

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

MARIANA MUSTAFA CATTANEO
RICHARD SANTOS PACHECO
TAMIRIS CHINAZZO

**ANÁLISE DOS HARMÔNICOS EM LÂMPADAS LED
DISPONÍVEIS NO BRASIL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA
2017

MARIANA MUSTAFA CATTANEO
RICHARD SANTOS PACHECO
TAMIRIS CHINAZZO

**ANÁLISE DOS HARMÔNICOS EM LÂMPADAS LED
DISPONÍVEIS NO BRASIL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação,
apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de
Curso, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento
Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) como requisito
parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Joaquim Eloir Rocha

CURITIBA
2017

**Mariana Mustafa Cattaneo
Richard Santos Pacheco
Tamiris Chinazzo**

Análise dos harmônicos em lâmpadas LED disponíveis no Brasil

Este Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação foi julgado e aprovado como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Eletricista, do curso de Engenharia Elétrica do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica (DAELT) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Curitiba, 13 de junho de 2017.

Prof. Emerson Rigoni, Doutor
Coordenador de Curso
Engenharia Elétrica

Profa. Annemarle Gehrke Castagna, Mestre
Responsável pelos Trabalhos de Conclusão de Curso
de Engenharia Elétrica do DAELT

ORIENTAÇÃO

Joaquim Eloir Rocha, Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Orientador

BANCA EXAMINADORA

Joaquim Eloir Rocha, Doutor
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Lilian Moreira Garcia, Doutora
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Vilmair Ermenio Wirmond, Mestre
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica

RESUMO

CATTANEO, Mariana M; CHINAZZO, Tamiris; PACHECO, Richard S. **Análise dos harmônicos em lâmpadas LED disponíveis no Brasil**. 2017. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Este trabalho apresenta uma análise quantitativa da distorção harmônica de corrente injetada na rede elétrica pelas lâmpadas LED mais predominantes nas residências brasileiras, fazendo uma comparação com a norma IEC 61000-3-2. A partir da definição de harmônicos e do mecanismo de geração destes, os indicadores de distorção harmônica mais utilizados são abordados. Também é discutida, de maneira qualitativa e por meio de simulações, a topologia genérica de uma lâmpada LED e algumas opções de filtragem disponíveis. O trabalho apresenta dados obtidos em medição para uma amostra de lâmpadas selecionadas para o estudo. Por fim, são comparados os resultados das medições as normas e regulamentações sobre o tema.

Palavras-chave: Lâmpada LED. Distorção harmônica. Qualidade de energia. Eficiência energética. IEC 61000-3-2.

ABSTRACT

CATTANEO, Mariana M; CHINAZZO, Tamiris; PACHECO, Richard S. **Harmonic analysis of LED light bulbs available in Brazil**. 2017. 91 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

This project presents a quantitative analysis of harmonic current distortion injected in the electrical grid by LED lamps predominant in Brazilian households, comparing them to the IEC 61000-3-2 standard. From the definition of harmonics and how they are generated, the most employed indicators of harmonic distortion are addressed. The generic topology of an LED lamp and some of the available filtering options are discussed, qualitatively and through simulations. Data obtained through measurements of a sample of lamps selected for this study is presented. At last, measured data is compared to standards and regulations on the subject.

Keywords: LED light bulbs. Harmonic distortion. Power quality. Power efficiency. IEC 61000-3-2.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Forma de onda de corrente distorcida e suas componentes harmônicas	18
Figura 2.2 – Relação entre corrente, tensão e potência em uma carga puramente resistiva (linear)	20
Figura 2.3 – Relação entre corrente, tensão e potência em uma carga puramente indutiva (linear)	21
Figura 2.4 – Relação entre corrente, tensão e potência em uma carga puramente capacitiva (linear)	21
Figura 2.5 – Deformações da forma de onda da corrente em relação a fonte de corrente senoidal	22
Figura 2.6 – Circuito de distribuição de potência para cargas não-lineares	23
Figura 2.7 – Circuito de alimentação das impedâncias por potências com frequências distintas a da fundamental	24
Figura 2.8 – Circuito genérico com tiristor e formas de onda	25
Figura 2.9 – Circuito genérico equivalente após substituição	25
Figura 2.10 - Histograma do espectro harmônico de lâmpadas LED com filtragem ..	31
Figura 2.11 - Histograma do espectro harmônico de lâmpadas LED sem filtragem ..	31
Figura 3.1 – Esquema simplificado da topologia de uma lâmpada LED	32
Figura 3.2 – Topologia típica para filtros de interferência eletromagnética	34
Figura 3.3 – Relação entre corrente e tensão em LED	35
Figura 3.4 – Circuito genérico de uma lâmpada LED	36
Figura 3.5 – Circuito base sem filtragem de harmônicos	37
Figura 3.6 – Circuito base sem filtragem de harmônicos: formas de onda	38
Figura 3.7 – Circuito base sem filtragem de harmônicos: componentes harmônicas	39
Figura 3.8 – Circuito base com filtro valley-fill	40
Figura 3.9 – Circuito base com filtro valley-fill: formas de onda	41
Figura 3.10 – Circuito base com filtro valley-fill: componentes harmônicas	41
Figura 3.11 – Circuito base com filtro passivo	43
Figura 3.12 – Circuito base com filtro passivo: formas de onda	43
Figura 3.13 – Circuito base com filtro passivo: componentes harmônicas	44
Figura 3.14 – Comparação entre as simulações: formas de onda	45
Figura 3.15 – Comparação entre as simulações: componentes harmônicas	46
Figura 4.1 – Lâmpada de 6 W do Fabricante A: histograma	49
Figura 4.2 – Lâmpada de 6 W do Fabricante A: formas de onda	50
Figura 4.3 – Lâmpada de 8 W do Fabricante A: histograma	51
Figura 4.4 – Lâmpada de 8 W do Fabricante A: formas de onda	51
Figura 4.5 – Lâmpada de 16 W do Fabricante A: histograma	52
Figura 4.6 – Lâmpada de 16 W do Fabricante A: formas de onda	52
Figura 4.7 – Lâmpada de 6 W do Fabricante B: histograma	53
Figura 4.8 – Lâmpada de 6 W do Fabricante B: formas de onda	54

Figura 4.9 – Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B: histograma	55
Figura 4.10 – Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B: formas de onda	55
Figura 4.11 – Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B: histograma	56
Figura 4.12 – Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B: formas de onda	56
Figura 4.13 – Lâmpada de 6 W do Fabricante C: histograma	57
Figura 4.14 – Lâmpada de 6 W do Fabricante C: formas de onda	58
Figura 4.15 – Lâmpada de 9 W do Fabricante C: histograma	59
Figura 4.16 – Lâmpada de 9 W do Fabricante C: formas de onda	59
Figura 4.17 – Lâmpada de 12 W do Fabricante C: histograma	60
Figura 4.18 – Lâmpada de 12 W do Fabricante C: formas de onda	60
Figura 4.19 – Comparação de THDi entre as lâmpadas analisadas	61
Figura 4.20 – Comparação de THDi entre as lâmpadas do Fabricante A	62
Figura 4.21 – Comparação de THDi entre as lâmpadas do Fabricante B	63
Figura 4.22 – Comparação de THDi entre as lâmpadas do Fabricante C	63
Figura 4.23 – Comparação de THDi entre as lâmpadas da faixa de 6 W	64
Figura 4.24 – Comparação de THDi entre as lâmpadas da faixa de 7,5 a 9 W	65
Figura 4.25 – Comparação de THDi entre as lâmpadas da faixa de 12 a 16 W	66
Figura 4.26 – Comparação de IHDi entre as lâmpadas analisadas	67
Figura 4.27 – Comparação de IHDi para a terceira ordem harmônica entre as lâmpadas analisadas	68
Figura 4.28 – Comparação de IHDi para a quinta ordem harmônica entre as lâmpadas analisadas	69
Figura 4.29 – Comparação de IHDi para a sétima ordem harmônica entre as lâmpadas analisadas	70

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relação entre PF e THD	30
Tabela 3.1 – Circuito base sem filtragem de harmônicos: componentes harmônicas	39
Tabela 3.2 – Circuito base com filtro valley-fill: componentes harmônicas	42
Tabela 3.3 – Circuito base com filtro passivo: componentes harmônicas	44
Tabela 4.1 – Fabricantes e potências das lâmpadas analisadas	47
Tabela 4.2 – Especificações técnicas das lâmpadas analisadas	47
Tabela 4.3 – Lâmpada de 6 W do Fabricante A: dados de medição	49
Tabela 4.4 – Lâmpada de 8 W do Fabricante A: dados de medição	50
Tabela 4.5 – Lâmpada de 16 W do Fabricante A: dados de medição	52
Tabela 4.6 – Lâmpada de 6 W do Fabricante B: dados de medição	53
Tabela 4.7 – Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B: dados de medição	54
Tabela 4.8 – Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B: dados de medição	55
Tabela 4.9 – Lâmpada de 6 W do Fabricante C: dados de medição	57
Tabela 4.10 – Lâmpada de 9 W do Fabricante C: dados de medição	58
Tabela 4.11 – Lâmpada de 12 W do Fabricante C: dados de medição	59
Tabela 5.1 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos Classe C conforme Norma IEC 61000-3-2	71
Tabela 5.2 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos Classe D conforme Norma IEC 61000-3-2	72
Tabela 5.3 – Lâmpada de 6 W do Fabricante A: componentes harmônicas	73
Tabela 5.4 – Lâmpada de 8 W do Fabricante A: componentes harmônicas	74
Tabela 5.5 – Lâmpada de 16 W do Fabricante A: componentes harmônicas	75
Tabela 5.6 – Lâmpada de 6 W do Fabricante B: componentes harmônicas	76
Tabela 5.7 – Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B: componentes harmônicas	77
Tabela 5.8 – Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B: componentes harmônicas	78
Tabela 5.9 – Lâmpada de 6 W do Fabricante C: componentes harmônicas	79
Tabela 5.10 – Lâmpada de 9 W do Fabricante C: componentes harmônicas	80
Tabela 5.11 – Lâmpada de 12 W do Fabricante C: componentes harmônicas	81
Tabela 5.12 – Conclusão e resultados das medições	84

LISTA DE SIGLAS

CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IHD	<i>Individual Harmonic Distortion</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
LED	<i>Light-emitting diode</i>
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
PRODIST	Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional
THD	<i>Total Harmonic Distortion</i>
THDi	<i>Total Harmonic Distortion (current)</i>

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.1.1 Delimitação do tema.....	12
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS.....	13
1.3 OBJETIVOS	13
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivos específicos.....	14
1.4 JUSTIFICATIVA	14
1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	15
1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2 INTRODUÇÃO AOS HARMÔNICOS	17
2.1 DEFINIÇÃO.....	17
2.2 MECANISMO DE GERAÇÃO DE HARMÔNICOS.....	19
2.2.1 Cargas lineares	19
2.2.2 Cargas não-lineares	22
2.3 GERAÇÃO DE HARMÔNICOS.....	23
2.4 INDICADORES DE DISTORÇÕES.....	26
2.4.1 Distorção Harmônica Individual.....	26
2.4.2 Distorção Harmônica Total	27
2.4.3 Fator de Crista.....	28
2.4.4 Fator de Potência	28
2.4.5 Histograma do Espectro Harmônico.....	30
3 CARACTERIZAÇÃO DOS HARMÔNICOS EM LÂMPADAS LED	32
3.1 TOPOLOGIA DE UMA LÂMPADA LED	32
3.1.1 Filtro de interferência eletromagnética	32
3.1.1.1 Corrente de Modo Diferencial.....	33
3.1.1.2 Corrente de Modo Comum	33
3.1.2 Retificador com suavização da onda de corrente contínua.....	34
3.1.3 Controle de corrente.....	35
3.1.4 Circuito genérico para análise harmônica	35
3.1.5 Filtragem dos harmônicos	36
3.2 SIMULAÇÃO DE FILTROS HARMÔNICOS.....	36
3.2.1 Sem filtragem de harmônicos.....	37
3.2.2 Filtro valley-fill.....	39
3.2.3 Filtro passivo	42
3.2.4 Filtro ativo.....	44
3.2.5 Comparações entre os resultados.....	45
4 CARACTERÍSTICAS HARMÔNICAS DAS LÂMPADAS LED.....	47
4.1 RESULTADO DAS MEDIÇÕES	49
4.1.1 Fabricante A.....	49

4.1.2 Fabricante B	53
4.1.3 Fabricante C	57
4.2 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES	61
4.2.1 Comparação das Potências por Fabricante	62
4.2.2 Comparação dos Fabricantes por Potências.....	64
4.2.3 Comparação por Ordem Harmônica	66
5 LIMITES DE CORRENTES HARMÔNICAS PARA EQUIPAMENTOS DE ILUMINAÇÃO	71
5.1 COMPARAÇÃO COM A NORMA IEC 61000-3-2	72
5.1.1 Lâmpada de 6 W do Fabricante A.....	73
5.1.2 Lâmpada de 8 W do Fabricante A.....	74
5.1.3 Lâmpada de 16 W do Fabricante A.....	75
5.1.4 Lâmpada de 6 W do Fabricante B.....	76
5.1.5 Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B.....	77
5.1.6 Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B.....	78
5.1.7 Lâmpada de 6 W do Fabricante C.....	79
5.1.8 Lâmpada de 9 W do Fabricante C.....	80
5.1.9 Lâmpada de 12 W do Fabricante C.....	81
5.2 CONCLUSÃO DAS MEDIÇÕES	82
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	85
6.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	86
REFERÊNCIAS.....	87

1 INTRODUÇÃO

A presença de harmônicos nos sistemas elétricos de potência não é novidade. A sua existência é conhecida desde o início do século XX e, nesta época, a principal preocupação era relacionada às perdas por aquecimento em motores e geradores. Apesar do conhecimento de sua existência, os harmônicos foram desconsiderados como um problema visto que, na época, a maioria das cargas eram lineares e não causavam distúrbios de corrente e tensão na rede. Entretanto, nos anos 1970, com o desenvolvimento da indústria de eletrônica de potência, dispositivos com características não-lineares, como tiristores, diodos e outras tecnologias foram incorporados à indústria e posteriormente às residências e centros comerciais (OWEN, 1998).

Diante desta nova realidade, observou-se a necessidade de regulamentar a injeção de distúrbios harmônicos na rede. No Brasil, em 2008 entraram em vigência os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), cuja função é normatizar e padronizar as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica. No módulo 8 do PRODIST, referente a qualidade de energia são estabelecidos limites de distorção harmônica total (THD) para a tensão nominal do barramento. Apesar da importância desta ação, é importante ressaltar que esta normatização não limita diretamente os consumidores residenciais e seus equipamentos elétricos e eletrônicos, abrindo margem para que o impacto das residências na qualidade de energia continue a crescer camuflado, ou até mesmo esquecido.

1.1 TEMA

Nos últimos 10 anos, as casas foram equipadas com geladeiras, computadores, televisões, telefones sem fio, micro-ondas e lâmpadas fluorescentes, dispositivos eletrônicos que podem gerar distorções de tensão na rede, visto que em

sua composição são encontradas fontes chaveadas, ou seja, cargas não-lineares (POMILIO; DECKMANN, 2007) e (SUÁREZ et al., 2005).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2015), o consumo de eletricidade dos consumidores industriais é de 38,8%, enquanto que o dos consumidores residenciais é de 24,9%. Porém, comparando o consumo entre 2005 e 2015, observa-se uma queda de aproximadamente 17% no setor industrial enquanto que no setor residencial houve um aumento de 12% no consumo. Isso mostra que os consumidores residenciais são uma parcela cada vez mais representativa na utilização da energia elétrica.

É possível perceber que as residências antes consideradas como cargas puramente resistivas agora apresentam características não-lineares, devido principalmente aos equipamentos eletrodomésticos e iluminação fluorescente ou por diodo emissor de luz (LED). Tais equipamentos são cargas não lineares de baixa potência e, portanto, quando analisados individualmente não são grandes contribuintes para os problemas relacionados a qualidade de energia. Entretanto, quando somados podem representar uma importante fonte de distorções harmônicas, já que em geral são ligados em conjunto e por longo períodos de tempo (IAGAR et al., 2014).

Sendo assim, faz-se necessário um melhor entendimento do comportamento dos harmônicos residenciais e a sua influência no cenário energético nacional.

1.1.1 Delimitação do tema

As lâmpadas LED são até duas vezes mais eficientes que as lâmpadas fluorescentes e de 8 a 10 vezes mais eficientes que as incandescentes, tem vida útil muito superior a estes dois outros tipos de lâmpada, e principalmente, representam economia no consumo de energia para consumidores residências, o que estimula seu uso. Entretanto, um conversor compacto CA-CC é necessário para suprir corrente contínua para a lâmpada, o que introduz não-linearidade no sistema. Por esse motivo, as lâmpadas LED geram distorções harmônicas que são injetadas na rede elétrica.

A *International Electrotechnical Commission* (IEC), através da diretriz da IEC 61000-3-2, desenvolveu uma norma internacional que requer que os equipamentos operem satisfatoriamente dentro de ambientes eletromagnéticos específicos, além de proteger a rede de distribuição elétrica, limitando os distúrbios emitidos por tais equipamentos (ARRILLAGA; WATSON, 2003). Ela se aplica para todos os equipamentos elétricos e eletrônicos que possuem uma entrada de corrente de no máximo 16 A por fase, sendo apropriada para conexões de baixa tensão. Já o setor elétrico brasileiro dispõe de apenas uma regulamentação própria em relação ao nível harmônico de equipamentos eletrodomésticos: a portaria do INMETRO nº 389, de 25 agosto de 2014, que se baseia na IEC 61000-3-2 e é direcionada às lâmpadas LED.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Os programas e ações visando a conservação de energia procuram melhorar a eficiência na utilização da energia elétrica. As lâmpadas LED por um lado melhoram a eficiência energética, mas por outro introduzem harmônicos de corrente no sistema elétrico. A pergunta então é se as lâmpadas de tecnologia LED utilizadas nas residências brasileiras estão de acordo com as normas reguladoras nacionais e internacionais referentes à distúrbios harmônicos.

1.3 OBJETIVOS

Neste trabalho foi estudada a geração de harmônicos nas lâmpadas LED comercializadas nacionalmente, bem como a quantificação destas distorções, visando determinar se tais lâmpadas estão em conformidade com as normas nacionais e internacionais. Por fim, foram analisados métodos de filtragem já conhecidos no mercado para reduzir o impacto dos harmônicos provenientes das lâmpadas LED no sistema de energia elétrica nacional.

1.3.1 Objetivo geral

Avaliar o comportamento das lâmpadas LED encontradas em ambientes residenciais quanto a sua contribuição harmônica em relação à normas e regulamentações existentes no assunto.

1.3.2 Objetivos específicos

- Analisar os problemas causados pelos harmônicos;
- Estudar os componentes da topologia das lâmpadas que causam distorções harmônicas, através de simulações;
- Estudar as técnicas de filtragem de harmônicos já existentes;
- Medir a quantidade de harmônicos em lâmpadas LED disponíveis no mercado nacional;
- Verificar a existência de diferenças no comportamento de lâmpadas LED alimentadas em diferentes tensões;
- Comparar os resultados obtidos com as limitações da norma IEC 61000-3-2.

1.4 JUSTIFICATIVA

As distorções harmônicas são a principal causa dos problemas de qualidade de energia. Atualmente, é conhecido que a poluição harmônica é causa de diversos problemas tais como: sobrecarga do sistema de distribuição, sobrecarga do condutor neutro, vibrações, envelhecimento prematuro de equipamentos, distorção de fontes de alimentação, dentre outros, levando à distúrbios em cargas sensíveis e em redes de comunicação. (DE LA ROSA, 2006).

De acordo com dados levantados pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL) em média uma residência brasileira utiliza quatro

lâmpadas, sendo que o período de funcionamento é de aproximadamente 10 horas por dia durante 30 dias (FERREIRA; TOMIOKA, 2013). A tecnologia LED vem ganhando mercado no setor residencial e a Associação Brasileira da Indústria de Iluminação (Abilux) estima que o crescimento de vendas feche em 20% em 2016. Já a empresa General Electric prevê que até 2020 o LED atingirá 70% do mercado de iluminação (GE REPORTS BRASIL, 2015). Outro fator que levará ao crescimento indireto das lâmpadas LED é que a tecnologia incandescente deixou o mercado em 30 de junho de 2016 (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2010).

Diante nesta nova realidade e sabendo-se que as lâmpadas LED são cargas não-lineares geradoras de distorções harmônicas, um estudo que quantifique as distorções harmônicas geradas pelas lâmpadas LED comercializadas nacionalmente e usadas em residências visando reduzir seu impacto na rede elétrica é bastante relevante.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Primeiramente houve o levantamento das distorções harmônicas geradas por lâmpadas LED através de simulações, sendo os circuitos simulados semelhantes a topologia real de lâmpadas encontradas atualmente no mercado. A partir destes dados, foi realizada uma comparação da situação atual brasileira com normas nacionais e internacionais.

Após isso foram realizadas medições individuais com as lâmpadas em questão, onde foram analisadas e medidas as distorções harmônicas reais presentes em cada uma delas e assim traçadas as características singulares de cada dispositivo.

1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

Capítulo 1 – Introdução: consiste na apresentação do tema, bem como o embasamento e relevância do seu desenvolvimento.

Capítulo 2 – Revisão Literária: apresenta assuntos pertinentes e relevantes para o desenvolvimento do trabalho. Conterá com uma breve explanação sobre distorção harmônica e seus impactos para os consumidores residenciais e para a rede elétrica, bem como a apresentação dos indicadores de qualidade de energia e as normas nacionais e internacionais que delimitam os harmônicos em sistemas de iluminação.

Capítulo 3 – Simulação das Características Harmônicas: as características harmônicas das lâmpadas LED são analisadas através de simulações, levando em conta os diferentes tipos de técnicas de filtragem encontradas nas lâmpadas comercializadas no Brasil.

Capítulo 4 – Características Harmônicas das lâmpadas LED: apresenta os resultados das medições das lâmpadas de diferentes fabricantes utilizando o Analisador de Energia RE6000/H.

Capítulo 5 – Normas Internacionais de Delimitação de Harmônicos: aborda os padrões já existentes com relação a delimitação de distorções harmônicas em sistemas de iluminação no Brasil e no mundo e compara os resultados obtidos no Capítulo 4 com as normas abordadas.

Capítulo 6 – Considerações Finais: conclusões sobre os temas abordados no desenvolvimento do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 INTRODUÇÃO AOS HARMÔNICOS

2.1 DEFINIÇÃO

Harmônicos são componentes senoidais de uma onda periódica que possuem frequência múltipla inteira da frequência fundamental. Portanto, harmônicos de tensão e corrente são componentes senoidais perfeitas da onda fundamental, mas com frequências diferentes. A presença desses harmônicos acaba por distorcer a forma de onda da corrente e/ou tensão fundamental.

As formas de ondas distorcidas devido a presença de componentes harmônicas podem ser analisadas através da Série de Fourier. A série nos diz que qualquer onda periódica não-senoidal pode ser representada como a soma de uma componente DC e ondas senoidais de várias amplitudes e fases deslocadas de um ângulo relativo de referência. Todas as ondas senoidais têm frequência de ordem inteira múltipla da frequência fundamental, que no Brasil é de 60 Hz (TOLBERT et al., 1996).

