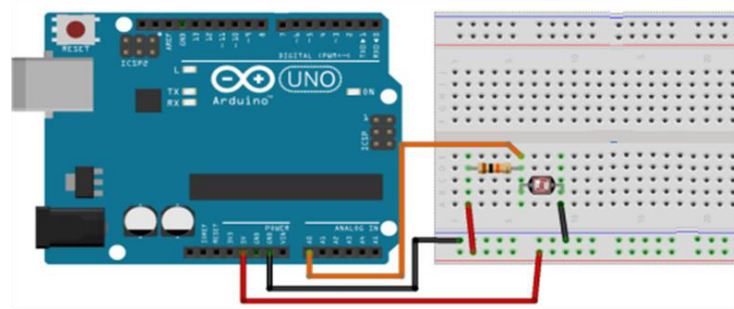


Figura 3.3 – Esquema de ligação do circuito de coleta de dados.
Fonte: Adaptado pelo autor.

Uma resistência de 10 kOhms limita a faixa de tensão na porta de dados do microcontrolador, que interpreta a informação sobre a quantidade de iluminação por um intervalo de 0 a 1023. Quanto mais próximo de 1023, menor é o nível de iluminação sobre o LDR (presente entre o conjunto caixa de proteção e medidor digital de energia elétrica). Com isso, é gerado por um código em C, na plataforma de desenvolvimento disponibilizada pela fabricante do microcontrolador, uma leitura dos dados a cada 190 ms a respeito do ambiente em que está instalado o LDR, o qual se encontra entre o involucrio de isolamento contra incidência luminosa externa e sobre o LED do medidor digital. A cada pulso, é gerada uma variação nos níveis do sinal processado pelo microcontrolador.

O registro dos dados adquiridos pelo sensor se faz por meio do próprio software desenvolvido pela fabricante do microcontrolador. Com o auxílio da ferramenta Monitor Serial, pode-se extrair todos os eventos durante os ensaios e inclui-las no Excel, a fim de se gerar um gráfico de eventos, com o auxílio da função “CONT.SE”. Isolou-se os eventos que não superam em valor 92,28% do nível máximo (1023), correspondente a ausência de luz. Em outras palavras, eventos registrados com nível inferior a 950 (de 1023), é considerado um consumo de 1 Wh de energia elétrica. A função “CONT.SE” retorna o consumo total em Wh para cada medição realizada.

Na Figura 3.4, é apresentada a instalação do sensor LDR sobre o medidor de energia elétrica sem o involucrio de proteção contra iluminação proveniente de fontes externas.



Figura 3.4 – Posição do sensor LDR no medidor.
Fonte: Elaborado pelo autor.

No entanto, ainda há uma forte influência da luz ambiente sobre os resultados coletados pelo microcontrolador, o que compromete a análise na medição do equipamento digital. Assim, faz-se necessário um estudo sobre a influência da iluminação ambiente na coleta de dados do conversor A/D.

3.3 Estudo da Influência da Iluminação Ambiente Sobre a Coleta de Dados pelo Microcontrolador

Após o estudo de um sistema para a obtenção de informações detalhadas a respeito dos ensaios efetuados pelo medidor digital de energia elétrica, verificou-se, se o circuito projetado fornecia informações confiáveis. Para isso, realizou-se ensaios com o circuito LDR instalado no medidor digital com e sem iluminação ambiente.

O esquema de montagem utilizado com o medidor digital e a bancada de medição são apresentados nas Figuras 3.5 e 3.6, respectivamente.

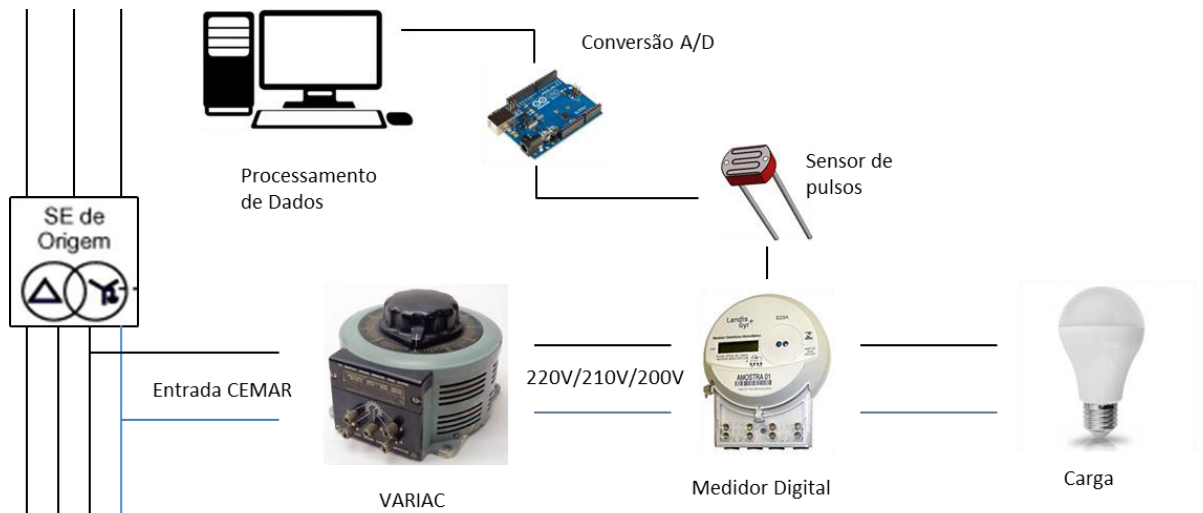


Figura 3.5 – Esquema de montagem do circuito de coleta.
Fonte: Elaborada pelo autor.

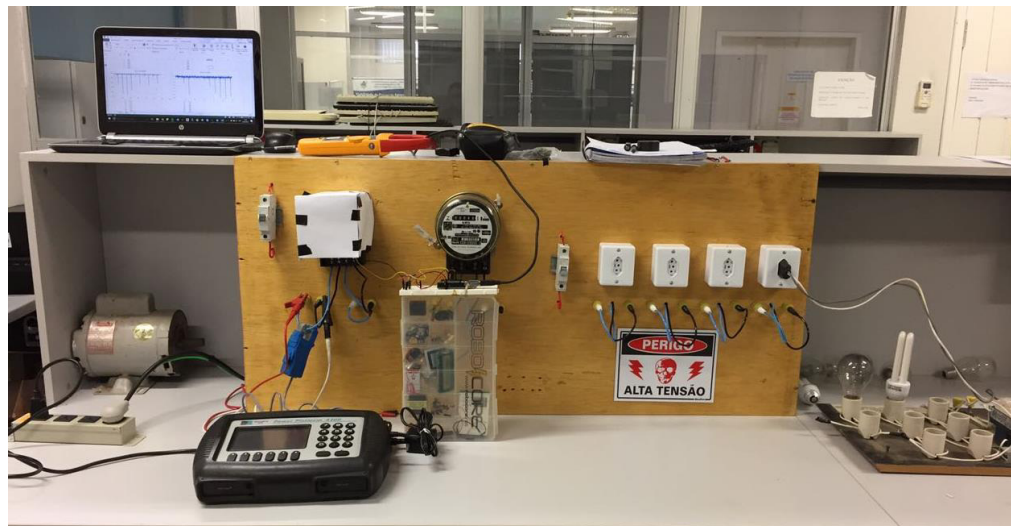


Figura 3.6 – Bancada de Medição.
Fonte: Elaborada pelo autor.

A carga utilizada para esta medição foi uma lâmpada fluorescente de 22 W e uma lâmpada incandescente de 200 W, de determinados fabricantes. A demanda da carga e a corrente de circuito, também podem ser vistas na Figura 3.8.



Figura 3.7 – Detalhes e resultado parcial do teste de calibração.
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3.1 Coleta de Dados pelo Microcontrolador Sob Iluminação Ambiente

Sob iluminação ambiente, executou-se a coleta de dados do circuito LDR durante a medição de 10 Wh com as cargas descritas. Os resultados fornecidos pelo microcontrolador foram transformados em forma gráfica para melhor visualização e análise do sinal gerado. O resultado obtido ao término da medição, Figura 3.9, com a presença de luz foi a seguinte:

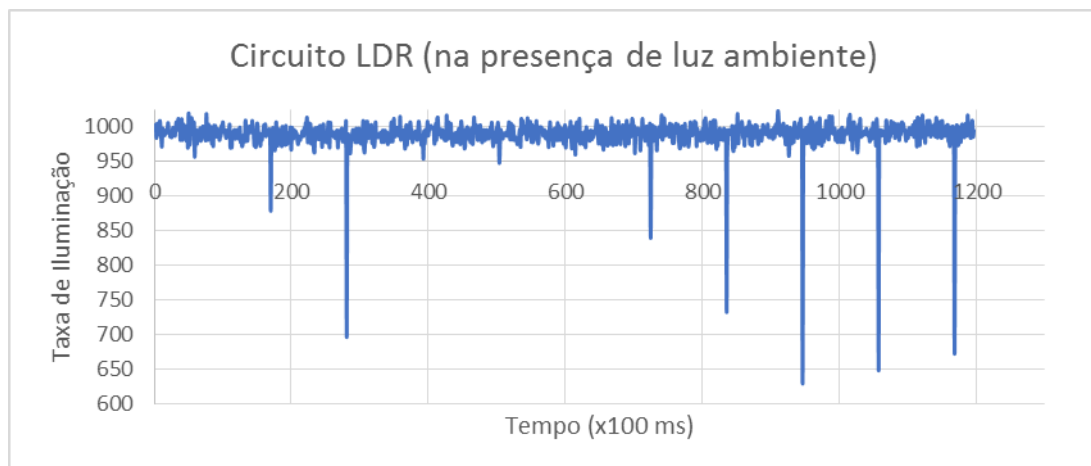


Figura 3.8 – Resultado teste medidor sob iluminação ambiente.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se notar que, dos 10 pulsos gerados durante a medição, apenas 7 podem ser visualizados, o que comprova que a exposição do sensor a luz ambiente,

sem nenhum tipo de redução de luminosidade, pode comprometer o resultado gerado pelo circuito de coleta de dados instalado sobre o medidor digital.

3.3.2 Coleta de Dados pelo Microcontrolador com redução de iluminação incidente

Com uma capa de proteção envolvendo o medidor digital e o sensor LDR, verificou-se os dados fornecidos pelo sensor, como executado na etapa anterior, numa medição de 10 Wh com a mesma carga. O resultado pode ser visto na Figura 3.10.



Figura 3.9 – Resultado teste medidor sem iluminação ambiente.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode-se visualizar os 10 pulsos de forma mais clara, verificando a periodicidade de cada pulso, já que se trata de uma carga linear. Portanto, uma redução do nível de iluminação incidente sobre o sensor de captação de pulsos luminosos se faz necessária para a obtenção de resultados a níveis aceitáveis. Percebe-se que, devido à presença de iluminação externa, as variações registradas pelo sensor LDR se encontram instáveis quando não há pulso de luz gerado pelo medidor. Porém, esse problema é resolvido quando o circuito coleta dados na ausência de iluminação ambiente, não apresentando elevadas variações nos níveis de iluminação, verificando-se os momentos onde há pulsos provenientes do medidor digital de forma mais clara.

Desta forma, conclui-se que, para o registro de informações a partir da medição do medidor digital, deve-se utilizar o circuito LDR, nas condições mínimas de iluminação, já que nesse ambiente os resultados para análise comparativa com o analisador de qualidade de energia são considerados mais confiáveis e dentro de

uma taxa de erro aceitável a fim de promover resultados com uma maior confiabilidade.

Concluído o desenvolvimento do sistema de extração de dados provenientes do medidor digital de energia elétrica, realiza-se uma breve explanação a respeito do tipo de carga utilizada para realizar simulações em laboratório. Esta escolha se faz necessária devido a fácil disponibilidade e a grande presença destes dispositivos elétricos em residências.

As lâmpadas são as principais fontes de iluminação artificial, representando uma boa parcela da carga elétrica. Com o advento das lâmpadas LED pôde-se otimizar o consumo elétrico em relação ao rendimento luminoso. Entretanto, os circuitos eletrônicos que as operam, como mostrado na Figura 3.10, promovem comportamentos diferentes das suas antecessoras para o sistema de distribuição de energia elétrica. Portanto, é interessante investiga-se sob o ponto de vista de eficiência e adversidades.

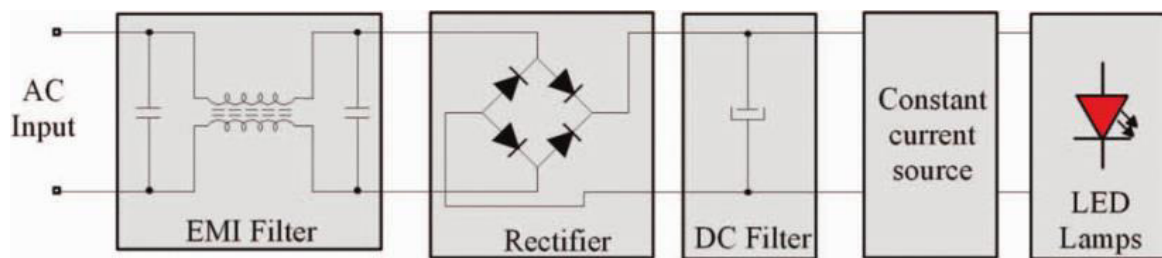


Figura 3.10 – Esquema simplificado da topologia de uma lâmpada LED
Fonte: [34]

3.4 Análise dos Harmônicos em lâmpadas de LED

Em [32], foi realizado um estudo pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), no qual apresentou uma análise detalhada dos harmônicos em lâmpadas de LED comercializadas em território nacional, incluindo os principais fabricantes destes dispositivos. São utilizadas as conclusões desse estudo como resultados esperados e justificativa para os resultados obtidos nos ensaios realizados no Capítulo 4.

3.4.1 Taxa de distorção harmônica em lâmpadas de LED

O estudo realizado com lâmpadas de LED, de diversos fabricantes e com variadas potências, discriminadas na Tabela 3.1, também mostrou a taxa de

distorção harmônica gerada por cada dispositivo durante os ensaios, nos níveis de tensão de 127 V e 220 V.

Tabela 3.1 – Especificações técnicas.

Fabricante	Potência	FP
A	6 W	$\geq 0,5$
	8 W	$\geq 0,8$
	16 W	$\geq 0,5$
B	6 W	$\geq 0,8$
	7,5 W	$\geq 0,8$
	13,5 W	$\geq 0,8$
A	6 W	$\geq 0,5$
	9 W	$\geq 0,7$
	12 W	$\geq 0,7$

Fonte: [32]

Para lâmpadas de 6 W, os resultados estão informados na Tabela 3.2, do fator de potência (FP) e THD para as duas faixas de tensão utilizadas no Brasil.

Tabela 3.2 – Comparativo entre FP e THD: lâmpadas LED 6W.

U (V)	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
	FP	THDi (%)	FP	THDi (%)	FP	THDi (%)
127	-0,6302	105,4351	-0,8705	16,9086	-0,6000	110,2762
220	-0,4807	162,1527	-0,8655	20,1430	-0,4495	171,7018

Fonte: [32]

Os dados comparativos para lâmpadas LED dentro da faixa de potência de 8W a 9W, são apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Comparativo entre FP e THD: lâmpadas LED 8W – 9W.

U (V)	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
	FP	THDi (%)	FP	THDi (%)	FP	THDi (%)
127	-0,9710	24,5962	-0,9739	21,7527	-0,9676	28,8494
220	-0,9708	24,6737	-0,9804	18,3000	-0,9763	22,9867

Fonte: [32]

Para as lâmpadas entre 12W a 16W os resultados são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Comparativo entre FP e THD: lâmpadas LED 12W – 16W.

U (V)	Fabricante A		Fabricante B		Fabricante C	
	FP	THDi (%)	FP	THDi (%)	FP	THDi (%)
127	-0,6369	97,3927	-0,9844	16,3569	-0,9830	17,1895
220	-0,4709	160,1412	-0,9756	21,3092	-0,9791	19,4321

Fonte: [32]

Observa-se que a taxa de distorção harmônica da corrente é mais acentuada quando o fator de potência do equipamento é menor. Estes resultados reafirmam o que se propôs no subitem 2.7 na Equação 2.18, onde se mostrou a inversão de proporcionalidade entre FP e THD. Como informado anteriormente, a taxa de distorção harmônica é uma das principais influências para a geração de erros no processo de medição elétrica. Com base no estudo realizado em [32] pode-se afirmar que o fator de potência em condições inferiores aos padrões estabelecidos pode interferir na medição de energia elétrica. Devido à elevação da distorção harmônica de corrente, gerando formas de onda de corrente não senoidais, resultando em diferenças nas amostragens dos valores de corrente, como no caso do medidor digital, ou alterando a magnitude do fluxo gerado pela bobina de corrente nos medidores analógicos. Ambos os casos resultam em erros de medição.

3.5 Ensaios em Laboratório

Os ensaios investigativos seguem uma sequência lógica para todo o experimento. Analisa-se para cada experimento, ensaios em condições de subtensão (-10% do valor nominal), ensaios nas condições nominais (220 V) de tensão e ensaios em condições de sobretensão (+5% do valor nominal). O esquema de medição é apresentado na Figura 3.5, variando-se apenas as cargas informadas na Tabela 3.5, por experimento, e tensões por ensaios.

O diagrama unifilar para cada experimento é apresentado na Figura 3.11. Variando a potências das combinações de cargas, por experimento, e a tensão de suprimento, por ensaio.

