



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS DE BALSAS
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

DOUGLAS JOSE ARAUJO DE CASTRO

ANÁLISE HARMÔNICA EM LÂMPADAS LED

Balsas - MA

2025

DOUGLAS JOSE ARAUJO DE CASTRO

Análise Harmônica em Lâmpadas LED

TCC apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Maranhão, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Nonato Diniz Costa Filho

Examinado por:

Prof. Dr. Raimundo Nonato Diniz Costa Filho
(UFMA)

Prof. Dr. Pedro Bezerra Leite Neto
(UFMA)

Profa. Esp. Thaís Barbosa da Silva
(Membro Externo)

Balsas – MA

2025

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

Castro, Douglas Jose Araujo de.

ANÁLISE HARMÔNICA EM LÂMPADAS LED / Douglas Jose Araujo
de Castro. - 2025.
59 f.

Orientador(a): Raimundo Nonato Diniz Costa Filho.

Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do
Maranhão, Balsas-ma, 2025.

1. Lâmpadas Led. 2. Distorção Harmônica Total. 3.
Sistemas de Energia Elétrica. I. Filho, Raimundo Nonato
Diniz Costa. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este projeto aos meus familiares que me apoiou e a todos os professores que me influenciaram na minha trajetória. Em especial ao Prof. Dr. Raimundo Nonato Diniz Costa Filho, meu orientador, com quem compartilhei minhas dúvidas a respeito do tema.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela dádiva da vida e por guiar cada passo desta jornada. Aos meus pais, cuja fé inabalável me impulsionou a superar desafios, expresso minha eterna gratidão. Ao Prof. Dr. Raimundo Nonato Diniz Costa Filho, meu orientador, agradeço pela confiança e incentivo constantes. Aos amigos do curso, obrigado por cada desafio compartilhado com espírito colaborativo, e à Universidade Federal do Maranhão e seus docentes, pela inspiração na pesquisa científica.

EPÍGRAFE

"A mente que se abre a uma nova ideia jamais voltará ao seu tamanho original."

– Albert Einstein

RESUMO

Neste trabalho foi realizada uma análise harmônica em lâmpadas do tipo LED, com o objetivo de entender melhor as características dessas lâmpadas que podem gerar harmônicos e o impacto desses harmônicos nos sistemas elétricos. Assim também, foi avaliado a eficácia das regulamentações existentes, como as estabelecidas pelo Inmetro no Brasil e a IEC 61000-3-2 a nível internacional, na garantia da qualidade da energia elétrica no contexto do uso de lâmpadas LED. Além disso, o estudo buscará comparar diferentes tecnologias de iluminação e desenvolver soluções potenciais para minimizar a Distorção Harmônica Total (DHT) causada por essas lâmpadas. Os resultados deste estudo têm o potencial de informar os níveis de distorção harmônicas desses dispositivos que na análise feita variaram de 63,22% a 87,60%, para assim melhores práticas para o uso dessas lâmpadas possam ser desenvolvidas, contribuindo para a melhoria da eficiência energética e da qualidade do sistema elétrico.

Palavras Chaves: Lâmpadas LED, Distorção Harmônica Total, Sistemas de Energia Elétrica.

ABSTRACT

In this work, a harmonic analysis was performed on LED lamps with the objective of better understanding the characteristics of these lamps that can generate harmonics and the impact of these harmonics on electrical systems. Furthermore, the effectiveness of existing regulations, such as those established by Inmetro in Brazil and IEC 61000-3-2 at the international level, in ensuring the quality of electrical energy in the context of LED lamp usage will also be evaluated. Moreover, the study will seek to compare different lighting technologies and develop potential solutions to minimize the Total Harmonic Distortion (THD) caused by these lamps. The results of this study have the potential to inform the harmonic distortion levels of these devices—which in the analysis ranged from 63.22% to 87.60%—thus enabling the development of improved practices for the use of these lamps, contributing to enhanced energy efficiency and the overall quality of the electrical system.

Keywords: LED Lamps, Total Harmonic Distortion, Electrical Power System.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Decomposição de ondas harmônicas	6
Figura 2 – Lâmpada Halógena	13
Figura 3 – Lâmpadas Florescente	14
Figura 4 – Lâmpadas LED	15
Figura 5 – Drive de iluminação LED	17
Figura 6 – Desenho esquemático do projeto	19
Figura 7 – Foto real do projeto	20
Figura 8 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. Halógena)	21
Figura 9 – Espectro de amplitude (Lamp. Halógena)	22
Figura 10 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. Halógena)	22
Figura 11 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. Florescente)	23
Figura 12 – Espectro de amplitude (Lamp. Florescente)	24
Figura 13 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. Florescente)	24
Figura 14 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 1)	25
Figura 15 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 1)	26
Figura 16 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 1)	26
Figura 17 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 2)	27
Figura 18 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 2)	28
Figura 19 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 2)	28
Figura 20 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 3)	29
Figura 21 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 3)	30
Figura 22 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 3)	30

Figura 23 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 4)	31
Figura 24 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 4)	32
Figura 25 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 4)	32
Figura 26 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 5)	33
Figura 27 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 5)	34
Figura 28 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 5)	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ordem, frequência e sequência das harmônicas	07
Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).	11
Tabela 3 – Limites para Equipamentos da Classe C, Iluminação > 25W	12
Tabela 4 – Caracterização das lâmpadas por modelo	35

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Transformada de Fourier (Continua)	08
Equação 3 – Transformada de Fourier (Discreta)	09
Equação 3 – Distorção Harmônica Total (DHT)	09

LISTA DE ABREVIACÕES

LED – Light Emitting Diode (ou Diodo Emissor de Luz)

DH – Distorções Harmônicas

DHT (THD) – Distorção Harmônica Total (Total Harmonic Distortion)

IEC – International Electrotechnical Commission

IEEE – Institute of Electrical and Electronics Engineers

CA – Corrente Alternada

CC – Corrente Contínua

DFT – Transformada Discreta de Fourier

FFT – Transformada Rápida de Fourier

PFC – Power Factor Correction (Correção do Fator de Potência)

EMI – Interferência Eletromagnética

FP – Fator de Potência

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

PRODIST – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica

ACS 712 – Sensor de Corrente ACS 712

LC – Refere-se a filtros LC (formados por indutor “L” e capacitor “C”)

QEE – Qualidade da Energia Elétrica

Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

Sumário

Capítulo 1	1
1.1 Introdução	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1. Objetivo geral	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3 Justificativa	3
1.4 Metodologia	4
1.5 Estrutura do Trabalho	5
Capítulo 2	6
2.1. Conceito	6
2.2. As ferramentas matemáticas para o cálculo das harmônicas	8
2.3. Qualidade de Energia	10
2.4. Normas	10
Capítulo 3	13
3.1. Tipos de Lâmpadas	13
3.2. Harmônicas em lâmpadas	15
3.3. Lâmpadas LEDs	16
Capítulo 4	18
4.1. Desenho Esquemático	18
4.2. Resultados	20
4.2.1 Lâmpada Halógena	21
4.2.2 Lâmpada Fluorescente	23
4.2.3 Lâmpadas LED	25
4.3. Comentários dos resultados	35
Capítulo 5	38
5.1. Conclusões	38
5.2. Trabalhos Futuros	38
Referências	40
Apêndice	42
Apêndice A – Código Arduino	42
Apêndice B – Código MatLab	44

Capítulo 1

Introdução

1.1 Introdução

A análise harmônica em lâmpadas do tipo *Light Emitting Diode* (LED) é um tema relevante na era atual da tecnologia. As lâmpadas LED, conhecidas por sua eficiência energética e longevidade, tornaram-se uma escolha popular para iluminação residencial e comercial na atualidade. No entanto, mesmo com a qualidade da luz que elas emitem, o impacto dessa luz nos sistemas elétricos são questões que merecem uma análise aprofundada.

No Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) estabeleceu a Portaria nº 144 em 13 de março de 2015, que delega a responsabilidade do processo de certificação de lâmpadas LED ao Inmetro e assegura a utilização da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) como pré-requisito para a comercialização desses produtos, tendo em vista que a Portaria n.º 389, de 25 de agosto de 2014, foi instituída, conferindo ao Inmetro a autoridade para definir diretrizes e critérios para a avaliação de conformidade das lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base, comercializadas no país, exigindo padrões mínimos de eficiência, segurança e compatibilidade eletromagnética. Em 2022, essas portarias foram consolidadas na Portaria 69 (BECKER et al., 2023).

As lâmpadas LED, em termos de eficiência energética, demonstram uma superioridade notável em comparação com outros tipos de lâmpadas, como as incandescentes e fluorescentes, que ainda são utilizadas em ambientes residenciais, comerciais e industriais. No entanto, os impactos dessas lâmpadas na qualidade da energia elétrica (QEE) podem ser consideráveis, devido a sua produção de distorções harmônicas (DH), que são senoides múltiplas da frequência fundamental, que em nosso país é 60Hz, sendo originadas das características não lineares dos componentes presentes nos conversores integrados na construção dos circuitos. Embora o volume de injeção de harmônicos por dispositivos residenciais seja relativamente pequeno em comparação com outras fontes, como equipamentos industriais, é importante notar que as cargas residenciais existem em grande

quantidade. Portanto, o efeito coletivo dessas cargas residenciais torna sua contribuição para a distorção harmônica significativa (ARAUJO et al., 2023).

Qualquer sinal de tensão ou corrente que não apresente uma forma de onda senoidal pode causar danos aos componentes do sistema elétrico ou aos dispositivos a eles conectados. As cargas particularmente suscetíveis a harmônicos são aquelas cujos projetos pressupõem uma forma de onda de alimentação perfeitamente senoidal. Equipamentos elétricos que comumente se enquadram nesta categoria incluem processadores de dados e dispositivos de comunicação (BATISTA, 2020)

Segundo (ARAUJO et al., 2023), a presença de distorção harmônica total pode causar uma série de problemas significativos, incluindo a queima, sobrecarga, vibrações e envelhecimento prematuro de geradores, transformadores, motores e capacitores utilizados em equipamentos para correção do fator de potência. Além disso, a DHT pode resultar em sobrecargas no sistema de distribuição devido ao aumento da corrente eficaz, sobrecarga no condutor neutro, e distorção da tensão de alimentação que pode perturbar cargas sensíveis, como equipamentos eletrônicos. A DHT também pode causar perturbações nas redes de comunicação e linhas telefônicas, e operação inadequada de relés, disjuntores e fusíveis. É importante notar que a QEE fornecida pelas concessionárias pode ser questionada em situações onde os níveis de DHT são elevados. Portanto, o controle do nível da DHT é tanto vantajoso quanto desejável.

Com isso a análise harmônica em lâmpadas LED é um campo de estudo crucial na era moderna da tecnologia, com implicações significativas para a eficiência energética e a qualidade da energia elétrica. As regulamentações estabelecidas pelo Inmetro no Brasil demonstram um compromisso com a garantia de padrões mínimos de eficiência, segurança e compatibilidade eletromagnética para esses dispositivos. No entanto, os desafios apresentados pela DHT e seus efeitos potencialmente prejudiciais em componentes do sistema elétrico e dispositivos conectados a eles, incluindo aqueles que são particularmente suscetíveis a harmônicos, destacam a necessidade de um controle rigoroso dos níveis de DHT. Este controle é benéfico tanto para as concessionárias quanto para seus clientes, contribuindo para a melhoria da qualidade da energia elétrica e a promoção de um uso mais seguro e eficiente da tecnologia LED.

1.2 Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Realizar uma análise harmônica em lâmpadas LED, explorando os impactos dessas lâmpadas na qualidade da energia elétrica e identificando possíveis soluções para mitigar os efeitos negativos.

1.2.2. Objetivos específicos

Visando atingir o objetivo principal, alguns objetivos específicos são requeridos, entre eles:

- Investigar as características das lâmpadas LED que podem gerar harmônicos.
- Avaliar o impacto dos harmônicos gerados por lâmpadas LED nos sistemas elétricos.
- Discutir as regulamentações existentes relacionadas às lâmpadas LED e sua eficácia na garantia da qualidade da energia elétrica.
- Propor soluções potenciais para minimizar a distorção harmônica total causada pelas lâmpadas LED.

1.3 Justificativa

A importância desse estudo reside na prevalência dessas lâmpadas na sociedade moderna, devido à sua eficiência energética e longa vida útil. No entanto, as distorções harmônicas que elas podem gerar apresentam desafios significativos para a qualidade da energia elétrica, afetando a eficiência e o desempenho dos sistemas elétricos e dispositivos conectados. Apesar das regulamentações existentes, como as do Inmetro no Brasil, há uma necessidade contínua de pesquisa para entender melhor esses efeitos e desenvolver soluções eficazes. Este estudo, portanto, tem o potencial de contribuir significativamente para a melhoria da eficiência energética e da qualidade da energia elétrica.

1.4 Metodologia

Para o desenvolvimento da presente pesquisa proposta será adotada a metodologia da pesquisa científica:

- I. **Revisão Bibliográfica:** Esta etapa envolverá uma revisão extensa da literatura existente sobre lâmpadas LED e análise harmônica em revista e periódicos, além das regulamentações relevantes estabelecidas pelo Inmetro. Isso ajudará a estabelecer um entendimento sólido do campo de estudo e identificar lacunas na pesquisa existente.
- II. **Coleta de Dados:** Esta etapa envolverá a coleta de dados sobre as características das lâmpadas LED que podem gerar harmônicos. Isso pode envolver testes em laboratório usando diferentes modelos de lâmpadas LED e equipamentos de medição para capturar dados sobre a corrente e a tensão.
- III. **Análise de Dados:** Os dados coletados serão analisados usando técnicas de análise harmônica para identificar e quantificar os harmônicos presentes. Isso também envolverá a análise do impacto desses harmônicos nos sistemas elétricos.
- IV. **Avaliação das Regulamentações:** Esta etapa envolverá uma avaliação detalhada das regulamentações existentes, como as estabelecidas pelo Inmetro, para determinar sua eficácia na garantia da qualidade da energia elétrica no contexto do uso de lâmpadas LED.
- V. **Desenvolvimento de Soluções:** Com base nos resultados da análise de dados e na avaliação das regulamentações, esta etapa visa o desenvolvimento de soluções potenciais para minimizar a DHT causada pelas lâmpadas LED.
- VI. **Conclusões e Recomendações:** Finalmente, o estudo concluirá com um resumo dos resultados, juntamente com recomendações para futuras pesquisas e práticas para o uso de lâmpadas LED.