Matematicamente, a série de Fourier é:

$$Y(t) = Y_o + \sum_{n=1}^{\infty} Y_{max,n}(nwt - \Phi_n) \quad (2.1)$$

Onde,

Y_o = Componente DC

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

w = frequência angular

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

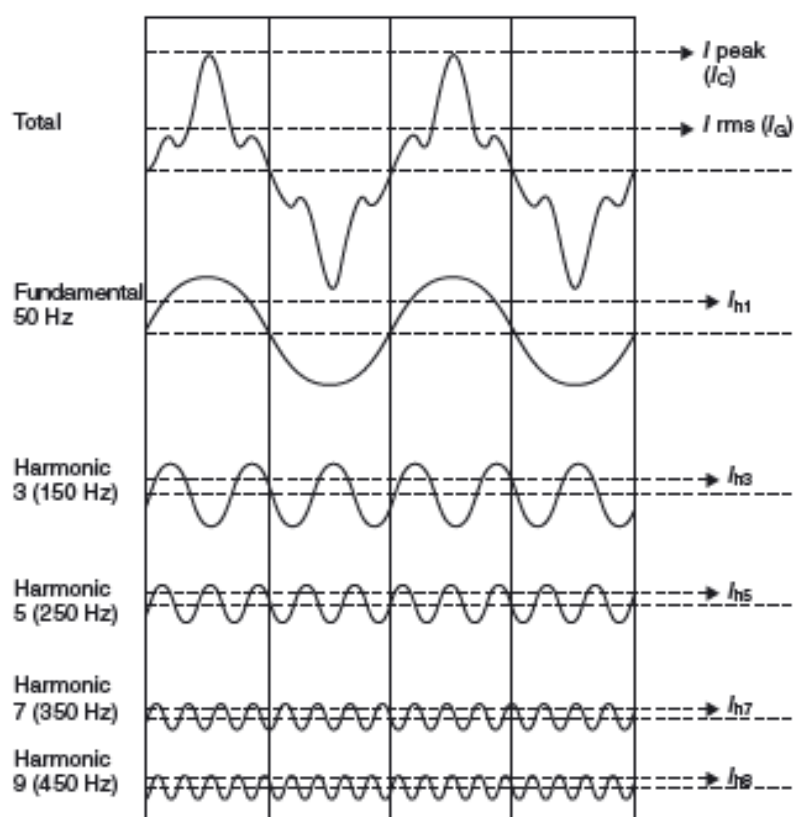


Figura 2.1 – Forma de onda de corrente distorcida e suas componentes harmônicas

Fonte: SALLAM; MALIK (2011).

Para exemplificar, a forma de onda da corrente representada pela primeira onda na Figura 2.1 é o somatório da forma da onda fundamental em 50 Hz com as componentes harmônicas de 3^a, 5^a, 7^a e 9^a ordem, correspondentes às frequências de 150, 250, 350 e 450 Hz respectivamente. É possível observar a deformação da onda devido às componentes harmônicas.

As distorções harmônicas afetam tanto as redes de distribuição elétrica como os equipamentos elétricos/eletrônicos. Nos últimos anos, os níveis de distorção harmônicas tem crescido rapidamente em sistemas que utilizam eletrônica de potências devido principalmente a vasta utilização de dispositivos semicondutores não lineares, que produzem a maior parte das distorções harmônicas (SALLAM; MALIK, 2011).

2.2 MECANISMO DE GERAÇÃO DE HARMÔNICOS

A energia elétrica é normalmente comercializada em frequências constantes de 60 Hz e 50 Hz e a força eletromotriz dos geradores pode ser considerada senoidal. Ou seja, a forma de onda da energia que é fornecida pelas concessionárias às empresas e residências tem formato praticamente senoidal. A geração de distorções harmônicas ocorre pela interação dessa onda de tensão senoidal com as cargas as quais vai alimentar; portanto, o tipo de carga é um elemento crucial nos harmônicos.

2.2.1 Cargas lineares

Cargas lineares são aquelas na qual os sinais de corrente e a tensão se propagam bem próximos; assim, a queda de tensão em uma resistência constante é diretamente proporcional a corrente que passa por ela. Em outras palavras, cargas lineares seguem a Lei de Ohm, que afirma que a razão entre a tensão entre dois pontos e a corrente elétrica é constante e denominada de resistência elétrica, como é descrita pela Equação (2.2) a seguir (DE LA ROSA, 2006, p. 4):

$$I(t) = \frac{v(t)}{R} \quad (2.2)$$

Devido a essa relação, pode-se concluir que a aplicação de uma tensão senoidal variável em uma carga linear resulta em um fluxo de corrente também senoidal, sem distorções. Tal situação é representada pela Figura 2.2, onde a aplicação de uma tensão variável senoidal em uma carga puramente resistiva resultou em uma forma de onda de corrente também senoidal.

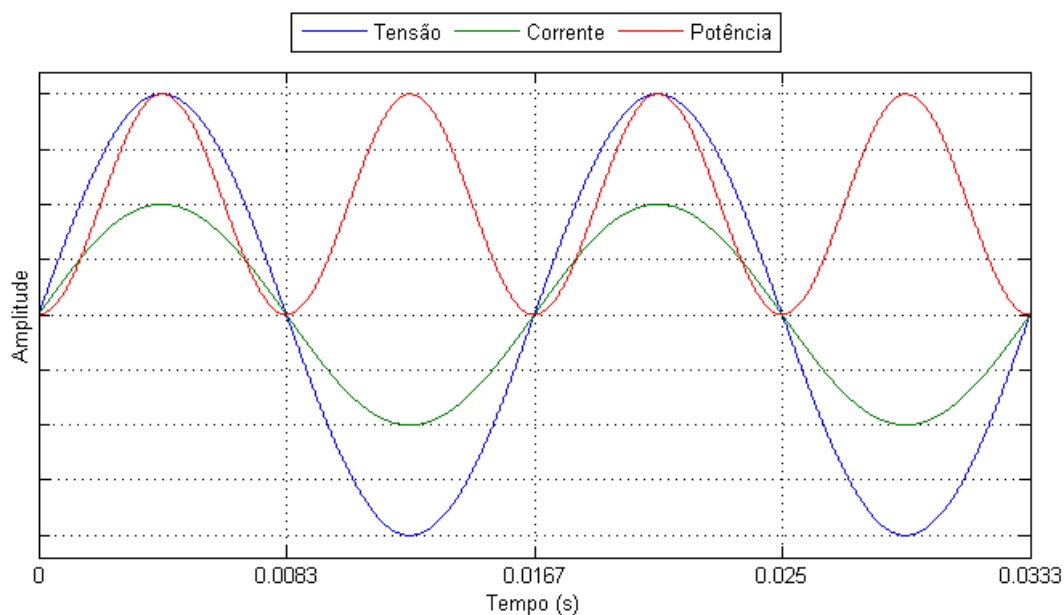


Figura 2.2 – Relação entre corrente, tensão e potência em uma carga puramente resistiva (linear)

Fonte: Adaptado de DE LA ROSA (2006, p. 5).

Capacitores e indutores também são considerados dispositivos lineares, apesar das ondas de tensão e corrente não estarem em fase. No caso da carga indutiva, a corrente está atrasada em relação a tensão; já para cargas capacitivas, a corrente está adiantada em relação a tensão. Apesar de as ondas não estarem em fase, nos dois casos quando a alimentação dos elementos for através de uma tensão com forma de onda senoidal, a forma de onda da corrente também será senoidal, sem distorções.

A Figura 2.3 mostra o comportamento da corrente para uma carga puramente indutiva. Em azul tem-se a tensão senoidal que é aplicada a carga, em verde temos a forma de onda da corrente que alimenta a carga. Como pode-se observar, ambas as formas de ondas são senoides perfeitas, a corrente não sofreu deformação, apenas está defasada da tensão.

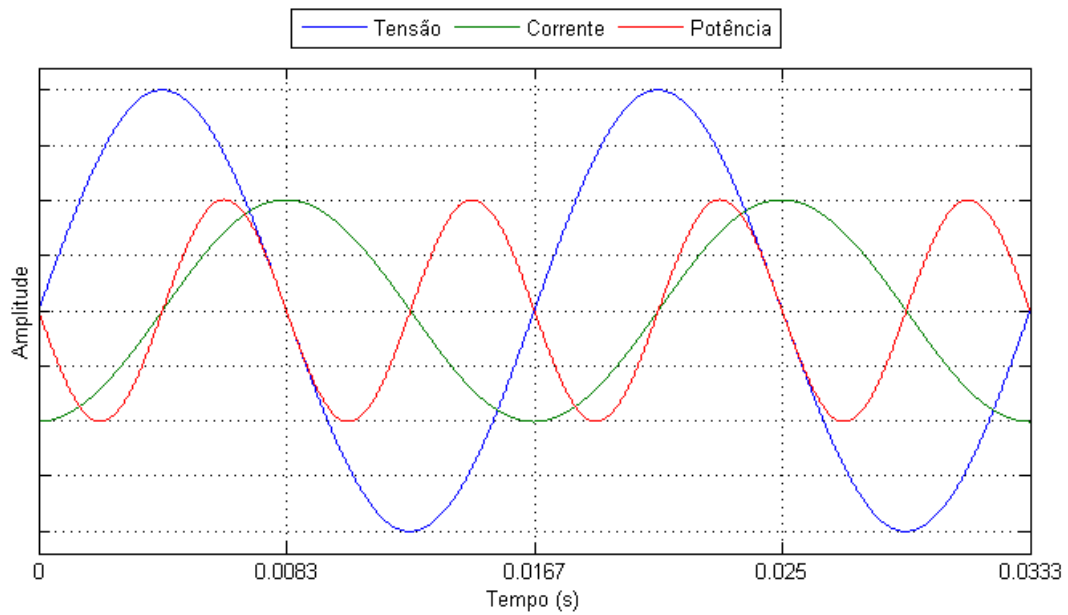


Figura 2.3 – Relação entre corrente, tensão e potência em uma carga puramente indutiva (linear)

Fonte: Adaptado de DE LA ROSA (2006, p. 5).

Similarmente, para uma carga puramente capacitiva, através da Figura 2.4 podemos observar que a forma de onda da tensão (azul) e forma de onda da corrente (verde) são ambas senoidais, não sendo evidenciado, portanto, deformação na forma de onda da corrente. Como já citado, temos apenas uma defasagem entre tensão e corrente devido a característica capacitiva da carga.

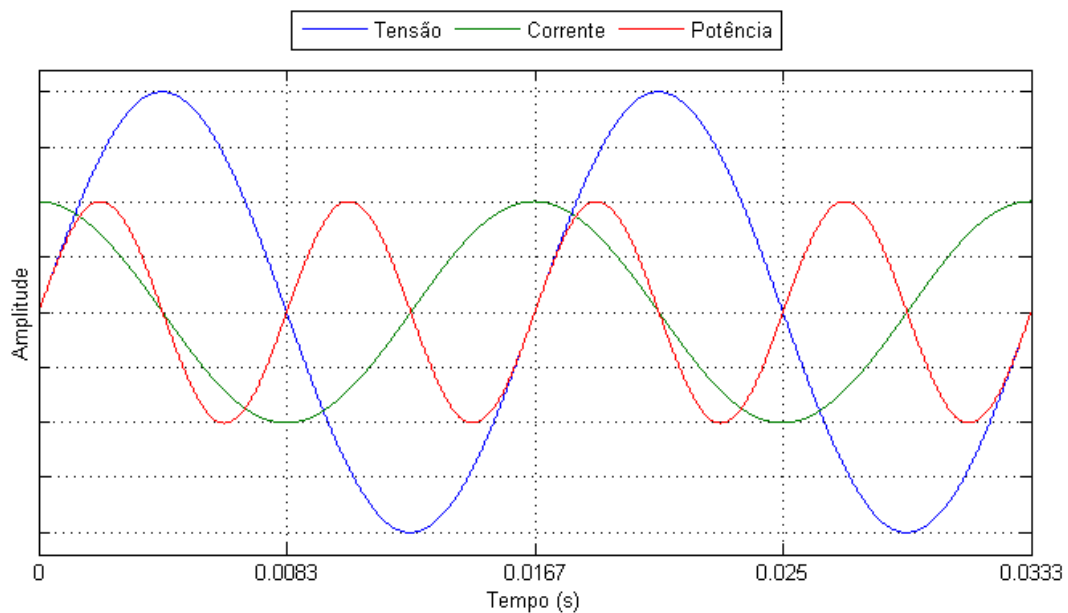


Figura 2.4 – Relação entre corrente, tensão e potência em uma carga puramente capacitiva (linear)

Fonte: Adaptado de DE LA ROSA (2006, p. 5).

2.2.2 Cargas não-lineares

Cargas não-lineares são as cargas nas quais a onda de corrente a onda de tensão não se assemelham, ou seja, a Lei de Ohm não consegue relacionar a tensão com a corrente.

A Figura 2.5, mostra o comportamento da corrente em um circuito genérico com cargas não-lineares alimentado por uma fonte de tensão senoidal. Como podemos observar a forma de onda das correntes (rosa) está distorcida. Basicamente, podemos afirmar que essa deformação corresponde ao somatório da componente fundamental da corrente (azul), uma senoide perfeita, com as componentes harmônicas (5ª, 7ª e 11ª ordens harmônicas em verde, vermelho e azul claro respectivamente).

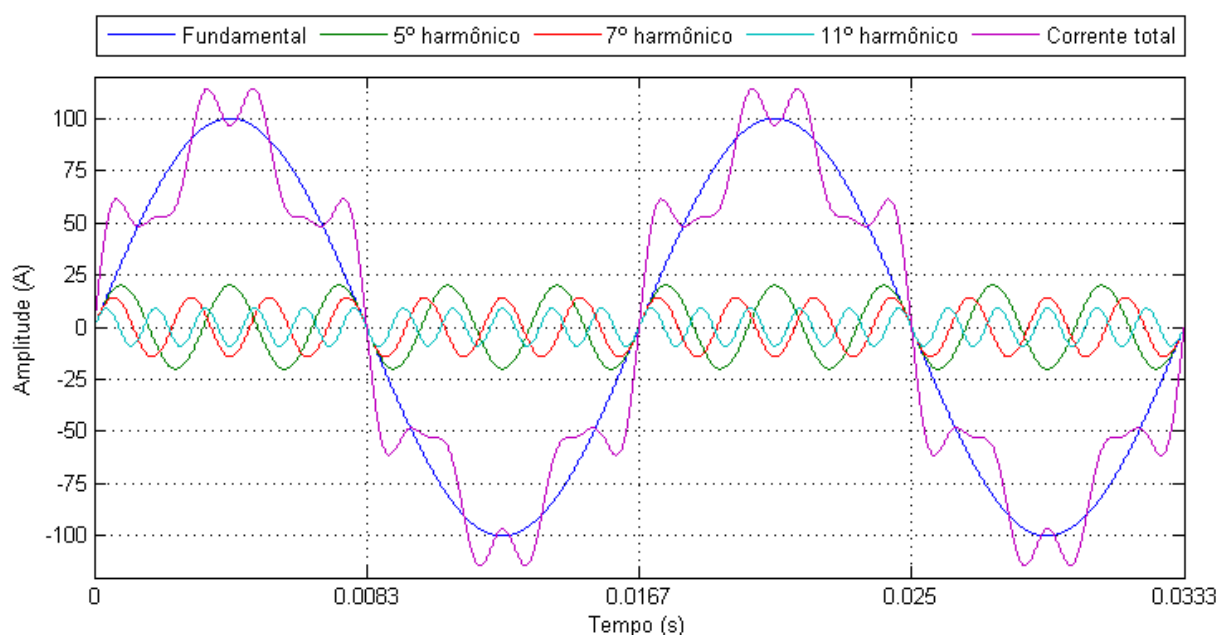


Figura 2.5 – Deformações da forma de onda da corrente em relação a fonte de corrente senoidal

Fonte: Adaptado de DE LA ROSA (2006, p. 11).

Em geral, as cargas que utilizam eletrônica de potência são não-lineares. Por exemplo, equipamentos de informática, pontes retificadoras, variadores de velocidade, fornos a arco, iluminação fluorescente ou LED, dentre outras (DE LA ROSA, 2006, p. 6).

2.3 GERAÇÃO DE HARMÔNICOS

Quando uma fonte de tensão senoidal alimenta uma carga ou dispositivo não-linear, a corrente resultante absorvida pelo circuito não é mais uma senoide perfeita. Basicamente, o que acontece é que na presença de impedâncias não-lineares a corrente provoca uma queda de tensão não senoidal no circuito, o que conseqüentemente leva a uma distorção nos terminais da carga, essas distorções são os harmônicos (ARRILLAGA; WATSON, 2003, p. 1).

O circuito mostrado na Figura 2.6 apresenta um gerador (G) alimentando com tensão senoidal uma carga puramente resistiva (R) e um conversor estático através de uma linha com impedância ($R_s + jX_s$). Em seu funcionamento básico, o gerador supre uma potência (P_g) para um ponto comum da carga com os outros elementos, o qual irá redistribuir essa potência para os elementos seguintes, como mostra a figura. A potência P_g é transferida majoritariamente para a carga R (P_r), enquanto que a outra parcela é direcionada para o conversor (P_c) e convertida para potência em outras frequências. Além disso, a potência adicional P_s na frequência fundamental do sistema, supre a impedância característica da linha ($R_s + jX_s$).

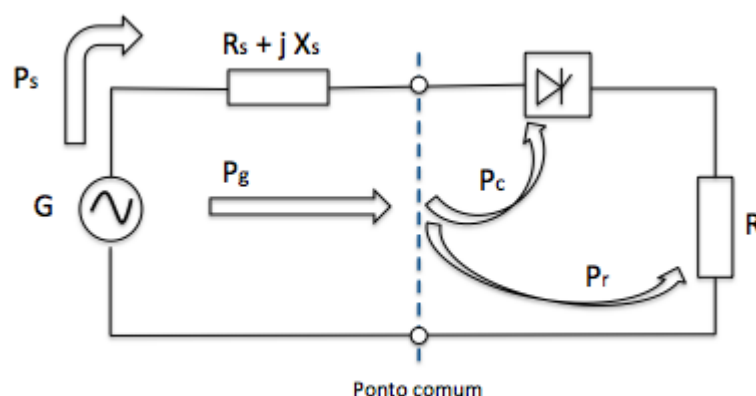


Figura 2.6 – Circuito de distribuição de potência para cargas não-lineares

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Visando compreender como a potência convertida para outras frequências atua na geração dos harmônicos, o circuito foi redesenhado na Figura 2.7. Como a tensão interna do gerador é uma senoide perfeita, ele supre potência para as cargas

na frequência fundamental, por isso, a fonte de tensão que representava o gerador foi curto-circuitada. As impedâncias do gerador e da linha foram substituídas por suas impedâncias harmônicas $R_{gh} + jX_{gh}$ e $R_{sh} + jX_{sh}$, respectivamente. O conversor estático foi representado como a fonte de correntes harmônicas que alimentará as impedâncias, já que é nele que a potência em outras frequências é obtida. Tecnicamente, uma pequena porção da potência fundamental P_c é transformada em potência harmônica P_{sh} , P_{gh} e P_{rh} que alimentaram as impedâncias.

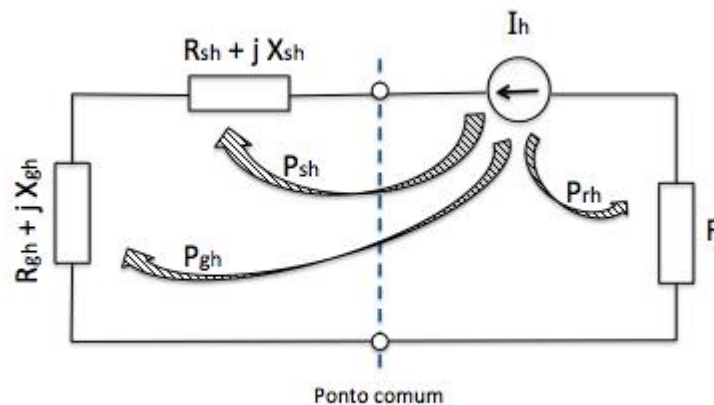


Figura 2.7 – Circuito de alimentação das impedâncias por potências com frequências distintas a da fundamental

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Assim, analisando do ponto de vista da potência, essas potências convertidas para frequências diferentes na fundamental ao alimentarem as impedâncias geram as componentes harmônicas, que ao serem somadas a corrente fundamental levam a distorção da forma de onda corrente.

Agora, analisando do ponto de vista da tensão na carga e no conversor. Considerando o circuito da Figura 2.8 (a), onde: V é a fonte de tensão senoidal, E constante f.m.m. com resistência desprezível, R resistência, L indutância e T tiristor.

Na Figura 2.8 (b) está representada a forma de onda da tensão fornecida pela fonte de tensão V . O tiristor é ativado com $\omega t = \alpha$ e é desativado com $\omega t = \beta$ (a queda de tensão durante o tempo em que o tiristor está conduzindo é desprezível), a queda de tensão no tiristor é representada pela Figura 2.8 (c). Já a queda de tensão no segmento RLE está da Figura 2.8 (d) (ARRILLAGA; WATSON, 2003, p. 1).

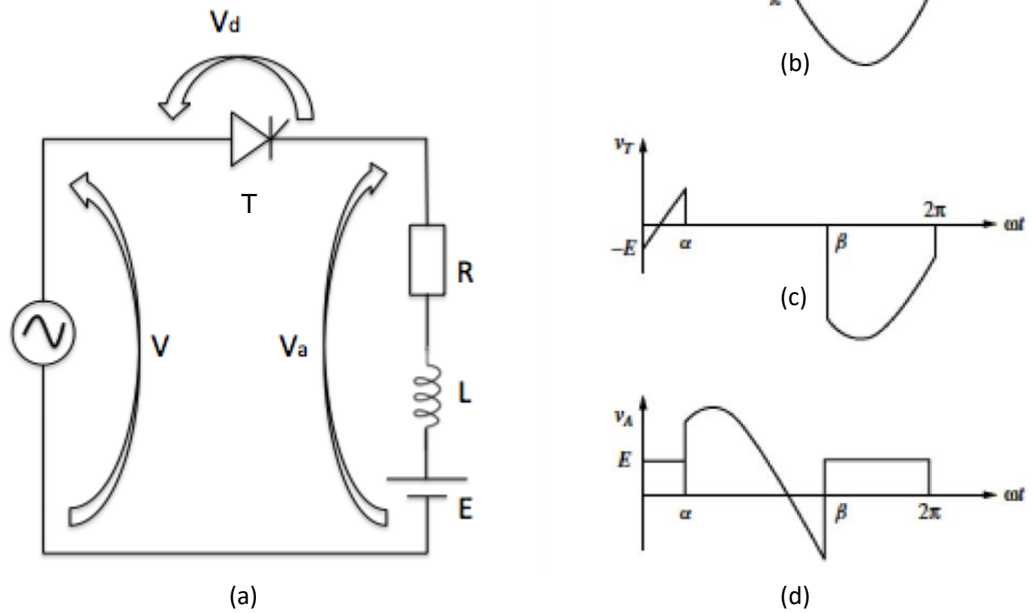


Figura 2.8 – Circuito genérico com tiristor e formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Utilizando-se da técnica da Série de Fourier, podemos substituir a queda de tensão V_A por três componentes, como mostrado na Figura 2.9.

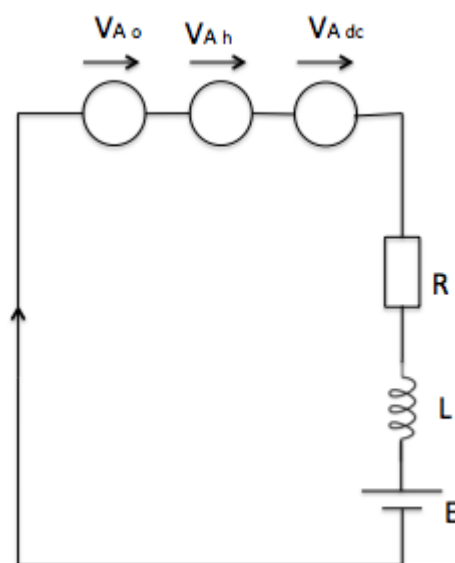


Figura 2.9 – Circuito genérico equivalente após substituição

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Assim, podemos equacionar:

$$V_A = V_{Ao} + V_{Ah} + V_{Adc} \quad (2.3)$$

Onde a componente fundamental é dada por:

$$V_{Ao} = \sqrt{2}V_{Ao} \text{ sen}(wt + \theta_1) \quad (2.4)$$

A componente harmônica:

$$V_{Ah} = \sum_{h=2}^n \sqrt{2}V_{Ah} \text{ sen}(hwt + \theta_h) \quad (2.5)$$

A componente DC:

$$V_{adc} = \frac{1}{T} \int_0^T V_A dt = V_{dc} \quad (2.6)$$

Analogamente, para a corrente:

$$\text{componente fundamental: } I_o = \sqrt{2}I_o \text{ sen}(wt + \xi_1), \quad (2.7)$$

$$\text{componente harmônica: } I_h = \sum_{h=2}^n \sqrt{2}I_h \text{ sen}(hwt + \xi_h), \quad (2.8)$$

$$\text{e componente contínua: } I_{dc} = \frac{V_{dc} - E}{R}. \quad (2.9)$$

2.4 INDICADORES DE DISTORÇÕES

2.4.1 Distorção Harmônica Individual

A Distorção Harmônica Individual (IHD) é definida como o nível de distorção percentual da ordem h com relação a frequência fundamental,

$$IHD v_h = \frac{V_h}{V_1} \times 100\% \quad (2.10)$$

$$IHD i_h = \frac{I_h}{I_1} \times 100\% \quad (2.11)$$

Onde $IHD v_h$ é a distorção harmônica individual da ordem h da tensão, enquanto que $IHD i_h$ é a distorção harmônica individual da ordem h da corrente, e V_1 e I_1 são os valores rms fundamentais de tensão e corrente, respectivamente.