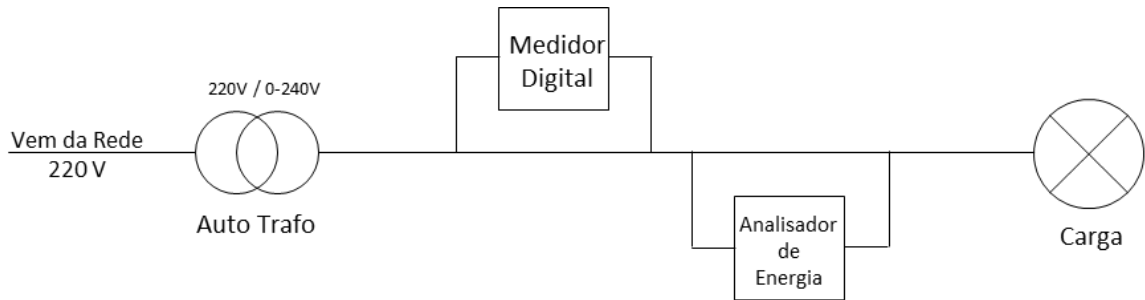


Figura 3.11 – Diagrama unifilar geral do sistema de investigação.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Dividiu-se a análise experimental deste trabalho, como informado na Tabela 3.6, em cinco experimentos. Cada um representa uma combinação de cargas, que são submetidas a três condições de suprimento (subtensão, tensão nominal e sobretensão), correspondendo a -10% da tensão nominal, 100% da tensão nominal e +5% da tensão nominal das lâmpadas, caracterizando cada um dos três ensaios. O ensaio na condição de sobretensão excepcionalmente para as cargas exclusivamente LED não foi executado, no intuito de preservação técnica do dispositivo, realizando-se dois ensaios de subtensão a -5% e -10% da tensão nominal da carga, além do ensaio na condição de tensão nominal.

Tabela 3.5 – Especificações técnicas das cargas

Fabricante	Tipo	Potência	Fator de Potência
A	LED	6W	$\geq 0,5$
B	Florescente	22W	$\geq 0,5$
C	Incandescente	200W	1

Tabela 3.6 – Descrição do aglomerado de cargas.

Experimento	Ensaio	Tensão (V)	Carga		Potência (W)	Duração (min)
			Qtd	Fabricante		
1	1	198	2	A	12	60
	2	209				
	3	220				
2	1	220	6	B	132	60
	2	231				
	3	198				
3	1	220	2	A	56	60
	2	231		B		
	3	198				
4	1	220	2	A	212	60
	2	231		C		
	3	198				
5	1	220	2	B	244	60
	2	231		C		
	3	198				

Em cada ensaio padronizou-se o período de 60 minutos, devendo antes de cada ensaio manter as cargas supridas por um período mínimo de 20 minutos, a fim de se obter registros das cargas nas mesmas condições técnicas.

Parametrizou-se o analisador de qualidade de energia Power Platform 4300 da DRANETZ-BMI, a fim de se obter, além do consumo energético, os resultados das principais grandezas elétricas que interferem na medição de energia, tais com distorção harmônica da tensão e corrente, fator de potência, também, potência ativa, potência reativa, potência aparente e demanda. Utilizando um software próprio, DranView 5, pode-se obter gráficos de potências, formas de onda de tensão e corrente, espectro harmônico da distorção de tensão e corrente, bem como relatórios para análise de dados. Estes são apresentados no Capítulo 4, junto com os resultados e as análises das investigações.

3.6 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada para a realização dos ensaios investigativos. Primeiramente, foi elaborado um sistema com a finalidade de se obter o consumo elétrico registrado pelos medidores. Devido à necessidade de sensores para a elaboração deste sistema, não foi possível a utilização do medidor analógico, pois não há disponibilidade de sensores adequados no mercado local. Limitando a pesquisa apenas ao medidor digital.

O sistema desenvolvido atua como um conversor A/D, utilizando um fotoresistor LDR para adquirir o consumo elétrico do medidor digital. Ensaios para verificar a influência da iluminação ambiente sob o fotoresistor foram realizados, comprovando a elevada influência da iluminação ambiente na produção de erros de medição por parte do sistema de aquisição de consumo elétrico. Assim, uma capa de proteção com materiais de baixo custo foi projetada a fim de reduzir a iluminação ambiente incidente sobre o LDR.

Elaborado o sistema de coleta de dados do medidor, foram selecionadas lâmpadas para compor as cargas dos ensaios investigativos e, apresentou-se um estudo a respeito das influências dos harmônicos nas lâmpadas de LED, tais resultados deste estudo são utilizados como resultados esperados no Capítulo 4.

Por fim, apresentou-se o diagrama unifilar do sistema de investigação, as especificações das cargas sob ensaios e a descrição da sequência utilizada para a execução dos ensaios investigativos, cujos resultados são apresentados e analisados no Capítulo a seguir.

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISES

No capítulo anterior apresentou-se o arranjo proposto para os ensaios, considerando-se a aquisição automática de todos os dados de interesse. Este capítulo apresenta os ensaios realizados com alguns modelos de lâmpadas submetidos a variados níveis de tensão, com objetivo de acompanhar o comportamento dos harmônicos gerados, fator de potência, potências ativas e reativas e as variações de distorção harmônica de tensão e corrente, na influência da medição elétrica pelo medidor digital. Também, é dedicado à apresentação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios do medidor digital de energia elétrica.

4.1 Ensaios Laboratoriais

Com os avanços tecnológicos na área de matérias elétricos, pode-se contar com uma gama de equipamentos com elevado rendimento e ao mesmo tempo com baixo consumo elétrico, reduzindo o consumo de diversas UC, seja residencial ou industrial. Pode-se citar como uma dessas evoluções, a lâmpada LED, conhecida também como uma fonte de iluminação fria. Este tipo de dispositivo apresenta uma diferença no consumo de energia em relação as lâmpadas incandescentes, fluorescentes, vapor de sódio, vapor de mercúrio, entre outras. Este tipo de lâmpada vem substituindo as outras, por isso, devido à sua grande presença nas residências, comércios e indústrias, foram utilizadas nos ensaios laboratoriais, cujos resultados são apresentados neste capítulo.

Todos os tipos de lâmpadas usadas nos ensaios, bem como suas especificações técnicas já foram apresentadas no Capítulo 3, mas são reproduzidas na Tabela 4.1 para fins de informação.

Tabela 4.1 – Especificações técnicas das lâmpadas analisadas.

Fabricante	Tipo	Potência	Fator de Potência
A	LED	6W	$\geq 0,5$
B	Fluorescente	22W	$\geq 0,5$
C	Incandescente	200W	1

Inicialmente, três ensaios com duas lâmpadas de LED de 6W cada, foram realizados variando a tensão de entrada em 220V, 209V e 198V, durante uma hora.

Nos demais ensaios, são estabelecidas como tensão de entrada, a tensão nominal ($V_{in} = 220V$), -10% e +5% deste valor.

Para garantir os níveis da tensão de entrada V_{in} , foi utilizado um Variac, suprido pela tensão da rede de distribuição e fornece níveis de tensões entre 0V a 240V em sua saída. Uma descrição sucinta dos ensaios é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Parâmetros dos ensaios.

Experimento	Tensão de Entrada (V_{in})	Carga
1	198V / 209V / 220V	12 W (2x lamp. Fabr. A)
2	220V / 231V / 198V	132 W (6x Fabr. B)
3	220V / 231V / 198V	56 W (2x lamp. Fabr.A + 2x lamp. Fabr. B)
4	220V / 231V / 198V	132 W (2x lamp. Fabr. A + 2x lamp. Fabr. C)
5	220V / 231V / 198V	164 W (2x lamp.Fabr. B + 2x lamp. Fabr. C)

Para realizar os ensaios foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Analisador de qualidade de energia Power Platform 4300 da empresa Dranetz BMI;
- Alicates amperímetro e voltímetro True RMS FLUKE 336, com as seguintes especificações:
 - Faixa de medição: 0,1 a 600 A;
 - Faixa de medição: 1 a 600 V;
 - Faixa de frequência: 5 a 500 Hz;
- Cabos de conexão com 0,5 m de extensão e plugue banana de 4 mm sem isolamento, cabo revestido de EPR;
- Suporte de lâmpada com soquete de cerâmica para base E27;
- Bancada de testes com fornecimento de energia em 220 V (Fase–Terra);
- Software de análise DranView 5 da empresa Dranetz BMI;
- Autotrafo Varivolt da empresa STP Soc. Técnica Paulista Ltda, entrada 220 V, saída 0-240 V, corrente max. 6,3^a e KVA max. 1,5;
- Medidor digital de energia elétrica ITRÓN, classe B, monofásico, classe de precisão 1%, para circuitos de 220 V, e constante de calibração $K_h = 1$ Wh/pulso;

- Arduíno Uno Ver 3, com sensor de luminosidade (LDR), resistor e jumpers de conexão;
- Notebook para leitura do software Arduíno;
- Tempo de estabilização da lâmpada: 20 minutos;
- Tempo de medição por Experimento: 60 minutos;
- Intervalo de aquisição de dados pelo Analisador: 60 segundos;
- Intervalo de aquisição de dados pelo Arduíno: 190 milissegundos.

Para a obtenção das formas de ondas da tensão e corrente, bem como os dados das potências e espectros de harmônicos de corrente e tensão, utilizou-se os dados gravados no software de análise DranView 5, sendo apresentados e discutidos com mais detalhes nas seções 4.2, 4.3 e 4.4.

4.2 Resultados Obtidos

4.2.1 Experimento 1

As tensões de entrada foram variadas entre: 198 V, 209 V e 220 V para cada ensaio. Evitou-se sobretensões na carga em LED, preservando a integridade técnica destes dispositivos. Antes de cada ensaio o Variac foi mantido suprindo as cargas por um período mínimo de 20 minutos, garantindo que todos os ensaios fossem feitos com as cargas sob as mesmas condições técnicas.

As especificações do suprimento de tensão e carga para cada ensaio do experimento 1 são apresentadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Especificações de suprimento e carga Experimento 1.

Especificações	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Tensão de entrada (V_{in})	198 V	209	220
Frequência	60 Hz		
Carga	Lâmpada LED		
QTD	2		
Tensão de entrada	100 - 240 V		
Frequência	50 - 60 Hz		
FP	≥ 0.5		
Potência Total	12 W		

Os dados obtidos no Experimento 1 pelo analisador de qualidade de energia são apresentados na Tabela 4.4. Os histogramas do espectro harmônico de corrente e tensão obtidos são apresentados na Figura 4.2 e Figura 4.3, respectivamente.

Tabela 4.4 – Resultados do Experimento 1.

Grandezas	Ensaio 1 (198 V)	Ensaio 2 (209 V)	Ensaio 3 (220 V)
P_W	9,90 W	10,15 W	10,70 W
S_{VA}	21,35 VA	21,73 VA	22,25 VA
Q_{Var}	-18,916 Var	-19,215 VAR	-19,639 VAR
Demanda	10,73 W	10,73 W	10,73 W
Energia	9,90 Wh	10,15 Wh	10,70 Wh
FP	-0.4637	-0.467	-0.479
V_{thd}	2,49%	2,34%	2,0472%
I_{thd}	100,13%	99,04%	91,03%

As formas de ondas da corrente e tensão podem ser visualizadas na Figura 4.1.

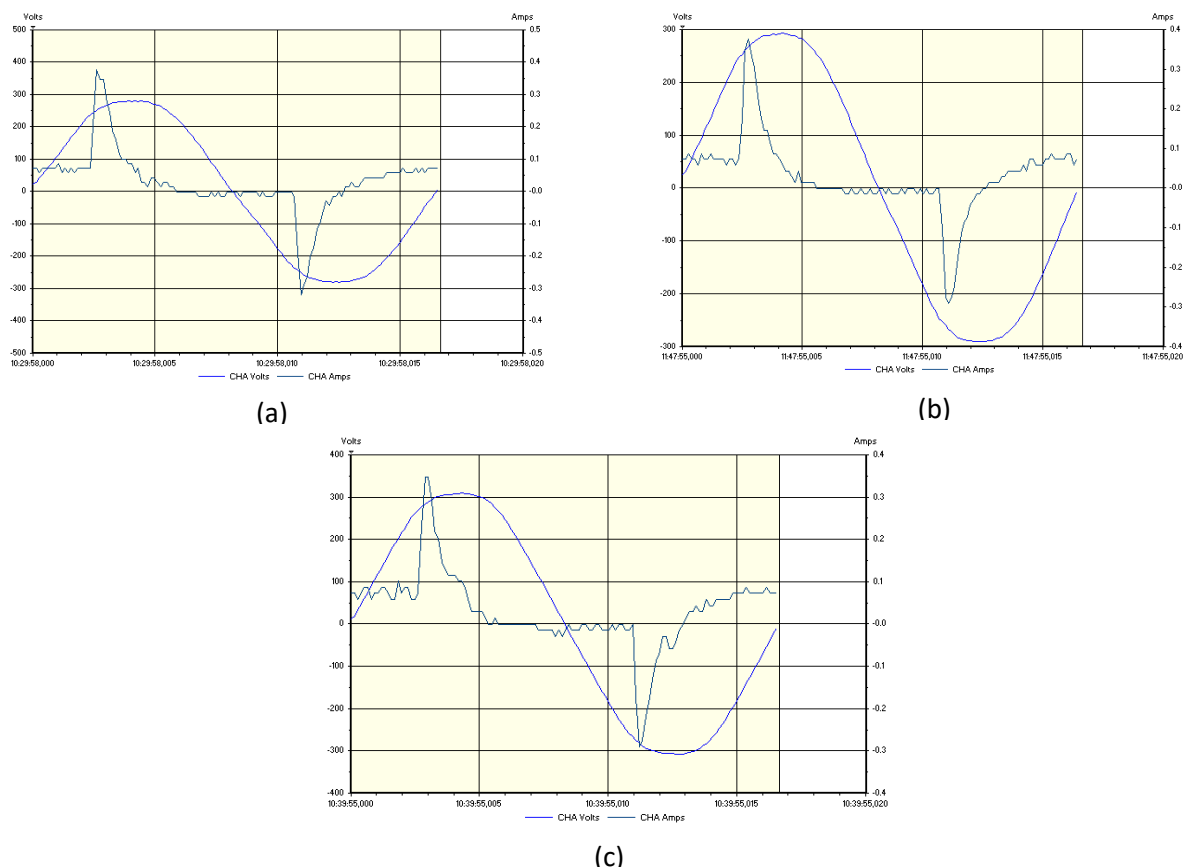


Figura 4.1 – Ondas de corrente e tensão dos ensaio 1 (a), ensaio 2 (b) e ensaio 3 (c) - Exp1. Fonte: DranView 5.

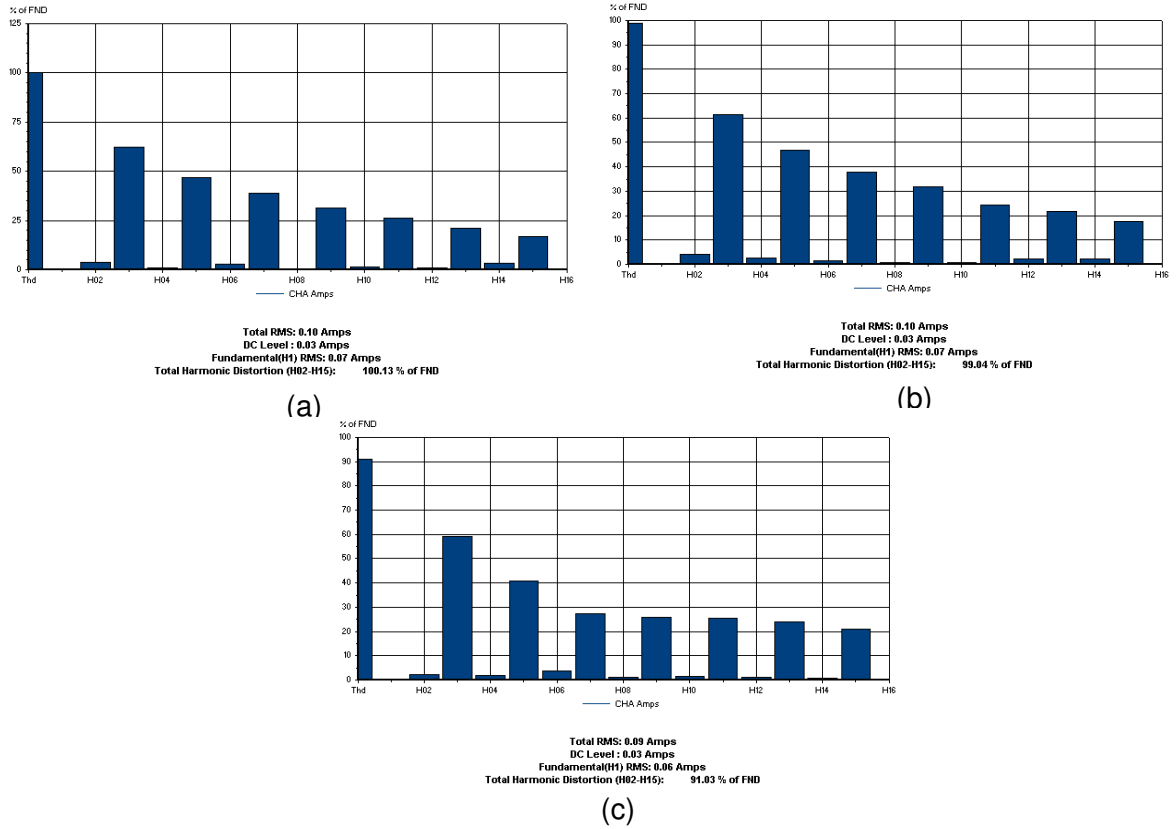


Figura 4.2 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 1. Fonte: DranView 5.