Cada etapa será realizada de maneira rigorosa e sistemática para garantir a validade e a confiabilidade dos resultados do estudo. Além disso, todas as análises e conclusões serão baseadas em evidências empíricas coletadas e analisadas durante o estudo.

1.5 Estrutura do Trabalho

Além do capítulo 1, este trabalho é composto pelos capítulos 2, 3, e 4. No capítulo 2, serão abordados os conceitos matemáticos de harmônicas e normas que regem o presente tema. O capítulo 3 será relatado o assunto das lâmpadas. No capítulo 4 iremos apresentar os resultados obtidos através de um protótipo. Finalmente, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões do trabalho.

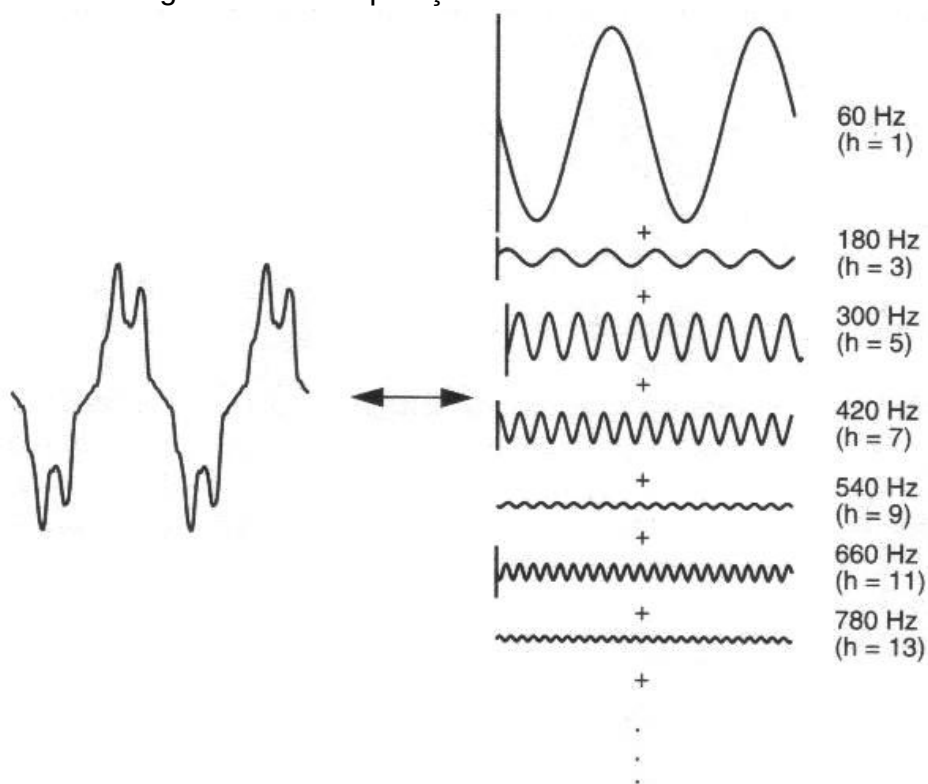
Capítulo 2

Harmônicas:

2.1. Conceito

A análise harmônica refere-se ao estudo detalhado das distorções introduzidas em sistemas elétricos por cargas não lineares, como lâmpadas LED. Tais cargas, ao interagir com a rede elétrica, geram correntes distorcidas que, por sua vez, produzem tensões harmônicas, as quais podem causar diversos problemas nos sistemas elétricos. As harmônicas são componentes de frequências múltiplas da frequência fundamental, que no Brasil é de 60 Hz. Assim, para uma frequência fundamental $h_1 = 60\text{Hz}$, as harmônicas aparecem nas frequências $h_2 = 120\text{Hz}$, $h_3 = 180\text{Hz}$, e assim por diante (OLESKOVICZ, 2007). Na Figura 1 temos a representação de uma onda de sinal global com todas as suas componentes decompostas

Figura 1: Decomposição de ondas harmônicas



Fonte: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Oliveira-121/publication/268355743/figure/fig2/AS:669415179837457@1536612424683/Figura-12-Decomposicao-de-uma-forma-de-onda-atraves-da-Serie-de-Fourier.ppm>. Acessado em 1 de fevereiro de 2025.

As harmônicas podem ser classificadas conforme sua ordem, frequência e sequência. A ordem da harmônica indica quantas vezes a frequência fundamental é multiplicada. As harmônicas de ordem ímpar (3ª, 5ª, 7ª, etc.) são as mais comuns em redes elétricas devido às características dos dispositivos eletrônicos. Já as de ordem par ocorrem com menor frequência e, em geral, estão associadas a assimetrias na forma de onda do sistema. A frequência da harmônica é simplesmente a ordem multiplicada pela frequência fundamental. Por exemplo, a 5ª harmônica em um sistema de 60 Hz aparece a 300 Hz (PROCROBRE, 2001).

A sequência da harmônica refere-se ao seu efeito no sistema trifásico. As harmônicas de sequência positiva giram no mesmo sentido que a fundamental e podem gerar aquecimentos adicionais em motores e transformadores. As de sequência negativa giram no sentido oposto e podem gerar forças de frenagem em motores, reduzindo sua eficiência e aumentando o desgaste. Já as harmônicas de sequência nula (também chamadas homopolares), como a 3ª, 9ª e 15ª, não afetam o giro dos motores, mas podem se somar no condutor neutro, causando sobrecargas e aquecimento excessivo (PROCROBRE, 2001).

Tabela 1: Ordem, frequência e sequência das harmônicas

Ordem	Frequência (Hz)	Sequência
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	$n \times 60$	...

Fonte: ProCobre, 2001

As lâmpadas LED, devido ao uso de conversores de energia baseados em componentes semicondutores, possuem características não lineares que contribuem para a geração de harmônicos. Esses dispositivos convertem a corrente alternada (CA) em corrente contínua (CC) e, durante este processo, injetam correntes distorcidas na rede elétrica.

2.2. As ferramentas matemáticas para o cálculo das harmônicas

Para avaliar o comportamento de cargas não lineares, como as lâmpadas LED, e estimar seus efeitos sobre a rede elétrica, recorre-se a uma série de técnicas matemáticas que permitem decompor, mensurar e quantificar as harmônicas presentes nos sinais de corrente ou tensão. Dentre essas técnicas, destacam-se as transformadas de Fourier e o cálculo da Distorção Harmônica Total (DHT), ambos amplamente empregados em análises de qualidade da energia elétrica.

A Transformada de Fourier é uma das principais ferramentas para investigar o conteúdo harmônico de um sinal. Em sua forma contínua, ela permite decompor qualquer sinal $x(t)$ em uma soma (ou integral) de exponenciais complexas que representam as diferentes frequências presentes (Azevedo, 2022). Matematicamente, essa transformada é dada por:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

Em que:

- $x(t)$ é o sinal no domínio do tempo;
- $X(f)$ é o espectro de frequência correspondente a $x(t)$;
- f é a frequência em hertz (Hz);
- j é a unidade imaginária, tal que $j^2 = -1$.

Na prática, a análise de sinais elétricos, como os decorrentes de medições de corrente ou tensão, geralmente ocorre em janelas de tempo finitas, demandando ferramentas numéricas que possibilitem o processamento computacional. Dessa forma, utiliza-se a Transformada Discreta de Fourier (DFT) ou, em implementações mais eficientes, a Transformada Rápida de Fourier (FFT). Essas variações discretas segmentam o sinal em amostras e retornam o espectro de frequências em pontos igualmente espaçados (SAUTER e AZEVEDO, 2022).

A Transformada de Fourier Discreta (DFT) permite decompor uma sequência de N amostras em seus componentes de frequência. Sua expressão matemática é:

$$X[k] = \sum_{n=0}^{N-1} x[n] e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1 \quad (2)$$

Aqui, $x[n]$ representa a sequência de entrada e $X[k]$ os coeficientes que indicam a contribuição de cada frequência. Já a Transformada Rápida de Fourier (FFT) não é uma nova transformada, mas um algoritmo eficiente para calcular a DFT. Enquanto a DFT direta requer $O(N^2)$ operações, o algoritmo FFT reduz essa complexidade para $O(N \log N)$ por meio de uma decomposição recursiva do problema, o que torna o cálculo muito mais rápido para grandes conjuntos de dados (OPPENHEIM; SCHAFFER, 2009).

Para sinais periódicos, como aqueles que seguem a frequência fundamental da rede elétrica (60 Hz no Brasil), o espectro resultante evidencia linhas espectrais em frequências múltiplas, caracterizando as harmônicas. Portanto, ao aplicar a DFT ou a FFT em medições de corrente de lâmpadas LED, é possível identificar e quantificar o valor de cada componente harmônica, determinando suas amplitudes relativas e fases associadas.

A **Distorção Harmônica Total (DHT)** é um indicador crucial para mensurar o quanto as harmônicas representam em relação à componente fundamental de um sinal, seja de corrente ou tensão (PROCROBRE, 2001). No caso de corrente, a DHT pode ser expressa como:

$$DHT = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \times 100\% \quad (3)$$

Onde:

- I_n é o valor eficaz da corrente na n -ésima harmônica;
- I_1 é o valor eficaz da corrente na frequência fundamental (60 Hz no Brasil)

Essa métrica permite compreender o *impacto relativo* das harmônicas no sinal total. Valores mais altos de DHT indicam maior conteúdo harmônico e, conseqüentemente, maior potencial de problemas na rede elétrica.

2.3. Qualidade de Energia

As harmônicas são distorções na forma de onda senoidal de tensão ou corrente elétrica, causadas principalmente por cargas não lineares, como dispositivos eletrônicos e fontes de alimentação modernas. Essas distorções são descritas pela Taxa de Distorção Harmônica Total (THD), que é amplamente utilizada para avaliar a qualidade da energia elétrica em sistemas industriais, comerciais e residenciais (OLESKOVICZ, 2007).

Com o crescimento do uso de lâmpadas LED, a injeção de harmônicas nos sistemas de distribuição tem se tornado uma preocupação significativa. As lâmpadas LED utilizam conversores eletrônicos que, embora melhorem a eficiência energética, geram harmônicas devido à sua operação não linear. Estudos apontam que muitas dessas lâmpadas, especialmente de baixa potência, não atendem aos limites regulatórios de THD, destacando a necessidade de fiscalização e revisão das normas existentes (ARAUJO et al., 2023).

As consequências das harmônicas incluem aumento do aquecimento em condutores e transformadores, redução do fator de potência e maior susceptibilidade a falhas em equipamentos sensíveis. Além disso, a interação entre as correntes harmônicas e as impedâncias do sistema pode causar ressonâncias, ampliando os efeitos negativos e comprometendo a estabilidade operacional das redes elétricas (PROCROBRE, 2001).

Para mitigar os impactos das harmônicas, são utilizados filtros ativos e passivos, transformadores de isolamento e práticas adequadas de dimensionamento de condutores e transformadores. Esses métodos, aliados à implementação de normas como a IEC 61000-3-2, são essenciais para garantir a qualidade da energia elétrica e prevenir problemas em sistemas modernos (AYAN; TURKAY, 2022).

2.4. Normas

As harmônicas na rede elétrica representam uma preocupação crescente para a qualidade da energia. A norma IEEE 519, "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems", estabelece diretrizes rigorosas para a limitação de distorções harmônicas, com foco em proteger equipamentos sensíveis e garantir a eficiência do sistema. Por exemplo, a norma

especifica que a Distorção Harmônica Total (THD) na tensão deve ser limitada a 5% em sistemas de baixa tensão, enquanto os limites para corrente variam conforme a classe do equipamento, como 5% para equipamentos de classe A.

No contexto brasileiro, o módulo 8 do PRODIST da ANEEL também aborda a questão das harmônicas. Ele define indicadores e limites para distorções harmônicas na forma de onda de tensão, enfatizando a importância da conformidade em regime permanente e transitório. Esse módulo regula os métodos de medição e estabelece padrões de qualidade que asseguram o funcionamento eficiente dos sistemas de distribuição e a proteção dos consumidores contra distorções excessivas. A Tabela 2 abaixo mostra os indicadores de limites para a distorção harmônicas.

Tabela 2 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão Nominal (V_n)		
	$V_n \leq 2,3 \text{ kV}$	$2,3 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,00%	8,00%	5,00%
DTTp95%	2,50%	2,00%	1,00%
DTTi95%	7,50%	6,00%	4,00%
DTT3 95%	6,50%	5,00%	3,00%

Fonte: Modulo 8 do Prodist

A proliferação de equipamentos eletrônicos e cargas não lineares, como inversores e lâmpadas LED, é uma fonte significativa de geração de harmônicas. Segundo o manual do Procobre, essas cargas introduzem perturbações na forma de onda elétrica, o que pode resultar em aquecimento excessivo de equipamentos, disparos de dispositivos de proteção e aumento do consumo de energia. Estratégias de mitigação incluem o uso de filtros harmônicos e transformadores projetados para minimizar os efeitos dessas distorções.

As normas internacionais, como a IEC 61000-3-2, também desempenham um papel crucial na regulação de harmônicas em equipamentos com corrente de entrada inferior a 16 A. Essa norma é amplamente utilizada em testes de conformidade de dispositivos no mercado brasileiro, indicando a necessidade de alinhamento regulatório com padrões globais para a melhoria contínua da qualidade da energia elétrica em escala nacional e internacional. Além disso para garantir que as aferições

de harmônicas realizadas sejam adequadas e padronizadas, ainda existe uma outra norma a IEC 61000-4-7.