Esse indicador é comumente utilizado para representar o espectro harmônico de sinais, já que dá a amplitude individual de cada componente harmônico permitindo a comparação direta entre ordens harmônicas.

2.4.2 Distorção Harmônica Total

Um método de quantificar a não-linearidade, ou distorção de uma onda é através da distorção harmônica total (THD). Tal método também serve como um indicador de qualidade de energia. O THD pode ser mensurado para tensão ou para corrente, como apresentado nas Equações (2.12) e (2.13), respectivamente.

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (V_h)^2}}{V_1} \quad (2.12)$$

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \quad (2.13)$$

Onde,

V_h – Valor eficaz de tensão de ordem h

I_h – Valor eficaz de corrente de ordem h

V_1 – Valor eficaz da tensão fundamental

I_1 – Valor eficaz da corrente fundamental

h – Ordem da componente harmônica

2.4.3 Fator de Crista

O fator de crista (K) é a relação entre o valor de pico da corrente ou tensão e o valor correspondente em RMS:

$$K = \frac{I_m}{I_{rms}} \text{ ou } K = \frac{V_m}{V_{rms}} \quad (2.14)$$

Onde,

I_m = valor de pico da corrente

I_{rms} = valor de rms da corrente

V_m = valor de pico da tensão

V_{rms} = valor de rms da tensão

Para um sinal senoidal o fator de crista é $\sqrt{2}$, já para sinais com distorções o fator pode variar entre valores superiores e inferiores a $\sqrt{2}$. Normalmente, para correntes que alimentam cargas não-lineares o fator de crista assume valores entre 1.5 a 2, ou até mesmo 5, em situações críticas.

O fator de crista é um importante indicador de altos valores de pico em relação ao valor rms do sinal. Valores elevados de K indicam que sobrecorrentes acontecem de tempos em tempos (SALLAM; MALIK, 2011, p. 400).

2.4.4 Fator de Potência

O fator de potência (PF) é a relação entre a potência ativa (P) e a potência aparente (S) para um circuito operando em corrente alternada e pode ser dado pela Equação (2.15):

$$PF = \frac{P}{S} \quad (2.15)$$

Para circuitos lineares, o fator de potência depende apenas da diferença de fase entre tensão e corrente, sendo chamado de fator de potência de deslocamento (PF_{disp}), e pode ser dado pela Equação (2.16):

$$PF_{disp} = \cos \varphi \quad (2.16)$$

No caso de circuitos não-lineares, é necessário considerar o efeito das componentes harmônicas presentes na tensão e corrente. Assim é calculado o fator de potência de distorção (PF_{dist}), como mostrado na Equação (2.17):

$$PF_{dist} = \frac{1}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (2.17)$$

Por fim, o fator de potência real de um circuito é dado pela multiplicação dos fatores de potência de distorção e de deslocamento:

$$PF_{true} = PF_{disp} \times PF_{dist} = \frac{\cos \varphi}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (2.18)$$

Essa influência da distorção harmônica sobre o fator de potência pode ser ilustrada pela Tabela 2.1, que relaciona o acréscimo de corrente às distorções harmônicas totais de corrente (THDi) causadas por cargas não lineares. Para obtenção destes resultados a corrente foi fixada em 1 A e o índice de distorção harmônica da corrente foi sofrendo sucessivos incrementos, enquanto que a corrente e o fator de potência eram monitorados. Foi possível constatar que o aumento de THDi ocasionava um acréscimo de corrente e uma diminuição do fator de potência, reafirmando que as distorções harmônicas têm um impacto negativo nos equipamentos e na rede.

Tabela 2.1 – Relação entre PF e THD

THDi (%)	Acréscimo de Corrente (%)	Fator de Potência
0	0,00	1,000
10	0,50	0,995
30	4,40	0,958
50	11,80	0,894
70	22,07	0,819
90	34,54	0,743
100	41,42	0,707
120	56,20	0,640
150	80,28	0,555

Fonte: GAMA; OLIVEIRA (1999).

2.4.5 Histograma do Espectro Harmônico

Uma outra maneira de analisar a distorção harmônica é através de um histograma do espectro harmônico. Este histograma é a representação gráfica da magnitude de corrente ou tensão para cada ordem harmônica quando comparada à frequência fundamental. A proporção da magnitude das tensões e correntes harmônicas em relação à componente fundamental depende do tipo de carga analisada e pode ser modificada através da utilização de filtros de harmônicos.

Nas Figura 2.10 e Figura 2.11 são mostrados dois exemplos de histogramas para lâmpadas LED tipo bulbo em duas situações: com filtragem de harmônicos e sem nenhum tipo de filtragem. Nos próximos capítulos serão apresentadas possíveis opções de filtragem para harmônicos e discutidos os histogramas obtidos a partir de alguns destes filtros.

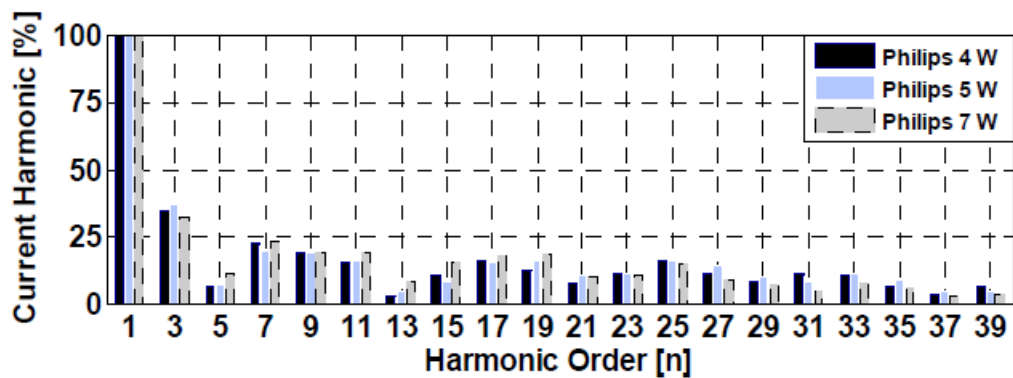


Figura 2.10 - Histograma do espectro harmônico de lâmpadas LED com filtragem

Fonte: UDDIN et al (2014, p. 3).

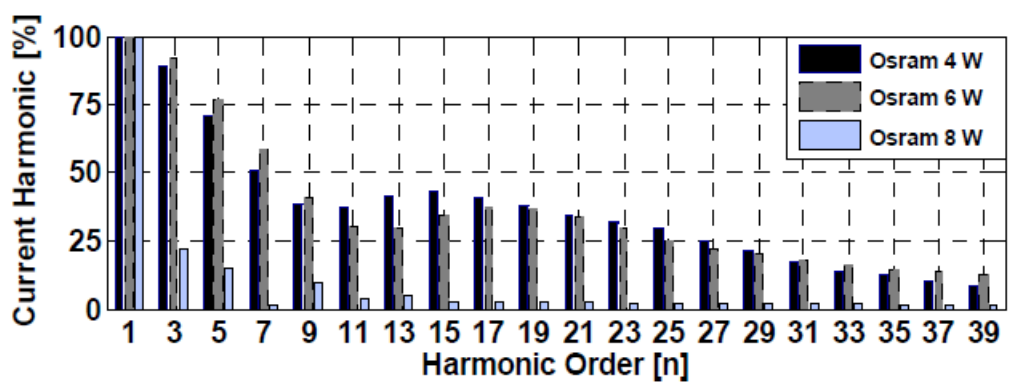


Figura 2.11 - Histograma do espectro harmônico de lâmpadas LED sem filtragem

Fonte: UDDIN et al (2014, p. 3).

3 CARACTERIZAÇÃO DOS HARMÔNICOS EM LÂMPADAS LED

3.1 TOPOLOGIA DE UMA LÂMPADA LED

O primeiro passo necessário para caracterizar os harmônicos em um dispositivo é entender quais os componentes estão presentes e qual função representam dentro do circuito. Como está ilustrado na Figura 3.1, a topologia de uma lâmpada LED comum consiste basicamente dos seguintes componentes (RATA; RATA, 2016):

- Filtro de interferência eletromagnética;
- Retificador com suavização da onda de corrente contínua;
- Algum tipo de controle da corrente.

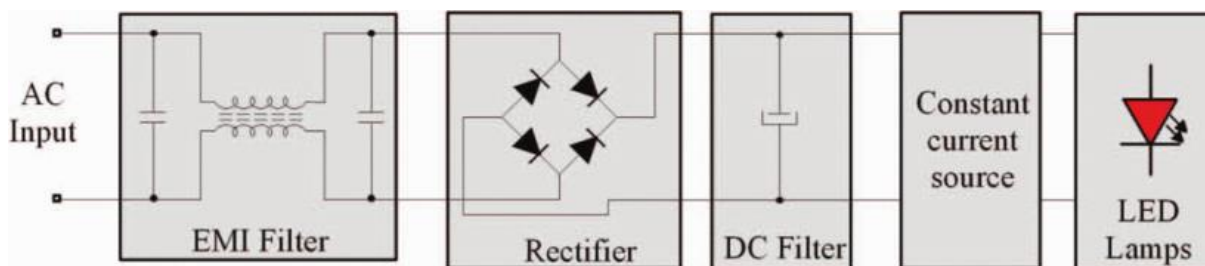


Figura 3.1 – Esquema simplificado da topologia de uma lâmpada LED

Fonte: RATA; RATA (2016).

3.1.1 Filtro de interferência eletromagnética

Quando um equipamento altamente sensível a interferências eletromagnéticas (geralmente eletrônico) é inserido em um ambiente sujeito a perturbações eletromagnéticas, ocorre um problema de compatibilidade eletromagnética. Há dois tipos de interferência eletromagnética: a conduzida por condutores (correntes de modo diferencial e comum), e a radiada por indução estacionária (campos magnéticos ou eletrostáticos) e/ou ondas eletromagnéticas.

Tornar esses equipamentos imunes a elas é complexo pois as fontes de interferência são muito numerosas e difíceis de se evitar, então torna-se necessário analisar a concepção física dos equipamentos assim como a fiação que interliga os aparelhos e fontes, suprimir a emissão de interferência na fonte, fazer com que o caminho de propagação seja tão ineficiente quanto possível e assegurar um nível satisfatório de imunidade à interferência para a maioria dos equipamentos sensíveis. As soluções adotadas são diferentes conforme se trate de baixa frequência ou alta frequência, dado que a frequência é um dos principais fatores que caracterizam uma onda eletromagnética (DE LIZ, 2003, p. 9).

3.1.1.1 Corrente de Modo Diferencial

Também conhecido como modo normal, modo simétrico ou modo série, o modo diferencial é o modo normal de condução de corrente por um condutor (SCHNEIDER ELECTRIC, p. 3).

As perturbações em modo diferencial são mais severas em baixa frequência, ou seja, abaixo de 9 kHz. Nas redes elétricas de potência, as perturbações em modo diferencial são bastante numerosas, sendo as principais: interrupções de curta ou longa duração, flutuações de tensão, instabilidade de fase, harmônicos e picos de tensão. As consequências de uma perturbação eletromagnética variam muito de acordo com a sua duração, as mais duradouras afetam principalmente aparelhos analógicos e as mais curtas afetam aparelhos digitais (DE LIZ, 2003, p. 10).

3.1.1.2 Corrente de Modo Comum

Também conhecida como corrente de modo paralelo, longitudinal ou assimétrico, a corrente de modo comum constitui-se basicamente de perturbações que passam pelos condutores com retorno pela terra, conexões de interligação, blindagem dos cabos, etc. Para quantificá-la, mede-se a diferença de potencial entre

o local de referência zero e o valor de potencial médio dos condutores a serem testados. (SCHNEIDER ELECTRIC, p. 3)

A corrente de modo comum é particularmente crítica na alta frequência em um ambiente isolado, onde a massa está isolada da terra, sendo assim necessárias algumas medidas de proteção. A redução das perturbações em modo comum em cabos de alta frequência pode ser obtida através de filtros de segunda ordem, sendo que o elemento indutivo deve ser do tipo acoplado e com polaridade adequada de enrolamentos, para que apresente uma impedância elevada para correntes assimétricas e ao mesmo tempo não induza nenhuma impedância para a corrente simétrica e os capacitores fornecem o caminho alternativo para a passagem dessa componente de corrente, como representado na Figura 3.2 (POMILIO; DECKMANN, 2007, p. 12).

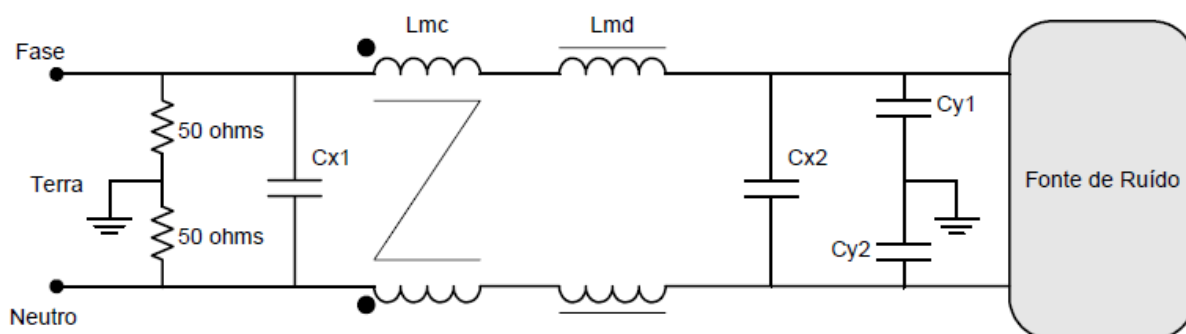


Figura 3.2 – Topologia típica para filtros de interferência eletromagnética

Fonte: DE LIZ (2003, p. 100).

3.1.2 Retificador com suavização da onda de corrente contínua

Da mesma forma que diversos aparelhos eletrônicos, as lâmpadas LED são alimentadas por uma tensão contínua, sendo necessária a presença de algum dispositivo de conversão CA-CC. Por conta disso, as lâmpadas LED são sensíveis a variação da tensão de saída (*ripple*), sendo necessária também a presença de algum elemento que suavize a onda retificada e diminua esse *ripple*, de modo a não afetar a vida útil ou a intensidade de luz percebida (GASSON-GARCÍA et al., 2016, p. 118).

3.1.3 Controle de corrente

Como pode ser visto na Figura 3.3, mostrada abaixo, a corrente de um LED de iluminação em relação à tensão é bastante sensível. Sabendo que a emissão de luz do LED é proporcional a corrente que o percorre e também que operar acima dos limites de corrente diminui a vida útil do dispositivo, faz-se necessário o controle da corrente no circuito (BULLOUGH, 2003).

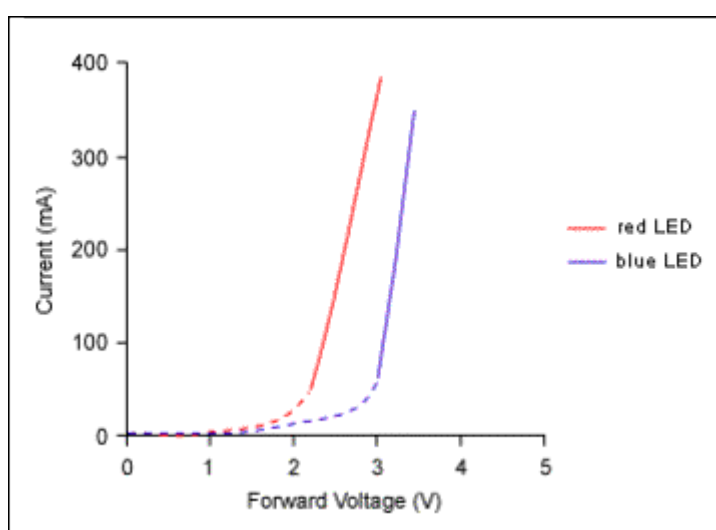


Figura 3.3 – Relação entre corrente e tensão em LED

Fonte: BULLOUGH (2003).

3.1.4 Circuito genérico para análise harmônica

Para uma análise harmônica, no entanto, nem todos os componentes apresentados anteriormente precisam ser levados em consideração. Uma lâmpada LED é, essencialmente, apenas um retificador com um capacitor para suavização da onda de corrente contínua (SHABBIR et al., 2014, p. 3). Um esquema desse circuito é apresentado na Figura 3.4.

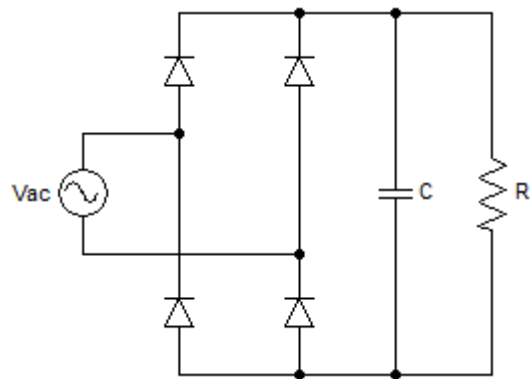


Figura 3.4 – Circuito genérico de uma lâmpada LED

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

3.1.5 Filtragem dos harmônicos

Além destes componentes apresentados anteriormente, também podem estar presentes algumas técnicas de filtragem de harmônicos, as quais serão analisadas com mais detalhes nas próximas seções. Nas lâmpadas LED disponíveis comercialmente, as situações mais comuns são (UDDIN et al., 2012): sem nenhum tipo de filtragem, filtro *valley-fill*, filtro passivo e filtro ativo.

3.2 SIMULAÇÃO DE FILTROS HARMÔNICOS

Primeiramente foram definidos alguns dos parâmetros dos circuitos a serem simulados e da própria simulação. Estes valores são facilmente encontrados na literatura.

Parâmetros do circuito:

- Fonte de tensão alternada de $127 V_{rms}$ com $f = 60$ Hz;
- Impedância da linha de $R = 0,7 \Omega$ e $L = 0,01$ mH (LEÃO et al., 2003);

- Com o objetivo de obter uma corrente de aproximadamente 150 mA, condizente com os limites de operação de um LED de iluminação, foi utilizada uma carga puramente resistiva de 750 Ω .

Parâmetros da simulação:

- As simulações foram realizadas através do software Simulink, utilizando as bibliotecas e ferramentas do módulo Simscape Power Systems;
- Taxa de amostragem: 100 kHz (16.666,67 amostras por ciclo);
- Tempo de amostragem: a simulação é realizada por 200 milissegundos (12 ciclos), iniciando em $t = 1$ s.

3.2.1 Sem filtragem de harmônicos

O primeiro caso simulado foi o de um circuito genérico de uma lâmpada LED, como o apresentado na Figura 3.4. Serão realizadas duas simulações deste circuito, alterando-se apenas o valor do capacitor de suavização da onda. Lembrando do que foi abordado na subseção 3.1.2, num primeiro momento esse capacitor terá um valor de 10 μF (TEXAS INSTRUMENTS, 2009, p. 27) e posteriormente será alterado para 100 μF . O circuito base, implantado no software Simulink, está representado na Figura 3.5:

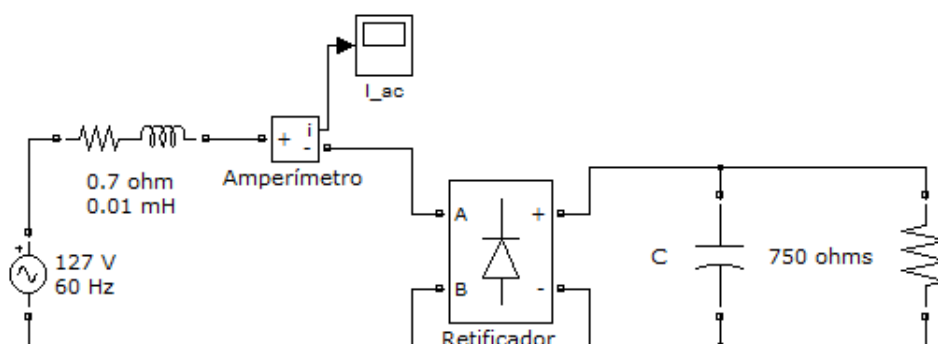


Figura 3.5 – Circuito base sem filtragem de harmônicos

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

A partir das simulações obtiveram-se as formas de onda apresentadas na Figura 3.6. Realizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) na forma de onda da corrente de entrada foi obtido o histograma da Figura 3.7, com seus dados imputados na Tabela 3.1:

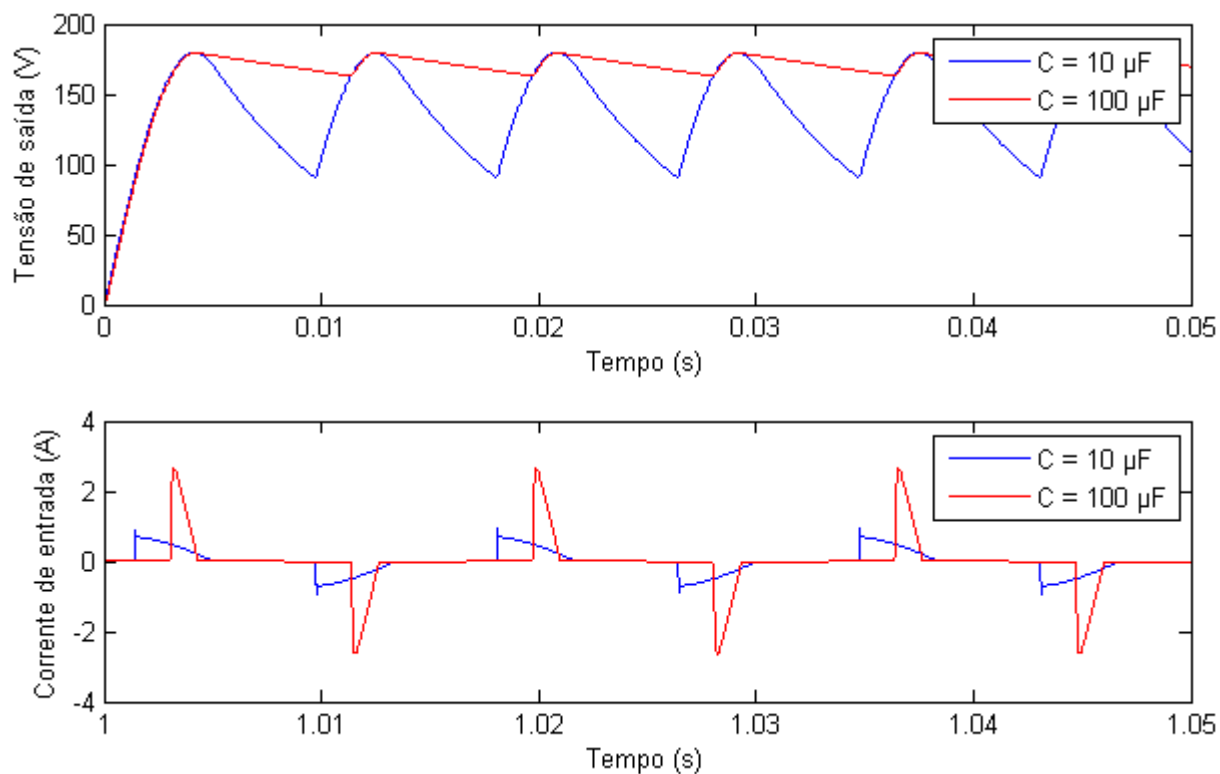


Figura 3.6 – Circuito base sem filtragem de harmônicos: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

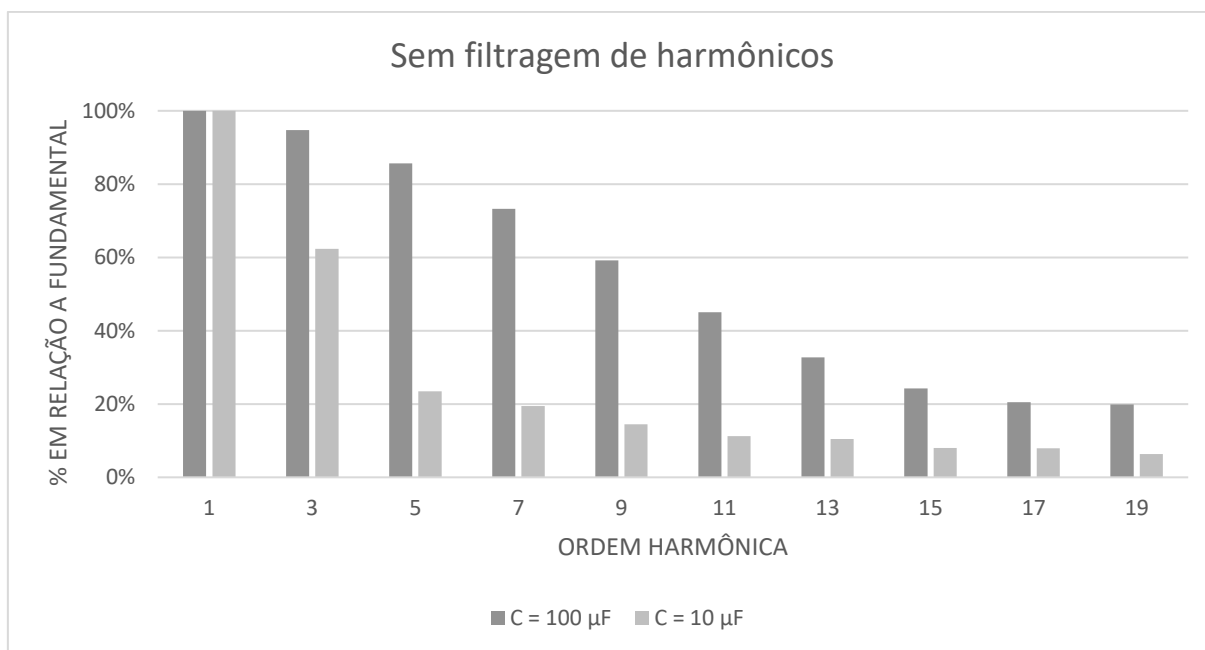


Figura 3.7 – Circuito base sem filtragem de harmônicos: componentes harmônicas

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Tabela 3.1 – Circuito base sem filtragem de harmônicos: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	C = 100 µF	C = 10 µF
	Amplitude (A)	Amplitude (A)
1	0.4597	0.3544
3	0.4357	0.2208
5	0.3937	0.0831
7	0.3369	0.0690
9	0.2720	0.0514
11	0.2069	0.0397
13	0.1504	0.0369
15	0.1114	0.0283
17	0.0944	0.0282
19	0.0916	0.0226
THDi	178.94%	76.55%

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

3.2.2 Filtro *valley-fill*

O filtro *valley-fill* na verdade é um filtro passivo de correção de fator de potência, que pode ser usado em circuitos com retificação como solução para o baixo

fator de potência causado pelo capacitor de suavização da onda (DALLA COSTA et al., 2001, p. 1). Devido a relação entre fator de potência e distorção harmônica, o filtro também consegue ser utilizado para esta finalidade. Uma desvantagem desse filtro é o alto valor do *ripple* na tensão contínua de saída do dispositivo.