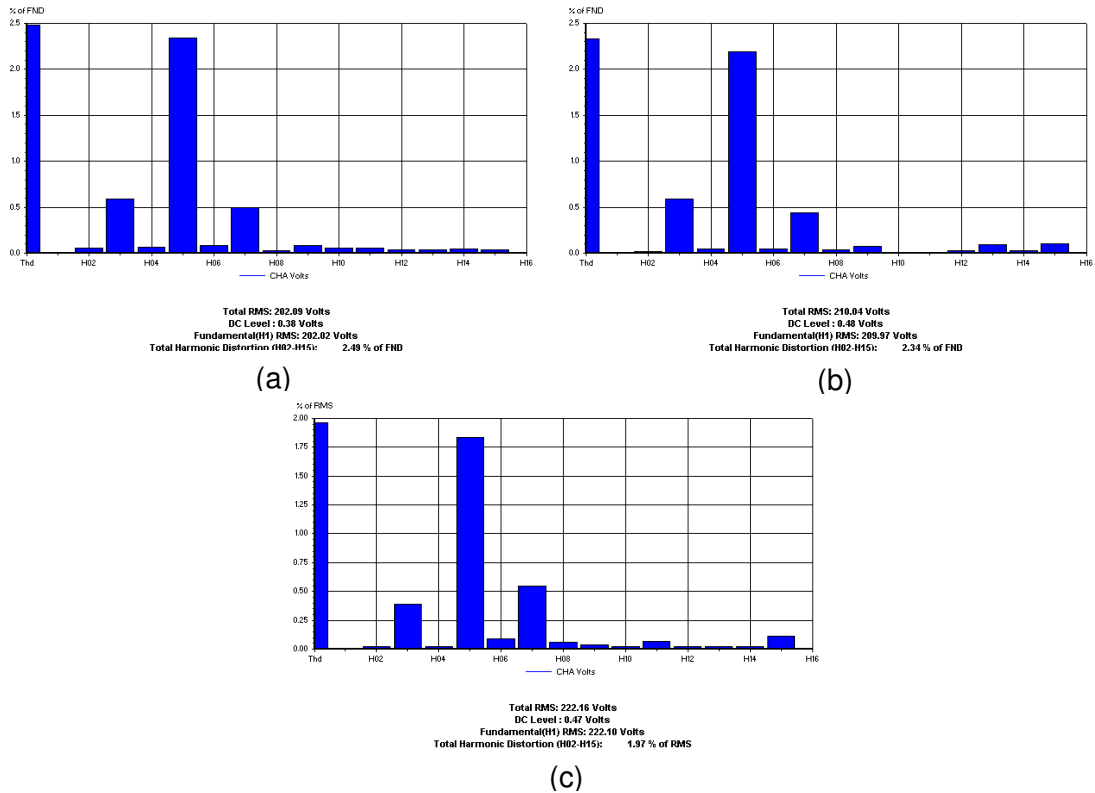


Figura 4.3 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 1. Fonte: DranView 5.

Os valores registrados pelo microcontrolador acoplado ao medidor digital são expostos na Figura 4.4. Cada pico inverso apresentado no gráfico corresponde a uma incidência luminosa sobre o sensor LDR, traduzindo cada pulso do LED em 1(um) Wh de energia consumida pela carga. Os eixos vertical (Kh) e horizontal (t) representam à taxa de luminosidade incidente sobre o sensor LDR a cada 0.19s.

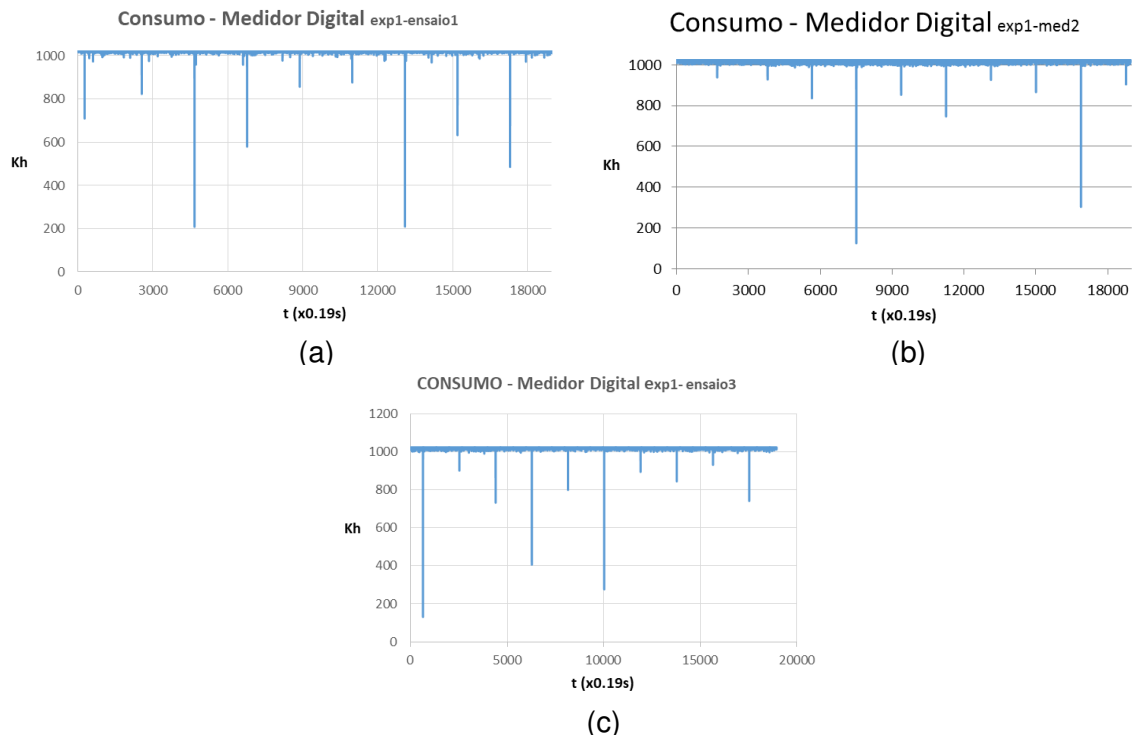


Figura 4.4 – Consumo pelo medidor digital; Ensaio 1 (a), Ensaio 2 (b) e Ensaio 3 (c). Exp 1.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre os FP e THDs de acordo com a variação de tensão pode ser visualizada a seguir na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Relação entre FP e THD Experimento 1.

Tensão (V)	FP	THDi%	THDv%
200	-0,463	100,13	2,49
210	-0,467	99,04	2,34
220	-0,479	91,45	2,05

4.2.2 Experimento 2

As especificações do suprimento de tensão e carga são apresentadas na Tabela 4.6. Os dados obtidos no Experimento 2 pelo analisador de qualidade de energia são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.6 – Especificações de suprimento e carga Experimento 2.

Especificações	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Tensão de entrada (V_{in})	220 V	231 V	198 V
Frequência	60 Hz		
Carga	Lâmpada Fluorescente		
QTD	6		
Tensão de entrada	185 - 240 V		
Frequência	50 - 60 Hz		
FP	≥ 0.5		
Potência Total	132 W		

Tabela 4.7 – Resultados do Experimento 2.

Grandezas	Ensaio 1 (220 V)	Ensaio 2 (231 V)	Ensaio 3 (198 V)
P_w	43,50 W	46,50 W	38,50 W
S_{VA}	72,26 VA	80,73 VA	65,81 VA
Q_{Var}	-61,41 VAr	-65,99 VAr	-53,37 VAr
Demanda	43,75 W	46,75 W	38,85 W
Energia	43,50 Wh	46,50 Wh	38,50 Wh
FP	-0.578	-0.576	-0.585
V_{thd}	2,03%	1,80%	1,84%
I_{thd}	109,37%	109,52%	106,40%

As formas de ondas da corrente e tensão, assim como o histograma do espectro harmônico de corrente e tensão obtidos e o consumo elétrico registrado pelo medidor digital de energia elétrica, são apresentados na Figura 4.5, Figura 4.6, Figura 4.7 e Figura 4.8, respectivamente.

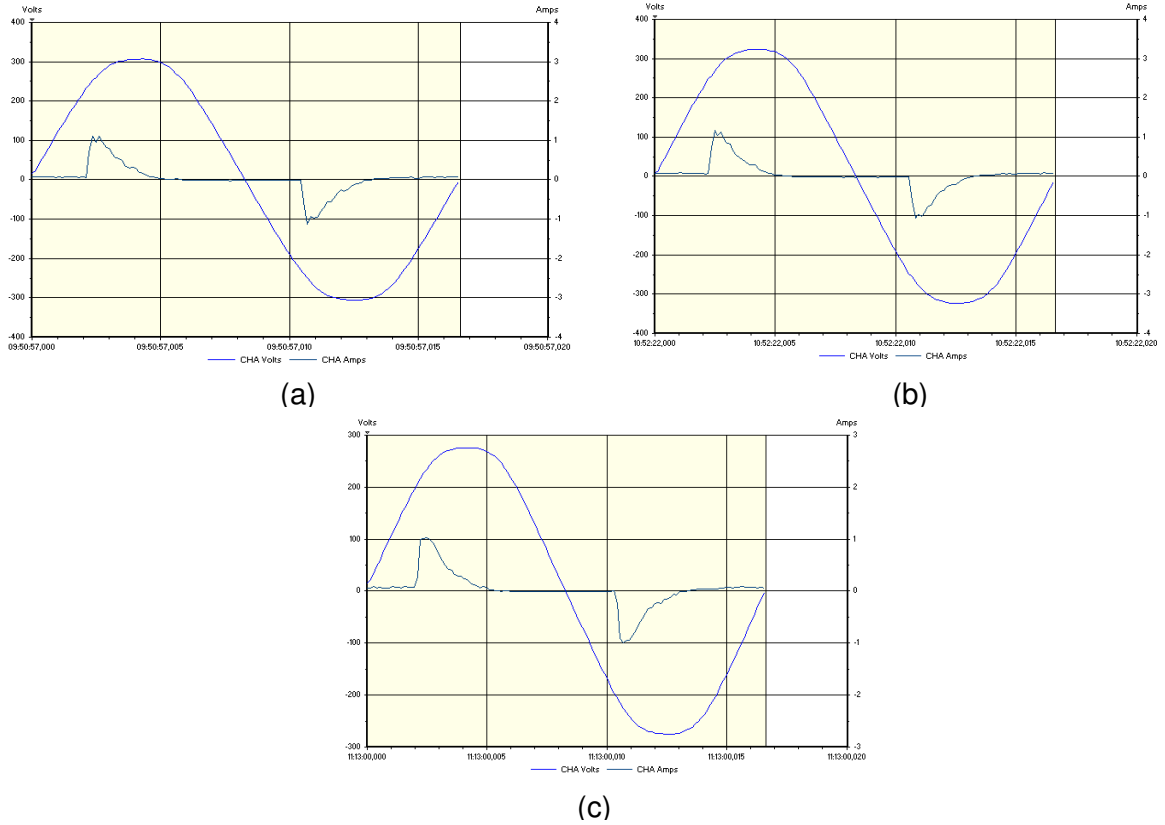


Figura 4.5 – Ondas de corrente e tensão dos ensaio 1(a), ensaio 2(b) e ensaio 3(c) - Exp 2. Fonte, DranView 5.

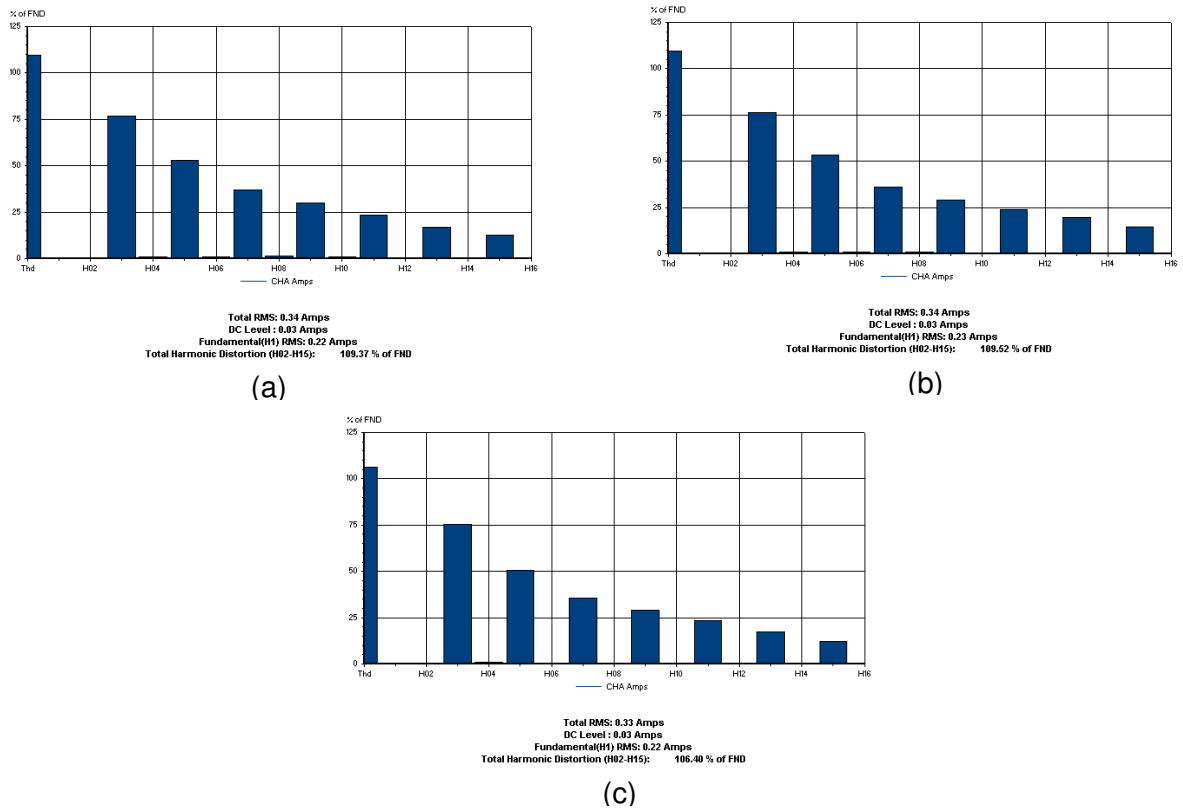


Figura 4.6 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 2. Fonte, DranView 5.

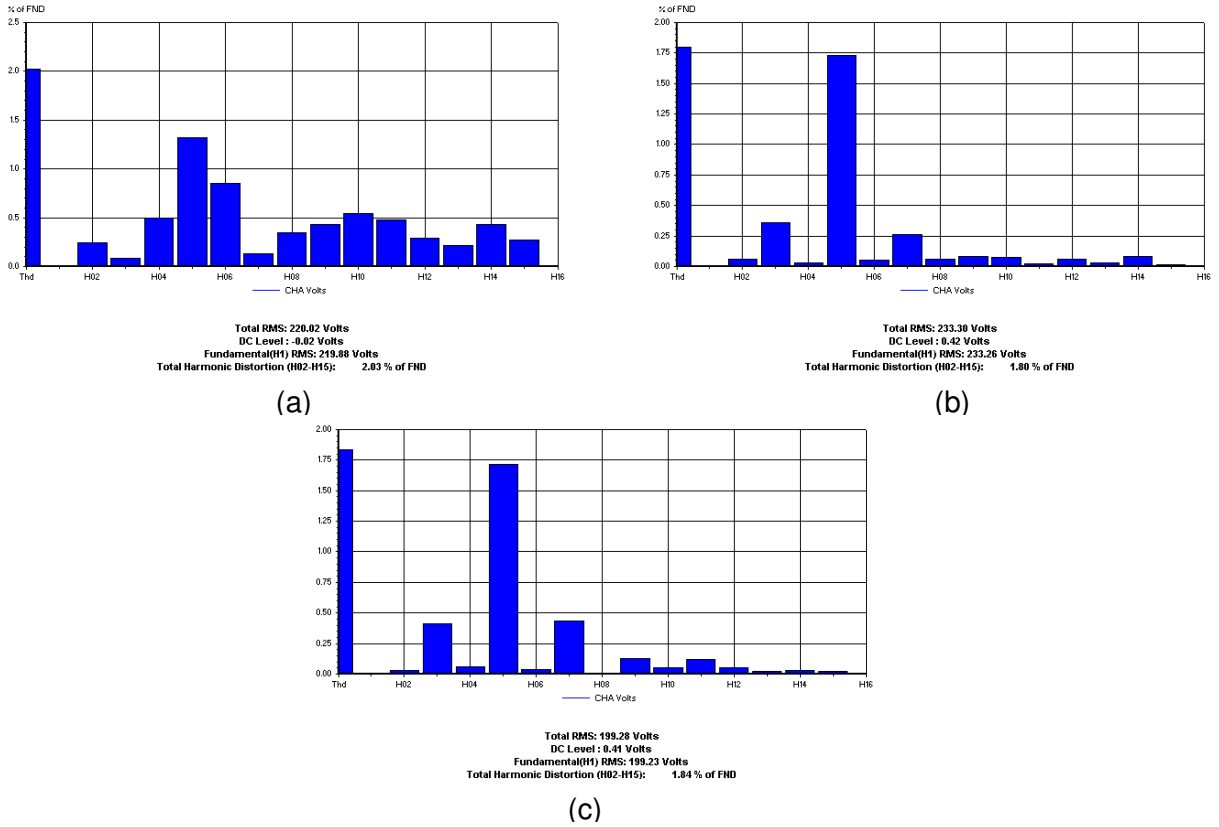


Figura 4.7 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 2. Fonte, DranView 5.

