

SUBMETIDO 25/01/2022

APROVADO 09/05/2022

PUBLICADO ON-LINE 17/05/2022

PUBLICADO 10/10/2023


EDITOR ASSOCIADO

Ademar Gonçalves da Costa Junior


DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id6612>

ARTIGO ORIGINAL

Lâmpadas LED e distorção harmônica: uma amostra do mercado brasileiro

 Bruno Vinicius Silveira Araujo ^[1] *

 Gustavo Aragão Rodrigues ^[2]

 Reginaldo Barnabé Gonzalez Grimaldi ^[3]

 Talita Santos Alves Chagas ^[4]

 Tarso Vilela Ferreira ^[5]

[1] bruno.vinicius.silveira.araujo@gmail.com

[2] gustavo.aragao.rodrigues@gmail.com

[5] tarso@academico.ufs.br

Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal de Sergipe (UFS), Brasil

[3] reginaldogrimaldi@gmail.com

Departamento de Engenharia Elétrica,
Universidade Federal da Bahia (UFBA), Brasil

[4] alves.talita0@gmail.com

Departamento de Engenharia de Processos,
Universidade Tiradentes (UNIT), Brasil

RESUMO: As lâmpadas baseadas em LED tornaram-se alternativas viáveis para a substituição de outros sistemas de iluminação, como aqueles baseados em lâmpadas fluorescentes. Entretanto, em contraste às vantagens proporcionadas pela aplicabilidade dos LED (longa vida útil, alta eficiência, baixo consumo de energia, entre outras), há desvantagens inerentes a essa tecnologia, como a injeção de harmônicos no sistema elétrico devido aos conversores utilizados. Neste artigo é apresentado um estudo acerca da presença de harmônicos na corrente de lâmpadas LED comercializadas no Brasil, frente ao estabelecido na Portaria Inmetro nº 389/2014 e na norma IEC 61000-3-2. Para tanto, é realizada uma avaliação da distorção harmônica total injetada pelas lâmpadas ensaiadas. Foram considerados oito tipos de potências nominais diferentes, fornecidos por três fabricantes presentes no mercado nacional. Além disso, foi mensurado o fator de potência dos tipos ensaiados. Foi constatado que 46,15% dos tipos de lâmpadas com potência inferior a 25 W, faixa de potência não regulamentada nacionalmente, estavam em desacordo com os níveis harmônicos estabelecidos na IEC 61000-3-2, o que aponta para a necessidade de revisão da normatização nacional.

Palavras-chave: distorção harmônica; fator de potência; lâmpadas LED; qualidade da energia.

Led lamps and harmonic distortion: a sample of the Brazilian market

ABSTRACT: LED-based lamps have become viable alternatives for replacing other lighting systems, like those based on fluorescent lamps. However, unlike the advantages provided by the applicability of LEDs (long service life, high efficiency, low energy consumption, and others) there are inherent disadvantages to this technology, for example, harmonic injection into electrical system due the converters used. This article presents the findings of a study based on the presence of harmonics in the electric current of LED lamps sold in Brazil, compared to what is established in Inmetro Decree No. 389/2014 and in the IEC 61000-3-2 standard. Therefore, an evaluation of the total harmonic distortion injected by the tested lamps is carried out. Eight types of different

*Autor para correspondência.

nominal powers were considered, supplied by three manufacturers found on domestic market. In addition, the power factor was measured. It was found out that 46.15% of lamps with power lower than 25 W, power range not nationally standardized, were in disagreement with the harmonic levels established in IEC 61000-3-2, which points to the need to review national standardization.

Keywords: harmonic distortion; LED lamps; power factor; power quality.

1 Introdução

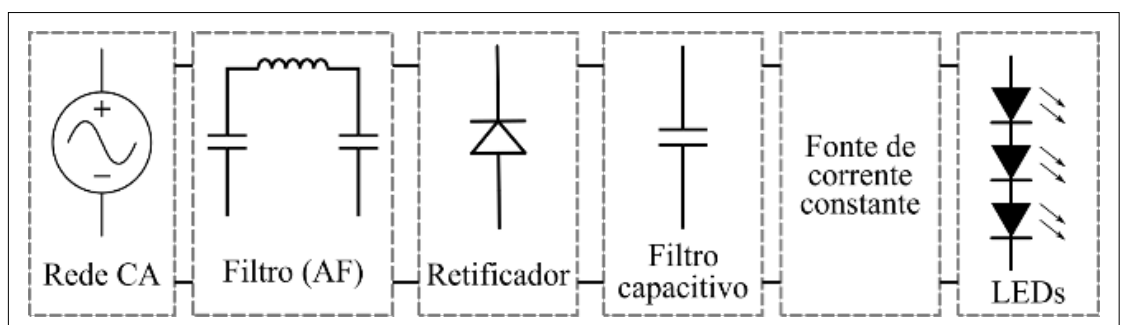
A luz elétrica artificial é uma das maiores conquistas tecnológicas da modernidade, tendo impactado positivamente a sociedade de forma inquestionável, modificando os hábitos e estilo de vida das pessoas. Tais mudanças iniciaram-se em meados de 1880, quando começou a substituição gradativa das velas e lamparinas pela luz elétrica, graças a Thomas Edison e ao advento da lâmpada incandescente (EDISON, 1880). Posteriormente, em 1938, a empresa General Electric introduziu as lâmpadas fluorescentes, mais eficientes, econômicas e com luminosidade superior às inventadas por Edison, sendo assim mais atrativas para o consumidor (FRIEDRICH; HANS-JOACHIM; EDMUND, 1939).