Para Lâmpadas de baixa potência variando de 5W a 25W a norma dá uma flexibilidade maior aos fabricantes, tendo em vista a baixa potência elétrica invalidade. Nesse caso a norma diz que:

Os equipamentos de iluminação com potência nominal superior ou igual a 5 W e inferior ou igual a 25 W devem atender a um dos três conjuntos de requisitos a seguir:

- As correntes harmônicas não devem exceder os valores relacionados na Tabela 3, coluna 2;
- A terceira harmônica da corrente, expressa como porcentagem da corrente fundamental, não deve exceder 86%, e a quinta harmônica não deve exceder 61%. Além disso, a forma de onda da corrente de entrada deve ser tal que:
 - (A) A corrente atinja o limiar de 5% antes de 0° ou a 60°;
 - (B) Tenha seu pico antes de 65°;
 - (C) Não caia abaixo do limiar de 5% antes de 90°, referenciado a qualquer cruzamento de zero da tensão fundamental de alimentação.
 - (D) O limiar de corrente é 5% do maior pico absoluto de corrente registrado na janela de medição, e as medições de ângulo de fase devem ser feitas no ciclo que inclui esse pico absoluto (ver Figura 2).
 - (E) Componentes de corrente com frequências acima de 9 kHz não devem influenciar essa avaliação (um filtro semelhante ao da seção 8 da IEC 61000-4-7:2002 e IEC 61000-4-7:2002/AMD1:2008 pode ser usado).
- O THD não deve exceder 70%. A terceira harmônica da corrente, expressa como porcentagem da corrente fundamental, não deve exceder 35%; a quinta harmônica não deve exceder 25%; a sétima harmônica não deve exceder 30%; a nona e a décima primeira harmônica não devem exceder 20%; e a segunda ordem harmônica não deve exceder 5%. (IEC, 2020, p. 23)

Já para dispositivos de potências maiores superiores a 25W a norma define a Tabela 3 abaixo como limites máximos permitidos para os harmônicos da corrente de entrada de equipamentos de iluminação, incluindo lâmpadas LED.

Tabela 3 – Limites para Equipamentos da Classe C, Iluminação > 25W

Ordem Harmônica (h)	Corrente Harmônica Máxima Permitida (% da Corrente Fundamental)
2 ^a	2%
3 ^a	$30 \times \lambda$ (ou 27% caso o fator de potência não seja especificado)
5 ^a	10%
7 ^a	7%
9 ^a	5%
11 ^a a 39 ^a (ímpares)	3%

Fonte: IEC 61000-3-2

Capítulo 3

Lâmpadas

3.1. Tipos de Lâmpadas

As lâmpadas elétricas desempenham um papel fundamental nos sistemas de iluminação, sendo classificadas em diversos tipos conforme sua tecnologia e aplicação. As lâmpadas incandescentes e halógenas, por exemplo, baseiam-se no aquecimento de um filamento, resultando em um consumo elevado de energia, mas com baixa eficiência luminosa (AYAN; TURKAY, 2022). A seguir, na Figura 2 temos representado a lâmpada halógena.

Figura 2 – Lâmpada halógena



Fonte:

https://pt.wikipedia.org/wiki/L%C3%A2mpada_de_halog%C3%AAneo#/media/Ficheiro:Wolfram-Halogengl%C3%BChlampe.png. Acessado em 19 de fevereiro de 2025.

Em contrapartida, lâmpadas fluorescentes compactas (CFLs) e tubulares introduzem um sistema de ionização de gases, que, embora mais eficiente, ainda apresenta desafios relacionados à disposição ambiental devido ao uso de mercúrio em sua composição (OLESKOVICZ, 2007). Na Figura 3 temos alguns exemplos de lâmpadas florescentes.

Figura 3 – Lâmpadas Florescente



Fonte: <https://viverdeeletrica.com/wp-content/uploads/2022/08/o-que-e-lampadas-fluorescentes-e-os-tipos-1024x576.jpg.webp>. Acessado em 2 de fevereiro de 2025.

Com a evolução tecnológica, surgiram as lâmpadas de vapor metálico e sódio de alta pressão, com aplicações predominantes em iluminação pública e industrial. Essas lâmpadas oferecem maior eficiência luminosa, mas requerem um controle específico para evitar oscilações de tensão (BATISTA, 2020).

Mais recentemente, as lâmpadas de estado sólido, como os LEDs (diodos emissores de luz), dominaram o mercado devido à sua eficiência energética superior e vida útil prolongada. Essa tecnologia reduz significativamente o consumo de energia em comparação com lâmpadas tradicionais e apresenta alta flexibilidade em termos de design e aplicações (BATISTA, 2020). Na Figura 4 vemos alguns modelos de lâmpadas LED.

Figura 4 – Lâmpadas LED



Fonte: <https://www.sinaleirosnj.com.br/images/lampadas-leds-01.jpg>. Acessado em 2 de fevereiro de 2025.

No entanto, cada tipo de lâmpada possui características específicas que influenciam sua interação com a rede elétrica. Por isso, a escolha adequada deve considerar fatores como eficiência, impacto ambiental e conformidade com normas de qualidade de energia (ARAUJO et al., 2023).

3.2. Harmônicas em lâmpadas

As harmônicas geradas por lâmpadas são uma consequência direta da não-linearidade de seus circuitos eletrônicos. As CFLs e LEDs, por exemplo, utilizam conversores eletrônicos internos para operar, o que resulta em correntes distorcidas que geram harmônicas. Essas distorções podem causar problemas na rede elétrica, como aquecimento excessivo de transformadores e aumento das perdas de energia (OLESKOVICZ, 2007).

A norma IEEE 519 e as regulamentações internacionais, como a IEC 61000-3-2, estabelecem limites rigorosos para a emissão de harmônicas por equipamentos. No entanto, estudos mostram que lâmpadas de baixa potência, especialmente LEDs com potências abaixo de 25 W, muitas vezes não atendem a esses limites, destacando a necessidade de regulamentação mais rigorosa em mercados como o brasileiro (ARAUJO et al., 2023).

Outro problema associado às harmônicas em lâmpadas é a interação entre diversas unidades em um mesmo circuito, o que pode amplificar as distorções harmônicas devido à ressonância entre componentes. A utilização de filtros harmônicos passivos e ativos pode mitigar esses efeitos, mas requer planejamento cuidadoso para evitar novos problemas, como alterações na impedância do sistema (AYAN; TURKAY, 2022).

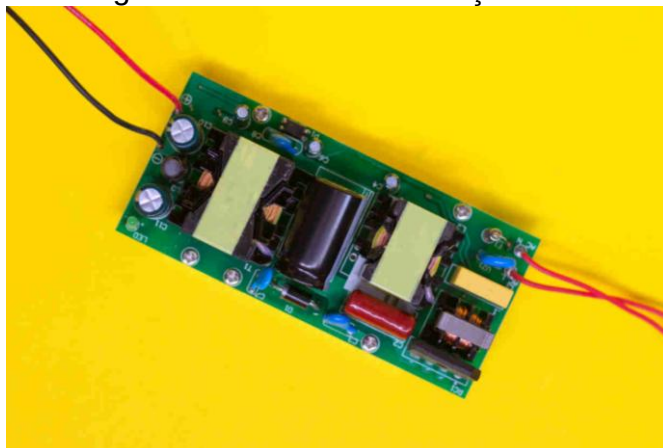
Além disso, a conformidade com normas é essencial para prevenir problemas de qualidade de energia em sistemas com alta densidade de lâmpadas não-lineares. A análise periódica dos níveis de distorção harmônica em instalações é uma prática recomendada para garantir a operação eficiente e segura (IEEE, 2014).

3.3. Lâmpadas LEDs

Os LEDs se consolidaram como uma tecnologia revolucionária na iluminação, oferecendo alta eficiência energética, longa vida útil e flexibilidade de design. Essa tecnologia opera por meio de semicondutores que emitem luz quando energizados, reduzindo significativamente as perdas de energia associadas ao calor, como ocorre em lâmpadas incandescentes e fluorescentes (AYAN; TURKAY, 2022).

Essa tecnologia de iluminação baseia-se no uso de drivers, que realizam a conversão e a regulação da energia elétrica de forma eficiente, transformando-a em luz através dos diodos emissores (LEDs). Esses dispositivos operam com corrente contínua e em tensões significativamente inferiores às fornecidas pela concessionária, o que não só aumenta a segurança do sistema, mas também potencializa a eficiência energética. Os drivers desempenham um papel crucial ao garantir uma corrente estável e proteger os LEDs contra variações e picos de tensão, fatores que poderiam comprometer o desempenho e a durabilidade dos componentes. Ademais, a integração de sistemas eletrônicos encapsulados – tanto interna quanto externamente às lâmpadas – possibilita a implementação de controles avançados. Na Figura 5 temos ilustrado um drive eletrônico de uma luminária LED.

Figura 5 – Drive de iluminação LED



Fonte: <https://www.efectoled.com/blog/pt/wp-content/uploads/sites/3/2021/11/driver-LED1.jpg>.
Acessado em 23 de fevereiro de 2025.

Apesar das vantagens, as lâmpadas LEDs são uma fonte significativa de harmônicas na rede elétrica. O conversor eletrônico interno necessário para seu funcionamento é responsável por distorcer a corrente elétrica, gerando harmônicas que podem impactar negativamente a qualidade da energia. Essa questão é amplificada em sistemas que utilizam grande quantidade de LEDs, como iluminação pública e industrial, exigindo soluções como filtros harmônicos para mitigar os impactos (ARAUJO et al., 2023).

No Brasil, a Portaria Inmetro nº 389/2014 e a norma IEC 61000-3-2 estabelecem diretrizes para controle da distorção harmônica em LEDs. Contudo, estudos indicam que lâmpadas de baixa potência frequentemente estão fora dos limites estabelecidos, exigindo revisões normativas e maior fiscalização para garantir a conformidade dos produtos comercializados.

Os LEDs apresentam desafios específicos em aplicações dimerizáveis, pois o ajuste da luminosidade pode alterar o fator de potência e aumentar os níveis de harmônicas. A padronização de componentes e o desenvolvimento de tecnologias mais avançadas são passos importantes para superar essas limitações e maximizar os benefícios dessa tecnologia (BECKER et al., 2023).

Por fim, a disseminação do uso de LEDs requer atenção especial às normas e regulamentações para garantir que seu impacto ambiental e na rede elétrica seja minimizado. A evolução contínua da tecnologia, aliada ao fortalecimento das diretrizes regulatórias, será essencial para a consolidação dessa tecnologia como padrão global (ARAUJO et al., 2023).

Capítulo 4

Parte Prática e Simulações

4.1. Desenho Esquemático

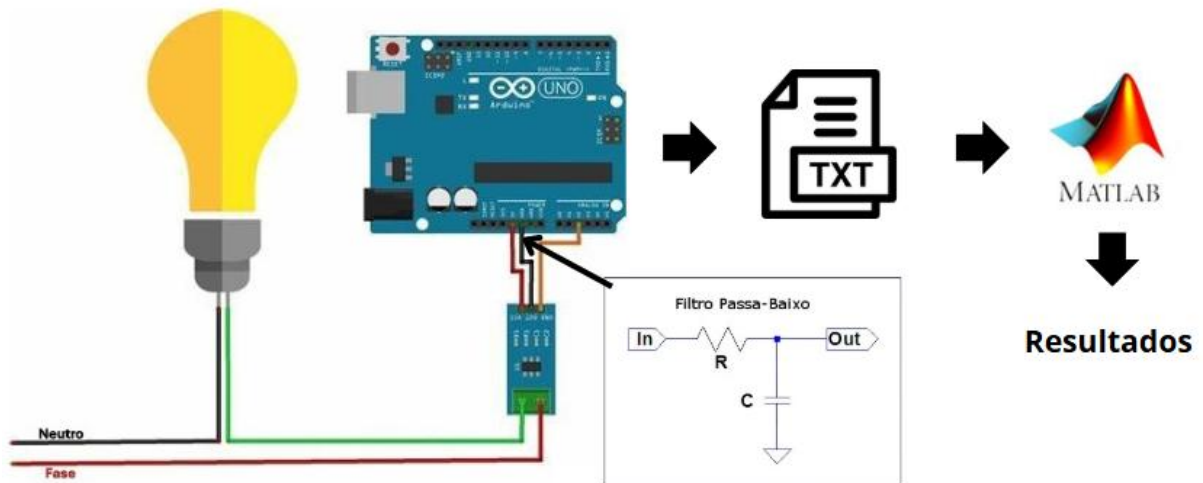
Para esse trabalho foram utilizadas poucas ferramentas, mas de grande importância. Assim sendo, foi utilizado:

- A. Arduino uno R3.
- B. Sensor de corrente ACS 712 de 5A.
- C. Filtro passa baixa, resistor 240Ω , capacitor 100nF
- D. MATLAB e software de programação e leitura do Arduino instalados.

O filtro passa baixa nesse caso é de grande importância tendo em vista que as correntes estudadas são de pequena amplitude e o sensor ACS 712 tem ruídos internos em todas as faixas de frequência até próximo de 100kHz , sendo assim, só se faria desprezível se as correntes medidas fossem de magnitudes mais elevadas, o que não é o caso. Dessa forma o filtro utilizado tem frequência de corte de $6,63\text{kHz}$.

O desenho usado para todos os casos analisados foi o mesmo, com a ligação em série da lâmpada, filtro passa baixa e os terminais de medição do ACS712, com as ligações devidas entre o sensor e o Arduino. O objetivo do trabalho é obter as magnitudes de harmônicas até a 12ª ordem, o que caracteriza frequência de 720Hz , sendo assim de acordo com o teorema de Nyquist temos que ter uma frequência de amostragem de no mínimo duas vezes maior que a estudada, o que levou a definir a frequência de amostragem do trabalho para 2kHz . Na Figura 6 a baixo se encontra o desenho com todas as ligações utilizadas.

Figura 6 – Desenho esquemático do projeto



Fonte: Autor

Após a construção do esquema, o processamento é feito pelo Arduino responsável por converter os valores de tensão padronizados de saída do ACS712 em valores de corrente, automatizando assim essa conversão e entregando os valores prontos para serem analisados computacionalmente. Essa padronização da tensão acontece com valores de 0V a 5V, onde 2,5V é a tensão correspondente a 0A e a sensibilidade de 185 mV/A. Na Figura 7 abaixo temos uma fotografia do esquema real construído.