O circuito a ser simulado é apresentado na Figura 3.8. Nesta simulação os capacitores C1 e C2 terão o valor de $33 \mu\text{F}$ (TEXAS INSTRUMENTS, 2009, p. 31) e o resistor em série com D1 tem como objetivo diminuir o pico da corrente de entrada do circuito.

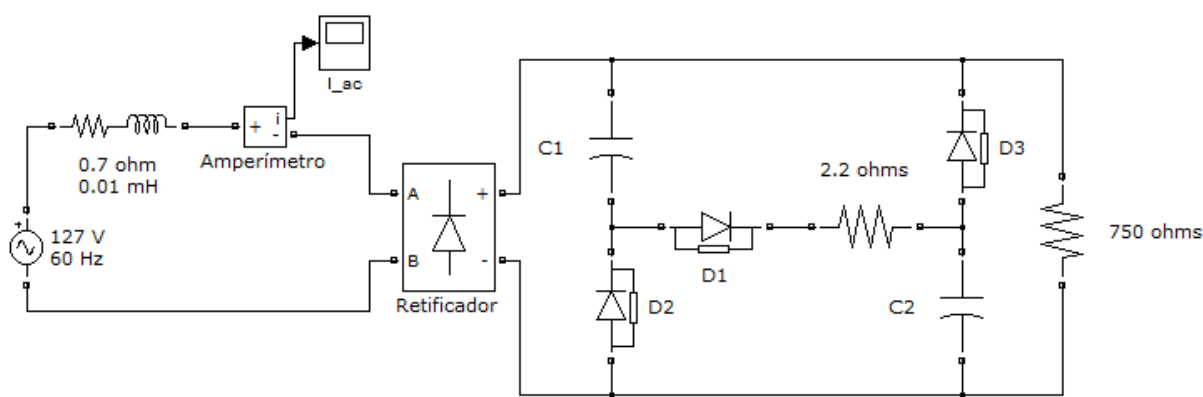


Figura 3.8 – Circuito base com filtro *valley-fill*

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

A partir das simulações obtiveram-se as formas de onda apresentadas na Figura 3.9. Realizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) na forma de onda da corrente de entrada foi obtido o histograma da Figura 3.10, com seus dados imputados na Tabela 3.2:

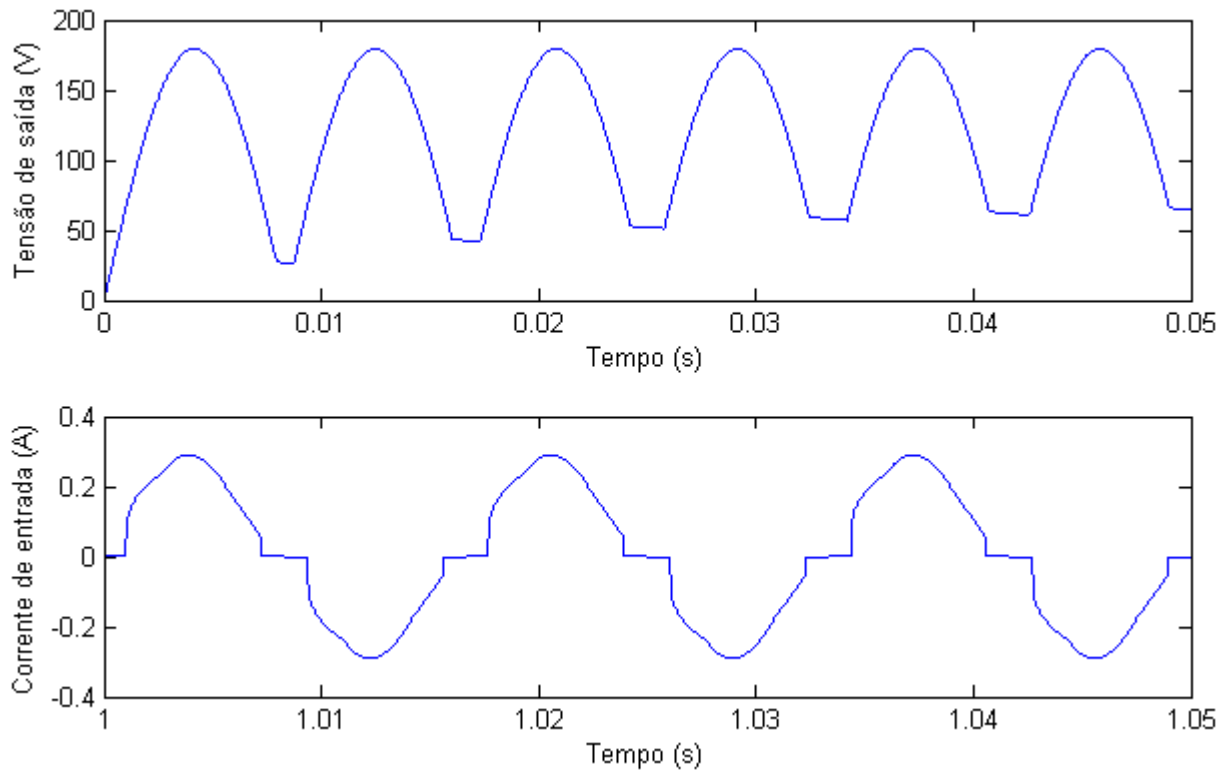


Figura 3.9 – Circuito base com filtro *valley-fill*: formas de onda
 Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

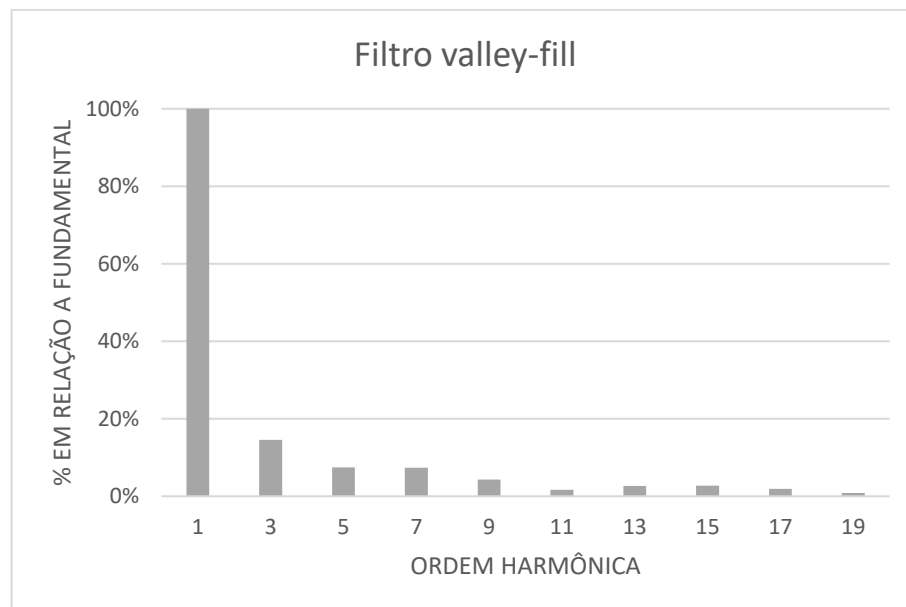


Figura 3.10 – Circuito base com filtro *valley-fill*: componentes harmônicas
 Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Tabela 3.2 – Circuito base com filtro *valley-fill*: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Amplitude (A)	% em relação à fundamental
1	0.2617	100.00%
3	0.0380	14.52%
5	0.0195	7.45%
7	0.0193	7.37%
9	0.0113	4.32%
11	0.0043	1.64%
13	0.0070	2.67%
15	0.0071	2.71%
17	0.0051	1.95%
19	0.0023	0.88%
THDi	19.54%	

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

3.2.3 Filtro passivo

Filtro passivo é todo aquele formado unicamente por componentes passivos, usualmente uma combinação de resistores, capacitores e/ou indutores. Para filtragem de harmônicos de corrente são bastante utilizados os filtros sintonizados em derivação. Estes filtros fazem uso da ressonância harmônica, criando um caminho de impedância quase nula para uma determinada frequência que se deseja filtrar (POMILIO, 1997). Para determinar o valor dos componentes do filtro foi utilizada a Equação (3.1).

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (3.1)$$

Na simulação do circuito da Figura 3.11 foram filtradas as correntes do 3º harmônico (180 Hz). Utilizando um capacitor de $C = 22 \mu\text{F}$ e resolvendo (3.1) chegamos a um indutor de $L = 35,54 \text{ mH}$, sendo o valor comercial mais próximo 36 mH. A utilização deste filtro em uma lâmpada LED residencial seria inviável devido ao tamanho do indutor, porém serão apresentados os resultados para fins de comparação.

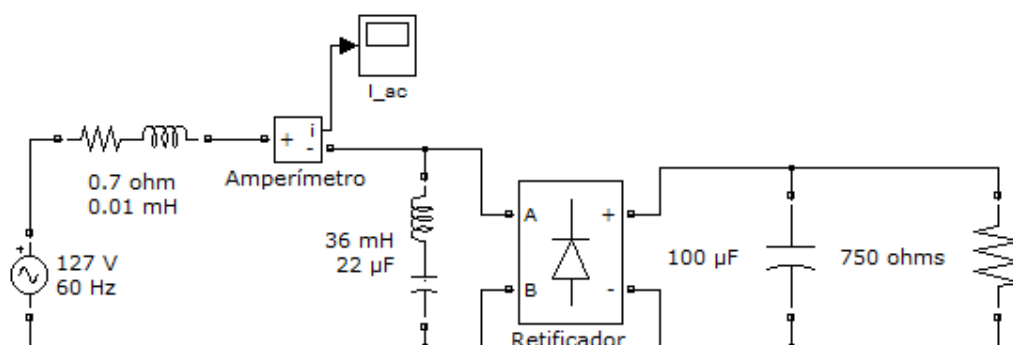


Figura 3.11 – Circuito base com filtro passivo

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

A partir das simulações obtiveram-se as formas de onda apresentadas na Figura 3.12. Realizando a Transformada Rápida de Fourier (FFT) na forma de onda da corrente de entrada foi obtido o histograma da Figura 3.13, com seus dados imputados na Tabela 3.3.

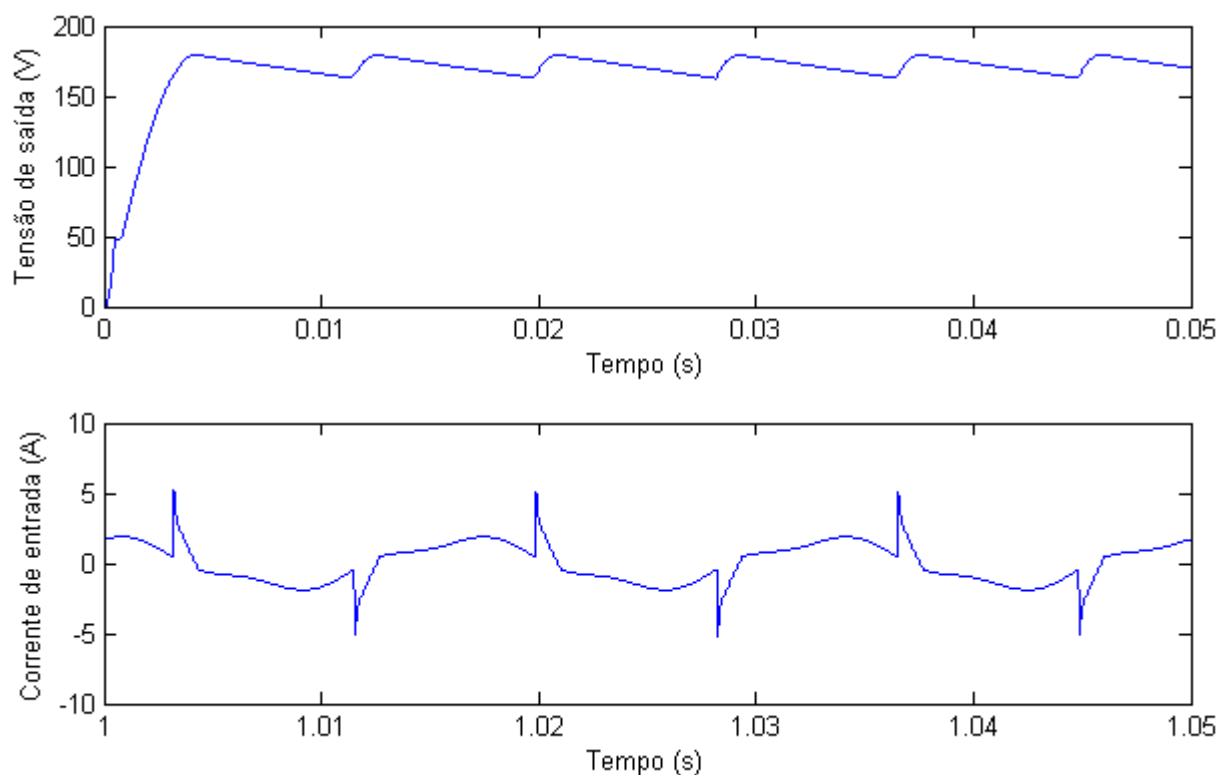


Figura 3.12 – Circuito base com filtro passivo: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

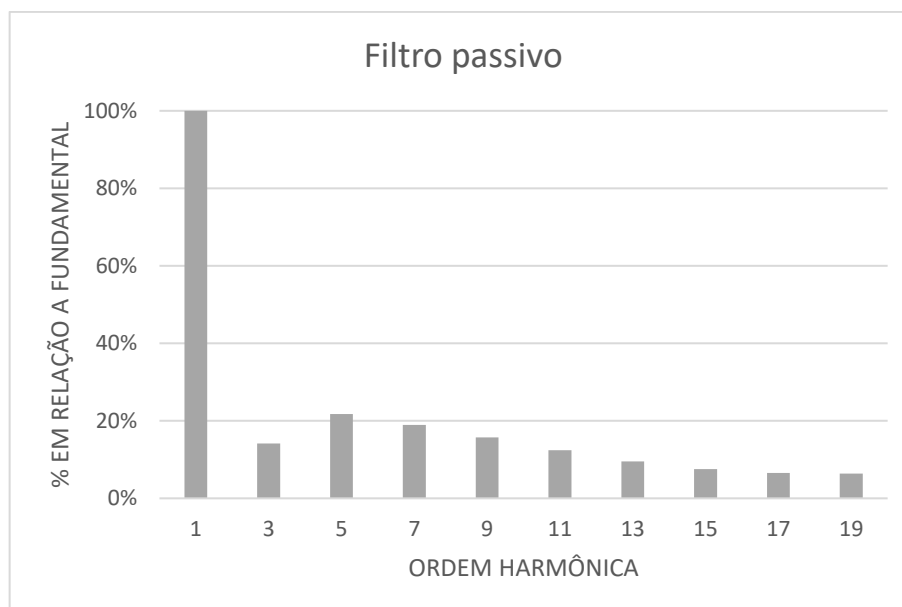


Figura 3.13 – Circuito base com filtro passivo: componentes harmônicas

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Tabela 3.3 – Circuito base com filtro passivo: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Amplitude (A)	% em relação à fundamental
1	1.8414	100.00%
3	0.2605	14.15%
5	0.3999	21.72%
7	0.3483	18.91%
9	0.2888	15.68%
11	0.2286	12.41%
13	0.1757	9.54%
15	0.1384	7.52%
17	0.1211	6.58%
19	0.1182	6.42%
THDi		46.47%

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

3.2.4 Filtro ativo

Os filtros ativos fazem uso de eletrônica e componentes ativos para monitorar o sistema e determinar a natureza e quantidade de harmônicas presentes, injetando correntes harmônicas opostas em fase para anular aquelas geradas por outras

cargas. São a alternativa mais completa e eficiente, porém por serem complexos e tipicamente mais caros que os demais filtros (CARNOVALE et al., p. 7-8) seu uso é justificado apenas quando utilizado em toda a instalação.

Devido à complexidade em sua implementação, esses filtros não foram simulados neste trabalho.

3.2.5 Comparações entre os resultados

A comparação entre os resultados obtidos nas simulações anteriores para os diferentes tipos de filtragem pode ser vista na Figura 3.14, para as formas de onda, e na Figura 3.15, para o histograma.

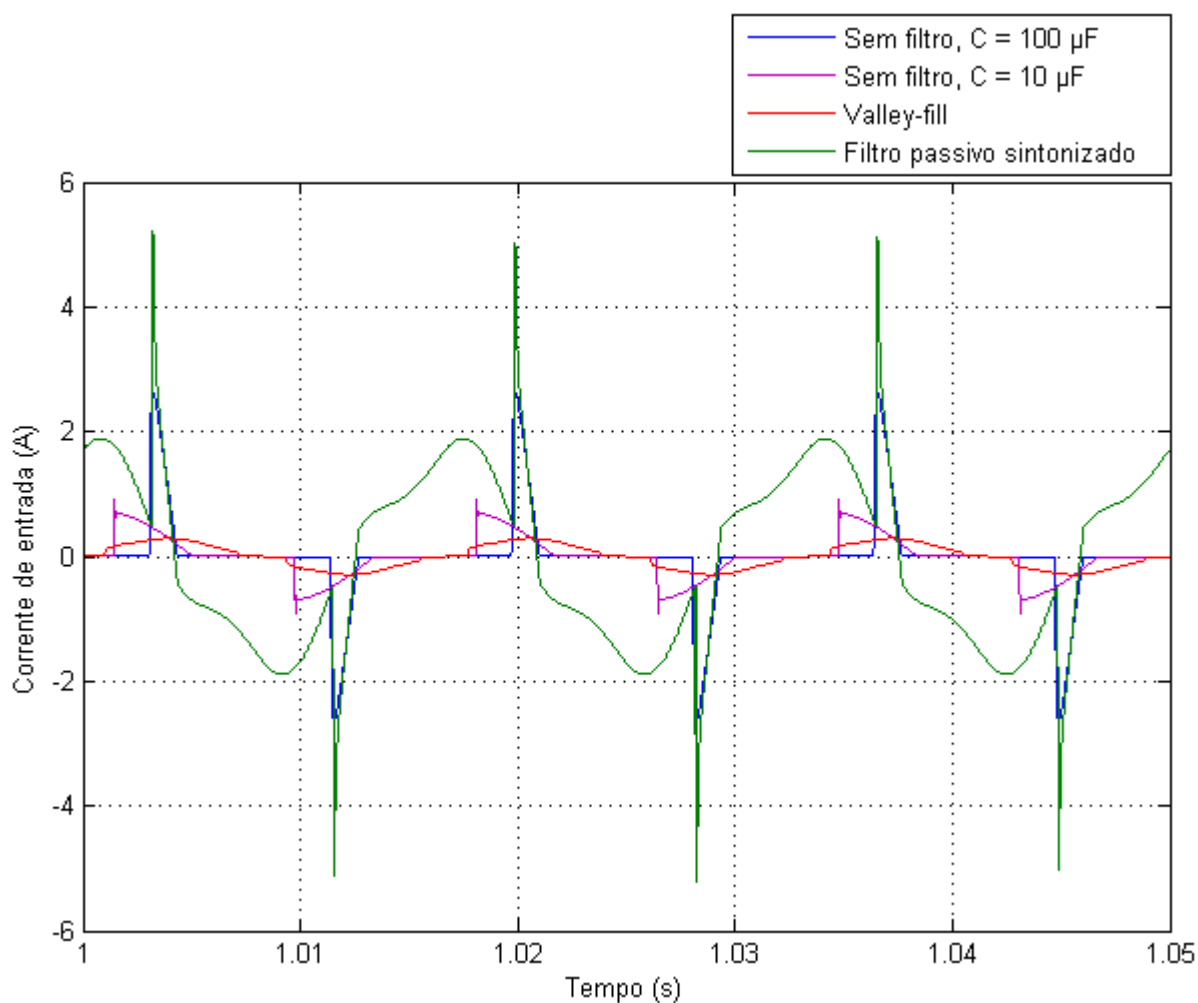


Figura 3.14 – Comparação entre as simulações: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

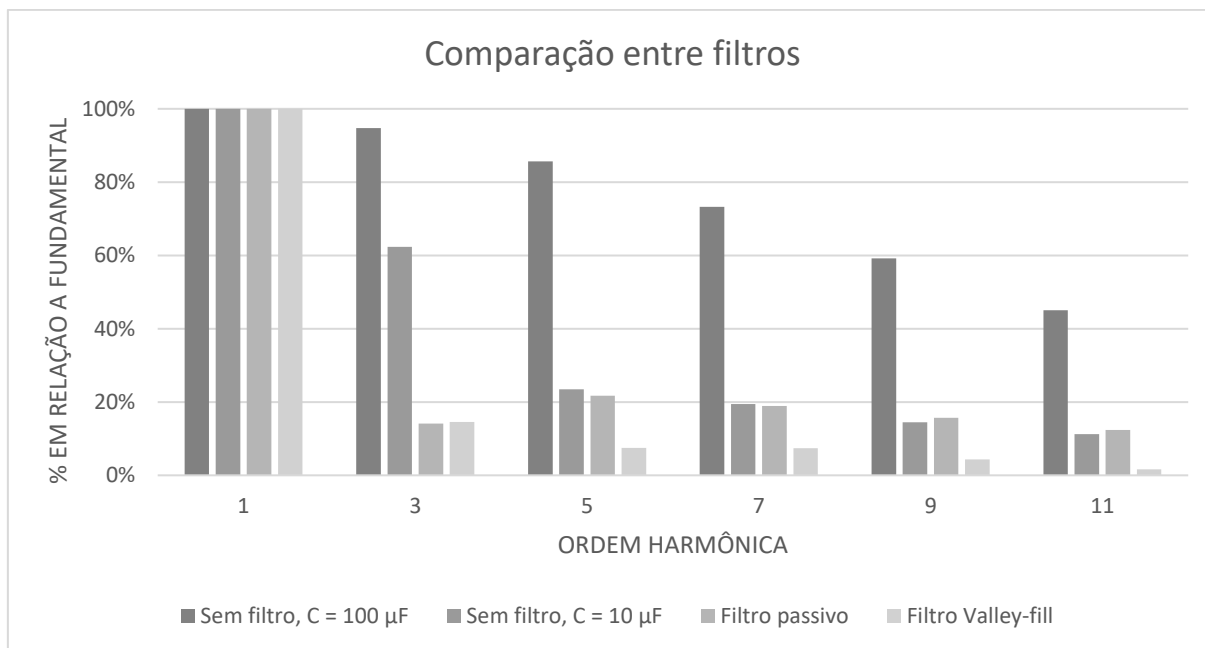


Figura 3.15 – Comparação entre as simulações: componentes harmônicas

Fonte: Elaborada pelo autor (2016).