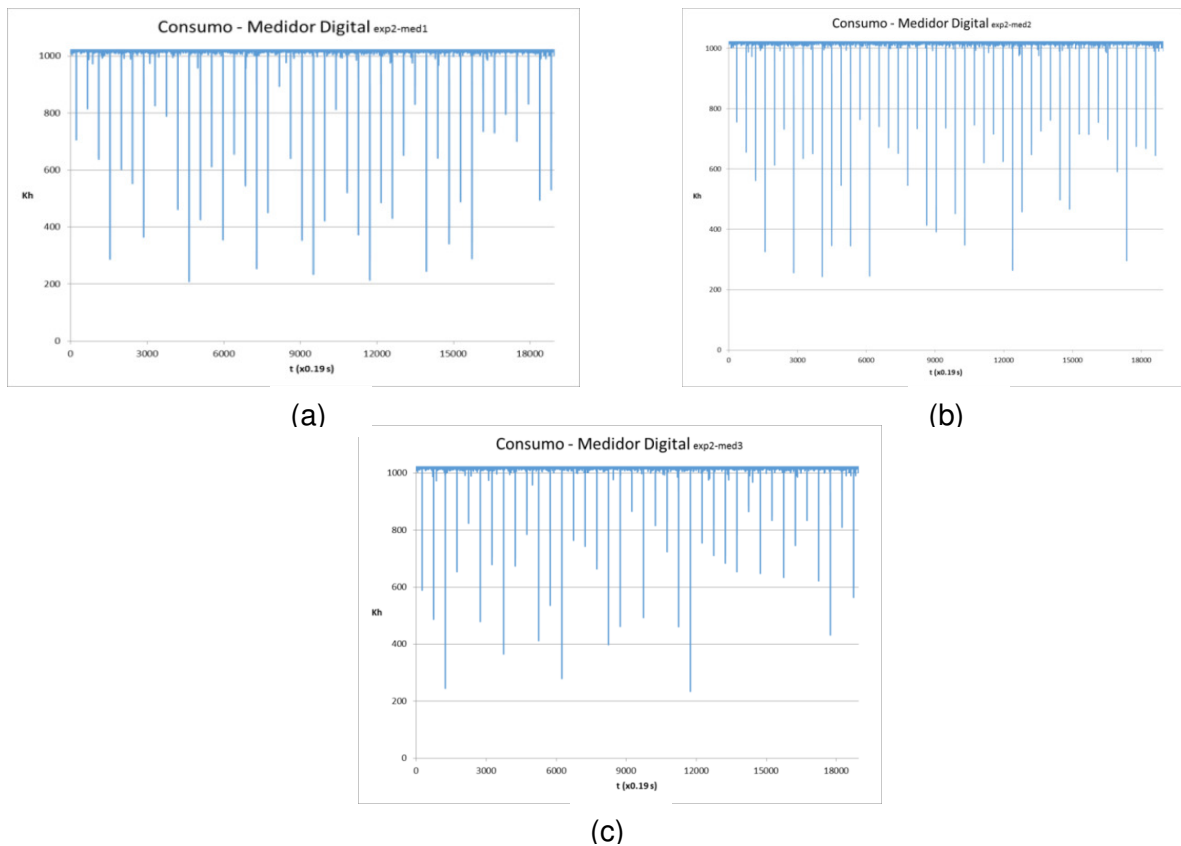


Figura 4.8 – Consumo pelo medidor digital; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 2. Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre os FP e THDs, obtidos no Experimento 2, de acordo com a variação de tensão pode ser visualizada a seguir na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Relação entre FP e THD Experimento 2.

Tensão (V)	FP	THDi%	THDv%
198	-0,585	106,4	1,84
220	-0,578	109,37	2,03
231	-0,576	109,52	1,80

4.2.3 Experimento 3

As especificações do suprimento de tensão e carga são apresentadas na Tabela 4.9. Os dados obtidos no Experimento 3 pelo analisador de qualidade de energia são apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4.9 – Especificações de suprimento e carga Experimento 3.

Especificações	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Tensão de entrada (V_{in})	220 V	231 V	198 V
Frequência	60 Hz		
Carga	2x Lamp. LED 6W 2x Lamp. Fluor. 22 W		
QTD	4		
Tensão de entrada	100 - 240 V(LED) 185 - 240 V (Fluoresc.)		
Frequência	50 - 60 Hz		
FP	≥ 0.5		
Potência Total	56 W		

Tabela 4.10 – Resultados da Experimento 3

Grandezas	Ensaio 1 (220 V)	Ensaio 2 (231 V)	Ensaio 3 (198 V)
P_w	25,05 W	26,24 W	23,54 W
S_{VA}	44,65 VA	46,28 VA	41,01 VA
Q_{Var}	-36,96 VAr	-38,12 VAr	-33,58 VAr
Demanda	25,18 W	26,47 W	23,58 W
Energia	25,05 Wh	26,24 Wh	23,54 Wh
FP	-0.561	-0.567	-0.574
V_{thd}	1,85%	1,64%	1,94%
I_{thd}	105,46%	102,35%	102,40%

As formas de ondas da corrente e tensão, assim como o histograma do espectro harmônico de corrente e tensão obtidos e o consumo registrado pelo

medidor digital, são apresentados na Figura 4.9, Figura 4.10, Figura 4.11 e Figura 4.12, respectivamente.

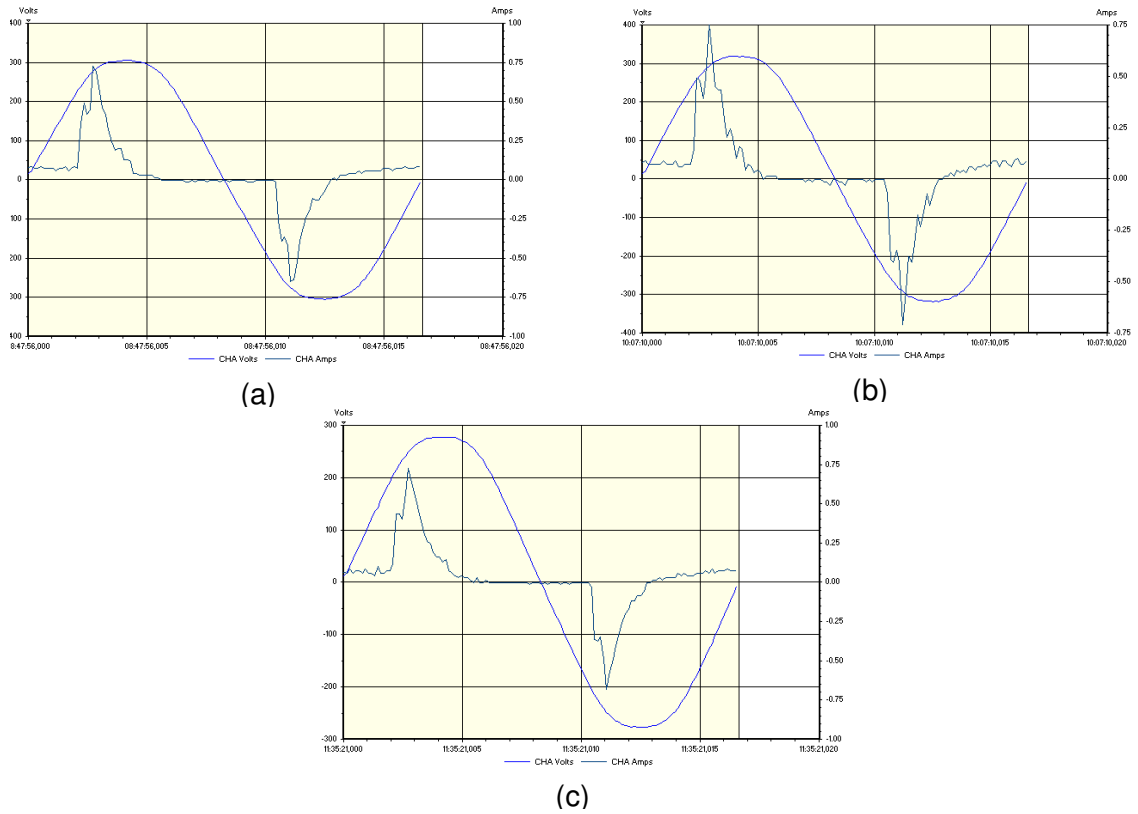


Figura 4.9 – Ondas de corrente e tensão dos Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c) - Exp 3.
Fonte: DranView 5.

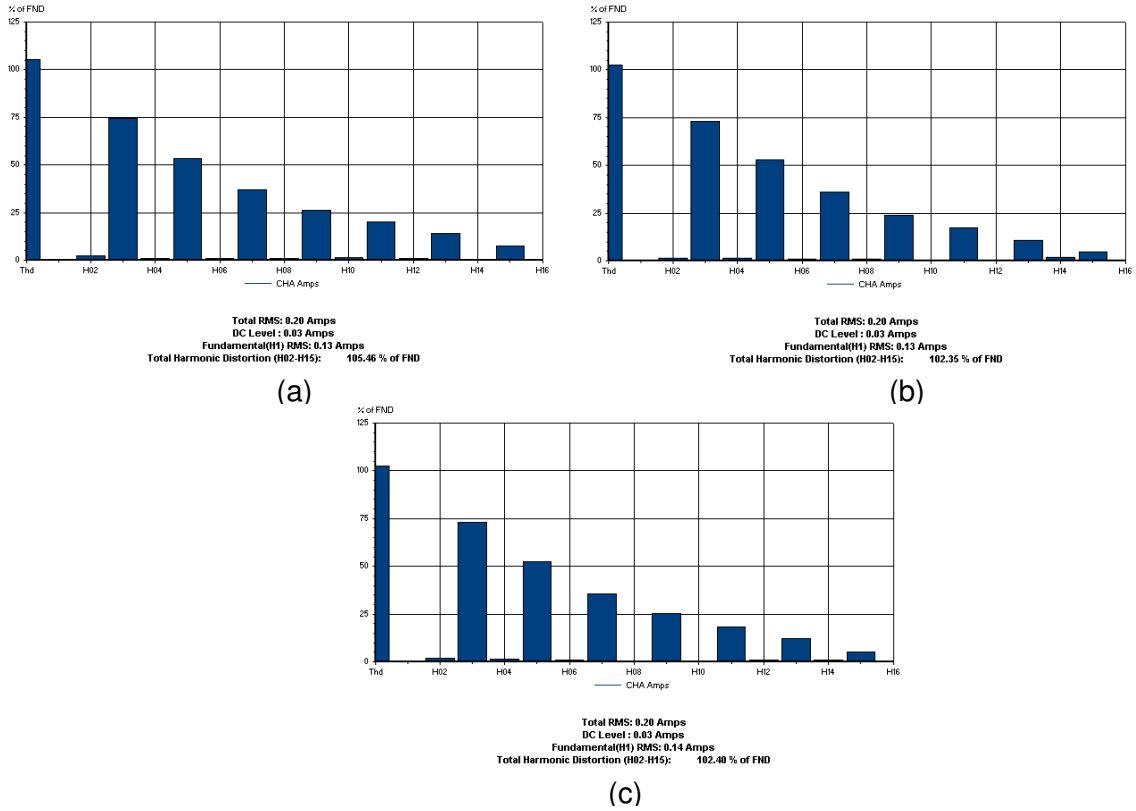


Figura 4.10 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 3. Fonte: DranView 5.

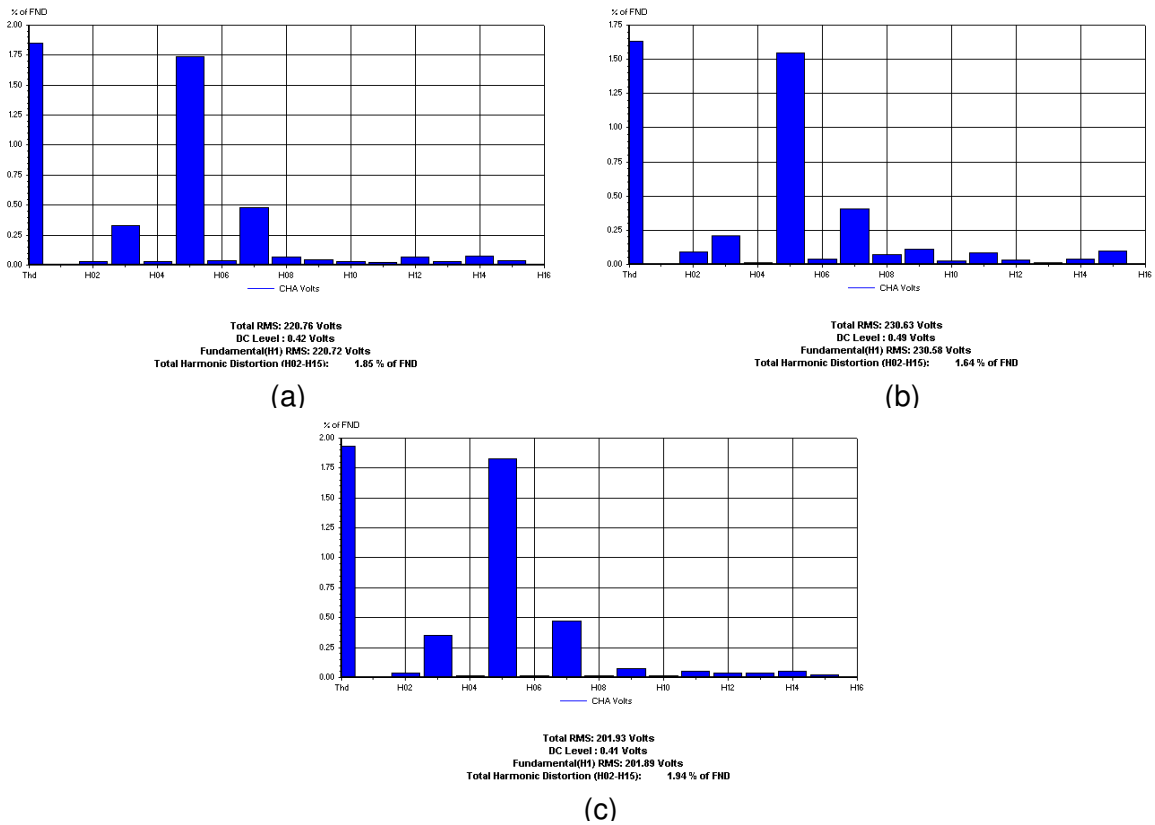


Figura 4.11 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 3. Fonte: DranView 5.

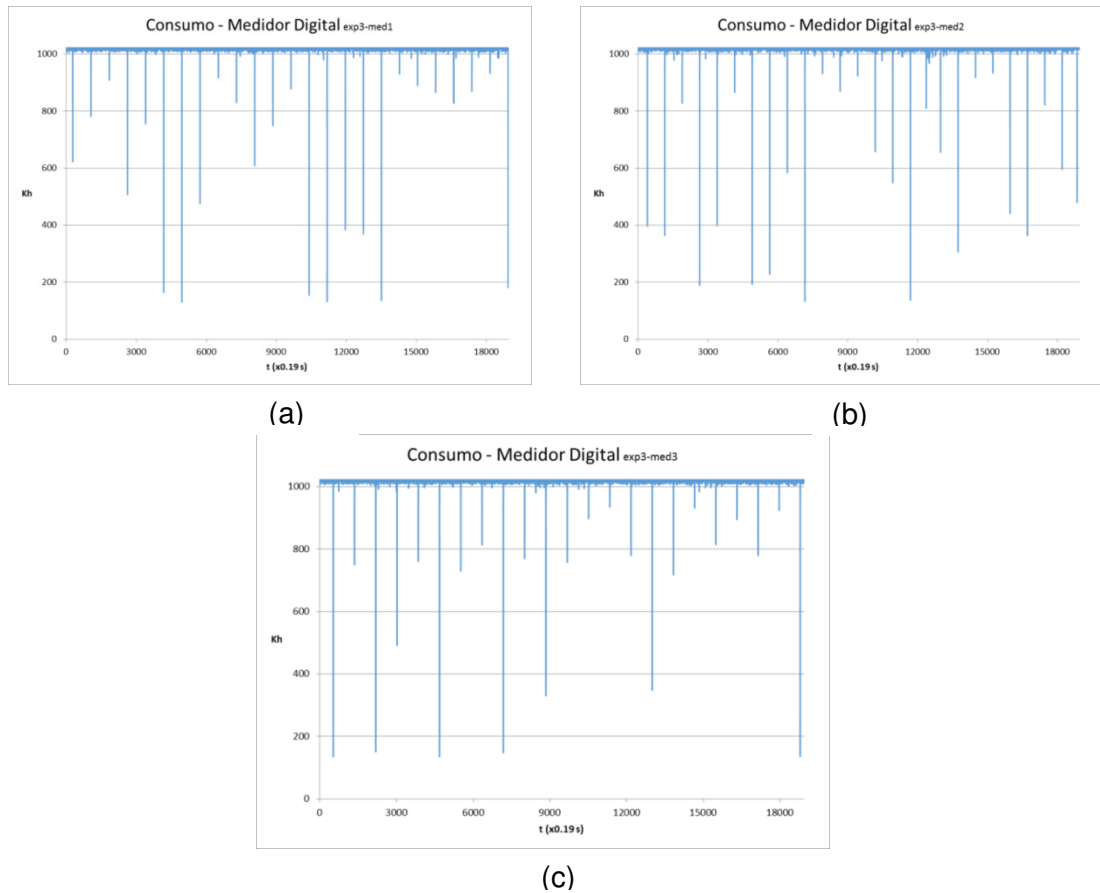


Figura 4.12 – Consumo pelo medidor digital; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 3.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre os FP e THDs, obtidos no Experimento 3, de acordo com a variação de tensão pode ser visualizada a seguir na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Relação entre FP e THD Experimento 3.