Figura 7 – Foto real do projeto



Fonte: Autor

Após a obtenção dos dados pelo Arduino, o processamento é todo realizado no MATLAB, onde realizamos a FFT e a DHT para obtenção dos valores e gráficos correspondentes. O Código utilizado tanto no Arduino quanto no MATLAB estão em ANEXOS.

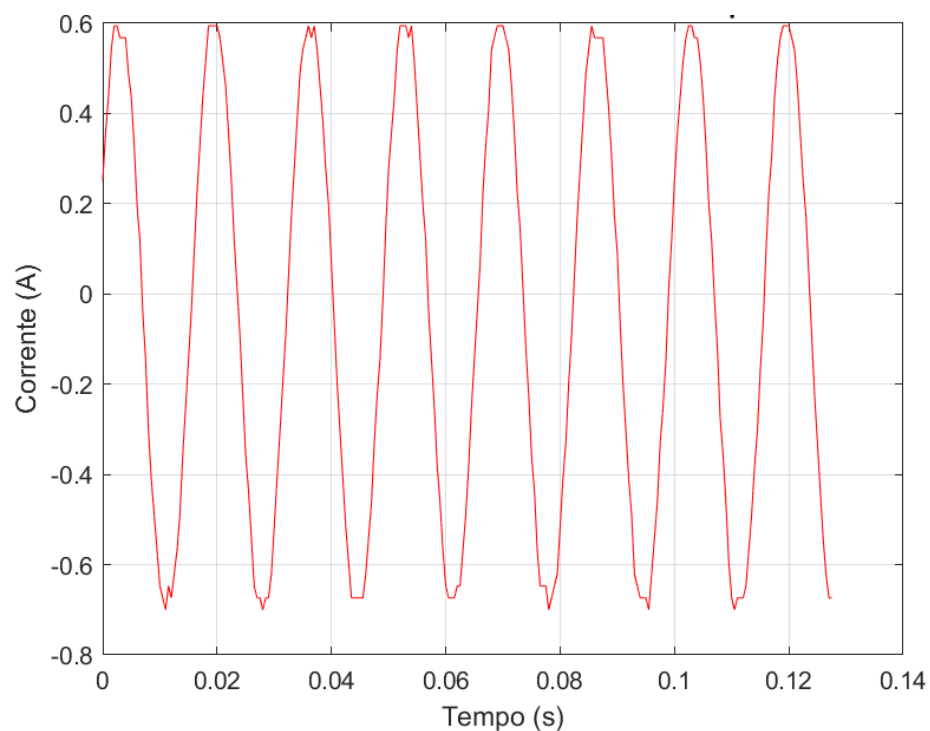
4.2. Resultados

A análise de harmônicas foi realizada para diferentes tipos de lâmpadas, incluindo uma lâmpada halogênica de 42W, uma lâmpada fluorescente de 15W e cinco modelos distintos de lâmpadas LED de 15W, identificadas como LED 1, LED 2, LED 3, LED 4 e LED 5 cada uma de fabricante diferente. Iremos avaliar a distorção harmônica total (DHT) e a contribuição das harmônicas individuais em cada caso, analisando os impactos dessas fontes de iluminação na qualidade de energia elétrica. O estudo deste trabalho é focado nas lâmpadas LEDs, mas para fiz de comparação será feito análises em outras tecnologias.

4.2.1 Lâmpada Halógena

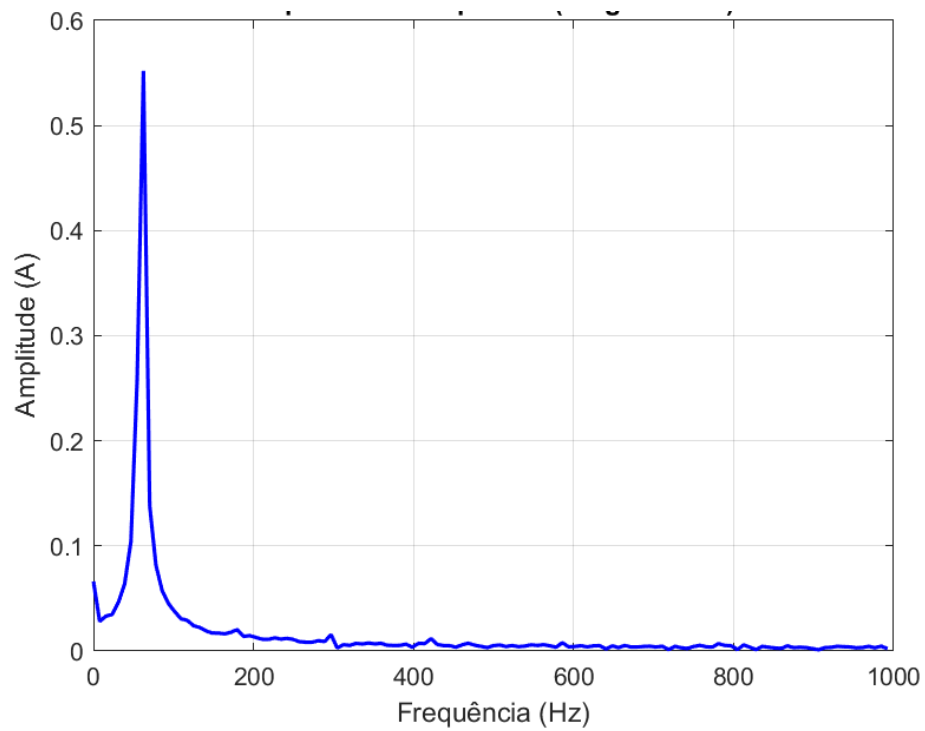
A lâmpada halogênica apresentou um DHT de 7,95%, indicando uma distorção praticamente irrelevante para a rede elétrica. A análise espectral mostrou que as harmônicas de ordem superior são praticamente inexistentes, reforçando o comportamento puramente resistivo dessa tecnologia. Com isso, a lâmpada halógena pode ser considerada uma carga linear, sem impactos negativos na rede. Abaixo temos os gráficos que obtivemos na análise dessa tecnologia de lâmpada.

Figura 8 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. Halógena)



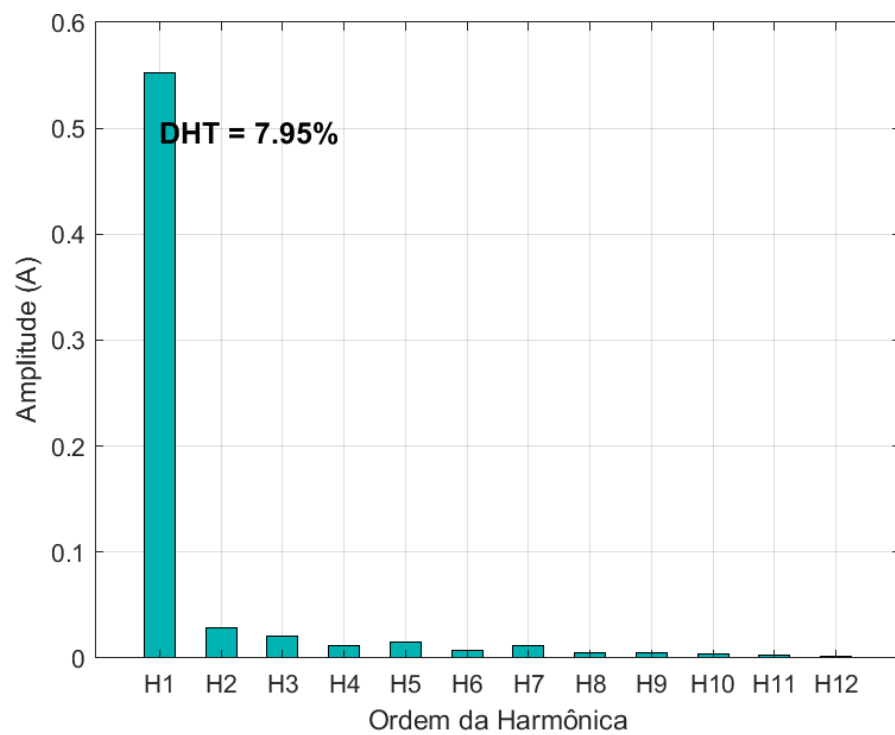
Fonte: Autor

Figura 9 – Espectro de amplitude (Lamp. Halógena)



Fonte: Autor

Figura 10 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. Halógena)

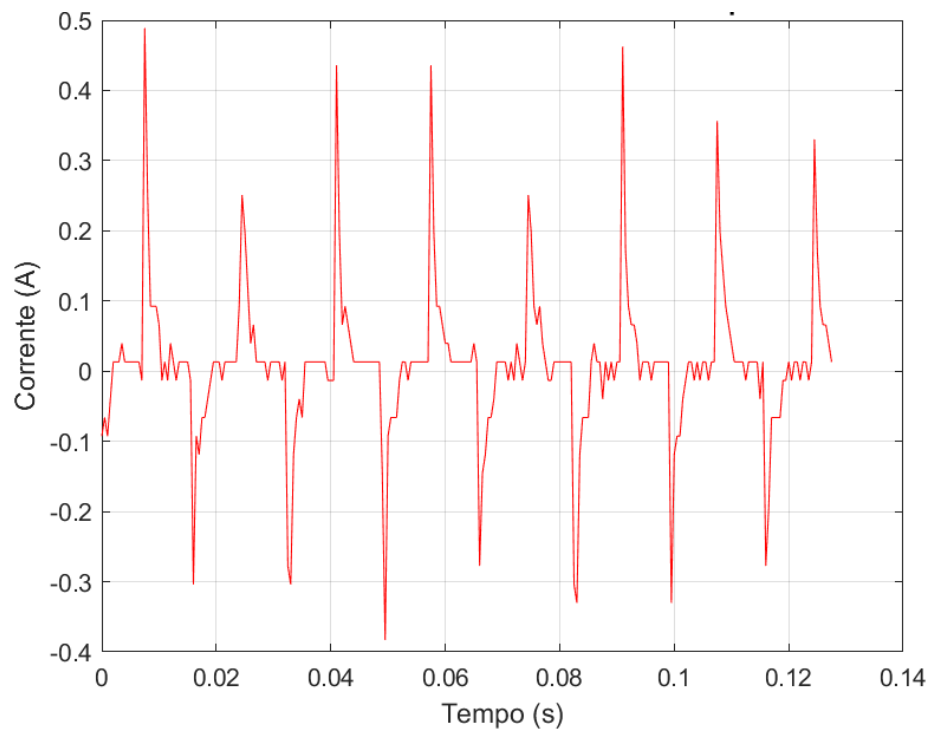


Fonte: Autor

4.2.2 Lâmpada Fluorescente

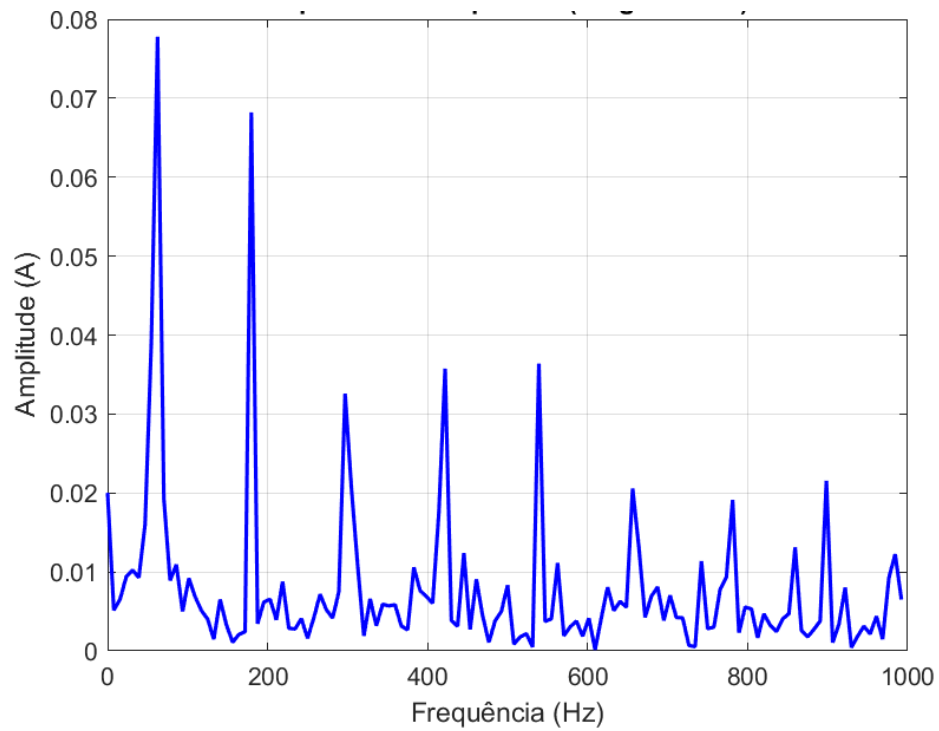
A lâmpada fluorescente apresentou um DHT excessivo de 120,93%, evidenciando uma forte presença de componentes harmônicos. O espectro revelou que as harmônicas de ordem 3, 5, 7 e 9 foram as mais significativas, com amplitudes superiores a 20% da componente fundamental. Esse resultado indica que essa tecnologia introduz sérias distorções na rede elétrica, podendo comprometer a eficiência de equipamentos sensíveis e aumentar as perdas no sistema. Abaixo na Figura 11, temos graficamente os resultados obtidos.