Através da análise dos dados e gráficos apresentados neste capítulo, o filtro *valley-fill* foi o que obteve maior êxito na filtragem geral de harmônicos e redução do THDi. O filtro passivo também conseguiu filtrar uma parte considerável dos harmônicos, porém, como mencionado anteriormente, a situação considerada na análise seria inviável na prática devido ao tamanho dos componentes.

Assim, dentre as opções apresentadas e simuladas, o filtro *valley-fill* é a opção mais eficiente na filtragem de harmônicos de corrente em lâmpadas LED. Os resultados obtidos nestas simulações serão comparados com as medições realizadas no próximo capítulo a fim de validar os modelos apresentados.

4 CARACTERÍSTICAS HARMÔNICAS DAS LÂMPADAS LED

Foram realizadas medições de lâmpadas de diferentes fabricantes utilizando o Analisador de Energia RE6000/H para duas tensões de alimentação: 127 e 220 V. As lâmpadas escolhidas são do tipo bulbo, mais comuns em residências pela similaridade em tamanho e forma às lâmpadas incandescentes e halógenas, e correspondem a fabricantes com grande presença no mercado brasileiro e as potências são as mais comumente utilizadas em residências. Esses dados são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Fabricantes e potências das lâmpadas analisadas

Fabricante	Potências analisadas		
A	6 W	8 W	16 W
B	6 W	7,5 W	13,5 W
C	6 W	9 W	12 W

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

As especificações técnicas das lâmpadas, fornecidas pelos fabricantes, estão contidas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Especificações técnicas das lâmpadas analisadas

Fabricante	Potência	Fator de Potência
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	$\geq 0,8$
C	6 W	$\geq 0,5$
	9 W	$\geq 0,7$
	12 W	$\geq 0,7$

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a realização das medições foram utilizados os seguintes instrumentos:

- Analisador de Energia RE6000/H da empresa Embrasul;
- Alicates de corrente AL 100, com as seguintes especificações:
 - Faixa de medição: 0,2 a 100 A;
 - Precisão: 3% da leitura entre 0,2 e 1 A;
 - Faixa de frequência: 0 a 3 kHz; Comprimento do cabo: 2 m.
- 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 127 V (Fase-Terra) e 220 V (Fase-Fase);
- Software de análise ANL 6000 da empresa Embrasul;

Parâmetros de análise para a corrente harmônica (RE6000/H):

- Tensão de alimentação: 127 V (1ª medição) e 220 V (2ª medição);
- Tempo de estabilização da lâmpada: 5 minutos;
- Tempo de medição por lâmpada: 5 minutos;
- Intervalo de aquisição de dados: 100 milissegundos;
- Intervalo de aquisição de dados harmônicos: 500 milissegundos.

Para obtenção da forma de onda da corrente, foi introduzido um resistor de 4,7 ohms em série com a lâmpada, seus efeitos no circuito, dado o valor de resistência, podem ser desconsiderados. O circuito foi então alimentado com tensão de 220 V e a partir de um osciloscópio digital a forma de onda no resistor foi adquirida.

Os dados de medição foram importados para o software de análise ANL6000 e serão apresentados nas seções 4.1 e 5.1 a seguir, sendo discutidos com mais detalhes na seção 4.2 e Capítulo 5.

4.1 RESULTADO DAS MEDIÇÕES

4.1.1 Fabricante A

Para a lâmpada de 6 W do Fabricante A, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.3:

Tabela 4.3 – Lâmpada de 6 W do Fabricante A: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
128,4693	0,0731	5,9202	-0,6302	105,4351
222,9627	0,0597	6,4070	-0,4807	162,1527

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.1 e Figura 4.2, respectivamente.

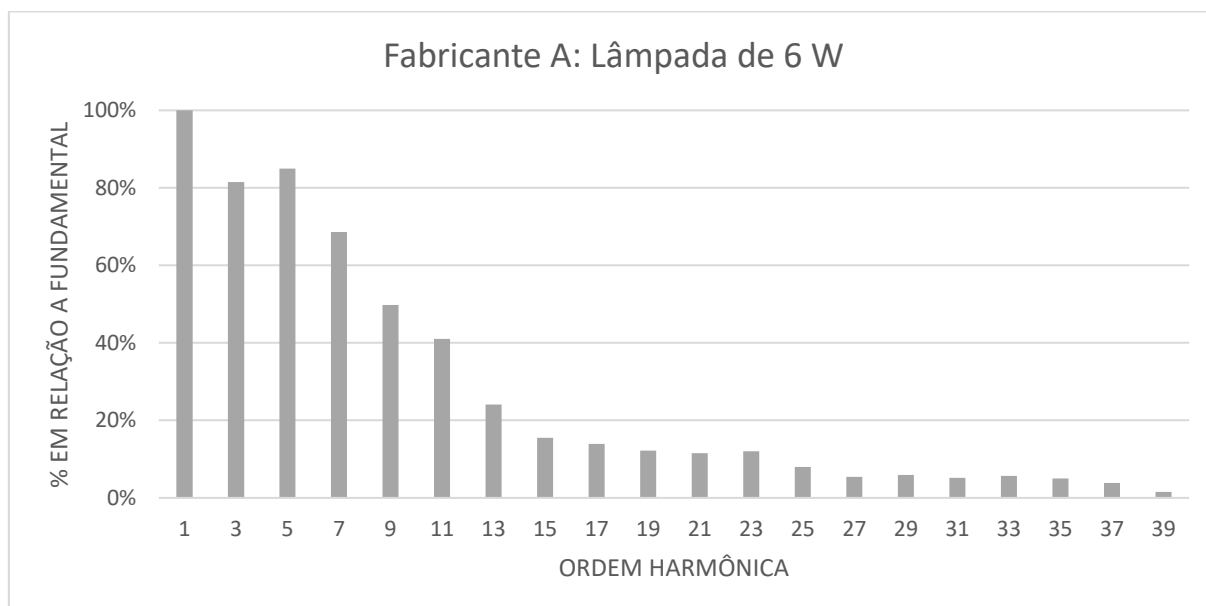


Figura 4.1 – Lâmpada de 6 W do Fabricante A: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

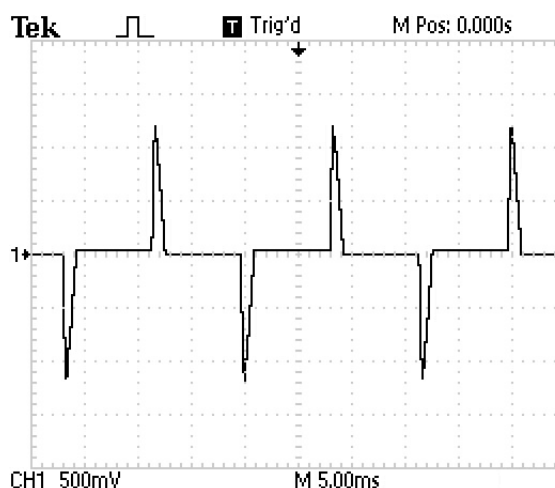


Figura 4.2 – Lâmpada de 6 W do Fabricante A: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a lâmpada de 8 W do Fabricante A, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.4:

Tabela 4.4 – Lâmpada de 8 W do Fabricante A: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
128,9453	0,0741	9,2829	-0,9710	24,5962
224,4706	0,0462	8,9458	-0,9708	24,6737

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.3 e Figura 4.4, respectivamente.

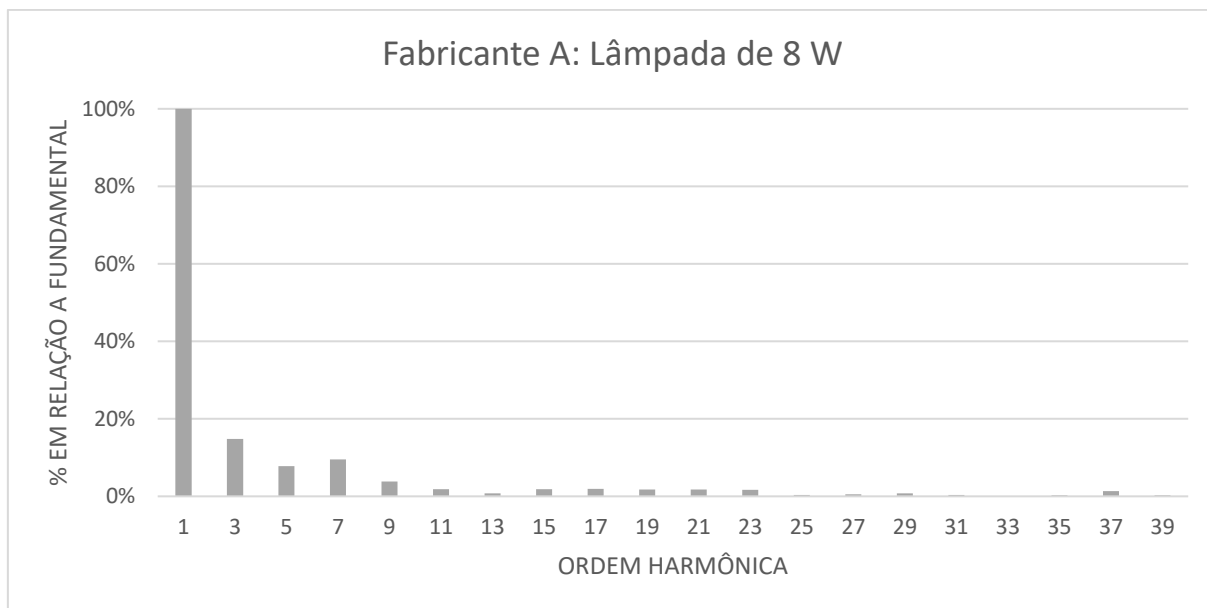


Figura 4.3 – Lâmpada de 8 W do Fabricante A: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

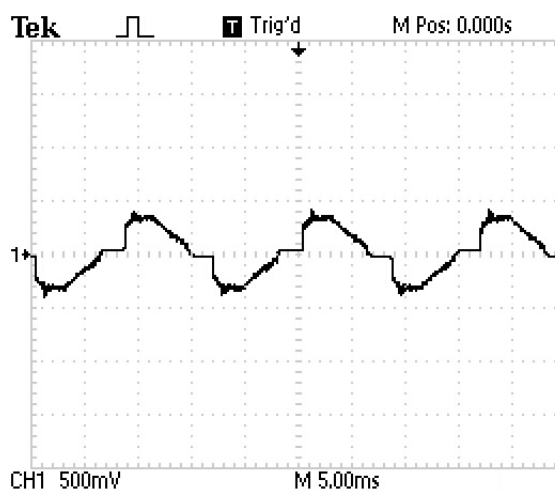


Figura 4.4 – Lâmpada de 8 W do Fabricante A: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a lâmpada de 16 W do Fabricante A, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.5:

Tabela 4.5 – Lâmpada de 16 W do Fabricante A: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
128,5559	0,1862	15,2446	-0,6369	97,3927
222,5823	0,1400	15,2402	-0,4709	160,1412

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.5 e Figura 4.6, respectivamente.

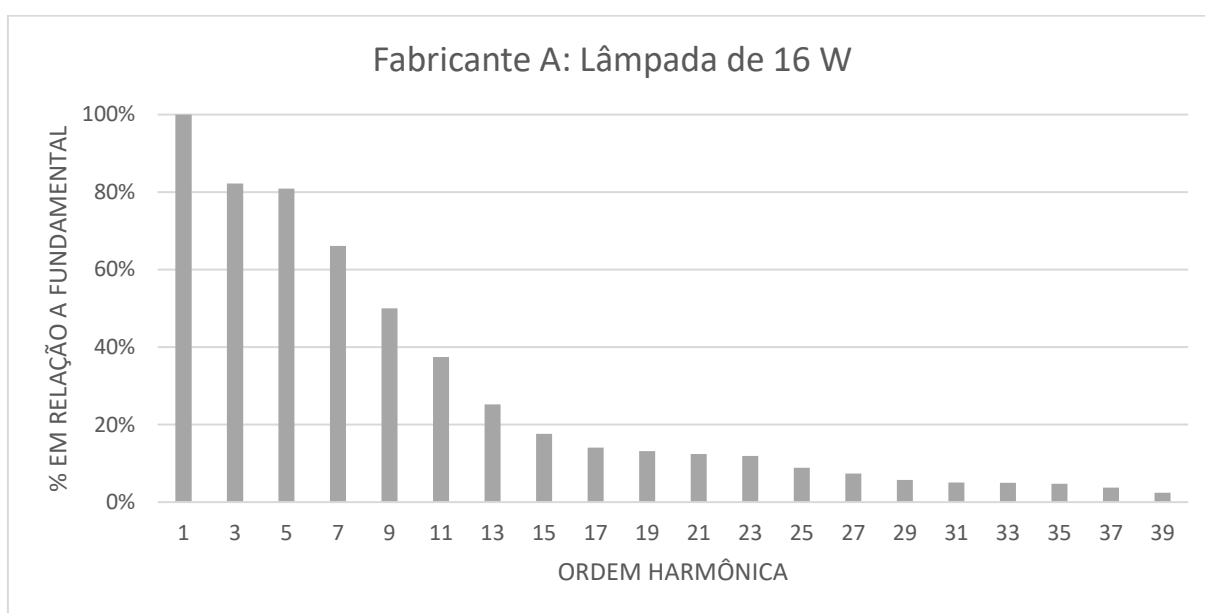


Figura 4.5 – Lâmpada de 16 W do Fabricante A: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

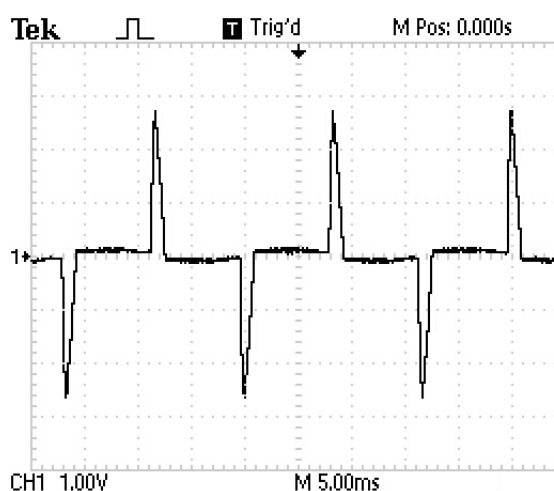


Figura 4.6 – Lâmpada de 16 W do Fabricante A: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.1.2 Fabricante B

Para a lâmpada de 6 W do Fabricante B, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.6:

Tabela 4.6 – Lâmpada de 6 W do Fabricante B: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
128,9980	0,0475	5,9407	-0,8705	16,9086
222,9270	0,0340	5,8002	-0,8655	20,1430

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.7 e Figura 4.8, respectivamente.

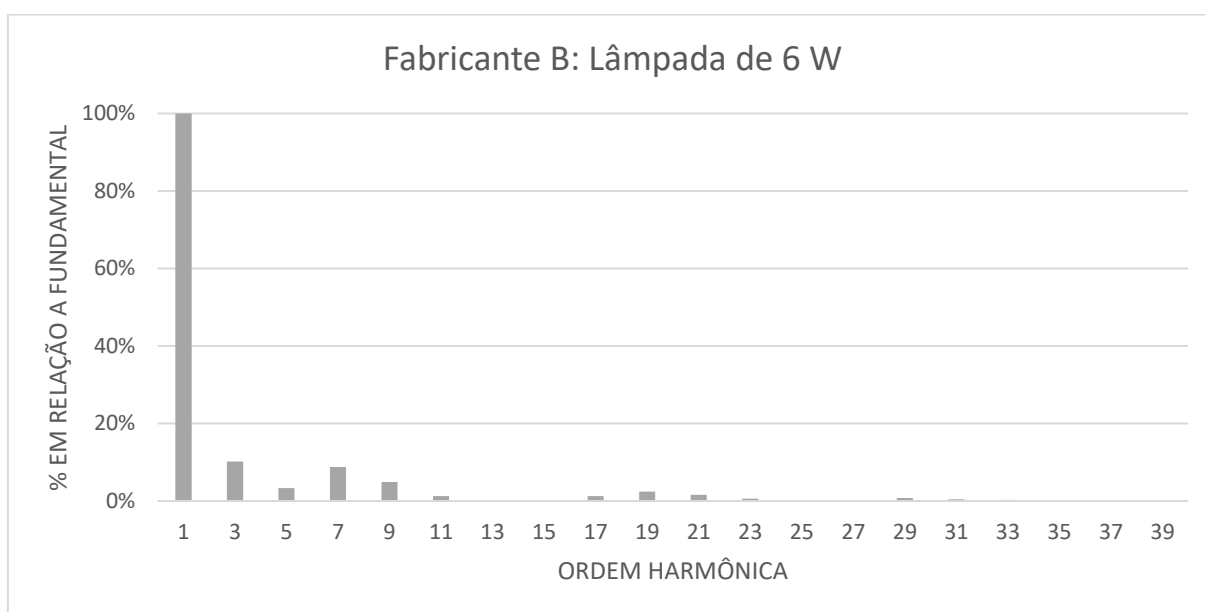


Figura 4.7 – Lâmpada de 6 W do Fabricante B: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).



Figura 4.8 – Lâmpada de 6 W do Fabricante B: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a lâmpada de 7,5 W do Fabricante B, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.7:

Tabela 4.7 – Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
128,6718	0,0593	7,4263	-0,9739	21,7527
223,5117	0,0400	7,4104	-0,9804	18,3000

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.9 e Figura 4.10, respectivamente.

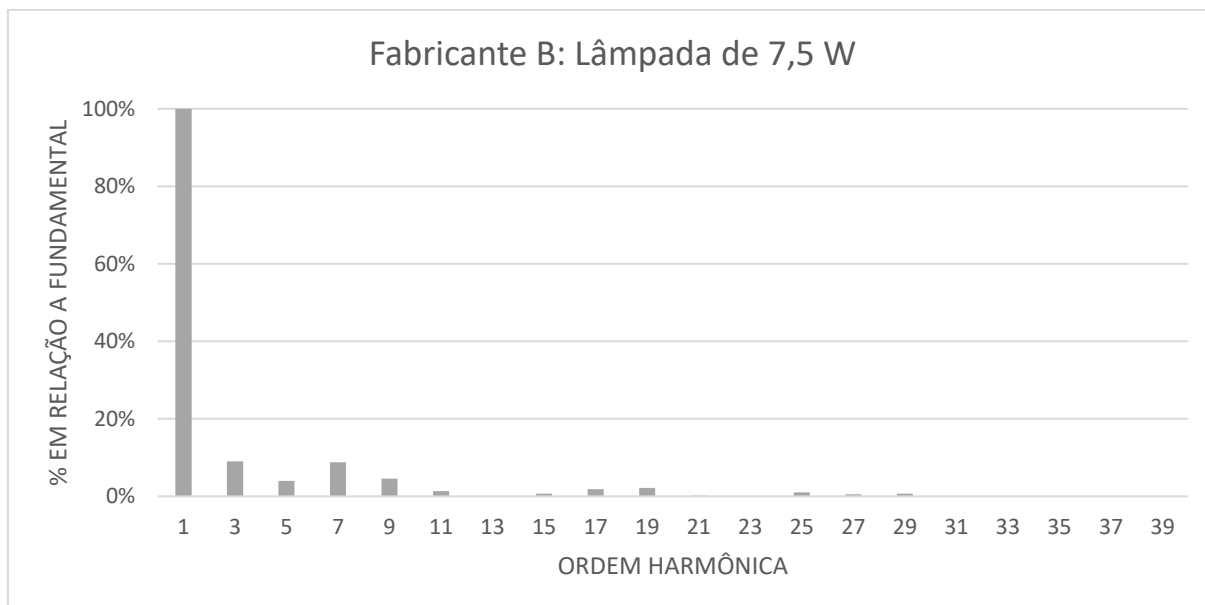


Figura 4.9 – Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

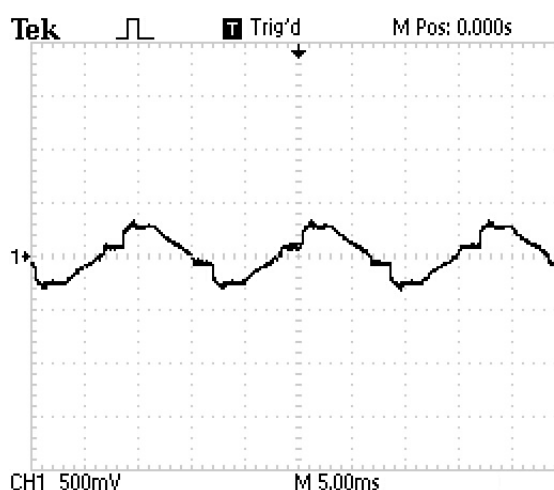


Figura 4.10 – Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a lâmpada de 13,5 W do Fabricante B, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.8:

Tabela 4.8 – Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
128,3010	0,1035	13,0710	-0,9844	16,3569
223,2825	0,0664	13,3671	-0,9756	21,3092

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.11 e Figura 4.12, respectivamente.

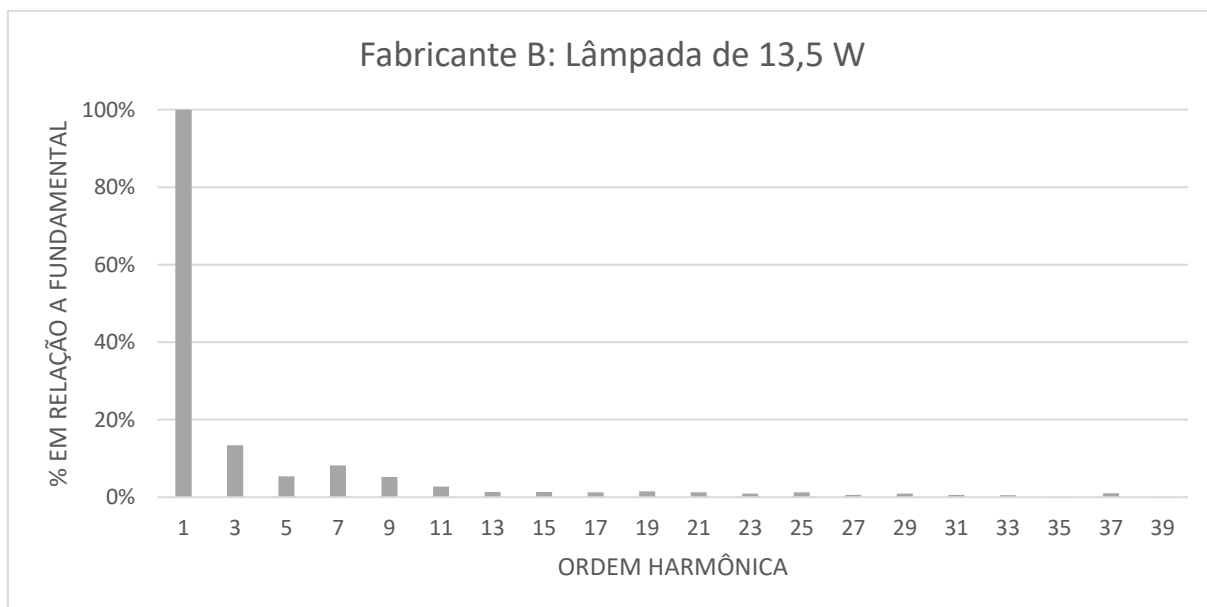


Figura 4.11 – Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

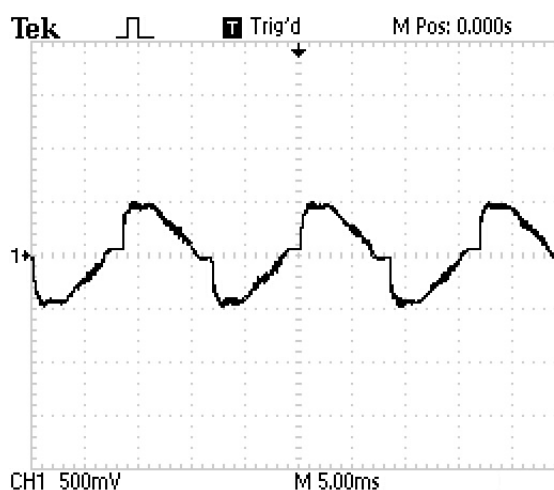


Figura 4.12 – Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.1.3 Fabricante C

Para a lâmpada de 6 W do Fabricante C, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.9:

Tabela 4.9 – Lâmpada de 6 W do Fabricante C: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
129,0337	0,0855	6,6200	-0,6000	110,2762
222,9982	0,0680	6,9491	-0,4495	171,7018

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.13 e Figura 4.14, respectivamente.