Tensão (V)	FP	THDi%	THDv%
198	-0,574	102,40	1,94
220	-0,561	105,40	1,85
231	-0,567	102,35	1,64

4.2.4 Experimento 4

As especificações do suprimento de tensão e carga são apresentadas na Tabela 4.12. Os dados obtidos no Experimento 4 pelo analisador de qualidade de energia são apresentados na Tabela 4.13.

Tabela 4.12 – Especificações de suprimento e carga Experimento 4.

Especificações	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Tensão de entrada (V_{in})	220 V	231 V	198 V
Frequência	60 Hz		
Carga	2x Lamp. LED 6W 2x Lamp. Incandescente. 200 W		
QTD	4		
Tensão de entrada	100 - 240 V(LED) 220 V (Incandescente)		
Frequência	60 Hz		
FP	1		
Potência Total	412 W		

Tabela 4.13 – Resultados do Experimento 4.

Grandezas	Ensaio 1 (220 V)	Ensaio 2 (231 V)	Ensaio 3 (198 V)
P_W	412,47 W	446,62 W	346,84 W
S_{VA}	412,84 VA	446,97 VA	347,22 VA
Q_{Var}	-17,51 VAr	-17,87 VAr	-16,28 VAr
Demanda	415,60 W	448,56 W	348,12 W
Energia	412,47 Wh	446,62 Wh	346,84 Wh
FP	-0,9991	0,9992	0,9989
V_{thd}	1,90%	1,85%	1,86%
I_{thd}	4,35%	4,07%	5,02%

As formas de ondas da corrente e tensão são apresentadas na Figura 4.13. Os histogramas do espectro harmônico de corrente e tensão obtidos e o consumo registrado pelo medidor digital são apresentados na Figura 4.14 e Figura 4.15, respectivamente.

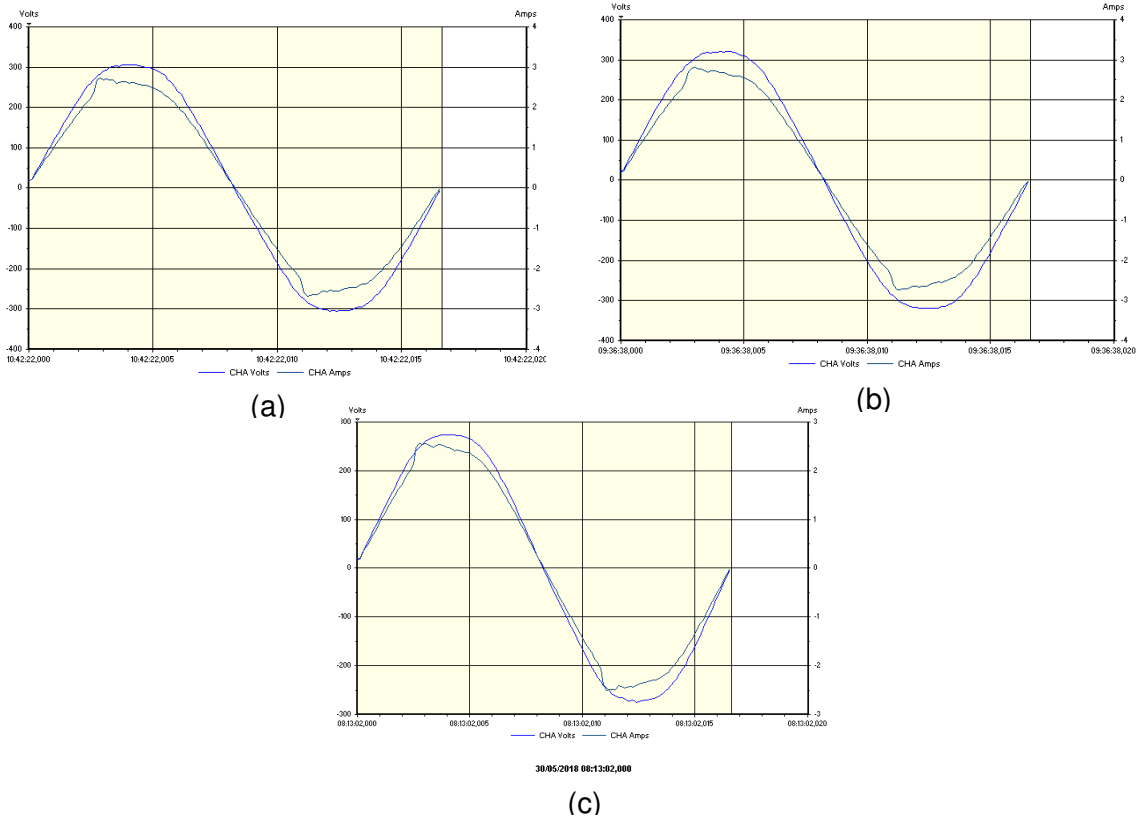


Figura 4.13 – Ondas de corrente e tensão dos Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c) - Exp 4.
 Fonte: DranView 5.

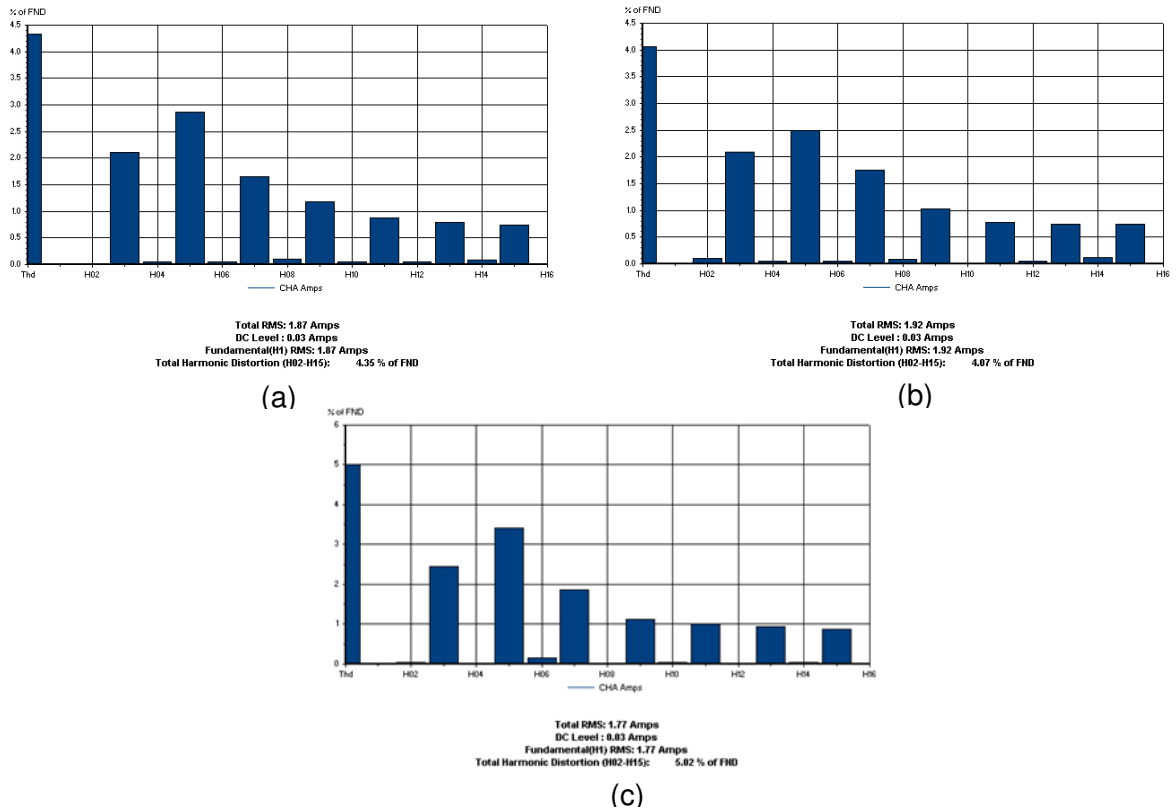


Figura 4.14 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 4.
 Fonte: DranView 5.

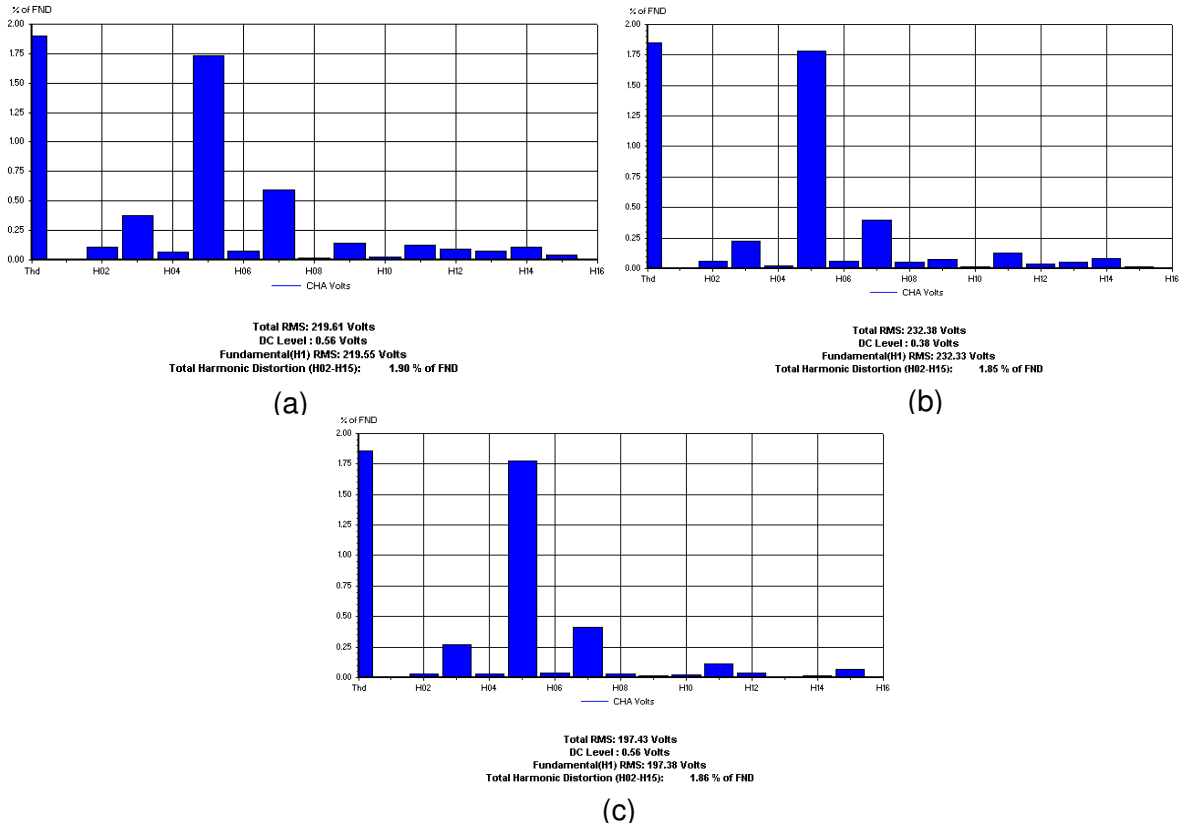


Figura 4.15 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 4.

Fonte: DranView 5.

O consumo registrado pelo medidor digital é apresentado a baixo, na Figura 4.16, Figura 4.17 e Figura 4.18. Cada pulso inverso corresponde a 1 Wh registrado.

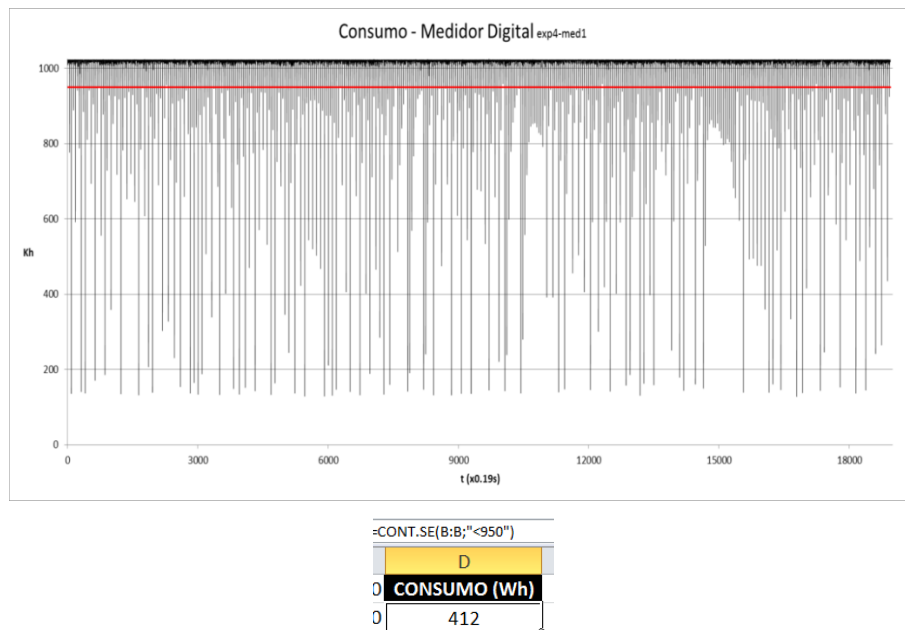


Figura 4.16 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 1, Exp. 4.

Fonte: Elaborado pelo autor.

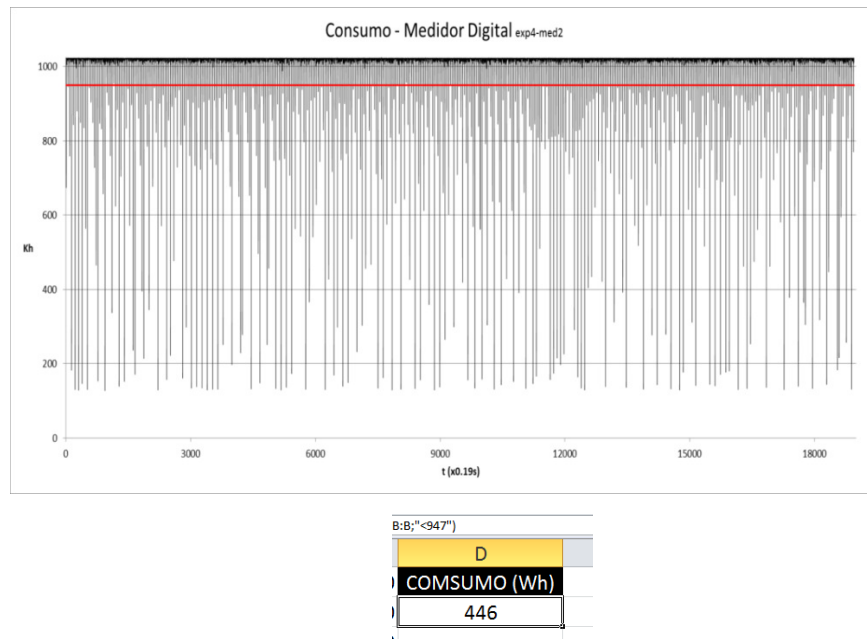


Figura 4.17 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 2, Exp. 4.
Fonte: Elaborado pelo autor.

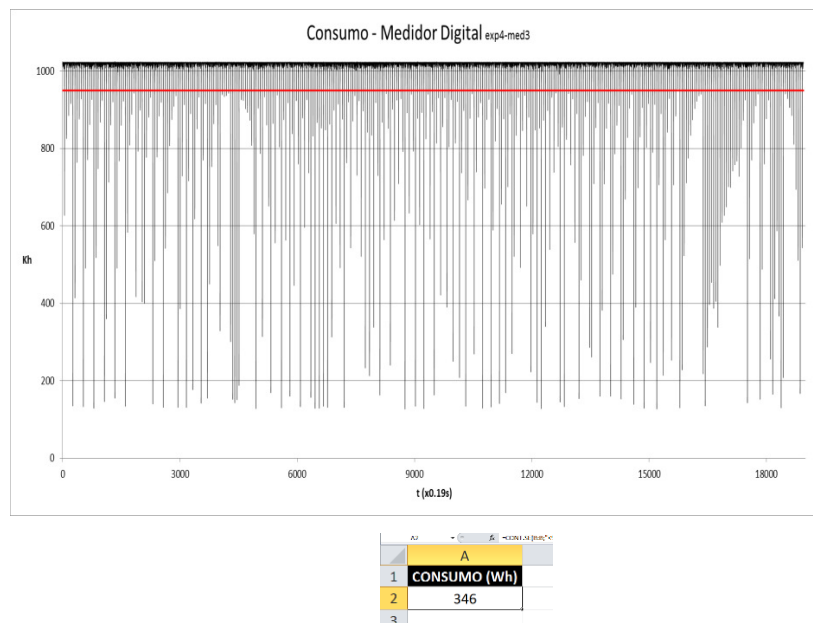


Figura 4.18 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 3, Exp. 4.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre os FP e THDs, obtidos no experimento 4, de acordo com a variação de tensão pode ser visualizada a seguir na Tabela 4.14.

Tabela 4.14 – Relação entre FP e THD Experimento 4.

Tensão (V)	FP	THDi%	THDv%
198	0,9989	5,02	1,86
220	0,9991	4,35	1,90
231	0,9992	4,07	1,85

4.2.5 Experimento 5

As especificações do suprimento de tensão e carga são apresentadas na Tabela 4.15. Os dados obtidos no Experimento 5 pelo analisador de qualidade de energia são apresentados na Tabela 4.16.

Tabela 4.15 – Especificações de suprimento e carga Experimento 5.

Especificações	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3
Tensão de entrada (V_{in})	220 V	231 V	198 V
Frequência	60 Hz		
Carga	2x Lamp. Fluorescente 22 W 2x Lamp. Incandescente. 200 W		
QTD	4		
Tensão de entrada	185 - 240 V (Fluorescente) 220 V (Incandescente)		
Frequência	60 Hz		
FP	1		
Potência Total	444 W		

Tabela 4.16 – Resultados do Experimento 5.