Figura 11 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. Florescente)



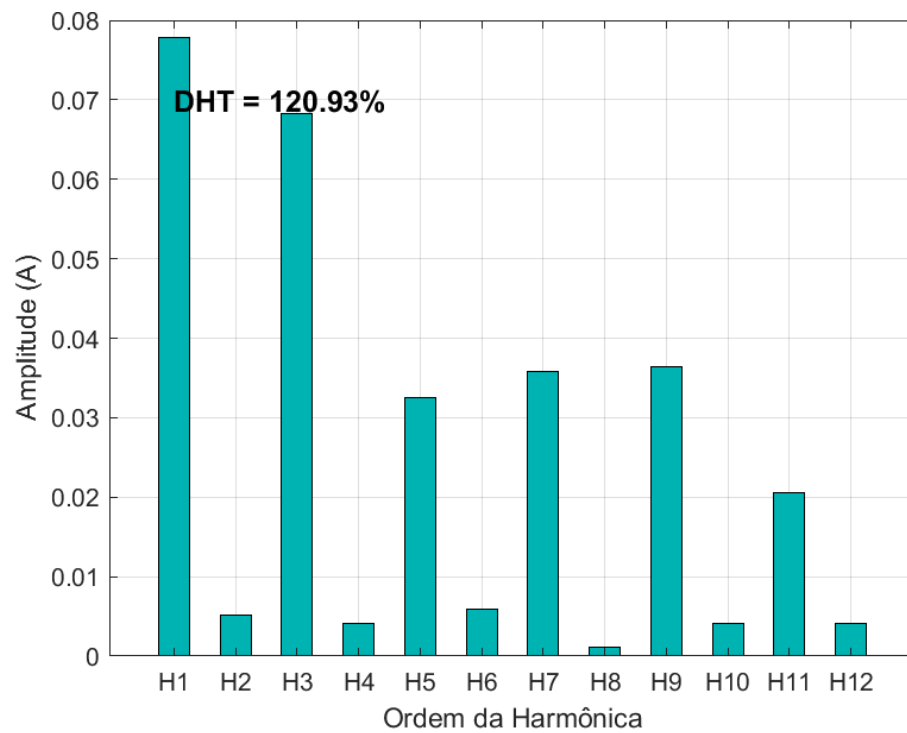
Fonte: Autor

Figura 12 – Espectro de amplitude (Lamp. Florescente)



Fonte: Autor

Figura 13 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. Florescente)



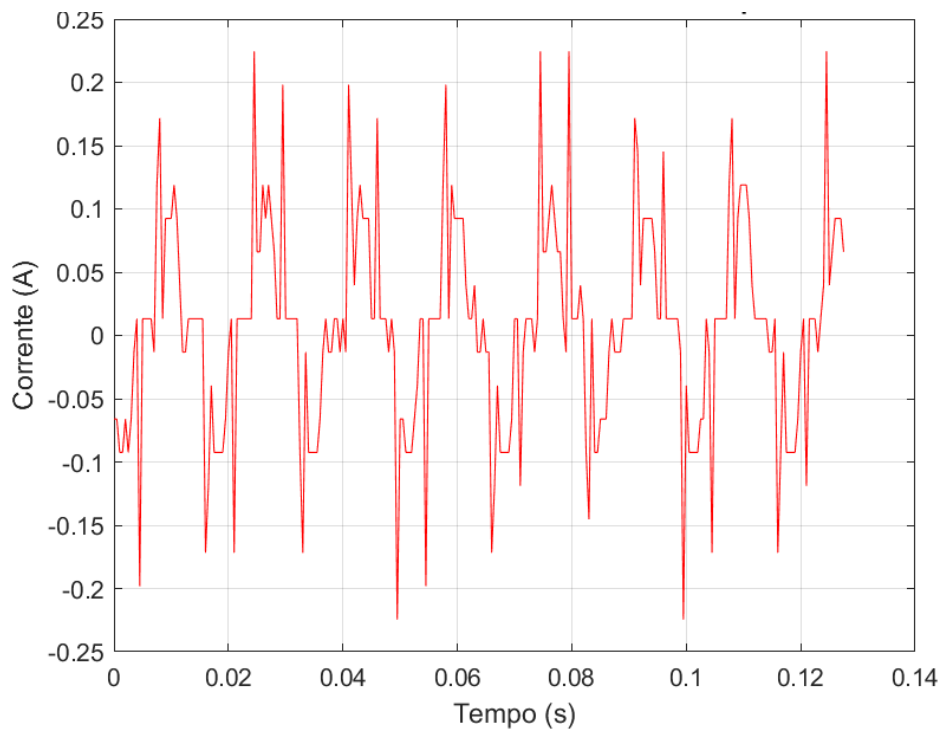
Fonte: Autor

4.2.3 Lâmpadas LED

As lâmpadas LED que é de fato o foco do estudo apresentaram valores de DHT variáveis de 63,22% a 87,60%, com as harmônicas de ordem ímpares se destacando com amplitudes relevantes, o que sugere que a qualidade dos circuitos internos tem impacto direto na distorção gerada. Os resultados obtidos foram:

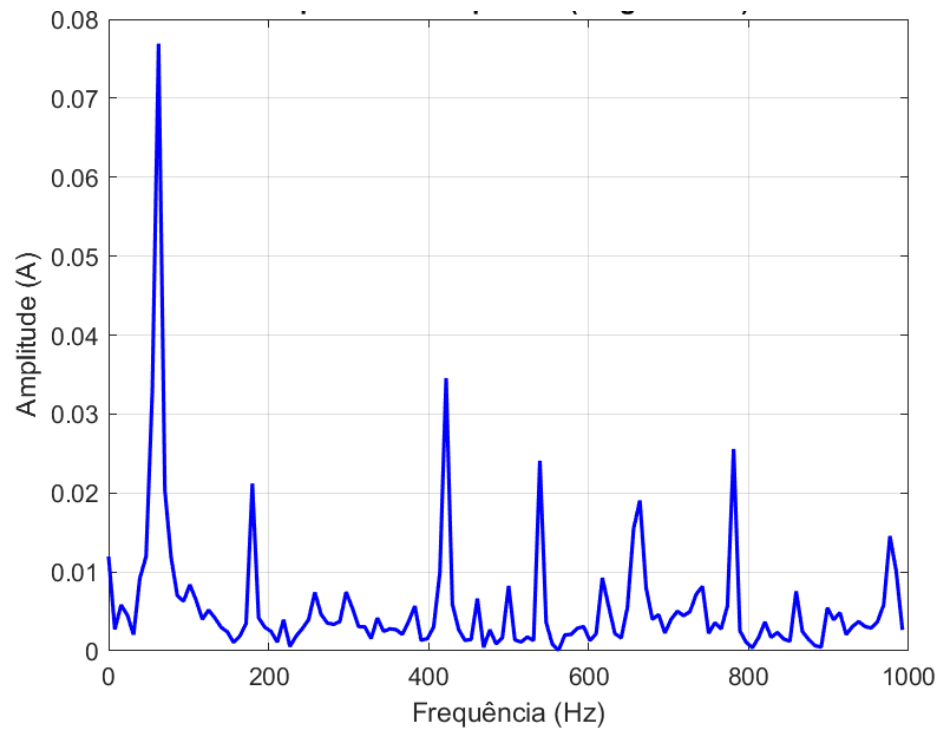
- **LED 1:** DHT = 66,03%, com harmônica de 7^a a ordem predominante, atingindo cerca de 30% da fundamental. Abaixo os gráficos com resultados.

Figura 14 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 1)



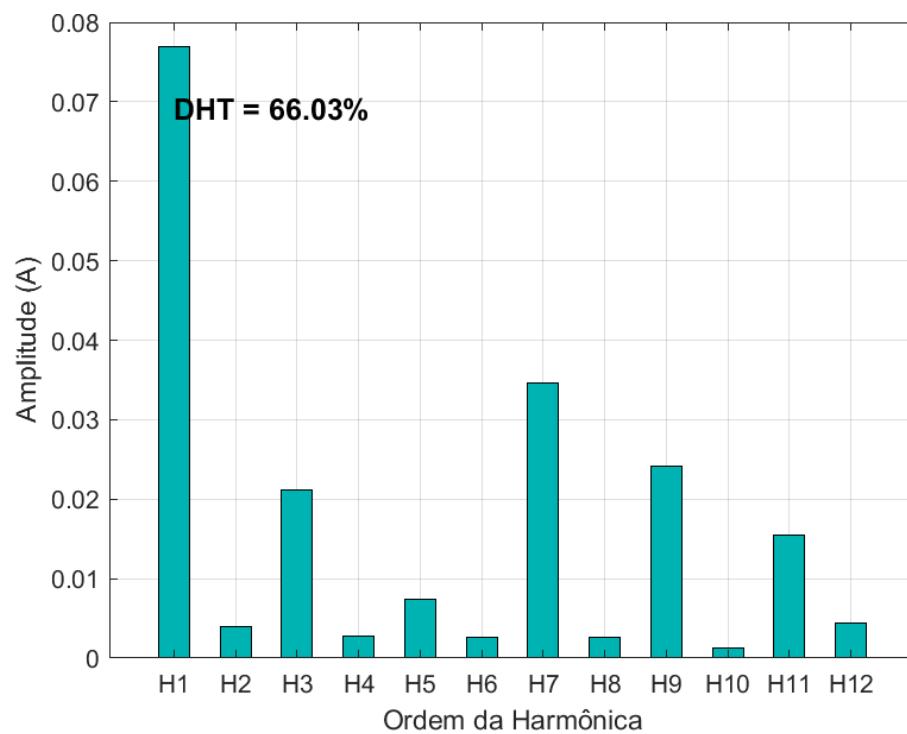
Fonte: Autor

Figura 15 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 1)



Fonte: Autor

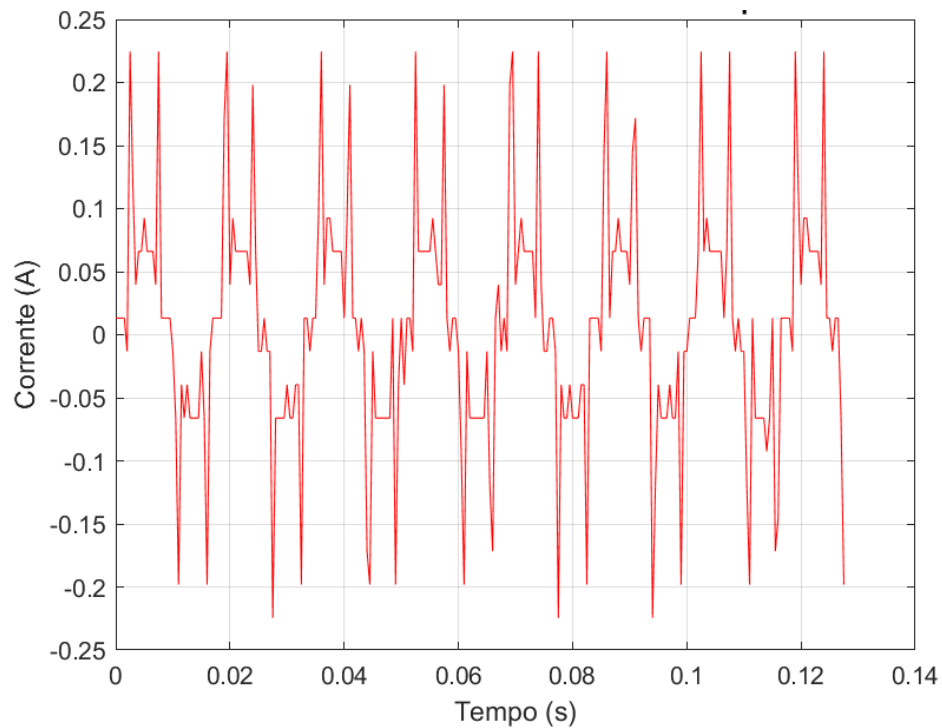
Figura 16 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 1)



Fonte: Autor

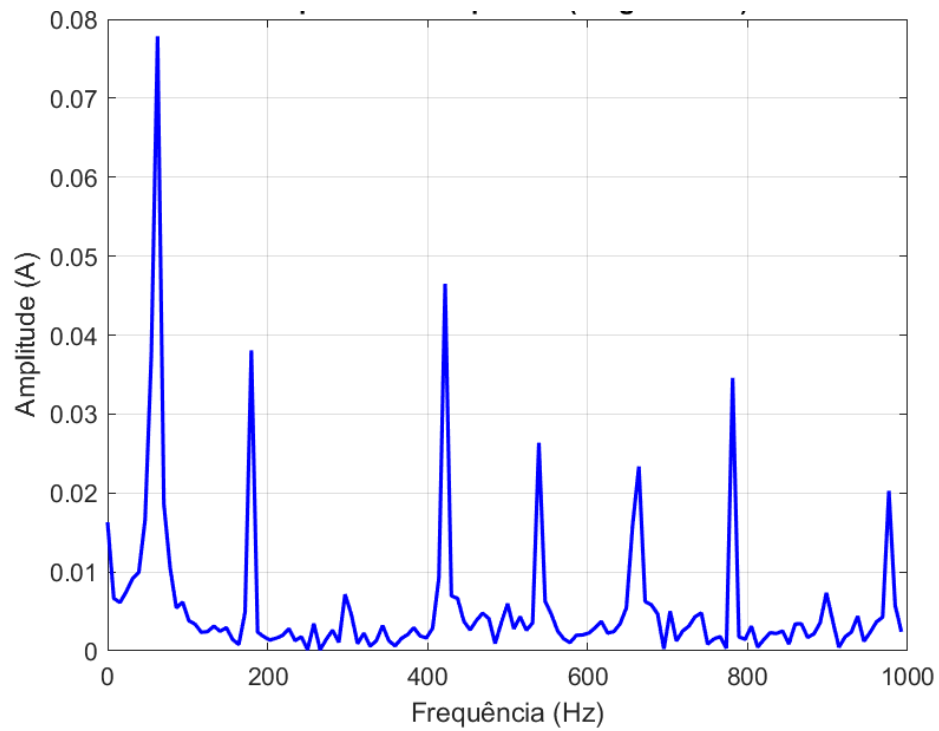
- **LED 2:** DHT = 87,60%, Comportamento parecido com o LED 1 só que com amplitudes maiores, evidenciando uma contribuição significativa da 3ª, 7ª e 9ª ordem, com amplitudes superiores a 20%. Abaixo os gráficos com resultados.