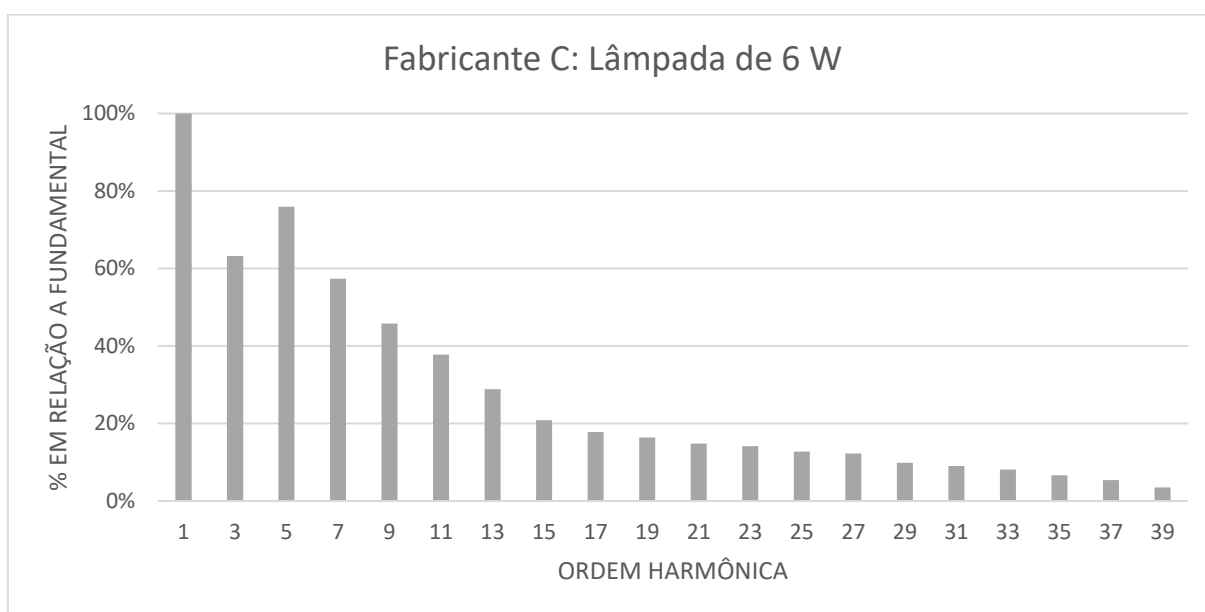


Figura 4.13 – Lâmpada de 6 W do Fabricante C: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

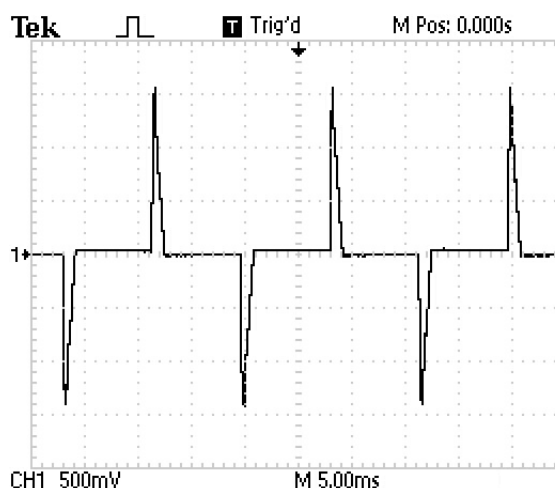


Figura 4.14 – Lâmpada de 6 W do Fabricante C: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a lâmpada de 9 W do Fabricante C, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.10:

Tabela 4.10 – Lâmpada de 9 W do Fabricante C: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
128,6559	0,0732	9,1035	-0,9675	26,8494
223,5173	0,0476	9,1408	-0,9763	22,9867

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.15 e Figura 4.16, respectivamente.

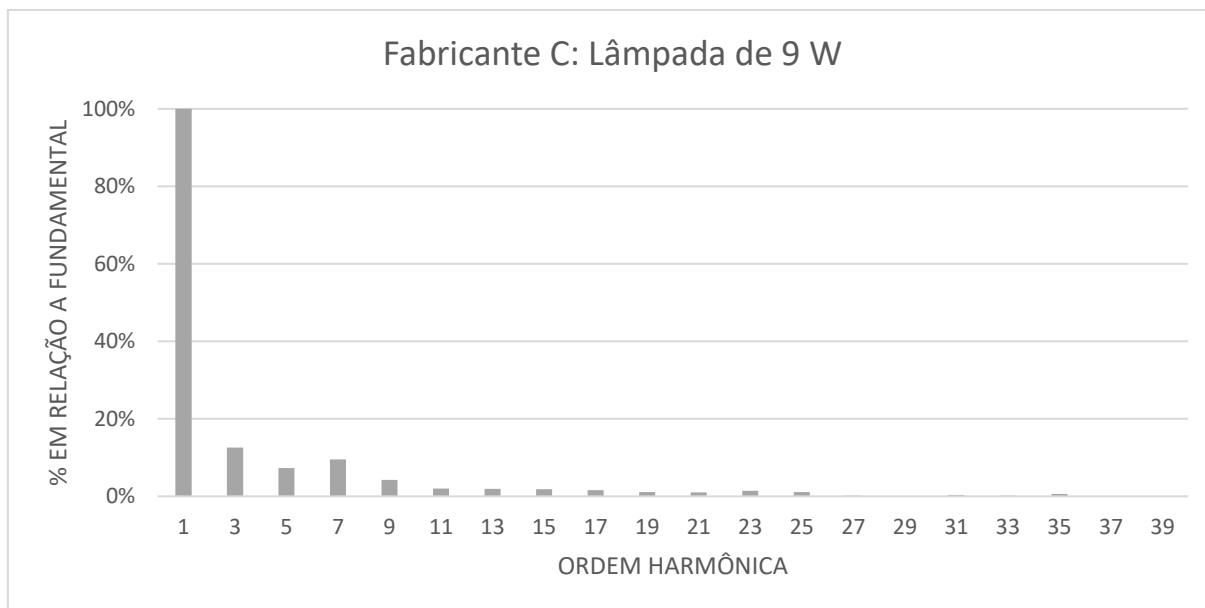


Figura 4.15 – Lâmpada de 9 W do Fabricante C: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

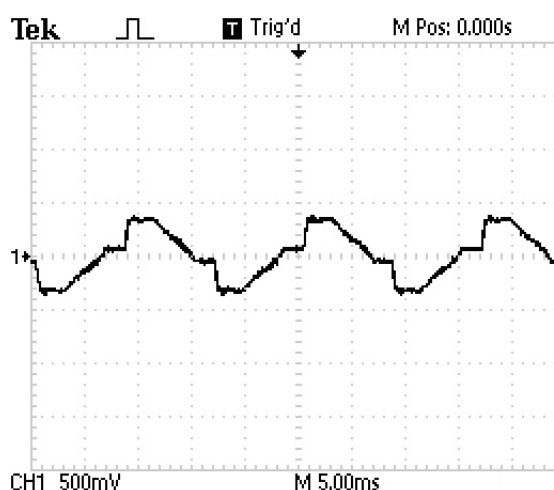


Figura 4.16 – Lâmpada de 9 W do Fabricante C: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a lâmpada de 12 W do Fabricante C, os dados gerais obtidos nas medições foram representados na Tabela 4.11:

Tabela 4.11 – Lâmpada de 12 W do Fabricante C: dados de medição

U (V)	I (A)	P (W)	FP	DHTi (%)
128,6769	0,0897	11,3397	-0,9830	17,1895
224,4727	0,0579	11,6719	-0,9791	19,4321

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

O histograma do espectro harmônico e as formas de onda de tensão e corrente obtidas para a segunda medição (220 V) são apresentados nas Figura 4.17 e Figura 4.18, respectivamente.

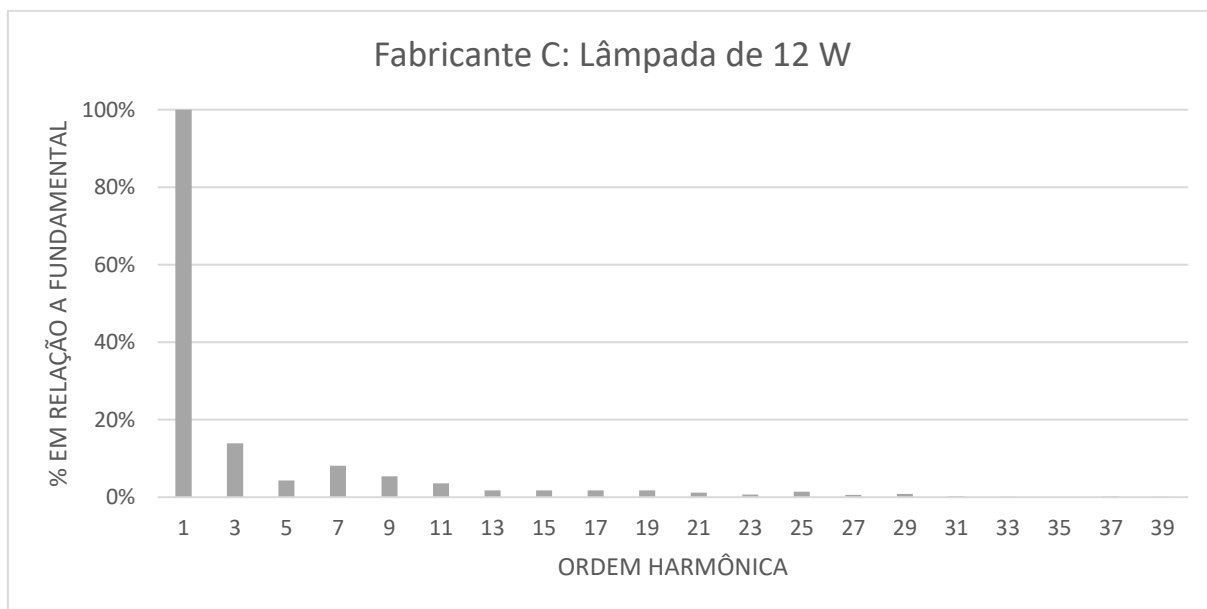


Figura 4.17 – Lâmpada de 12 W do Fabricante C: histograma

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

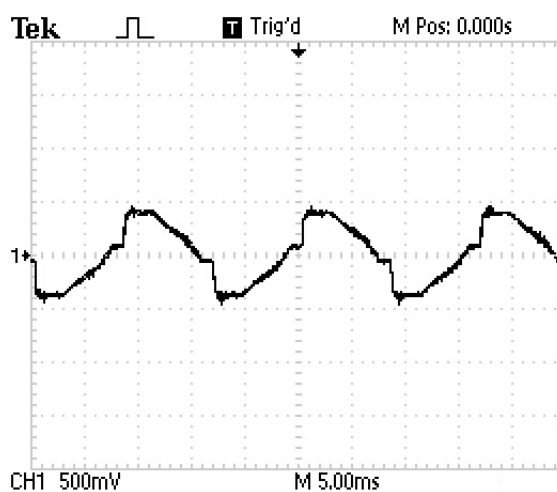


Figura 4.18 – Lâmpada de 12 W do Fabricante C: formas de onda

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.2 ANÁLISE DAS MEDIÇÕES

Os dados coletados através do analisador de energia foram compilados e organizados de forma a estudar o THDi em 2 categorias: fabricante e potência. Também serão analisados os histogramas de cada lâmpada, visando observar o comportamento das ordens harmônicas para cada potência e fabricante. As análises realizadas nesta subseção e posteriormente no Capítulo 5 utilizarão apenas os dados obtidos para a tensão de alimentação de 220 V, uma vez que a norma IEC 61000-3-2 utiliza uma tensão de 230 V como base para suas delimitações.

A Figura 4.19, apresenta o índice de distorção harmônica total de corrente (THDi) para cada lâmpada do estudo. Observa-se que a lâmpada que possui maior distorção harmônica de corrente é a lâmpada de 6 W do Fabricante C, sendo esta a menor potência dentre as estudadas. Do outro lado, a lâmpada com a menor distorção harmônica de corrente é a lâmpada de 7,5 W do Fabricante B.

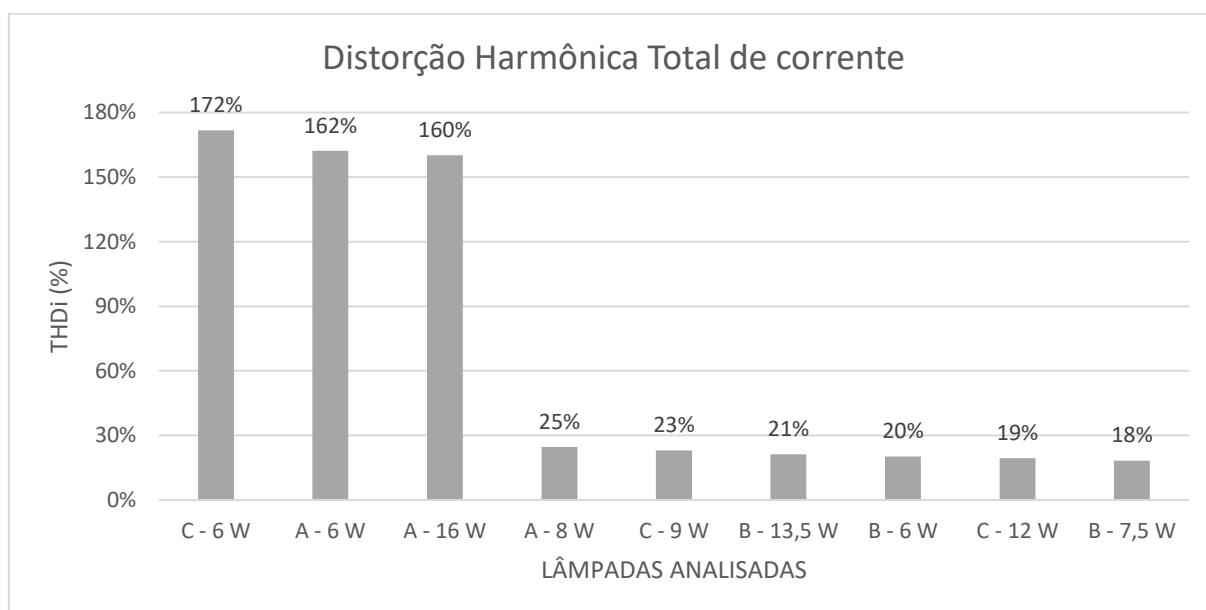


Figura 4.19 – Comparação de THDi entre as lâmpadas analisadas

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

4.2.1 Comparação das Potências por Fabricante

Primeiramente foi realizada uma comparação do THDi entre as potências dentro do mesmo fabricante, visando observar a tendência de desempenho geral de cada fabricante.

Para o Fabricante A, obteve-se a comparação da Figura 4.20.

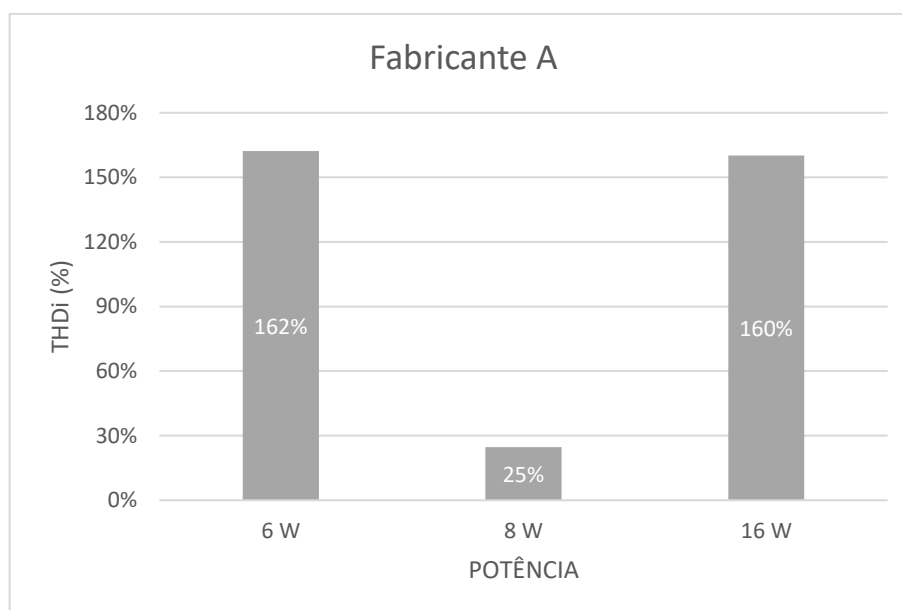


Figura 4.20 – Comparação de THDi entre as lâmpadas do Fabricante A

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Observa-se que nas lâmpadas do Fabricante A as potências de 6 W e 16 W apresentam valor de THDi de 162% e 160%, respectivamente; enquanto que a lâmpada de 8 W atingiu apenas 25% de distorção harmônica total, valor 6,5 vezes menor que a média das outras duas lâmpadas. O valor médio de THDi do Fabricante A é de 136%.

Para o Fabricante B, obteve-se a comparação da Figura 4.21.

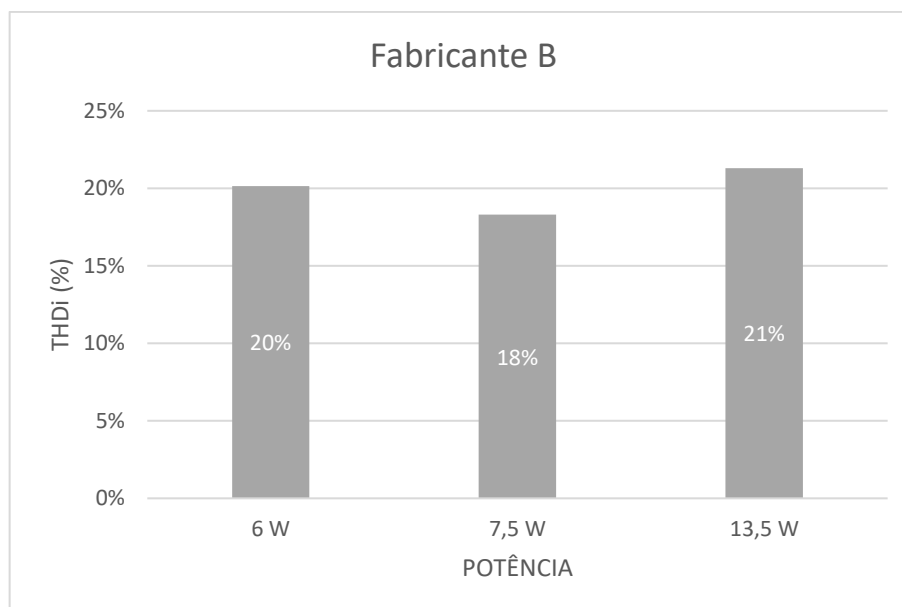


Figura 4.21 – Comparação de THDi entre as lâmpadas do Fabricante B

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para o Fabricante B, as distorções harmônicas foram significativamente menores quando comparadas aos outros fabricantes, apresentando um THDi médio de 20%. Também é possível observar que as lâmpadas analisadas não apresentam muita variação de THDi entre si, diferente do apresentado para o Fabricante A.

E por último, para o Fabricante C, obteve-se a comparação da Figura 4.22.

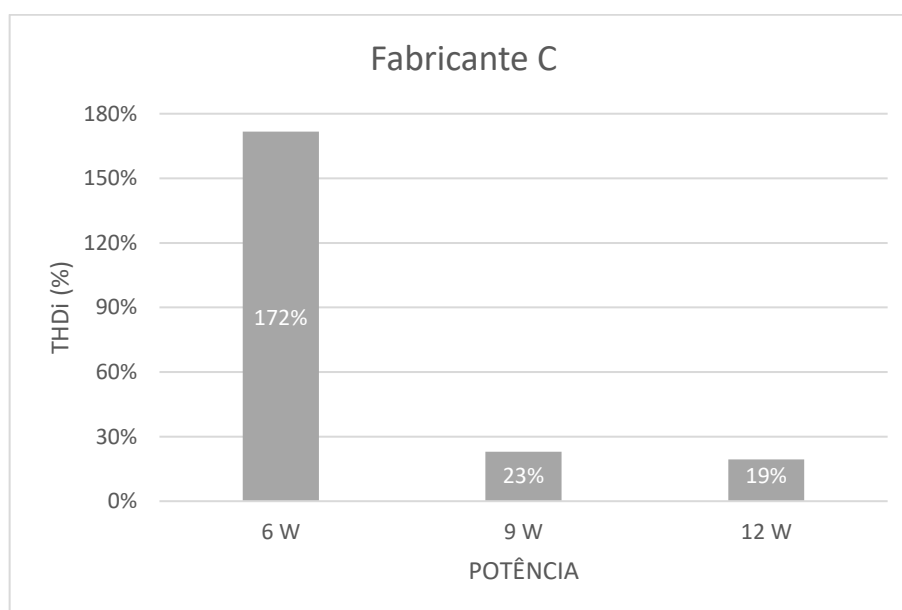


Figura 4.22 – Comparação de THDi entre as lâmpadas do Fabricante C

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Ao analisar as distorções harmônicas para o Fabricante C, verifica-se que a lâmpada de menor potência (6 W) apresenta a maior THDi do fabricante, com 172%. Por outro lado, as lâmpadas de 9W e 12W apresentaram valores bastante inferiores, de 23% e 19% respectivamente. A média de THDi do fabricante é de 71%.

Concluindo, o fabricante das lâmpadas com melhor índice de distorção harmônica de corrente é o Fabricante B, enquanto que o Fabricante A possui o pior.

4.2.2 Comparação dos Fabricantes por Potências

Na sequência foi realizada uma comparação da THDi entre os fabricantes dentro de uma mesma faixa de potência.