Grandezas	Ensaio 1 (220 V)	Ensaio 2 (231 V)	Ensaio 3 (198 V)
P_w	411,14 W	444,95 W	343,50 W
S_{VA}	411,75 VA	445,39 VA	344,19 VA
Q_{var}	-22,54 VAr	-19,91 VAr	-21,75 VAr
Demanda	414 W	446,40 W	357,60 W
Energia	411,14 Wh	444,95 Wh	343,50 Wh
FP	0,9985	0,999	0,998
V_{thd}	1,73%	1,76%	1,89%
I_{thd}	5,59%	5,52%	5,82%

As formas de ondas da corrente e tensão são apresentadas na Figura 4.19. Os histogramas do espectro harmônico de corrente e tensão obtidos são apresentados na Figura 4.20 e Figura 4.21, respectivamente.

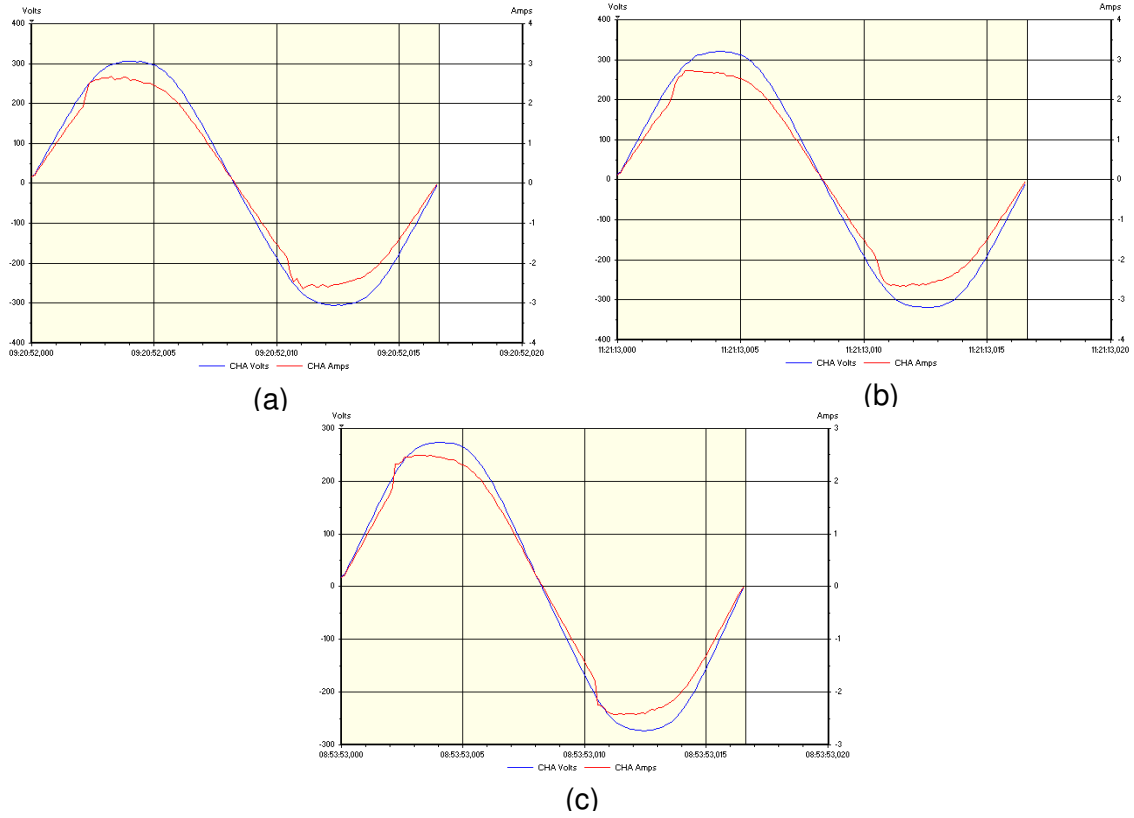


Figura 4.19 – Ondas de corrente e tensão dos Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c) - Exp 5. Fonte: DranView 5.

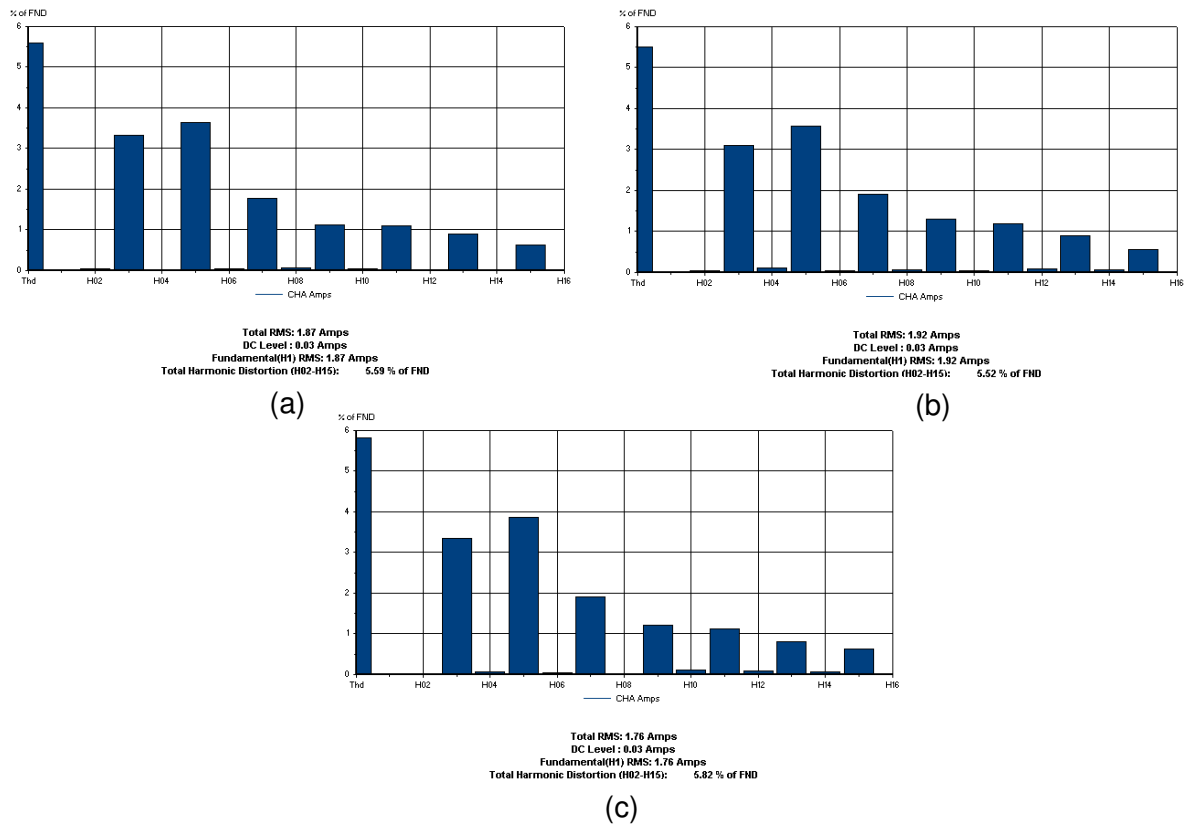


Figura 4.20 – Espectro harmônico de corrente; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp 5. Fonte: DranView 5.

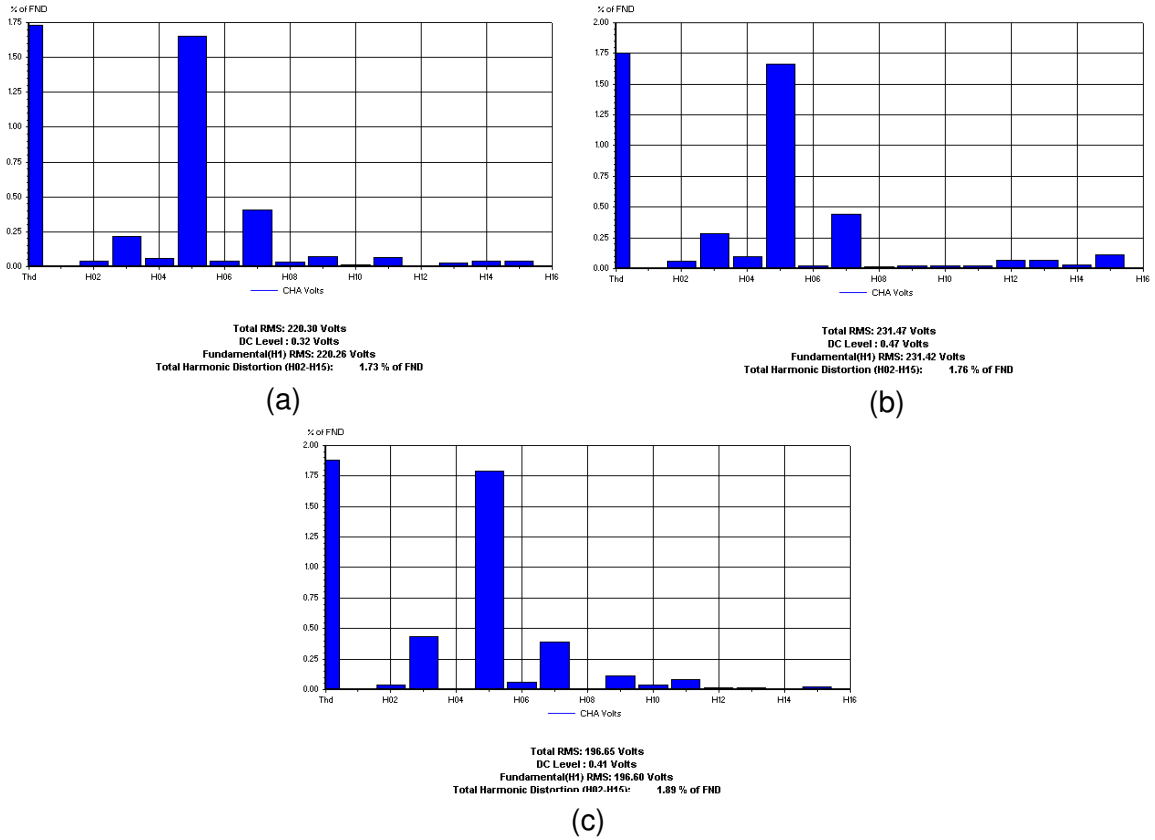


Figura 4.21 – Espectro harmônico de tensão; Ensaio 1(a), Ensaio 2(b) e Ensaio 3(c). Exp. 5. Fonte: DranView 5.

O consumo registrado pelo medidor digital é apresentado a baixo, na Figura 4.22, Figura 4.23 e Figura 4.24. Cada pulso inverso corresponde a 1 Wh registrado.

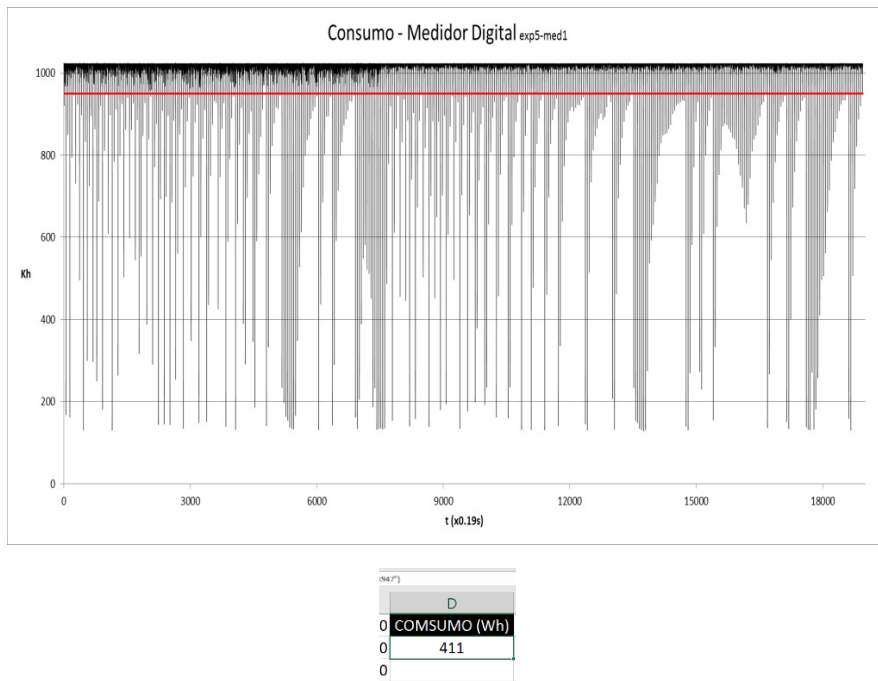


Figura 4.22 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 1, Exp. 5. Fonte: Elaborado pelo autor.

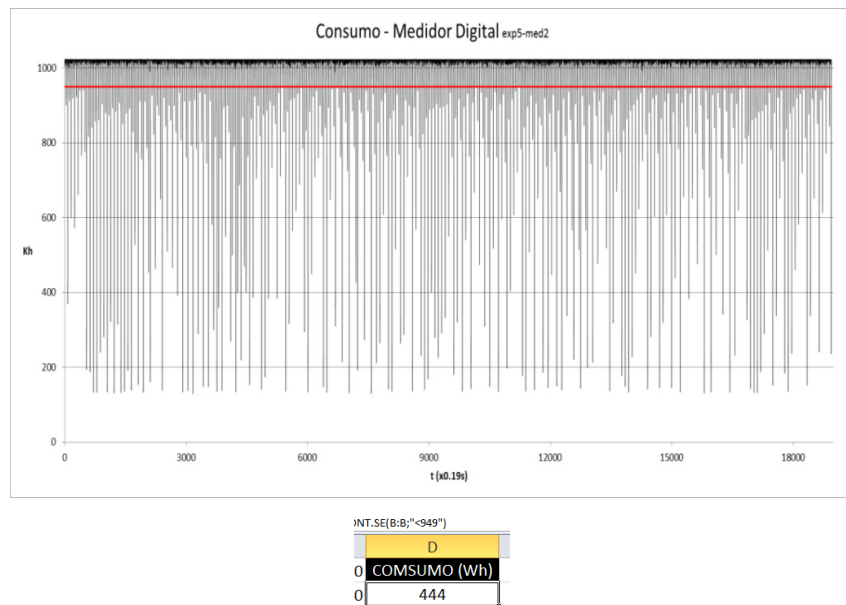


Figura 4.23 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 2, Exp. 5.
Fonte: Elaborado pelo autor.

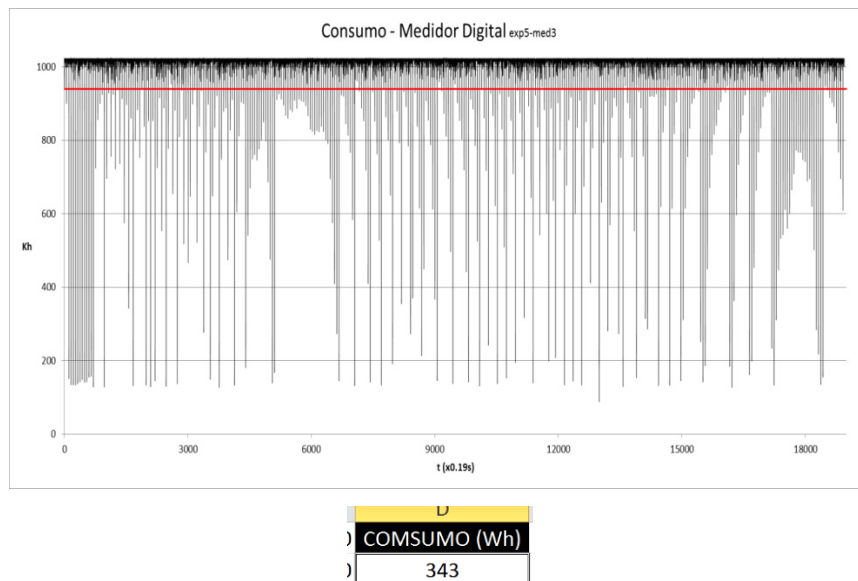


Figura 4.24 – Consumo registrado pelo Medidor Digital – Ensaio 3, Exp. 5
Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre os FP e THDs, obtidos no experimento 5, de acordo com a variação de tensão pode ser visualizada a seguir na Tabela 4.17.

Tabela 4.17 – Relação entre FP e THD Experimento 5.

Tensão (V)	FP	THDi%	THDv%
198	0,9980	5,82	1,89
220	0,9985	5,59	1,73
231	0,999	5,52	1,76

4.3 Análise dos Resultados

Esta seção é dedicada à comparação e discussão dos resultados obtidos nos ensaios investigativos realizados anteriormente

4.3.1 Experimento 1

No capítulo 2 demonstrou-se a relação entre THDi e FP, apresentando uma proporção inversa entre esses dois elementos. Apresenta-se esta relação a partir dos dados obtidos nos ensaios realizados em laboratório.

No Experimento 1, as especificações técnicas fornecida pelo fabricante da carga garante um $FP \geq 0.5$, porém, pode-se perceber que para todas as condições de tensões adotadas nos ensaios obteve-se $FP \leq 0.5$, vale ressaltar que as lâmpadas são novas, descartando a hipótese de desgaste das mesmas.

Comprova-se no Experimento 1 a teoria da inversão proporcional da THDi e FP. Observa-se, Figura 4.25, que à medida que elava-se o suprimento de tensão o FP tende a aumentar.