Figura 17 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 2)



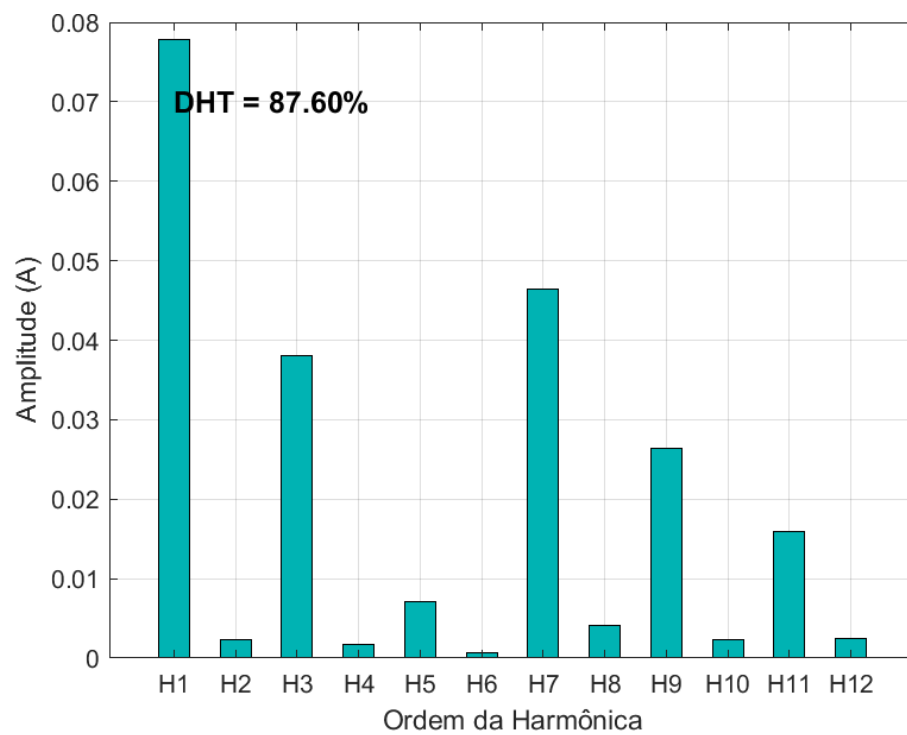
Fonte: Autor

Figura 18 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 2)



Fonte: Autor

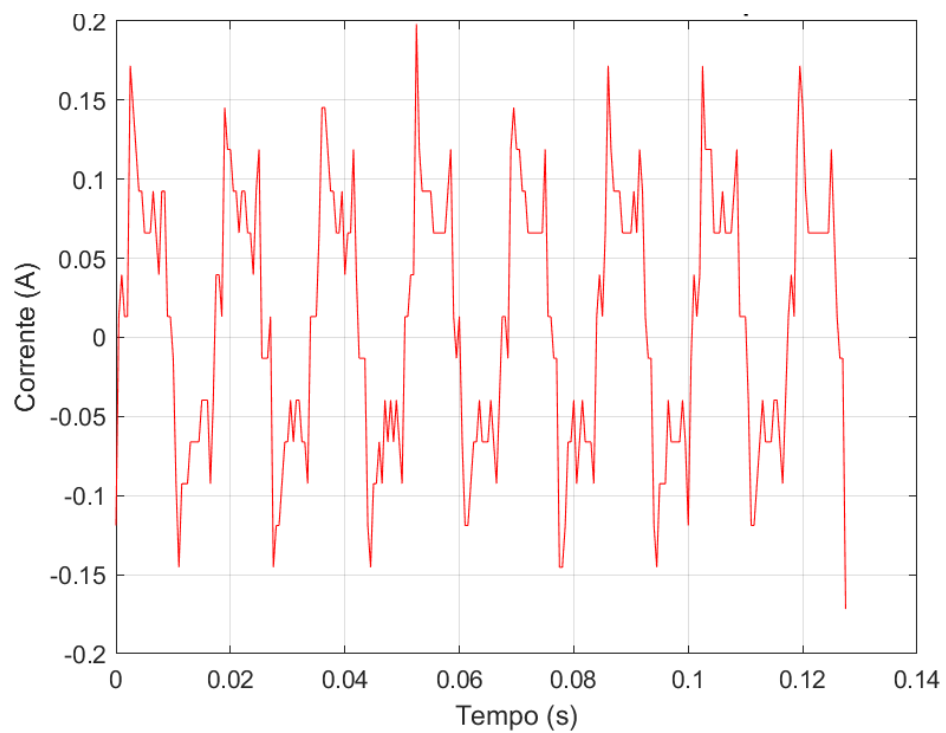
Figura 19 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 2)



Fonte: Autor

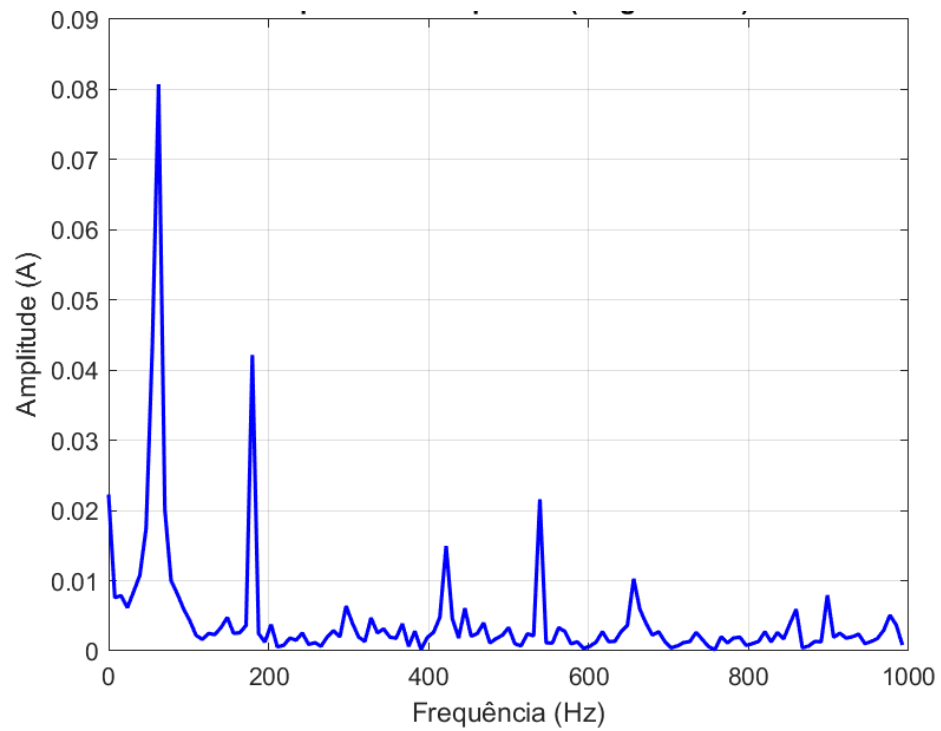
- **LED 3:** DHT = 63,53%, destacando harmônicas de 3ª e 9ª ordem, mas com 5ª ordem de baixa amplitude inferior a 11ª ordem. Nas Figuras 20 a 22 temos os gráficos com resultados.

Figura 20 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 3)



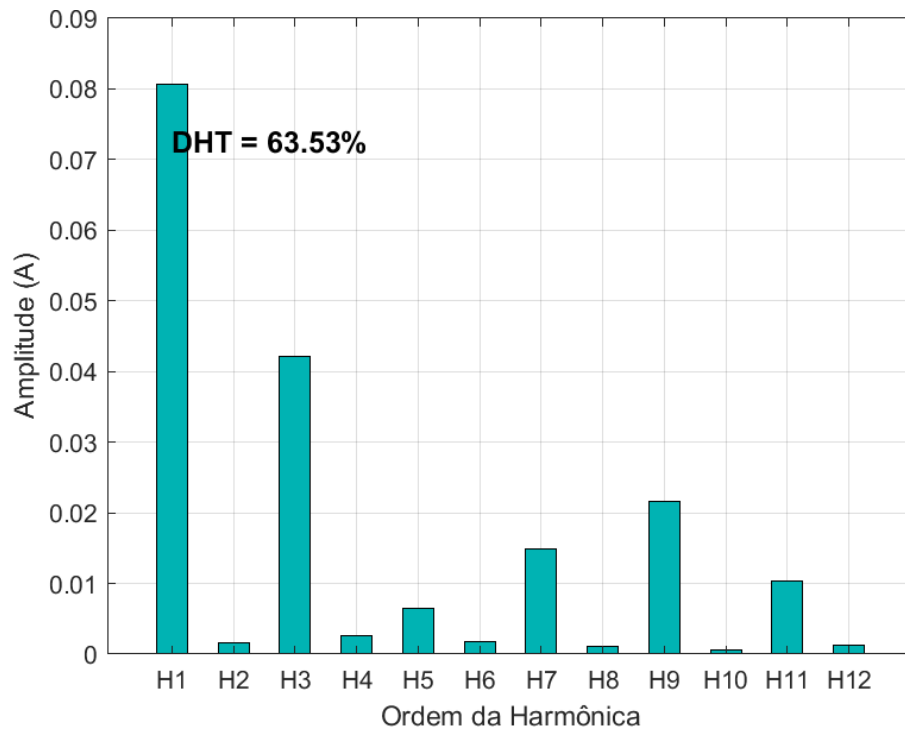
Fonte: Autor

Figura 21 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 3)



Fonte: Autor

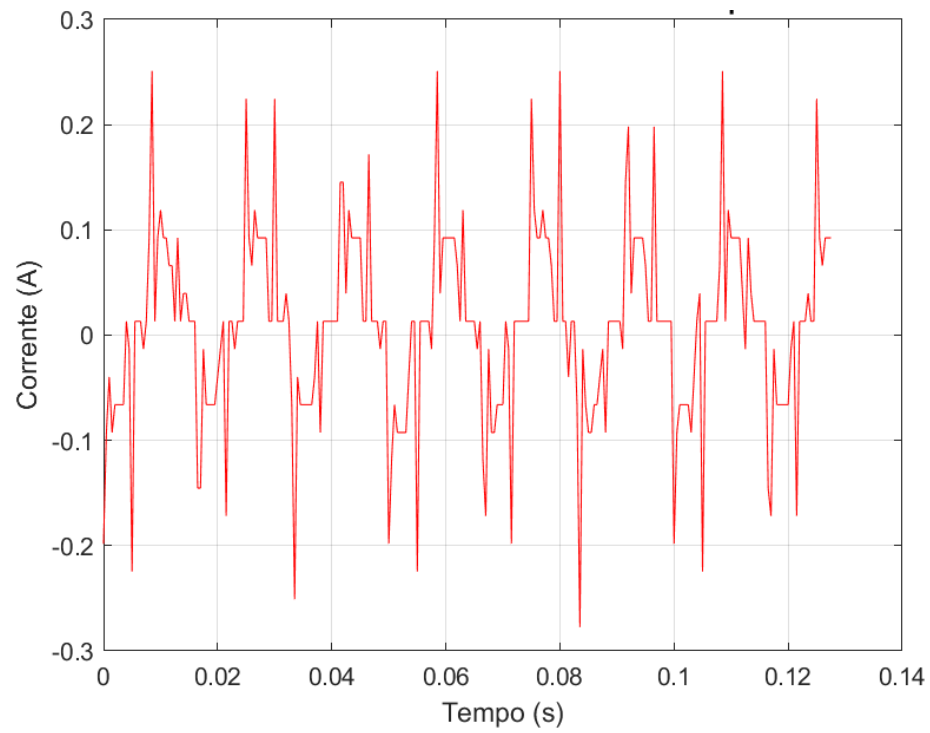
Figura 22 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 3)



Fonte: Autor

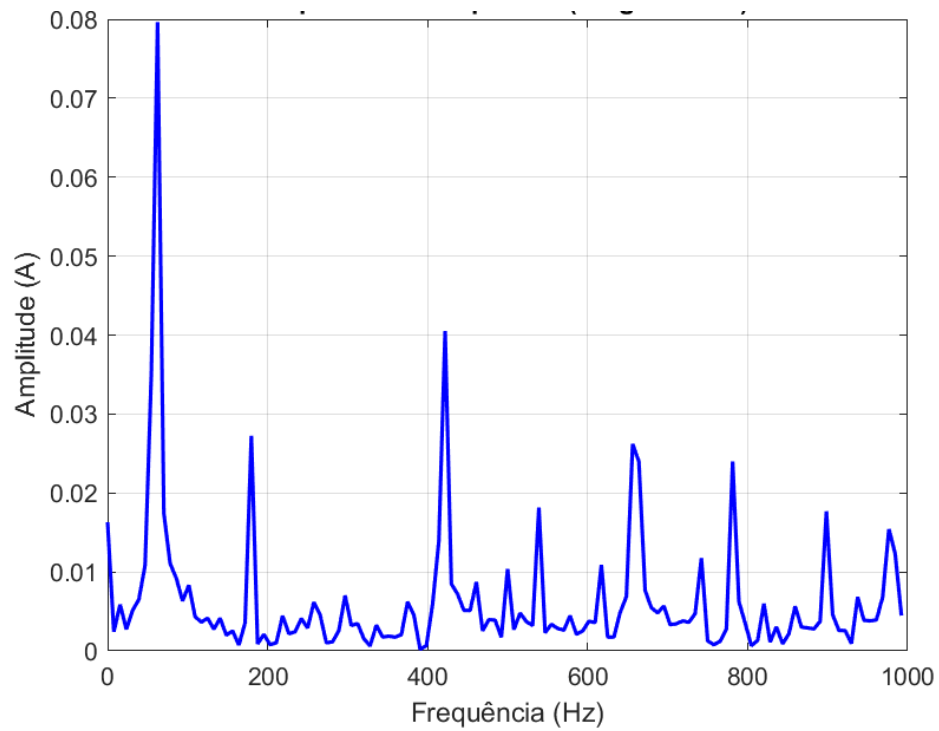
- **LED 4:** DHT = 74,58%, com maior impacto da 3ª, 7ª e 11ª ordem, atingindo picos superiores a 25%. Abaixo os gráficos com resultados.