Para a potência de 6 W obteve-se a comparação apresentada na Figura 4.23:

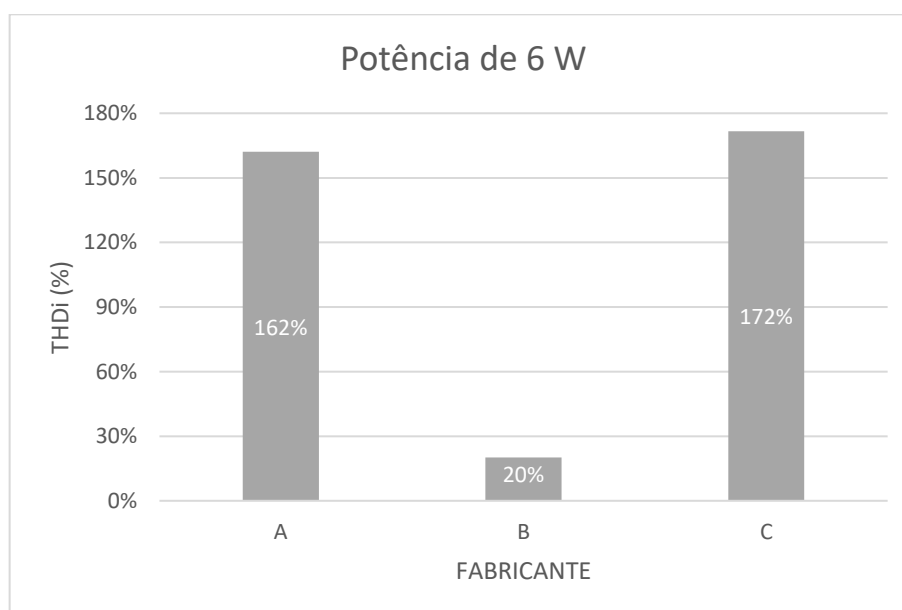


Figura 4.23 – Comparação de THDi entre as lâmpadas da faixa de 6 W

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Pode-se inferir que os Fabricantes A e C apresentam uma THDi bastante elevada quando comparada ao Fabricante B, uma vez que enquanto o Fabricante B possui THDi de 20%, os outros dois possuem THDi acima de 160%. A média aritmética para esta categoria de potência é de 118%, mostrando que o Fabricante B

possui melhor desempenho no quesito de THDi, já que sua THDi é quase seis vezes inferior à média.

Para a faixa potência de 7,5 a 9 W obteve-se a comparação mostrada na Figura 4.24:

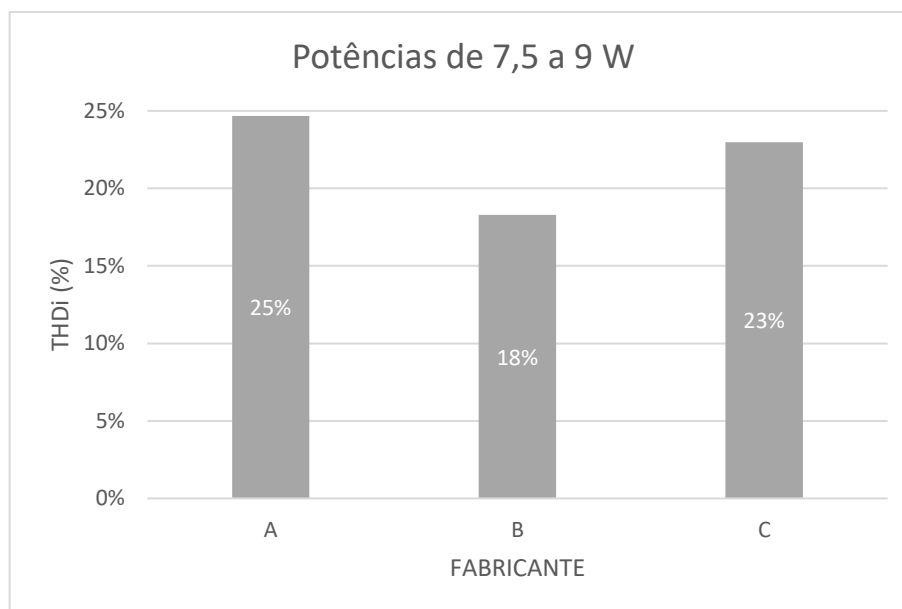


Figura 4.24 – Comparação de THDi entre as lâmpadas da faixa de 7,5 a 9 W

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a faixa de potência de 7,5 a 9 W, a média de THDi é de 22%, e os valores para os Fabricantes A, B e C variaram em apenas 3, 4 e 5 pontos percentuais, respectivamente; mostrando que o índice de distorção harmônica é bastante uniforme para essa faixa de potência, independente do fabricante. O Fabricante B apresenta a menor THDi desta categoria de potência (18%), seguido pelo Fabricante C (23%) e por fim o Fabricante A, com o maior índice de distorção (25%).

Por fim, para a faixa potência de 12 a 16 W obteve-se a comparação apresentada na Figura 4.25:

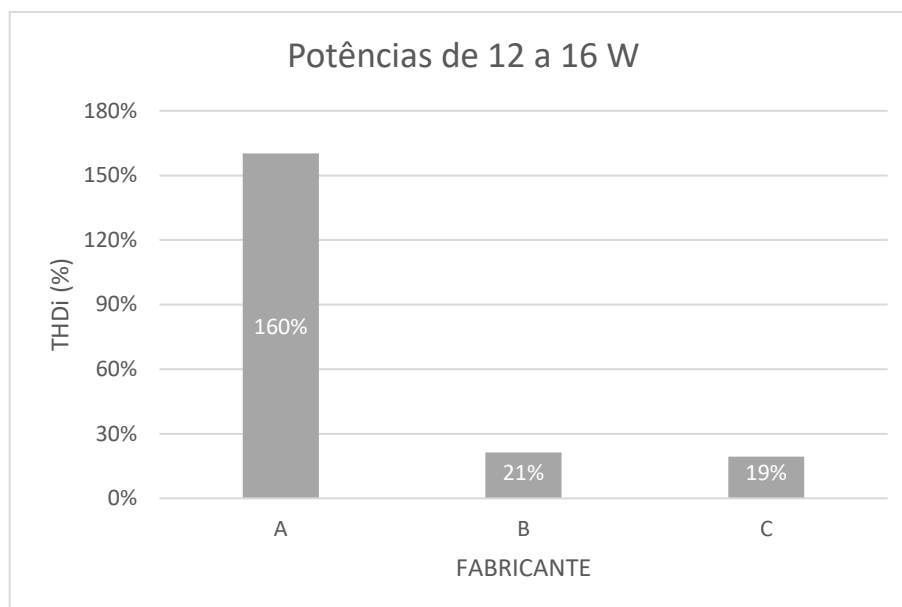


Figura 4.25 – Comparação de THDi entre as lâmpadas da faixa de 12 a 16 W

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Analisando lâmpadas dos 3 fabricantes com potências entre 12 e 16 W obtemos uma média de 67% de distorção harmônica de corrente, entretanto, verificou-se alta discrepância entre o Fabricante A e os outros 2 fabricantes. Enquanto o Fabricante A atingiu uma THDi de 160%, os Fabricantes B e C atingiram valores significativamente inferiores, de 21% e 19%, respectivamente.

4.2.3 Comparação por Ordem Harmônica

Visando melhor compreender a contribuição que cada ordem harmônica traz para compor o THDi, foi construído um gráfico contendo no eixo horizontal todas as lâmpadas estudadas e no eixo vertical o índice de distorção harmônica de corrente individual (IHD) para a terceira, quinta e sétima ordens harmônicas, as componentes com valores mais significativos dentre os dados levantados. Este gráfico é representado na Figura 4.26.

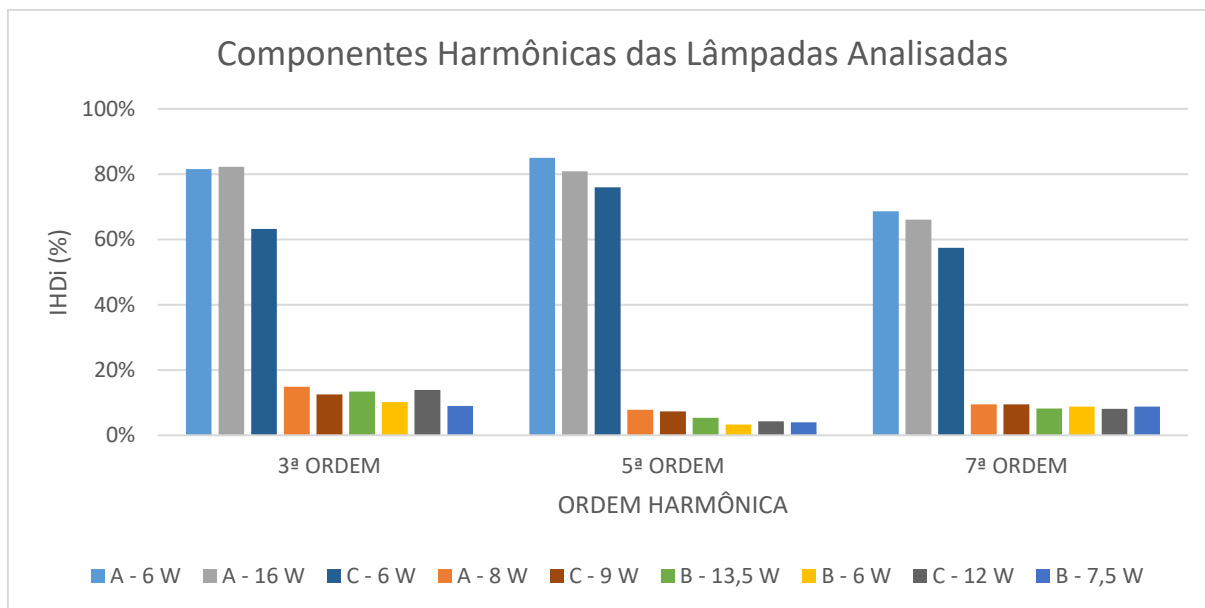


Figura 4.26 – Comparação de IHDi entre as lâmpadas analisadas

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Como já esperado, a terceira e quinta ordem harmônica trazem grande contribuição para o índice de distorção harmônica total das lâmpadas, seus valores médios são de 33% e 30%, respectivamente. Sendo que, em apenas duas lâmpadas a 3ª ordem não é superior a 5ª, nas duas lâmpadas de 6 W dos Fabricantes A e C. A sétima ordem possui média de 27%, também tendo influência significativa no valor total de THDi. Diante dos dados analisados, constatou-se que tais ordens são de grande contribuição no que diz respeito ao valor de THDi. As harmônicas a partir da 9ª ordem possuem participação variável de acordo com a característica da lâmpada e serão apresentadas com mais detalhes na seção 5.1.

Nos próximos passos, foram elaborados gráficos individuais para a terceira, quinta e sétima ordem harmônica, onde é possível melhor observar o comportamento individual de cada ordem.

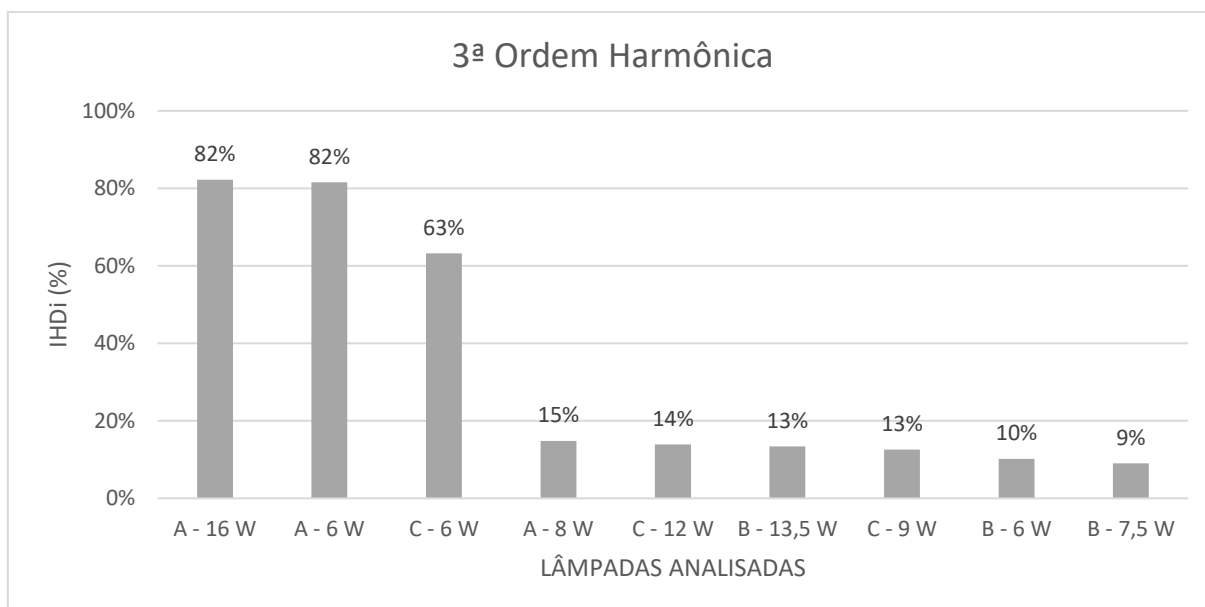


Figura 4.27 – Comparação de IHDi para a terceira ordem harmônica entre as lâmpadas analisadas

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

A partir do apresentado na Figura 4.27, o valor médio da terceira harmônica é de 60%, 11% e 30% para os Fabricantes A, B e C, respectivamente. Pelo gráfico é possível observar que as lâmpadas de 6 W dos Fabricantes A e C e a lâmpada de 16 W do Fabricante A possuem índice individual de distorção harmônica para a terceira ordem superior a 60%, e estas são as mesmas lâmpadas que possuem os maiores THDi dentre todas as analisadas, acima de 160%. As demais lâmpadas possuem IHDi de terceira ordem inferior a 15%, sendo que a lâmpada com menor valor de IHDi é a de 7,5 W do Fabricante B (9%), justamente a lâmpada com menor valor de THDi (18%).

Já quando os dados são agrupados por potências: as lâmpadas de 6 W possuem IHDi médio de terceira ordem de 52%, as lâmpadas de 7,5 a 9 W de 12% e as lâmpadas de 12 a 16 W de 37%.

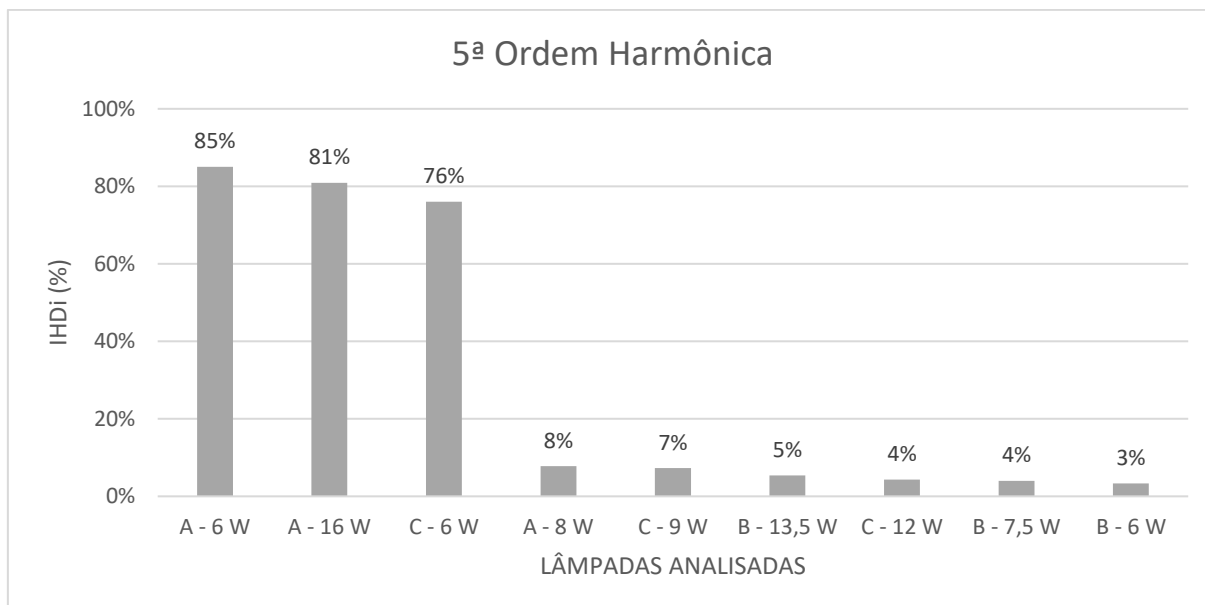


Figura 4.28 – Comparação de IHDi para a quinta ordem harmônica entre as lâmpadas analisadas

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Para a quinta ordem harmônica, o gráfico da Figura 4.28 mostra que as lâmpadas que tiveram os maiores valores de IHDi na terceira ordem, são as mesmas com os maiores valores na quinta ordem. Observa-se, que as lâmpadas de 6 W dos Fabricantes A e C tiveram seu valor de IHDi de quinta ordem (85% e 76%) maiores em 3 e 13 pontos percentuais do que os de terceira ordem, respectivamente. Os valores médios de IHDi dos Fabricantes A, B e C foram, respectivamente, de 58%, 4% e 29%, onde pode-se observar uma redução do IHD da terceira ordem para a quinta ordem em todas as fabricantes em relação à média.

Agrupando as lâmpadas por faixas de potência: as lâmpadas de 6 W possuem IHDi médio de quinta ordem de 55%, as lâmpadas de 7,5 a 9 W de 6% e as lâmpadas de 12 a 16 W de 30%, valores inferiores aos da terceira ordem.

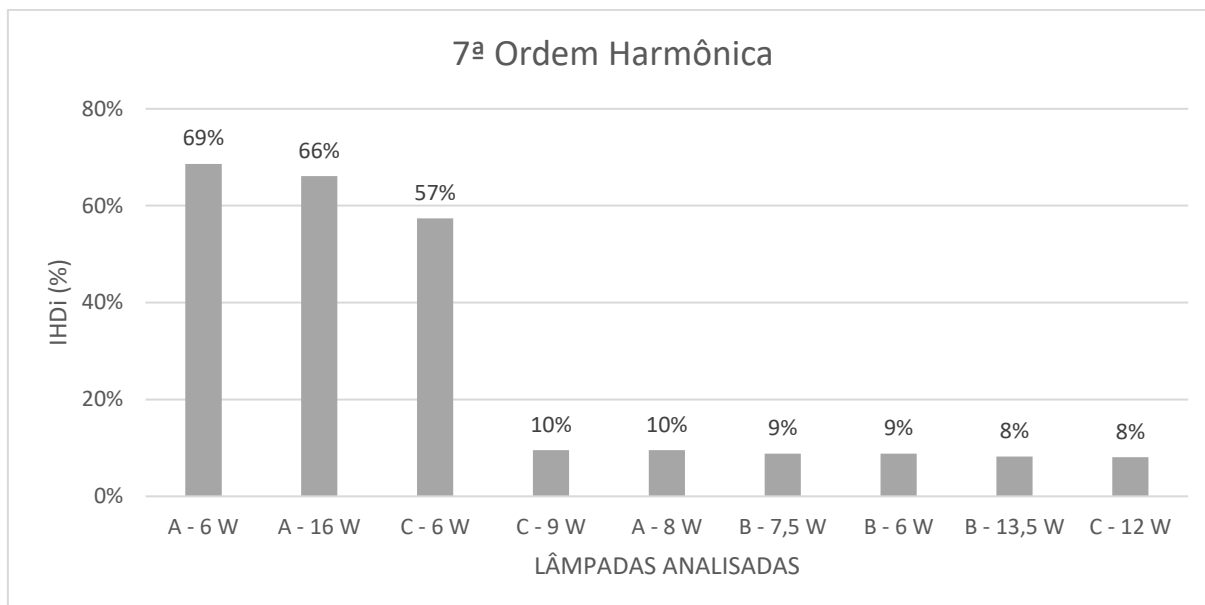


Figura 4.29 – Comparação de IHDi para a sétima ordem harmônica entre as lâmpadas analisadas

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

Por fim, analisando os dados da sétima ordem harmônica, apresentados na Figura 4.29, constata-se que com exceção das lâmpadas de 6 W dos Fabricantes A e C e da lâmpada de 16 W do Fabricante A, cujos valores de IHDi são superiores a 50%, as demais lâmpadas possuem IHDi de no máximo 10%; entretanto para tais lâmpadas seus valores de IHDi da 7ª ordem são superiores aos da 5ª ordem. Por outro lado, as lâmpadas com os 3 maiores IHDi obtiveram uma redução de em média 17 pontos da 5ª para a 7ª ordem. A média do índice individual de distorção de corrente para os fabricantes A, B e C é respectivamente 48%, 9% e 25%.

Agrupando as lâmpadas por faixas de potência: as lâmpadas de 6 W possuem IHDi médio de sétima ordem de 45%, as lâmpadas de 7,5 a 9 W de 9% e as lâmpadas de 12 a 16 W de 27%.

5 LIMITES DE CORRENTES HARMÔNICAS PARA EQUIPAMENTOS DE ILUMINAÇÃO

A Comissão Eletrotécnica Internacional (IEC), define, através da norma IEC 61000-3-2, limites de correntes harmônicas para equipamentos nos quais a corrente por fase é menor que 16 A e tensão de funcionamento igual a 230 V. Nesta norma os equipamentos são divididos em 4 categorias de limitação:

- 1) Classe A: equipamentos de alimentação trifásica, eletrônicos que não se enquadram na classe D, ferramentas não-portáteis, dimmers para lâmpadas incandescentes, equipamentos de áudio e quaisquer equipamentos que não se enquadrem nas outras classes;
- 2) Classe B: equipamentos portáteis e de soldagem a arco;
- 3) Classe C: equipamentos para iluminação;
- 4) Classe D: computadores, monitores, rádios, e receptores de televisão com potência de entrada inferior a 600 W.

A Tabela 5.1 mostrada abaixo contém as limitações de corrente harmônica para a classe C, onde se enquadram as lâmpadas LED, lâmpadas fluorescentes e lâmpadas incandescentes com potência acima de 25 W.

Tabela 5.1 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos Classe C conforme Norma IEC 61000-3-2

Ordem harmônica	Máxima corrente (%) *
2	2
3	30% x FP
5	10
7	7
9	5
11 < n < 39	3

Notas:

* Em relação a corrente fundamental.

Fonte: DUNGAN et al. (2003).

Para os equipamentos da Classe C com potência igual ou inferior a 25 W é utilizada a Tabela 5.2 (EUROPEAN..., 2010, p. 6).

Tabela 5.2 – Limites de correntes harmônicas para equipamentos Classe D conforme Norma IEC 61000-3-2

Ordem harmônica	Máxima corrente harmônica permissível (mA/W)
3	3,4
5	1,9
7	1,0
9	0,5
11	0,35
11 < n < 39 (apenas ímpares)	3,85 / n

Fonte: EUROPEAN... (2010, p. 7).

Equipamentos que se enquadram nas Classes A, B e D não serão abordados neste trabalho, portanto torna-se irrelevante aprofundar-se em suas limitações.

Atualmente, também existe a portaria nº 389 do INMETRO (2014) que aborda os limites de fator de potência e de correntes harmônicas de lâmpadas LED. Para lâmpadas com potência nominal superior a 25 W os limites são os mesmos da norma IEC 61000-3-2 e já foram mostrados na Tabela 5.1. Para potências entre 5 e 25 W, a única exigência é que o fator de potência seja igual ou superior a 0,70.

5.1 COMPARAÇÃO COM A NORMA IEC 61000-3-2

A Tabela 5.2 contém as limitações de corrente harmônica para a equipamentos da classe D, onde também se enquadram as lâmpadas LED com potência inferior a 25 W. A comparação será realizada apenas com a norma IEC 61000-3-2, uma vez que a portaria nº 389 do INMETRO, restringe apenas lâmpadas LED tubulares com potência acima de 25W.

Visando facilitar a comparação dos dados obtidos com a norma internacional, para cada lâmpada será apresentada uma tabela com os valores de corrente para cada componente harmônica bem como o limite dado pela Tabela 5.2. Os valores acima dos estipulados pela norma serão destacados em negrito nestas tabelas.