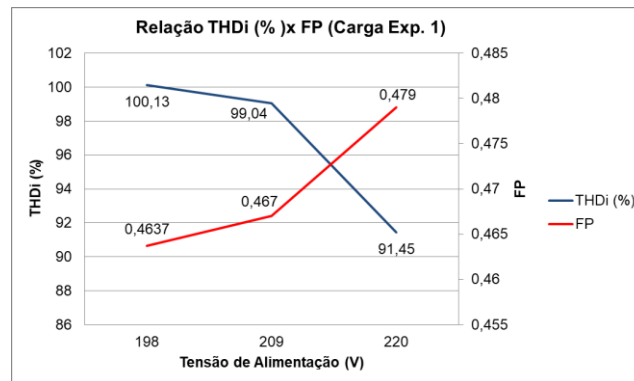


Figura 4.25 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 1.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os registros de consumo elétrico do medidor digital durante os ensaios do experimento 1, encontram-se dentro da classe de precisão do medidor digital (1%). Com base nos registros efetuados pelo analisador de qualidade Power Platform, não se percebeu a ocorrência de erros referentes à medição elétrica, Figura 4.26. Apesar do baixo fator de potência e da alta distorção harmônica da corrente, não houve erros nos ensaios do experimento 1. Vale ressaltar que para este experimento a carga de 12 W, corresponde a uma carga de baixa potência.

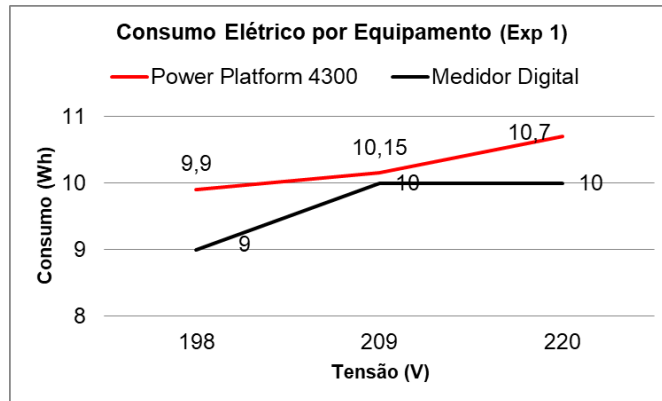


Figura 4.26 – Consumo elétrico por equipamento de medição. Exp. 1.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para as lâmpadas LED, a potência ativa aumenta à medida que a tensão aumenta, assim como a potência reativa, Figura 4.27, refletindo em um consumo menor em condições de subtensão. Ressalta-se que condições elétricas diferentes das quais dispositivos ou equipamentos elétricos foram projetados, resulta em desgastes dos elementos construtivos destes, diminuindo a vida útil do mesmo. Apesar da fabricante especificar potência ativa de 12 W para o conjunto de duas lâmpadas LED, obteve-se potência máxima de 10,7 W, em condição nominal de tensão. Devido ao $FP < 0,5$, reflexo da baixa qualidade dos materiais e eletrônica envolvidos em sua composição.

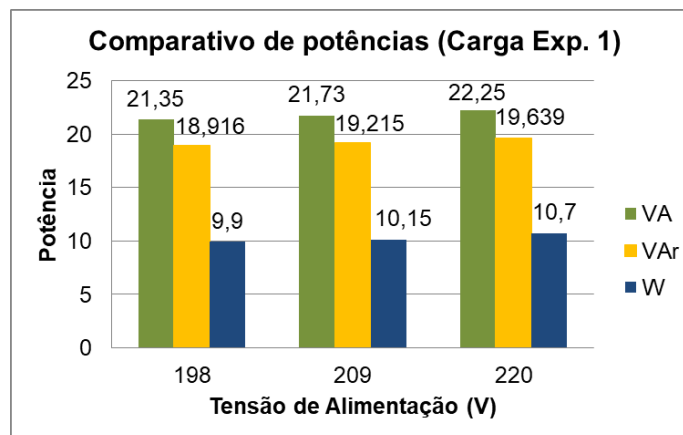


Figura 4.27 – Potências Experimento 1.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.2 Experimento 2

Neste experimento os erros de medições também são nulos, sem diferenças de medição em relação ao analisador durante os ensaios do experimento 2, Figura 4.28. A carga de iluminação composta por seis lâmpadas fluorescentes de 22 W do

Fabricante B apresentou FP superior ao especificado pelo fabricante, apesar da variação no suprimento de tensão. Ao contrário da carga do experimento anterior.

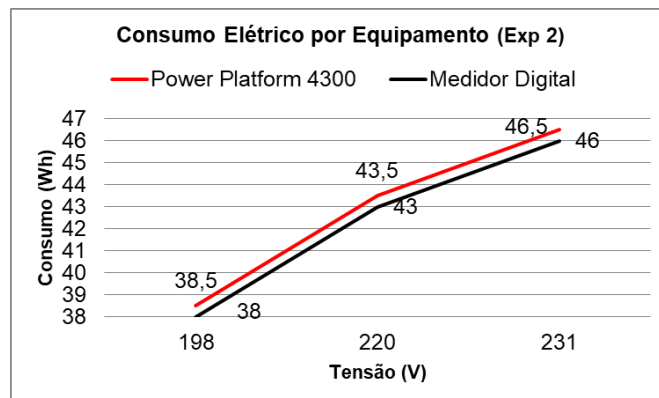


Figura 4.28 – Consumo elétrico por equipamento de medição. Exp. 2
Fonte: Elaborado pelo autor.

Inversamente do apresentado no experimento 1, no experimento 2 há uma diminuição no FP à medida que o suprimento de tensão aumenta, Figura 4.29, elevando sua taxa de distorção harmônica total de corrente, verificando a teoria exposta anteriormente. Apesar da elevada distorção harmônica da corrente, do baixo fator de potência e tensões de suprimento diferentes da nominal de projeto, não se registrou erros de medição pelo medidor digital.

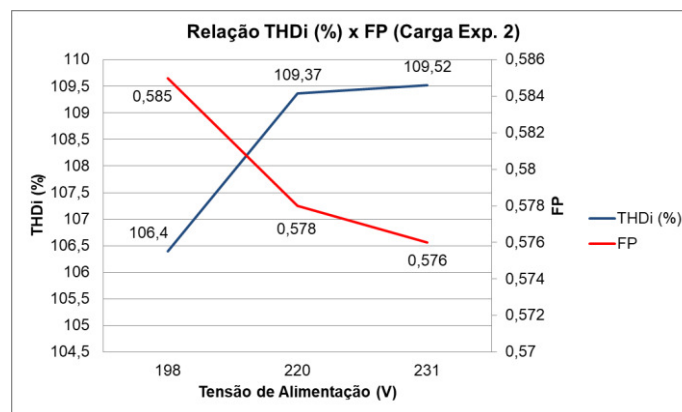


Figura 4.29 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 2.
Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência total de 132 W prevista pelo fabricante da carga não foi verificada durante os ensaios. Comprovando-se mais uma vez a baixa qualidade nos elementos construtivo que compõem esses dispositivos. Na Figura 4.30, pode ser observado que a potência reativa aumenta em relação a potência ativa, devido a diminuição do fator de potência, o que implica na elevação da distorção da corrente.

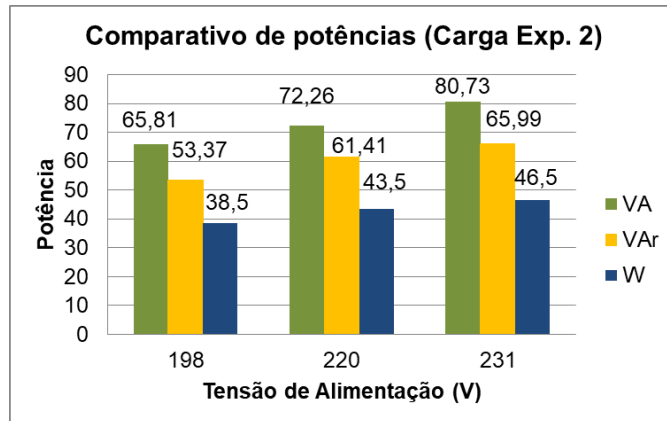


Figura 4.30 – Potências Experimento 2.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.3 Experimento 3

Um sistema de cargas mistas foi apresentado neste experimento, com duas lâmpadas do Fabricante A e duas lâmpadas do Fabricante B. Ambos os fabricantes especificaram $FP \geq 0.5$ para seus respectivos dispositivos.

Diferentemente dos outros resultados, verifica-se uma variação no FP e THDi, Figura 4.31, com o aumento da tensão, isso deve-se ao comportamento de cada dispositivo em subtensão e sobretensão. Quando exposto à situação de subtensão as características das lâmpadas fluorescentes prevalecem sobre as lâmpadas LED. Analogamente, quando num cenário de sobretensão as influências das lâmpadas LED sobressaem. Neste caso, especificamente, pode-se notar esse comportamento devido às lâmpadas apresentarem potências similares. Apesar da especificação do fabricante ser diferente.

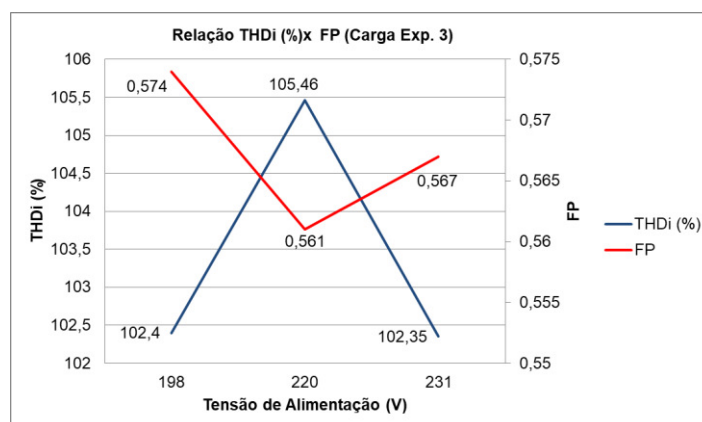


Figura 4.31 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 3.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Neste experimento, não houve erro de medição elétrica. O medidor digital de energia elétrica registrou todas as unidades de energia ativa consumida pela carga sob ensaio, Figura 4.32, mesmo com altas distorções harmônicas na onda das correntes.

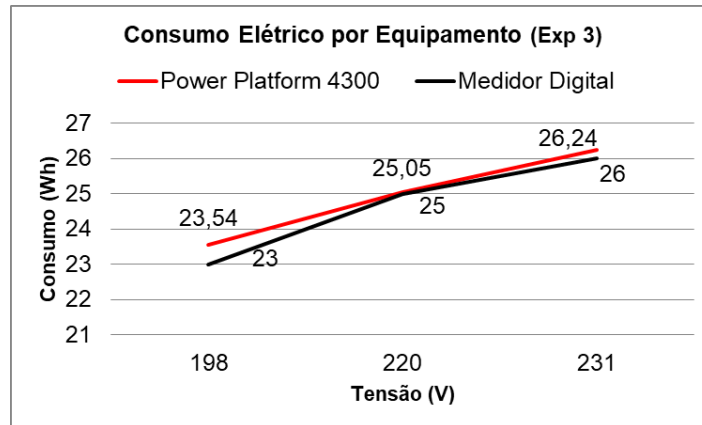


Figura 4.32 – Consumo elétrico por equipamento de medição. Exp. 3.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Pode se observar na Figura 4.33, que a potência reativa apresenta valores elevados, que são crescentes com a elevação da tensão, implicando numa distorção da corrente ainda maior e resultando em perdas para o sistema devido ao baixo fator de potência.

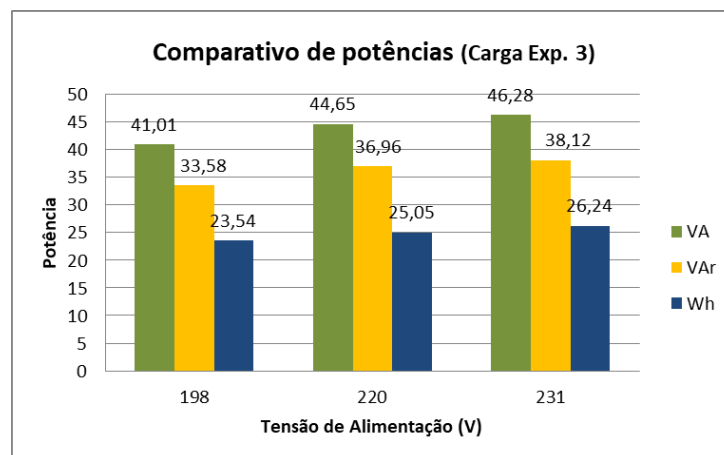


Figura 4.33 – Potências Experimento 3.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.4 Experimento 4

A carga deste experimento é predominante resistiva, próximo ao fator de potência unitário. As distorções harmônicas das correntes permanecem dentro dos padrões estabelecidos pela ANEEL [20]. Da mesma forma que os experimentos anteriores, não houve erro de medição, Figura 4.34. Verifica-se que cargas resistivas

apresentam menores distorções harmônicas de corrente e tensão, não produzindo fenômenos elétricos suficientes para causar interferências no processo de medição. Os erros de medição com cargas resistivas são menos frequentes e significativos, pois permite os perfis da forma de onda de tensão e corrente bem próximas as projetadas para estes equipamentos de medição.

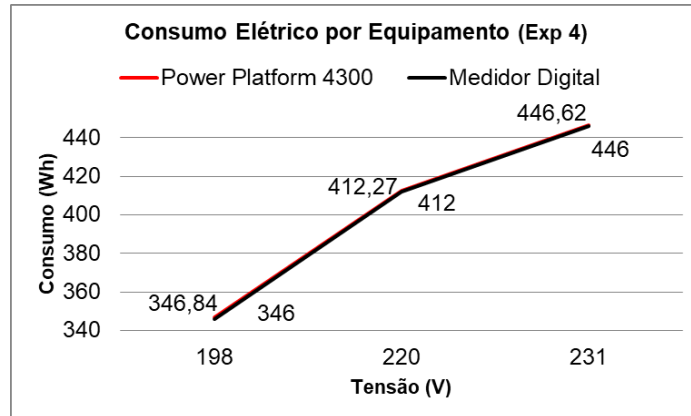


Figura 4.34 – Consumo elétrico por equipamento de medição. Exp. 4.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar das pequenas variações, percebe-se que a medida que se eleva o suprimento de tensão nos ensaios o fator de potência tende a aumentar, Figura 4.35, por consequência há o aumento do consumo elétrico e a diminuição na distorção harmônica da corrente.

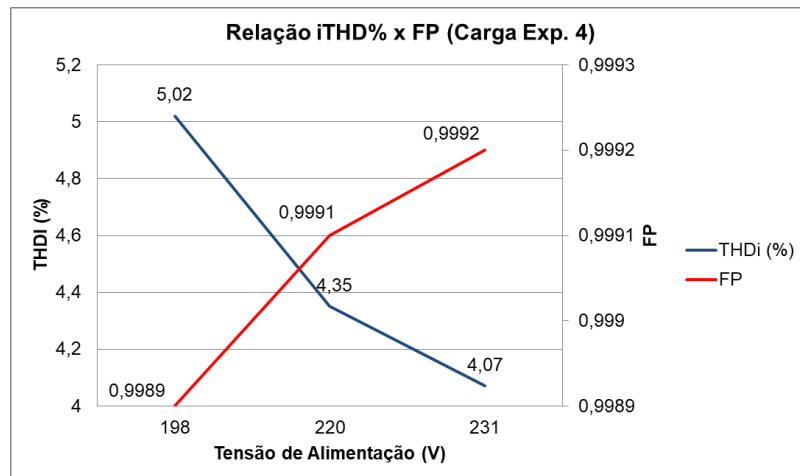


Figura 4.35 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 4.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Da mesma forma, o aumento do consumo elétrico com o aumento da tensão pode ser comprovado neste experimento, Figura 4.36, de acordo com a teoria. Devido à relação direta de potência ativa com tensão. Ensaios investigativos sobre a influência de adversidades elétricas na medição do consumo de energia ativa com

cargas resistivas, não são eficientes devido à característica linear predominante destas.

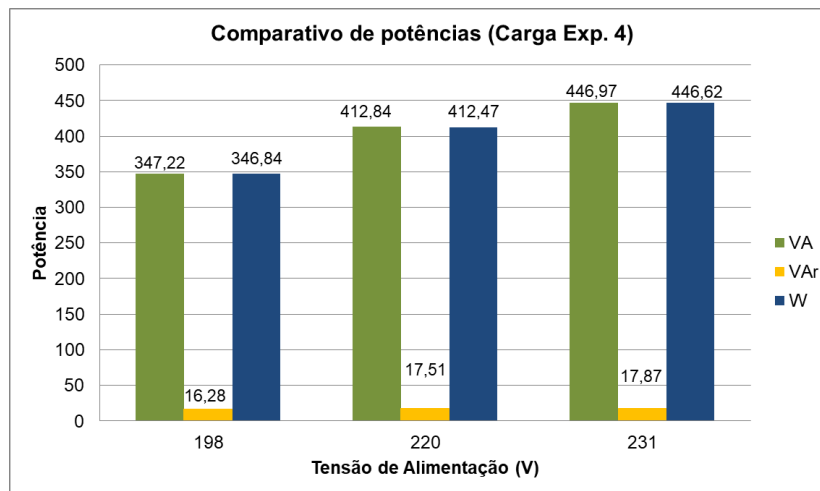


Figura 4.36 – Potências, Experimento 4.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3.5 Experimento 5

Da mesma forma que 4.3.4, o perfil resistivo predominante no experimento 5 mantém as formas de ondas das correntes próximas a senóide. Não se percebeu erros de medição, Figura 4.37, devido às condições mínimas de distorção harmônica nas formas de onda de tensão e corrente. Influenciando no consumo de energia elétrica e fator de potência, devido às variações do suprimento de tensão.