Figura 23 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 4)



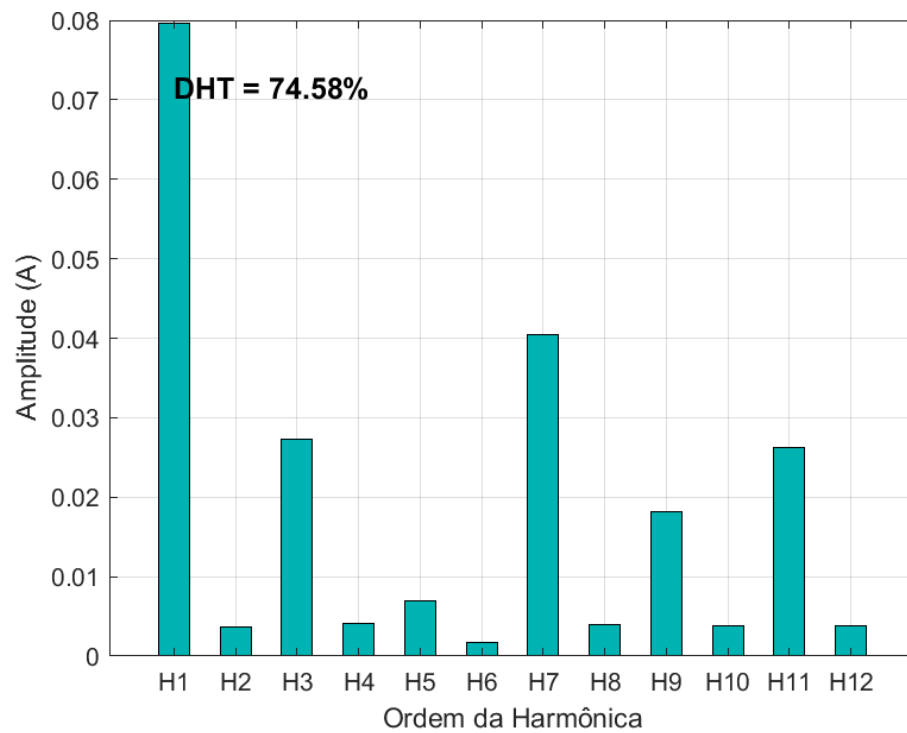
Fonte: Autor

Figura 24 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 4)



Fonte: Autor

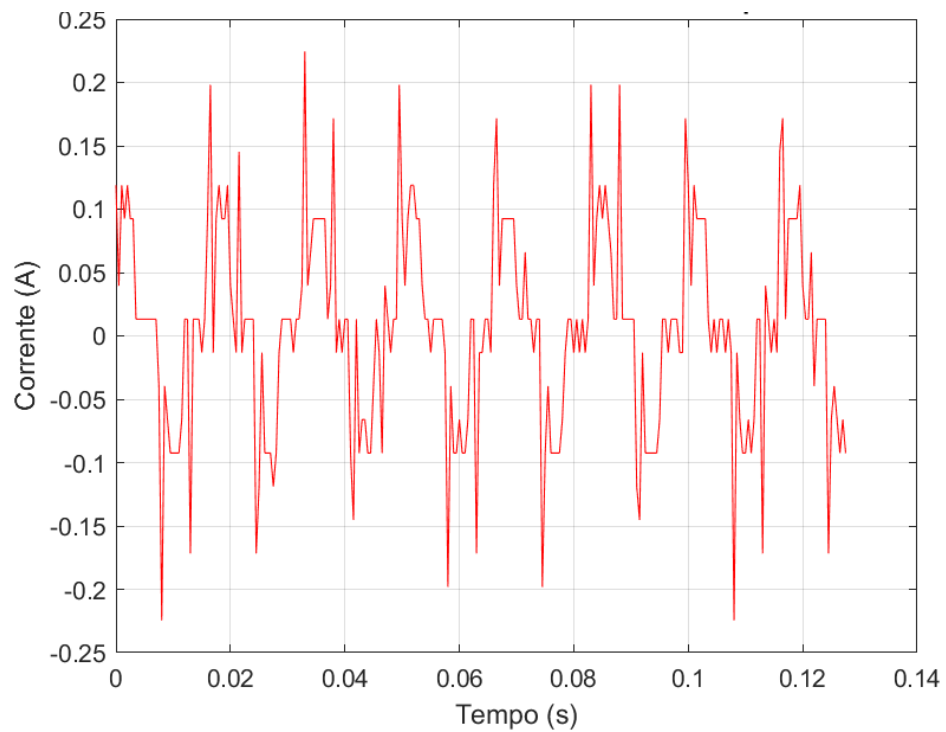
Figura 25 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 4)



Fonte: Autor

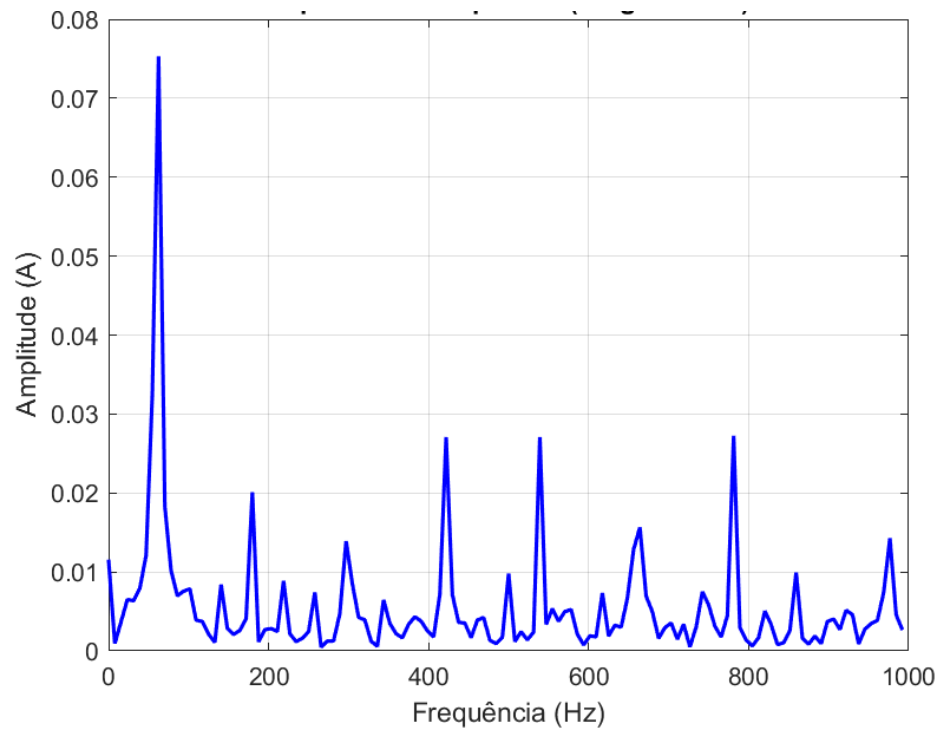
- **LED 5:** DHT = 63,22%, com harmônicas de 7ª e 9ª ordem dominantes. Abaixo os gráficos com resultados.

Figura 26 – Sinal de corrente no domínio do tempo (Lamp. LED 5)



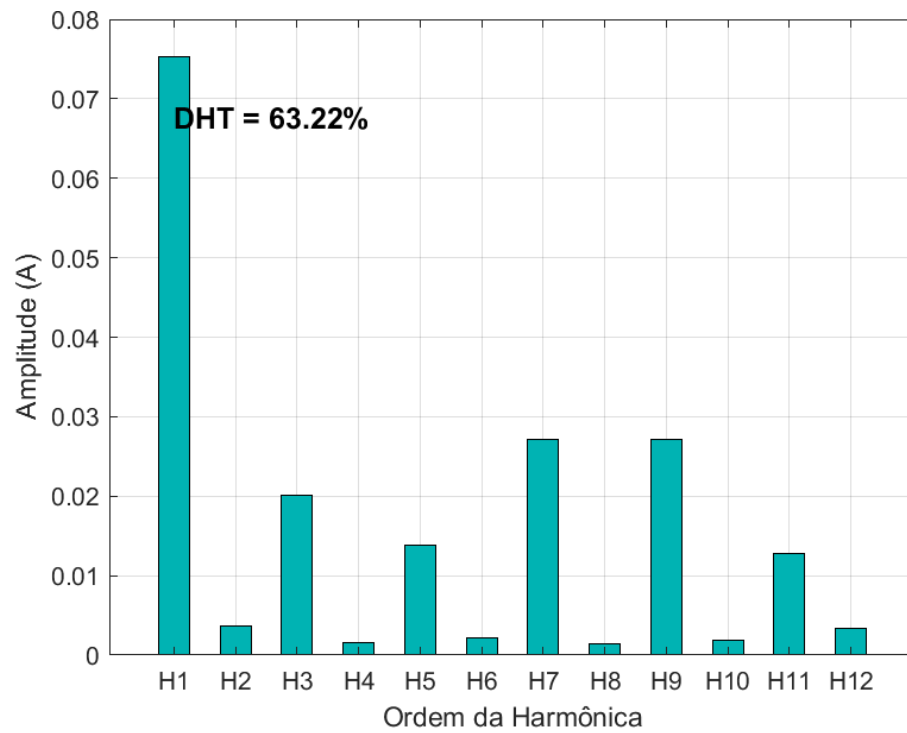
Fonte: Autor

Figura 27 – Espectro de amplitude (Lamp. LED 5)



Fonte: Autor

Figura 28 – Primeiras 12 Harmônicas de 60Hz (Lamp. LED 5)



Fonte: Autor

Assim depois de constatadas tantas distorções harmônicas observadas abaixo temos tabelado todos os valores de DHT obtidos em cada análise, assim aferindo as diferenças entre cada tecnologia, no caso Halógena, Florescente e Led, como também o que difere entre fabricantes no quesito distorção harmônica para cada modelo.

Tabela 4 – Caracterização das lâmpadas por modelo

Modelos	DHT na Corrente (%)	Fator de potência (FP)	Fluxo Luminoso (Lm)	Valor Aproximado (R\$)
Lâmpada Halógena (42w)	7,95	≈ 1	629	4,50
Lâmpada Florescente	120,93	0,5	915	9,97
Lâmpada LED 1	66,03	≥0,70	1311	8,99
Lâmpada LED 2	87,60	≥0,70	1311	8,73
Lâmpada LED 3	63,53	≥0,70	1311	8,90
Lâmpada LED 4	74,58	≥0,70	1300	7,70
Lâmpada LED 5	63,22	>0,70	1311	6,90

Fonte: Autor

4.3. Comentários dos resultados

A análise realizada revelou diferenças significativas na distorção harmônica gerada por diferentes tecnologias de iluminação, destacando tanto as vantagens quanto as desvantagens de cada uma no contexto da qualidade de energia elétrica.

A lâmpada halógena apresentou um comportamento previsível, com DHT extremamente baixo (7,95%) devido à sua natureza resistiva. Por não depender de circuitos eletrônicos, essa tecnologia praticamente não introduz harmônicas significativas na rede, sendo a opção com menor impacto elétrico, embora com eficiência energética reduzida em comparação com as demais.

A lâmpada fluorescente, por sua vez, apresentou um DHT extremamente alto 120,93%, destacando-se como a mais prejudicial para a qualidade de energia. A presença de harmônicas de baixa ordem, como a 3ª, 5ª e 7ª, indica que o reator eletrônico utilizado não possui filtragem eficiente. Esse comportamento pode comprometer equipamentos sensíveis, aumentar perdas em transformadores e afetar negativamente o fator de potência do sistema. Fabricantes poderiam mitigar esses

efeitos implementando circuitos de correção ativa do fator de potência, que reduziriam a injeção de harmônicas na rede.

No caso das lâmpadas LED, foi observado um comportamento intermediário, com DHT variando entre 63,22% e 87,60%. A presença de harmônicas de 3ª e 5ª ordem em todas as lâmpadas analisadas indica que os circuitos eletrônicos internos, responsáveis pela conversão de corrente alternada em corrente contínua, não possuem filtragem eficiente o suficiente para eliminar completamente as componentes harmônicas indesejadas. O LED 2, que apresentou o maior DHT (87,60%), provavelmente utiliza um driver de menor qualidade, com menor grau de correção.

Ao analisar o custo aproximado de cada lâmpada é possível perceber que marcas de maior destaque e relevância no cenário nacional e mundial, como multinacionais, tendem a conseguir oferecer dispositivos mais baratos e algumas vezes com melhor qualidade na filtragem de harmônicas, o que pode ser explicado pela sua maior capacidade de adquirir componentes de boa qualidade e menor custo. De toda forma, não se encontra excelentes resultados na filtragem de harmônicas em produtos de baixo custo.

A regulamentação de referência para esse tipo de dispositivo de iluminação, a IEC 61000-3-2, é bem mais flexível para dispositivos de potência inferiores a 25w, o que torna as lâmpadas de potências inferiores mais propensas a terem filtros de menor qualidade. Para as lâmpadas analisadas a norma define três conjunto de parâmetros como avaliação, desses apenas dois é possível analisar, pois um desses parâmetros inclui medições simultânea de tensão.

De maneira objetiva três fabricantes tiveram resultados relativamente próximo do esperado segundo a norma, pois não ultrapassaram os 70% de DHT, são os modelos LED 1, LED 2 e LED 5. Mesmo com esses resultados ao analisar as harmônicas de 3ª, 5ª, 7ª, 9ª e 11ª ordem, para todos os modelos temos distorção superior ao permitido em alguma dessas ordens. Assim segundo os dois critérios em norma que podemos avaliar, nenhum fabricante cumpri todos os requisitos exigidos, incluído a lâmpada fluorescente que também é enquadrada nessa mesma norma.

Fabricantes de lâmpadas LED poderiam implementar diferentes técnicas para reduzir a distorção harmônica. Uma das soluções mais eficazes seria a utilização de circuitos PFC (Power Factor Correction), especialmente os ativos, que podem

minimizar significativamente a geração de harmônicas. Outra alternativa seria o uso de filtros LC ou EMI embutidos no driver da lâmpada, que reduziriam a emissão de ruído elétrico na rede.