5.1.1 Lâmpada de 6 W do Fabricante A

A lâmpada de 6 W do Fabricante A não atende a nenhum critério de limitação de corrente. As 3ª, 5ª e 7ª ordens apresentam valores de corrente 13,8%, 111% e 224% superiores ao limite da norma, respectivamente. As demais ordens também estão acima do estipulado, com destaque para a 11ª ordem, que percentualmente apresenta o valor mais divergente da norma, 454% acima do máximo permitido. Esses dados podem ser verificados na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Lâmpada de 6 W do Fabricante A: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	28,3459	-
3	23,1108	20,4000
5	24,0935	11,4000
7	19,4493	6,0000
9	14,1080	3,0000
11	11,6267	2,1000
13	6,8341	1,7769
15	4,3953	1,5400
17	3,9382	1,3588
19	3,4653	1,2158
21	3,2630	1,1000
23	3,4077	1,0043
25	2,2549	0,9240
27	1,5325	0,8556
29	1,6671	0,7966
31	1,4609	0,7452
33	1,6029	0,7000
35	1,4224	0,6600
37	1,0924	0,6243
39	0,4442	0,5923

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.1.2 Lâmpada de 8 W do Fabricante A

A lâmpada de 8W do Fabricante B atende a norma em todos os quesitos de limitação de corrente harmônica. A terceira ordem, por exemplo, possui corrente harmônica de 6.71 mA quando a limitação é de 27,2 mA, ou seja, o valor obtido é aproximadamente quatro vezes inferior ao seu limite. A 7ª ordem harmônica apresenta valor superior a 5ª ordem em 22,2%. Esses dados podem ser verificados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 – Lâmpada de 8 W do Fabricante A: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	45,1833	-
3	6,7092	27.2000
5	3,5139	15.2000
7	4,2948	8.0000
9	1,7211	4.0000
11	0,8207	2.8000
13	0,3426	2.3692
15	0,8367	2.0533
17	0,8645	1.8118
19	0,8088	1.6211
21	0,8008	1.4667
23	0,7610	1.3391
25	0,1434	1.2320
27	0,2430	1.1407
29	0,3586	1.0621
31	0,1673	0.9935
33	0,0040	0.9333
35	0,1116	0.8800
37	0,6215	0.8324
39	0,1394	0.7897

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.1.3 Lâmpada de 16 W do Fabricante A

A lâmpada de 16 W do Fabricante A não atende a nenhum critério de limitação de corrente. As 3ª e 5ª ordens apresentam um valor de corrente 13,8% e 100% superior ao limite da norma, respectivamente. As demais ordens também estão acima do estipulado, com destaque para a 11ª ordem, que percentualmente apresenta o valor mais divergente da norma, 500% acima do máximo. Esses dados podem ser verificados na Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Lâmpada de 16 W do Fabricante A: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	75,2789	-
3	61,9124	54.4000
5	60,9084	30.4000
7	49,7490	16.0000
9	37,6534	8.0000
11	28,1633	5.6000
13	19,0120	4.7385
15	13,2510	4.1067
17	10,5697	3.6235
19	9,8924	3.2421
21	9,3506	2.9333
23	8,9562	2.6783
25	6,6653	2.4640
27	5,5378	2.2815
29	4,3227	2.1241
31	3,8008	1.9871
33	3,7610	1.8667
35	3,5697	1.7600
37	2,8088	1.6649
39	1,7928	1.5795

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.1.4 Lâmpada de 6 W do Fabricante B

Para o Fabricante B, a lâmpada de 6W atende a norma em todos os quesitos de limitação. A terceira ordem harmônica possui amplitude de corrente de apenas 2,7450 mA, sendo que a corrente máxima permitida é de 20,4 mA. A quinta ordem harmônica possui amplitude de corrente inferior a sétima ordem em 166%, sendo a sétima ordem harmônica inferior a terceira em apenas 15%. A partir da 11ª ordem a corrente atinge valores inferiores a 1 mA. Esses dados podem ser verificados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 – Lâmpada de 6 W do Fabricante B: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	27,0159	-
3	2,7450	20,4000
5	0,8924	11,4000
7	2,3745	6,0000
9	1,3307	3,0000
11	0,3466	2,1000
13	0,0279	1,7769
15	0,0319	1,5400
17	0,3347	1,3588
19	0,6454	1,2158
21	0,4422	1,1000
23	0,1713	1,0043
25	0,0478	0,9240
27	0,0279	0,8556
29	0,2072	0,7966
31	0,1116	0,7452
33	0,0757	0,7000
35	0,0080	0,6600
37	0,0438	0,6243
39	0,0120	0,5923

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.1.5 Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B

A lâmpada de 7,5W do Fabricante B atende a norma completamente. A 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica apresentam corrente de distorção harmônica de 3,5418 mA, 1,5697 mA e 3,4502 mA, sendo que seus limites são aproximadamente sete, nove e três vezes superior a estes valores. A 7ª e 9ª ordem harmônica apresentam valores superiores a 5ª ordem, em 119% e 14,2%, respectivamente. A ordem mais próxima de seu valor máximo estipulado na IEC é a 9ª, entretanto seu valor de corrente não chega a atingir nem metade do valor estipulado. Esses dados podem ser verificados na Tabela 5.7.

Tabela 5.7 – Lâmpada de 7,5 W do Fabricante B: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	39,2311	-
3	3,5418	25.5000
5	1,5697	14.2500
7	3,4502	7.5000
9	1,7928	3.7500
11	0,5299	2.6250
13	0,0040	2.2212
15	0,2709	1.9250
17	0,7171	1.6985
19	0,8367	1.5197
21	0,0637	1.3750
23	0,0040	1.2554
25	0,3865	1.1550
27	0,2151	1.0694
29	0,2629	0.9957
31	0,0120	0.9315
33	0,0279	0.8750
35	0,0159	0.8250
37	0,0080	0.7804
39	0,0000	0.7404

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.1.6 Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B

A lâmpada de 13,5 W do Fabricante B também atende completamente aos limites da norma. As suas correntes de 3ª e 5ª ordem apresentam valores aproximadamente 5 e 7 vezes inferiores ao estipulado na IEC, respectivamente. A sétima ordem possui valor superior a quinta ordem em 52,1%. Esses dados podem ser verificados na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Lâmpada de 13,5 W do Fabricante B: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	65,0199	-
3	8,7012	45.9000
5	3,5179	25.6500
7	5,3506	13.5000
9	3,4223	6.7500
11	1,8088	4.7250
13	0,8845	3.9981
15	0,8765	3.4650
17	0,8446	3.0574
19	0,9761	2.7355
21	0,8367	2.4750
23	0,5896	2.2598
25	0,8127	2.0790
27	0,4104	1.9250
29	0,6175	1.7922
31	0,3904	1.6766
33	0,3426	1.5750
35	0,0398	1.4850
37	0,6813	1.4047
39	0,0279	1.3327

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.1.7 Lâmpada de 6 W do Fabricante C

Para a lâmpada de 6 W do Fabricante C todas as ordens harmônicas englobadas no estudo estão acima dos máximos estipulados pela norma IEC 61000-3-2. A 3ª, 5ª e 7ª ordem harmônica estão 15%, 147% e 254% além dos limites, respectivamente. A 5ª é 20,1% superior a 3ª ordem. A 11ª ordem é aquela com a maior divergência percentual do máximo estipulado, estando 565% acima dos 2,1 mA previstos em norma. Esses dados podem ser verificados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Lâmpada de 6 W do Fabricante C: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	37,0000	-
3	23,4064	20,4000
5	28,1155	11,4000
7	21,2390	6,0000
9	16,9482	3,0000
11	13,9681	2,1000
13	10,6773	1,7769
15	7,7211	1,5400
17	6,5936	1,3588
19	6,0757	1,2158
21	5,4900	1,1000
23	5,2271	1,0043
25	4,7251	0,9240
27	4,5339	0,8556
29	3,6574	0,7966
31	3,3466	0,7452
33	2,9920	0,7000
35	2,4422	0,6600
37	1,9960	0,6243
39	1,2948	0,5923

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.1.8 Lâmpada de 9 W do Fabricante C

A Tabela 5.10 apresenta os valores da lâmpada de 9 W do Fabricante C, evidenciando que esta atende aos limites estabelecidos em norma. Todos os valores de corrente estão pelo menos 50% abaixo dos valores máximos, sendo que a terceira ordem tem valor de apenas 5,8446 mA, valor aproximadamente cinco vezes inferior ao limite de 30,6 mA. Novamente, a sétima ordem é superior à quinta ordem, em 30,6%.

Tabela 5.10 – Lâmpada de 9 W do Fabricante C: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	46,5618	-
3	5,8446	30.6000
5	3,3904	17.1000
7	4,4263	9.0000
9	1,9721	4.5000
11	0,9363	3.1500
13	0,8964	2.6654
15	0,8486	2.3100
17	0,7410	2.0382
19	0,5259	1.8237
21	0,4900	1.6500
23	0,6733	1.5065
25	0,4940	1.3860
27	0,0916	1.2833
29	0,0080	1.1948
31	0,1633	1.1177
33	0,0837	1.0500
35	0,2669	0.9900
37	0,0000	0.9365
39	0,0359	0.8885

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.1.9 Lâmpada de 12 W do Fabricante C

A lâmpada de 12 W do Fabricante C, também atende a todos os requisitos de limitação de correntes harmônicas estabelecidos na IEC 61000-3-2. Sendo que a 3ª e 5ª ordem atingiram valores aproximadamente cinco e sete vezes inferiores aos máximos. Neste caso, a 7ª e 9ª ordem possuem valores superiores a 5ª ordem, em 87,5% e 24%, respectivamente. Esses dados podem ser verificados na Tabela 5.11.

Tabela 5.11 – Lâmpada de 12 W do Fabricante C: componentes harmônicas

Ordem Harmônica	Corrente (mA)	Máxima corrente permitida (mA)
1	56,8725	-
3	7,9044	40.8000
5	2,4542	17.1000
7	4,6016	9.0000
9	3,0438	4.5000
11	2,0120	3.1500
13	1,0159	2.6654
15	1,0040	2.3100
17	1,0000	2.0382
19	0,9920	1.8237
21	0,6773	1.6500
23	0,4064	1.5065
25	0,8008	1.3860
27	0,3426	1.2833
29	0,4940	1.1948
31	0,1474	1.1177
33	0,0239	1.0500
35	0,0000	0.9900
37	0,0837	0.9365
39	0,0359	0.8885

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

5.2 CONCLUSÃO DAS MEDIÇÕES

Quando se analisam os dados de THDi para tensão de 127 e 220 V, é possível observar que para sete dentre as nove lâmpadas analisadas, o valor do índice de distorção harmônica total aumentou em média 33,8% com tensão de alimentação de 220 V, quando comparado com os valores de THDi com tensão em 127 V. Acredita-se que esse resultado ocorre devido a influência que a tensão tem sob a velocidade de carga dos capacitores, elementos indispensáveis em circuitos retificadores. Assim, pode-se afirmar que, em geral, as lâmpadas estudadas têm maior contribuição harmônica na rede elétrica quanto maior a tensão de alimentação aplicada.

Em relação ao desempenho de THDi, as lâmpadas ficaram divididas em duas categorias: THDi alto, igual ou superior a 160%, e THDi baixo, igual ou inferior a 25%. As lâmpadas de 6 W dos Fabricantes A e C e 16 W do Fabricante A, classificadas como THDi alto, atingiram valores de 162%, 160% e 172%, respectivamente, e também estão em desconformidade com as limitações da norma IEC 61000-3-2. Em contrapartida, as demais lâmpadas, classificadas na categoria de baixo THDi, apresentaram valores entre 25% e 18% e atendem todos os quesitos de limitação de corrente harmônica por ordem.

A partir da comparação entre as formas de onda e histogramas obtidas através das simulações apresentadas na seção 3.2 e os dados apresentados na seção 4.1, chegou-se a suposição de que as lâmpadas de 8 W do Fabricante A, de 6 W, 7,5 W e 13,5 W do Fabricante B e de 9 W e 12 W do Fabricante utilizam uma filtragem do tipo valley-fill ou semelhante. A forma de onda com característica do filtro é encontrada nas lâmpadas citadas acima, além de que o valor médio de fator de potência para tais lâmpadas é de 0,96, característica esperada, uma vez que o filtro valley-fill é um filtro passivo utilizado também para correção de fator de potência. Outro fator a ser considerado é que, dentre as opções simuladas, foi constatado que o filtro valley-fill obteve o melhor resultado dentre os filtros levantados, apresentando um THDi na faixa de 20%, próximo ao valor encontrado para essas lâmpadas.

Para as lâmpadas de 6 W do Fabricante A e C e lâmpada de 16 W do Fabricante A, constatou-se que não ocorre utilização de filtro, de acordo com dados adquiridos. As lâmpadas apresentam forma de onda com característica de picos,

especificação encontrada nas simulações de circuito sem filtro, apenas com capacitor de suavização de onda. Outra característica foi a proximidade entre o valor da corrente fundamental e da corrente harmônica de 3ª ordem, atingindo a média de 76% de THDi. Apesar da 3ª ordem ser inferior à 5ª nas lâmpadas de 6 W dos Fabricantes A e C, devido as características analisadas acima e do alto valor de TDHi, não foi considerada a utilização de filtro passivo de anulação da 3ª ordem harmônica.

Utilizando como critério os valores médios de THDi obtidos e a comparação com a norma, o Fabricante B obteve o melhor resultado. Seu valor médio de THDi é de 20% e também foi o único fabricante em que as três lâmpadas analisadas estão de acordo com os parâmetros de corrente harmônica delimitados em norma. O fabricante também possui alto fator de potência, média de 0,94. Por outro lado, o Fabricante A obteve o pior resultado no quesito de concordância com a norma, dentre as três lâmpadas estudadas, duas destas não seguem os limites de corrente harmônica máxima. O Fabricante C, obteve um resultado mediano, com média de THDi de 71% e duas lâmpadas dentre três dentro dos requisitos de IHDi máximos. Por fim, 6 dentre as 9 lâmpadas estudadas atenderam aos limites dados pela norma IEC 61000-3-2.

Analisando o desempenho dentre as faixas de potência das 9 lâmpadas, pode-se concluir que as lâmpadas de 6 W apresentam baixo desempenho médio, uma vez que a média da categoria é de THDi é 118%, entretanto tal análise é enganosa, uma vez que dentro dessa categoria há uma lâmpada de 6 W com apenas 20% de THDi, enquanto as outras duas apresentam valores acima de 160%. Em contrapartida, a faixa de potência entre 7,5 a 9 W apresenta valor médio de 20% de THDi, sem grande variação dentre os fabricantes, mostrando um comportamento uniforme desta faixa de potência. Por fim, para as lâmpadas de maior potência (12 a 16 W) a média de THDi é de 67%, entretanto novamente temos uma lâmpada com alto índice de distorção (160%) que camufla o desempenho da categoria, uma vez que o THDi das outras duas lâmpadas é de 21% e 19%, respectivamente. Portanto, conclui-se que apesar da faixa intermediária ter obtido melhor resultados, devido a discrepância de valores, a análise entre potências não é válida, uma vez que os valores de THDi obtidos não parecem apresentar correlação com a potência das lâmpadas analisadas.

Com relação ao IHDi de cada ordem, observou-se que em média 56% do valor total do THDi é originário dos valores de corrente harmônica da 3ª, 5ª e 7ª ordem. Os maiores valores de IHDi para tais ordens estão nas lâmpadas de 6 W dos Fabricantes

A e C na lâmpada de 16 W do Fabricante A, onde o valor médio das três ordens é de 75%, contra média de 6% de IHDi das outras lâmpadas.

A Tabela 5.12 exemplifica as conclusões abordadas acima:

Tabela 5.12 – Conclusão e resultados das medições.

Fabricante	Potência	THDi 220 V (%)	THDi 127 V (%)	Atende a IEC 6100-3-2?	Possível filtro utilizado
A	6 W	162,15	105,44	NÃO	Sem filtro
	8 W	24,67	24,60	SIM	Valley-fill
	16 W	160,14	97,39	NÃO	Sem filtro
B	6 W	20,14	16,91	SIM	Valley-fill
	7,5 W	18,30	21,75	SIM	Valley-fill
	13,5 W	21,31	16,36	SIM	Valley-fill
C	6 W	171,70	110,28	NÃO	Sem filtro
	9 W	22,99	26,85	SIM	Valley-fill
	12 W	19,43	17,19	SIM	Valley-fill

Fonte: Elaborada pelo autor (2017).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo comparar as lâmpadas LED de uso mais comum em residências brasileiras à normas e regulamentações quanto aos limites de distorção harmônica de corrente que estas lâmpadas podem injetar no sistema elétrico nacional.

Após as comparações e considerações, foi possível observar que, apesar de não existir no Brasil nenhuma regulamentação quanto à essas distorções para os equipamentos analisados, uma quantia considerável das lâmpadas analisadas está de acordo com os padrões internacionais.

Utilizando os conceitos de cargas não-lineares e dos mecanismos de geração dos harmônicos, chegou-se a um modelo genérico do circuito de uma lâmpada LED, que foi utilizado para simular os diferentes tipos de filtragem de componentes harmônicas disponíveis. Formas de onda e histogramas com as características de cada filtro foram adquiridos a partir da simulação do modelo.

Através das medições realizadas, foram obtidos os parâmetros gerais e também os dados de distorção harmônica das lâmpadas analisadas. Por fim, os dados foram comparados à norma IEC 61000-3-2 e pôde-se verificar efetivamente quais lâmpadas atenderam a norma.

Cabe ressaltar que não foi a intenção deste trabalho realizar um ensaio de certificação, visto que seria inviável obter uma amostra estatisticamente significativa, equipamentos de Classe A e ambiente com parâmetros elétricos dentro dos padrões estabelecidos. O objetivo foi apenas verificar, pontualmente, a situação atual das lâmpadas LED de uso residencial existentes e disponíveis ao consumidor.

Como a iluminação através de LED ainda é uma tecnologia em crescimento no setor residencial, espera-se que no futuro uma regulamentação brasileira que englobe estes produtos entre em vigor. Uma vez determinadas os requisitos mínimos para assegurar a qualidade das lâmpadas LED no Brasil, a tendência é que uma parcela maior destas esteja de acordo com o estabelecido.

6.1 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Por fim, o presente trabalho abre portas para que futuramente seja realizado um estudo mais aprofundado da topologia das lâmpadas LED, visando comprovar as suposições de filtros utilizados em cada lâmpada e sua influência no THDi. Além disso, os resultados obtidos comprovam que nem todas as lâmpadas comercializadas no mercado brasileiro atendem a norma IEC 61000-3-2 nos quesitos de limitação de corrente harmônica. Isso mostra que a Portaria nº 389 do INMETRO, que restringe as limitações harmônicas apenas a lâmpadas LED tubulares acima de 25W, poderia passar a explorar o mercado das lâmpadas do tipo bulbo de baixa potência.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/Módulo8_Revisão_7.pdf>. Acesso em: 23 de nov. 2016.

ARRILLAGA, Jos; WATSON, Neville R. **Power System Harmonics**. 2nd. ed. West Sussex, Inglaterra: Wiley, 2003.

BULLOUGH, John D. **Lighting Answers: Light Emitting Diode Lighting Systems**, v. 7, n. 3, 2003, 47 p. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/NLPIP/lightinganswers/pdf/PRINT/LED.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

CARNOVALE et al. **Price and Performance Considerations for Harmonic Solutions**. Disponível em: <http://www.newark.com/pdfs/techarticles/eaton/Eaton_Technical_Articles/Power_Quality_White_Papers/Harmonic_Solutions.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2016.

DALLA COSTA, Marco A. et al. An Improved Arrangement of the Lamps in the Half-Bridge Topology. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 2001. EUA, Chicago. **Conference Record...** 2001. v. 1, p. 223-229.

DE LA ROSA, Francisco. **Harmonics and power systems**. Boca Raton, EUA: CRC Press, 2006.

DE LIZ, Muriel 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: 23 nov. 2016.

CORRÊA, Diogo S. **Methodology for Evaluating the Collective Harmonic Impact of Residential Loads in Modern Power Distribution Systems**. 2012. 190 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Campinas, 2012. Disponível em:

<<http://pct.capes.gov.br/teses/2012/33003017021P3/TES.PDF>>. Acesso em: 23 nov. 2016

DUNGAN, Roger C. et al. **Electrical Power Systems Quality**. 2nd. ed. McGraw Hill, 2003. 528 p.

EUROPEAN POWER SUPPLY MANUFACTURERS ASSOCIATION. **Harmonic Current Emissions**: Guidelines to the standard EN 61000-3-2. EPSMA, abr. 2010. Disponível em: <http://www.epsma.org/PFCver100406_b.pdf>. Acesso em: 06 jun. 2017.

FERREIRA, André R.; TOMIOKA, Jorge. Iluminação de estado sólido, economia potencial de energia elétrica para o país. In: VIII WORKSHOP DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DO CENTRO PAULA SOUZA, out. 2013, São Paulo. **Anais...** São Paulo, out. 2013. p. 313-323. Disponível em: <http://www.cps.sp.gov.br/pos-graduacao/workshop-de-pos-graduacao-e-pesquisa/008-workshop-2013/trabalhos/gestao_ambiental_e_ocupacional_para_desenvolvimento_sustentavel/121156_313_323_FINAL.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2016.

GAMA, Paulo H. R. P.; DE OLIVEIRA, Adilson. Conservação de Energia e sua relação com a qualidade de Energia Elétrica. In: SNPTEE – SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 15, 1999, Foz do Iguaçu. Disponível em: <<http://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2015/12/CONSERVAÇÃO-DE-ENERGIA-E-SUA-RELAÇÃO-COM-A-QUALIDADE-DA-ENERGIA-ELÉTRICA.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

GASSON-GARCÍA, Carlos F. et al. Simulation of simple capacitive-isolated LED drivers. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER ELECTRONICS (CIEP), 13, 2016, Mexico, Guanajuato. p. 116-120, 2016.

GE REPORTS BRASIL. Quer saber quais são as tendências em iluminação? A GE Lighting conta para você!. ago. 2015. Disponível em: <<http://www.gereportsbrasil.com.br/post/126370005974>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

GRADY, W. Mack; GILLESKIE, Robert J. Harmonics and How they relate to Power Factor. In: EPRI POWER QUALITY ISSUES & OPPORTUNITIES CONFERENCE, 1993, EUA, San Diego. Disponível em: <<http://intranet.ctism.ufsm.br/gsec/Apostilas/fatordepotenciaethd.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

IAGAR, Angela et al. The influence of home nonlinear electric equipment operating modes on power quality. **WSEAS Transactions on Systems**, v. 13, p. 357-367, 2014. Disponível em: <www.wseas.org/multimedia/journals/systems/2014/c085702-389.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2016.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. Portaria nº 389, de 25 de agosto de 2014. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 27 ago. 2014. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC002154.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

LEÃO, Paulo C. A. et al. Conversores de Frequência VSI-PWM Submetidos a Afundamentos Temporários de Tensão ("Voltage Sags"). *Revista Controle & Automação*, v. 14, n. 1, p. 50-57, 2003. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ca/v14n1/a06v14n1.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Balanco Energético Nacional**, 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2016.

_____. Portaria Interministerial nº 1007, de 31 de dezembro de 2010. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 06 jan. 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1139097/Portaria_Interministerial_nx_10_07_2010.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2016.

OWEN, Edward L. A History of Harmonics in Power Systems. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 4, n. 1, p. 6-12, jan.-fev. 1998.

POMILIO, José A.; DECKMANN, Sigmar M. Characterization and Compensation of Harmonics and Reactive Power of Residential and Commercial Load. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 2, p. 1049-1055, abr. 2007.

_____. **Harmônicos e Fator de Potência**: um Curso de Extensão. Unicamp, mai. 1997. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/harmo.html>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

RATA, Gabriela; RATA, Mihai. The study of harmonics from dimmable LED lamps, using CompactRIO. In: 2016 INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEVELOPMENT AND APPLICATION SYSTEMS (DAS), abr. 2016, Romania, Suceava. p. 180-183, jun. 2016.

SALLAM, Abdelhay A.; MALIK, Om P. **Harmonics in Electric Distribution Systems**. 1st. ed. Wiley-IEEE Press, 2011.

SHABBIR, Hassan et al. Assessment of harmonic pollution by LED lamps in power systems. In: CLEMSON UNIVERSITY POWER SYSTEMS CONFERENCE, 2014, EUA, Clemson. 2014.

SCHNEIDER ELECTRIC. **Programa de Formação Técnica Continuada: Compatibilidade eletromagnética**. Disponível em: <https://www.schneider-electric.com.br/documents/cadernos-tecnicos/tema10_compatibilidade.pdf>. Acesso em: 23 nov. 2016.

SUÁREZ, Juan A. et al. Análisis de la distorsión armónica y los efectos de atenuación y diversidad en áreas residenciales. **Revista IEEE América Latina**, v. 3, n. 5, p. 53-59, dez. 2005.

TEXAS INSTRUMENTS. **LM3445 TRIAC Dimmable Offline LED Driver**. EUA, Dallas, jan. 2009. 42 p. Disponível em: <<http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3445.pdf>>. Acesso em: 23 nov. 2016.

TOLBERT, Leon M. et al. Survey of harmonics measurements in electrical distribution systems. In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE, 1996. EUA. Conference Record... 1996. p. 2333-2339.

UDDIN, Sahel et al. An Analysis of Harmonic Diversity Factors Applied to LED Lamps. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER SYSTEM TECHNOLOGY (POWERCON), 2012, New Zealand, Auckland.