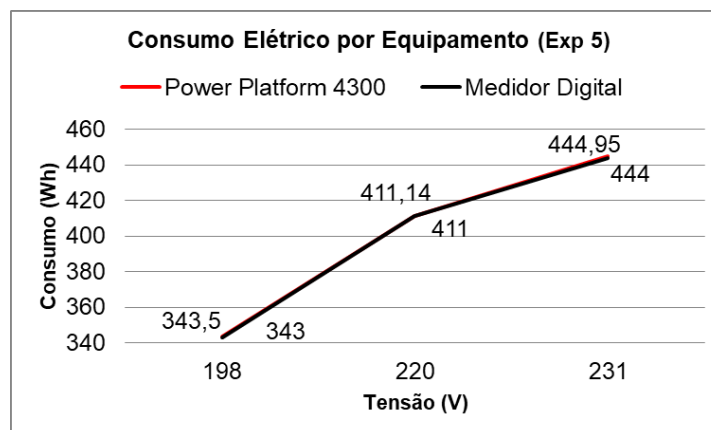


Figura 4.37 – Consumo elétrico por equipamento, Experimento 5.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Este experimento reafirma o que se analisou no item 4.3.4, cargas resistivas não promovem interferências na medição de energia elétrica. Porém, a elevação no suprimento de tensão provoca uma elevação no fator de potência, reduzindo a distorção harmônica da corrente e aumentando o consumo elétrico, Figura 4.38.

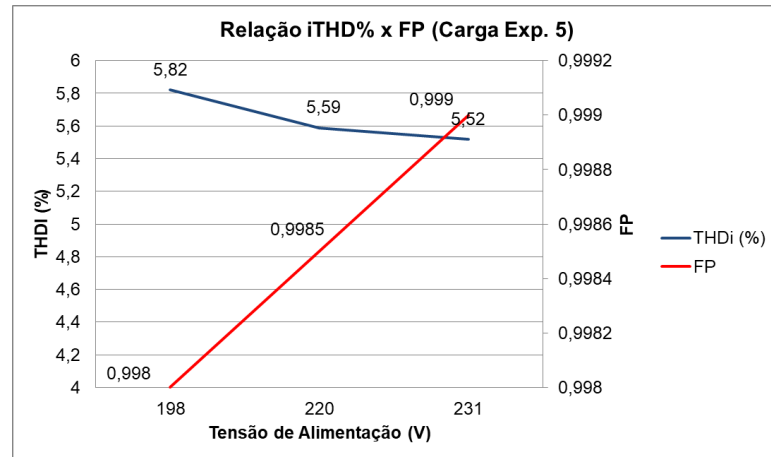


Figura 4.38 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 5.
Fonte: Elaborado pelo autor.

Diferente do experimento 4 na condição de sobretensão a potência reativa da carga foi reduzida, Figura 4.39. Isso se deve, pois, as lâmpadas fluorescentes promovem variações mais acentuadas nas distorções harmônicas, ou seja, as lâmpadas fluorescentes apresentam maior variação na distorção harmônica da corrente em função da tensão. Desta forma a redução da distorção harmônica foi maior entre o suprimento nominal de tensão e a sobretensão (231 V), quando comparado a carga resistiva com LED.

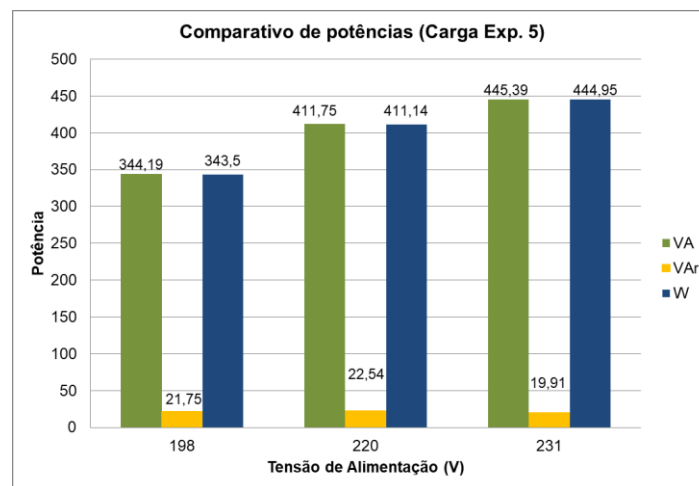


Figura 4.39 – Relação THDi (%) x FP, Experimento 5.
Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Considerações Finais

Neste capítulo, foram apresentados e analisados os resultados dos ensaios, e também, a verificação dos padrões qualitativos das cargas ensaiadas na

investigação de erros no medidor digital de energia elétrica ativa. Os resultados foram colocados em forma de figuras, facilitando a análise, e em seguida, foram apresentadas considerações sob forma de análise, relacionando os erros de medição de energia, o nível de distorção harmônica da corrente e o operador cossenoidal do ângulo de defasagem entre tensões e correntes (FP) das diversas combinações de perfis de cargas ensaiadas.

Ao analisar os resultados, não se percebeu ocorrência de erros de medição nos ensaios, pois estes, não foram superiores ao limite permitido pela classe de exatidão dos medidores, ou seja, classe 1. Desta forma, considerando-se que o medidor ensaiado, não pode exceder a $\pm 1\%$ de erro na medição.

Nos ensaios do medidor monofásico em condições de subtensão, a potência ativa apresentou redução considerável, e as distorções harmônicas das correntes foram as maiores verificadas. Dessa forma, para queda de tensão no sistema elétrico a forma de onda da corrente da carga apresenta grandes taxas de distorção harmônica, proporcionando erros de medição por medidores de energia ativa, apesar de não ter sido verificado para o medidor ensaiado neste trabalho.

Respectivamente. Verificou-se também que outro parâmetro que deve ser considerado é o operador cossenoidal do ângulo de defasagem entre tensões e correntes, fator de potência, para cada combinação dos perfis de cargas ensaiadas, uma vez que o mesmo está diretamente relacionado com a energia elétrica ativa consumida pela carga associada ao sistema. Quanto mais distante da unidade, maior a distorção harmônica da corrente. Observou-se que a distorção harmônica na tensão permaneceu a níveis aceitáveis para o sistema elétrico, não representando interferência para os ensaios de medição.

Por fim, apesar da obtenção de elevadas taxas de distorções harmônicas de corrente, o medidor digital de energia elétrica, Itron, permaneceu dentro da sua classe de exatidão (1%). Vale ressaltar, que as cargas ensaiadas apresentaram diferenças acentuadas nas potências especificadas pelos fabricantes, reduzindo ainda mais os níveis de interferências produzidas por estas. O que pode ter impossibilitado a verificação de possíveis erros de medição. Pode-se afirmar que para as cargas ensaiadas o medidor digital, submetido a correntes não-senoidal efetuou a real medição do consumo elétrico.

5 CONCLUSÕES GERAIS

Para um bom entendimento do trabalho realizado, os primeiros capítulos foram dedicados aos motivos que levaram ao início da pesquisa, envolvendo, levantamento bibliográfico dos estudos experimentais a respeito de fenômenos elétricos que influenciam na medição do consumo energético, em seguida apresentou-se a proposta de realizar ensaios investigativos com cargas de iluminação a fim de se observar o comportamento dos fenômenos produzidos por essas cargas na medição elétrica. Adicionalmente, uma revisão bibliográfica resumida dos itens relacionados a fenômenos que influenciam na medição do consumo de energia elétrica foi apresentada, enfatizando-se os índices mais analisados durante a pesquisa prática: Distorção harmônica e fator de potência. Também, de forma resumida, foi apresentado o princípio de funcionamento do medidor de energia elétrica tipo indução, equipamento responsável pelo registro de kWh consumido na grande maioria das instalações atuais no país, e o medidor eletrônico.

Em seguida um procedimento de aquisição dos dados foi otimizado para que se pudesse de forma simples e eficaz obter o registro do consumo de energia elétrica a partir do medidor eletrônico. A necessidade de se desenvolver um sistema de aquisição de dados dos medidores é fundamental para a obtenção do registro preciso do consumo energético. Tal necessidade impossibilitou, durante a pesquisa, a utilização do medidor de energia elétrica tipo indução, devido a imprescindível utilização de sensor de rotação, responsável pelo registro do número de voltas realizadas pelo disco de medição. Tal dispositivo, não possui disponibilidade no mercado eletrônico local.

O medidor digital de energia elétrica, Ítron, apesar de submetido a altas distorções harmônicas da corrente manteve-se dentro da sua classe de precisão. Vale ressaltar que a potência das cargas ensaiadas não representaram valores significativos para a medição, devido à baixa qualidade dos elementos que as compõem havendo divergências em relação aos valores especificados pelos fabricantes, reduzindo ainda mais, possíveis ocorrências de erros de medição.

Observou-se após a realização dos ensaios de medição que as lâmpadas fluorescentes apresentaram maior variação da taxa de distorção harmônica da

corrente quando comparadas com as lâmpadas LED, nos mesmos níveis de suprimento de tensão. Na condição de subtensão (198 V), a carga composta por lâmpadas LED apresentou THDi de 100,13%, enquanto a carga de lâmpadas fluorescentes apresentou THDi de 106,4%. Para tensão nominal (220 V), as LED apresentaram THDi de 91,45%, já as fluorescentes apresentaram THDi de 109,37%. Desta forma, o fator de potência das lâmpadas LED, aumentou à medida que o nível de tensão foi elevado, reduzindo o consumo de potência reativa. De modo contrário, o fator de potência da carga composta por lâmpadas fluorescentes sofreu uma redução, o que implica no aumento do consumo de potência reativa.

A distorção harmônica da tensão apresentou-se durante este trabalho dentro do máximo aceitável estabelecido pela ANEEL ($\leq 5\%$), apresentando maior distorção harmônica de tensão de 2,49% durante os ensaios. Desta forma, a distorção harmônica de tensão não atingiu valores significativos para influenciar erros nas medições. Este fato não a isenta na contribuição como interferência na medição do consumo elétrico.

As cargas ensaiadas não apresentaram significativos valores de potência, apesar da alta distorção na forma de onda da corrente. Valores mais significativos de potência para as cargas selecionadas podem apresentar resultados diferentes dos obtidos neste trabalho, devido à alta distorção harmônica da corrente, levando a erros mais significativos de medição. Portanto, os harmônicos gerados pelas lâmpadas ditas eficientes ainda são os principais causadores de distúrbios na qualidade de energia, e por consequência, são os que mais podem interferir nos processos de medição.

Com a conclusão do trabalho, pode-se perceber que ainda existem questões a serem investigadas a respeito deste assunto, podendo ser objetos de novas investigações. Segue, portanto, algumas propostas para trabalhos futuros.

- Dar continuidade à pesquisa com um maior número de cargas com diferentes níveis de distorções harmônicas, de maiores amplitudes;
- Ensaios com cargas indutivas, tais como motores elétricos e outros equipamentos de potência mais elevada;
- Viabilização de um cenário em que as formas de onda de tensões e correntes variem com o tempo, aproximando-se ainda mais das condições encontradas em campo;

- Análise experimental de erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletrônicos polifásicos, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados;
- Análise de erros para medição de energia elétrica reativa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Avaliação da política nacional de desenvolvimento regional**. Relatório. Secretaria de Políticas de Desenvolvimento Regional, Brasília, 2011.
- [2] ITO, H.T. **Energia elétrica: apuração da qualidade dos dados de consumo**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- [3] VELASCO, L. N. **Análise experimental de erros de medição de energia elétrica ativa em medidores eletromagnéticos tipo indução, sujeitos a distorções harmônicas de correntes e tensões, em sistemas equilibrados e desequilibrados**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2007.
- [4] HENRIQUES, A. L. **Medição de energia elétrica para faturamento: estudo comparativo de medidores eletrônicos e eletromecânicos, com foco no desempenho sob condições não senoidais**. TCC (Graduação em Engenharia Industrial Elétrica) – Universidade Federal Tecnológica do Paraná, Curitiba, 2012.
- [5] DE CARVALHO, P. L. **Uma contribuição ao estudo da depressão de tensão**. Dissertação (Mestrado) – Escola Federal de Engenharia de Itajubá, Itajubá, 1997.
- [6] CANESIN, C. A. et al. **Sistema de avaliação de erros de medição em medidores de energia elétrica ativa em condições de distorções harmônicas**. Artigo. 2015.
- [7] LOPES, C.; EPALANGA, E.; TEMBU, R. **Medidor de energia inteligente**. Monografia (Engenharia Eletrônica) – Centro Universitário de Lins, São Paulo, 2013.
- [8] MÍNGUEZ, A. **Medidores de energia ativa: funcionamento, práticas usuais, principais ensaios e análise das fraudes mais comuns**. Monografia (Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio De Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- [9] BRITO, J. L.G. **Sistema para monitoramento de consumo de energia elétrica particular, em tempo real e não invasivo utilizando a tecnologia Arduino**. Monografia (Engenharia Elétrica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2016.

- [10] MEDEIROS, S.F. **Medição de engenharia elétrica**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1986.
- [11] POMILIO, J. A. **Eletrônica de potência: conversores ca-cc - retificadores**. 01 jan. 2017. 33 p. Notas de Aula. Cap. 3. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/files/eltpot/cap3.pdf>>. Acesso em: 03 mai. 2018.
- [12] RODRIGUES, J. E. **Interferência de harmônicas em equipamentos de medição de energia elétrica**. Dissertação (Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- [13] CAPETTA, D. **Sistemas de medição para faturamento e o mercado de energia elétrica: uma visão crítica do referencial regulatório**. Dissertação (Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.
- [14] JÚNIOR, J. M. C. **Um medidor de energia elétrica integrado em redes de comunicações**. Dissertação (Sistemas de Informação e Comunicação) – Faculdade de Tecnologia da Universidade Estadual de Campinas. Limeira, 2014
- [15] DINIZ, B. R. A.; EVANGELISTA, A. A.; ALEXANDRIA, A. R. Projeto e desenvolvimento de um medidor digital de energia elétrica monofásico para aplicações residenciais. **Hollos**, v.7, 2017.
- [16] INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA NORMATIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL – INMETRO. **Portaria INMETRO/Dimel nº 0074, de 21 de fevereiro de 2011**. Rio de Janeiro, 2011.
- [17] NICOLAU, C. T. **Medição de energia elétrica: impactos da mudança tecnológica no setor jurídico de uma concessionária distribuidora de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2013.
- [18] CLARKE, F. J. J., STOCKTON, J. R. Principles and theory of wattmeters operating on the basis of regularly spaced sample pairs – **J. Phys. E. Sci. Instrum.**, V. 15, 1982.
- [19] SVENSSON, S. **Power measurement techniques for non-sinusoidal conditions -the significance of harmonics for the measurement of power and other ac quantities**. Tese de doutorado - Department of Electric Power Engineering Chalmers University Of Technology, Göteborg Sweden, 1999.
- [20] PROCEDIMENTOS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SISTEMA ELÉTRICO NACIONAL – PRODIST. **Resolução normativa nº 728/2016**. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Brasília, 2016.

- [21] RODRIGUES, A. M. **Influência da distorção harmônica e de desequilíbrios em medidores de energia elétrica ativa.** Artigo. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [22] GIRGES, A. A. et al. Testing the performance of three-phase Induction watt-hour meters in the presence of harmonic distortion. **IEE Transaction on Industry Applications**, New York, v.26, n.4, 1990.
- [23] SILVA, R.V.R. **Análise do desempenho dos medidores de watt-hora indutivo sob condições não senoidais.** 1998. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 1998.
- [24] BALTHAZAR, M. Q. F. et al. **Medidores de Watt-Hora Eletrônicos na Presença de Harmônicos: Análise e Testes Preliminares.** SENDI, 2004.
- [25] IEEE Std 1159 **RECOMMENDED PRACTICE FOR MONITORING ELECTRIC POWER QUALITY:** IEEE Standards Coordinating Committee 22 on Power Quality, 1995.
- [26] DA SILVA, L. C. E. **Efeitos das distorções harmônicas (tensões e correntes) e desequilíbrios (tensões) em medidores eletrônicos trifásicos de energia elétrica ativa.** Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.
- [27] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Contribuições para a normalização da qualidade da energia elétrica - desequilíbrios nas redes elétricas.** Uberlândia: UFB, 2001.
- [28] SALLAM, A. A.; MALIK, O. P. **Harmonics in electric distribution systems.** 1st. ed. Wiley-IEEE Press, 2011.
- [29] MOREIRA, N. J. H. **Resolução normativa nº 414/2010.** Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Brasília, 2010.
- [30] DE LA ROSA, F. **Harmonics and power systems.** Boca raton. EUA: CRC Press, 2006.
- [31] DRANETZ, B. M. I. **Power Platform 4300 TaskCard PQlite User's Guide.** EUA, New Jersey, mai. 2002. Disponível em: < <http://dranetz.com/wp-content/uploads/2014/05/powerplatform4300-taskcard-pqlite-usersguide.pdf>>. Acesso em: 16 jan. 2017.
- [32] SILVA, F. S. C. **Semicondutores.** Universidade Federal do Maranhão. Notas de Aula. mai. 2018. 48 p. São Luís. 2018.

- [33] VALNER, B. A. **Transdutores**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Notas de Aula. mai. 2018. 15 p. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/eleinst/ufrgs9.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2018.
- [34] CATTANEO, M. M. et al. **Análise dos harmônicos em lâmpadas LED disponíveis no Brasil**. Monografia – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba. 2017.
- [35] DE LIZ, M. B. **Contribuição para a Redução da Interferência Eletromagnética em Fontes Chaveadas**. 2003. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/85025/195653.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2017.
- [36] IEEE. **Simulation of simple capacitive-isolated LED drivers**. 13th International Conference on Power Electronics (ICPE), 2016.