Diante desses resultados, percebe-se que a escolha de uma lâmpada LED deve ir além do consumo energético e incluir a análise da qualidade do driver e da distorção gerada. Modelos com melhores circuitos internos podem oferecer vantagens consideráveis na redução de poluição harmônica e maior estabilidade da rede elétrica. Por fim, a análise demonstra a importância de pesquisas mais detalhadas sobre o impacto das harmônicas e o desenvolvimento de soluções mais eficazes para melhorar a eficiência e confiabilidade da iluminação LED moderna.

Capítulo 5

Conclusões

5.1. Conclusões

O presente trabalho analisou as harmônicas produzidas em lâmpadas LED de diferentes fabricantes, avaliando os impactos destes dispositivos na qualidade da energia elétrica e confrontando-os com outras tecnologias de iluminação, como as lâmpadas halógenas e fluorescentes. Através de uma abordagem teórica e experimental, foram identificados níveis expressivos de distorção harmônica em lâmpadas LED – com valores de DHT variando entre 63% e 87% – em contraste com os baixos índices observados nas lâmpadas halógenas (7,95%) e os elevados nas fluorescentes (120,93%).

Esses resultados evidenciam que, embora os LEDs se destaquem por sua eficiência energética e longa vida útil, a sua implementação vem acompanhada de desafios relacionados à qualidade da energia elétrica, especialmente devido à não-linearidade dos circuitos internos que geram harmônicas. Observou-se, ainda, que as regulamentações vigentes (como a IEC 61000-3-2 e as portarias do Inmetro) não têm sido suficientemente rigorosas ou efetivas, considerando que os dispositivos analisados, mesmo os de fabricantes renomados, não atendem completamente aos parâmetros normativos.

Dessa forma, conclui-se que há necessidade de aperfeiçoamento dos drivers e circuitos de filtragem das lâmpadas LED, por meio da implementação de técnicas como a correção ativa do fator de potência (PFC) e o uso de filtros LC ou EMI. Além disso, o estudo reforça a importância de uma avaliação contínua dos impactos das cargas não-lineares na rede elétrica, contribuindo para a melhoria da eficiência e segurança dos sistemas de distribuição.

5.2. Trabalhos Futuros

Visando dar continuidade e aprofundar os resultados obtidos, algumas possíveis pesquisas futuras são:

1. **Ampliação da Amostragem:** Realizar experimentos com um número maior de modelos de lâmpadas LED, abrangendo distintas faixas de potência e

diferentes fabricantes, para avaliar a variabilidade de desempenho quanto à geração de harmônicas.

2. **Avaliação de Fatores Ambientais:** Estudar como variações de temperatura, umidade e tensões de alimentação acima ou abaixo da nominal podem influenciar a distorção harmônica em lâmpadas LED.
3. **Incorporação de Filtros e PFCs:** Investigar a eficácia de diferentes métodos de correção de fator de potência (PFC) e de filtros (ativos ou passivos), tanto integrados nos drivers quanto adicionados externamente, medindo-se o impacto na redução de harmônicas.
4. **Aplicação em Escala Real:** Conduzir análises em instalações completas, como prédios residenciais ou comerciais, para avaliar a soma dos efeitos harmônicos de múltiplas lâmpadas conectadas simultaneamente e possíveis ressonâncias geradas no sistema.
5. **Estudo do Impacto Econômico:** Examinar o custo-benefício de investir em lâmpadas com drivers de maior qualidade e sistemas de filtragem mais avançados, comparando a redução de perdas e falhas na rede elétrica em relação ao acréscimo no valor de aquisição dos dispositivos.

Essas propostas de continuidade reforçam a importância de se aprofundar o entendimento do comportamento eletromagnético das lâmpadas LED, contribuindo para o desenvolvimento de produtos cada vez mais eficientes, confiáveis e alinhados às exigências de qualidade de energia.

Referências

ARAUJO, Bruno Vinicius Silveira; RODRIGUES, Gustavo Aragão; GRIMALDI, Reginaldo Barnabé Gonzalez; CHAGAS, Talita Santos Alves; FERREIRA, Tarso Vilela. *Lâmpadas LED e distorção harmônica: uma amostra do mercado brasileiro.* **Revista de Divulgação Científica**, v. 60, n. 4, 2023. DOI: 10.18265/1517-0306a2021id6612.

AYAN, Onur; TURKAY, Belgin Emre. *A comparative study on harmonic analysis and thermal performance of different types of lamps for residential building.* **Energy Reports**, [S.l.], v. 8, p. 932–945, 2022. DOI: 10.1016/j.egyr.2022.05.271.

BATISTA, Ana Luísa do Amaral. *Efeitos da Disseminação de Lâmpadas LED nos Sistemas de Distribuição.* 2020. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2020.

BECKER, Ana Regina Meneses e Silva; FRANÇA, Bruno Wanderley; FORTES, Márcio Zamboti. *Análise comparativa de lâmpada bulbo LED dimerizável e lâmpada bulbo LED: Aspecto Regulatório.* **Revista de Tecnologia Aplicada**, v. 12, n. 1, p. 3–16, Jan./Abr. 2023. DOI: 10.48005/2237-3713rta2023v12n1p316.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). *Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021. PRODIST – Módulo 8: Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica.* [S.l.]: ANEEL, 2021.

IEEE. *IEEE 519 – Qualidade da Energia e Distorção Harmônica.* [S.l.]: IEEE, 2014.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61000-3-2: Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase).* Edition 5.1, Jul. 2020. Geneva: IEC, 2020.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. *IEC 61000-4-7: Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-7: Testing and measurement techniques – General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto.* Edition 2.1, 2009. Geneva: IEC, 2009.

OLESKOVICZ, Mário. *Apostila Qualidade de Energia Elétrica.* São Carlos: EESC/USP, 2007.

OPPENHEIM, Alan V.; SCHAFER, Ronald W. *Discrete-Time Signal Processing.* 3. ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2009.

PROCROBRE – Instituto Brasileiro do Cobre. *Manual Harmônicas nas Instalações Elétricas.* São Paulo: Procobre, 2001.

SAUTER, Esequia; AZEVEDO, Fabio Souto de. *Análise de Fourier: um livro colaborativo.* 26 jul. 2022. Disponível em: <https://www.ufrgs.br/reatmat/TransformadasIntegrais/livro-af/main.html>. Acesso em: 19 fev. 2025.

Apêndice

Apêndice A – Código Arduino

```
/*
*****
* Aquisição de Corrente com ACS712 no Arduino Uno a 2000Hz
*****
*/

#include <avr/io.h>
#include <avr/interrupt.h>

#define NUM_SAMPLES 256 // Número de amostras para a análise
const uint8_t sensorChannel = 0; // Canal ADC correspondente a A0

volatile float currentSamples[NUM_SAMPLES]; // Armazena as correntes medidas
volatile uint16_t sampleIndex = 0; // Índice da amostragem atual
volatile bool acquisitionDone = false; // Flag que indica fim da aquisição

const float offsetVoltage = 2.50; // Tensão de offset (V)
const float sensitivity = 0.185; // Sensibilidade do sensor (V/A)
const unsigned long sampleRate = 2000; // Frequência de amostragem desejada (Hz)

// Função inline para leitura direta do ADC
static inline uint16_t readADC() {
    // Inicia a conversão
    ADCSRA |= (1 << ADSC);
    // Aguarda a conversão terminar
    while (ADCSRA & (1 << ADSC));
    return ADC;
}

// Configuração do ADC: referência AVcc e prescaler 128 (clock ADC ≈ 125 kHz)
void setupADC() {
    // Configura o ADMUX: referência AVcc e seleciona canal 0 (A0)
    ADMUX = (1 << REFS0);
    // Configura o prescaler para 128: (16 MHz / 128 ≈ 125 kHz)
    ADCSRA |= (1 << ADPS2) | (1 << ADPS1) | (1 << ADPS0);
    // Habilita o ADC
    ADCSRA |= (1 << ADEN);
}

// Configuração do Timer1 para gerar interrupção a 2000Hz
void setupTimer1() {
    cli(); // Desabilita interrupções enquanto configura
    TCCR1A = 0; // Limpa registros do Timer1
    TCCR1B = 0;

    // Modo CTC: limpa o timer ao comparar com OCR1A
    TCCR1B |= (1 << WGM12);
    // Prescaler = 1
    TCCR1B |= (1 << CS10);

    // Cálculo: (16 MHz / 2000) - 1 = 7999
    OCR1A = (16000000UL / sampleRate) - 1;

    // Habilita a interrupção de compare match do Timer1
}
```



```

TIMSK1 |= (1 << OCIE1A);
sei(); // Habilita interrupções novamente
}

// Rotina de interrupção do Timer1 (executada a cada 500µs)
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    if (!acquisitionDone) {
        // Realiza a conversão ADC no canal A0
        uint16_t adcValue = readADC();
        // Converte o valor ADC (0 a 1023) em tensão (0 a 5V)
        float voltage = ((float)adcValue / 1023.0) * 5.0;
        // Converte a tensão medida em corrente (A) usando offset e sensibilidade
        float current = (voltage - offsetVoltage) / sensitivity;

        // Armazena a corrente na posição atual
        currentSamples[sampleIndex] = current;
        sampleIndex++;

        // Se alcançou o número desejado de amostras, sinaliza fim da aquisição
        if (sampleIndex >= NUM_SAMPLES) {
            acquisitionDone = true;
            sampleIndex = 0; // Reinicia o índice para a próxima aquisição
        }
    }
}

void setup() {
    Serial.begin(115200);
    setupADC(); // Configura o ADC
    setupTimer1(); // Configura o Timer1 para amostragem a 2000Hz
    Serial.println("Iniciando aquisicao...");
}

void loop() {
    if (acquisitionDone) {
        Serial.println("Aquisicao concluida (256 amostras):");
        // Envia todas as amostras para o monitor serial
        for (uint16_t i = 0; i < NUM_SAMPLES; i++) {
            Serial.println(currentSamples[i], 6);
        }
        Serial.println("Fim dos dados.");

        // Aguarda 15 segundos antes de iniciar uma nova aquisição
        delay(15000);
        acquisitionDone = false;
    }
}

```

Apêndice B – Código MatLab

```
%% Script: analisadorFFT_Harmonicas
%% 1) Carregar arquivo de dados
% Inserir o caminho do arquivo
data = load('C:\Testalogeno.txt');
% 'data' é um vetor coluna com os valores de corrente (A)
%% 2) Parâmetros
fs = 2000; % Frequência de amostragem em Hz (2 kHz)
N = length(data); % Número total de amostras
%% 3) Cálculo da FFT (Fast Fourier Transform)
Y = fft(data);
% Vetor de frequências correspondente a cada ponto da FFT
f = (0:N-1) * (fs/N);
% Para sinais reais, a FFT é simétrica; portanto, usamos apenas a metade dos dados
N2 = floor(N/2);
Y_mono = Y(1:N2);
f_mono = f(1:N2);
% Cálculo da magnitude (módulo) do espectro (single-sided)
% A normalização por (N/2)
A = abs(Y_mono) / (N/2);
%% 4) Plot do Espectro de Amplitude (Single-Sided)
figure('Name','Espectro de Amplitude (Single-Sided)');
plot(f_mono, A, 'b', 'LineWidth', 1.5);
grid on;
xlabel('Frequência (Hz)');
ylabel('Amplitude (A)');
title('Espectro de Amplitude (Single-Sided)');
%% 5) Plot do Sinal no Domínio do Tempo
figure('Name','Sinal no Domínio do Tempo');
t = (0:N-1) / fs; % Eixo do tempo em segundos
plot(t, data, 'r');
grid on;
xlabel('Tempo (s)');
ylabel('Corrente (A)');
title('Sinal de Corrente no Domínio do Tempo');
%% 6) Cálculo e Plot das 12 Primeiras Harmônicas (Gráfico de Barras)
fundamental = 60; % Hz
maxH = 12; % Número de harmônicas a serem analisadas
% Pré-aloca um vetor para armazenar as amplitudes das harmônicas
harmonicAmp = zeros(1, maxH);
for k = 1:maxH
    targetFreq = k * fundamental;
    % Encontra o índice cujo valor de frequência está mais próximo de targetFreq
    [~, idx] = min(abs(f_mono - targetFreq));
    % Armazena a amplitude encontrada
    harmonicAmp(k) = A(idx);
end
% Plot das amplitudes das harmônicas em gráfico de barras
figure('Name','Harmônicas (Bar Plot)');
bar(1:maxH, harmonicAmp, 0.5, 'FaceColor', [0 0.7 0.7]);
grid on;
```

```

xlabel('Ordem da Harmônica');
ylabel('Amplitude (A)');
title(['Primeiras ' num2str(maxH) ' Harmônicas - Fundamental = '
num2str(fundamental) ' Hz']);
% Ajusta os rótulos do eixo X para "H1", "H2", ..., "H12"
set(gca, 'XTick', 1:maxH, 'XTickLabel', arrayfun(@(x) ['H' num2str(x)], 1:maxH,
'UniformOutput', false));
%% 7) Cálculo da Distorção Harmônica Total (DHT)
% Verifica se a amplitude da fundamental (A1) é diferente de zero para evitar
divisão por zero.
if harmonicAmp(1) == 0
disp('A amplitude da fundamental é zero. Não é possível calcular a DHT.');
```

$$THD = NaN;$$

```

else
THD = sqrt( sum( harmonicAmp(2:end).^2 ) ) / harmonicAmp(1);
end
% Converte a DHT para percentual
THD_percent = THD * 100;
fprintf('Distorção Harmônica Total (DHT): %.2f%%\n', THD_percent);
% Adiciona a informação da DHT no gráfico das harmônicas
text(1, max(harmonicAmp)*0.9, sprintf('DHT = %.2f%%', THD_percent), ...
'FontSize', 12, 'FontWeight', 'bold', 'Color', 'k');
```