Por volta dos anos de 1990, disponibilizaram-se dispositivos de alta eficiência, baseados em diodos emissores de luz (LED, do inglês *light-emitting diode*). Esses dispositivos cobriam todo o espectro visível e consequentemente possibilitaram a geração de luz branca por LED (CHO *et al.*, 2017). Além do consumo energético baixo, a tecnologia LED também tem como vantagens a alta durabilidade, segurança, sustentabilidade, economia e flexibilidade de aplicações (GU *et al.*, 2009).

O avanço tecnológico propiciou um aumento da vida útil do LED, permitindo uma redução na necessidade de manutenção. Além disso, proporcionou uma qualidade de iluminação superior, como também uma eficiência até 80% maior que a das outras lâmpadas presentes no mercado (MAXWELL, 2016). Ainda de acordo com Maxwell (2016), é esperado que as remessas de unidades de lâmpadas LED alcancem 2.592.468 em 2024. Sendo assim, é provável que o LED supere numericamente as demais formas de iluminação artificial de uso geral.

Figura 1 ▼
Circuito de alimentação de um sistema de iluminação a LED.
Fonte: adaptada de Uddin *et al.* (2012)

Existem diversas topologias de circuitos que constituem as lâmpadas LED. Na Figura 1 observa-se um diagrama esquemático, representando uma dessas topologias, constituído pelos seguintes blocos: rede de energia elétrica; filtro que bloqueia os ruídos de altas frequências; retificador com capacitor de filtragem; fonte de corrente constante que é produzida por um conversor CC/CC controlado por modulação de largura de pulso (do inglês *Pulse Width Modulation*, PWM); e um conjunto de LEDs (UDDIN *et al.*, 2012).



As lâmpadas LED, no quesito de eficiência energética, mostram-se muito superiores se comparadas às lâmpadas incandescentes e fluorescentes que ainda são utilizadas nos âmbitos residenciais, comerciais e industriais. Contudo, seus impactos relativamente à qualidade da energia elétrica (QEE) podem ser significativos, devido ao aparecimento de distorções harmônicas (DH) advindas das características não lineares dos componentes existentes nos conversores incorporados na construção dos circuitos. O volume de injeção de harmônicos por aparelhos residenciais é relativamente pequeno, se comparado ao volume injetado por outras fontes, como equipamentos industriais, por exemplo. Quantitativamente, no entanto, as cargas residenciais também existem em grande número, assim, o efeito coletivo das cargas residenciais faz com que elas sejam significativas (COSTA, 2005).

De acordo com Torres *et al.* (2009) e Muthu, Schuurmans e Pashley (2002b), os principais problemas causados pela presença de distorção harmônica total (DHT) são: queima, sobrecargas, vibrações e envelhecimento prematuro de geradores, transformadores, motores e capacitores de equipamentos de correção do fator de potência; sobrecargas no sistema de distribuição devido ao aumento da corrente eficaz; sobrecarga no condutor neutro; distorção da tensão de alimentação capaz de perturbar cargas sensíveis, como equipamentos eletrônicos; perturbações nas redes de comunicação e linhas telefônicas; operação inadequada de relés, disjuntores, fusíveis. Além disso, é evidente que a QEE fornecida pelas concessionárias pode ser questionada em situações em que os níveis de DHT são elevados (TORRES *et al.*, 2009). Logo, o controle do nível da DHT é vantajoso e desejável tanto para as concessionárias quanto para os seus clientes.

Diante do exposto e da relevância que as lâmpadas LED vêm adquirindo ao longo dos anos, vários estudos foram publicados tendo como objetivo a análise de tais lâmpadas sob diversos aspectos. Há diversas linhas de pesquisa relacionadas com lâmpadas LED, e, entre os diversos estudos, alguns se concentraram no desempenho de lâmpadas LED nos quesitos relacionados à distribuição de luz e reprodutibilidade de cores (KUMAR; KUMAR; KUMAR, 2020; MUTHU; SCHUURMANS; PASHLEY, 2002a, 2002b; REYES; GALLAGHER; SAMMARCO, 2013). Outros artigos propõem novas topologias de circuitos de alimentação dos LED, ou variações destes, buscando maior economia e/ou eficiência (ADRAGNA *et al.*, 2020; CHANG *et al.*, 2008; GU *et al.*, 2009; LAMAR *et al.*, 2009; LIU *et al.*, 2019; QU; WONG; TSE, 2010; VAN DER BROECK; SAUERLANDER; WENDT, 2007). Além dos trabalhos supracitados, várias pesquisas dedicam-se à avaliação do desempenho de lâmpadas LED relativamente ao grau de distorção da corrente (BLANCO; PARRA, 2010; ČUK *et al.*, 2010; DI MAURO *et al.*, 2016; IQBAL *et al.*, 2020; JARKOVOI; IQBAL; KÜTT, 2019; UDDIN *et al.*, 2011).

O cerne do presente trabalho está contido na linha de pesquisa que se propõe a avaliar o desempenho de lâmpadas LED relativamente ao grau de distorção da corrente. Nos parágrafos a seguir, são apresentadas referências importantes, publicadas nos últimos anos.

No trabalho exposto em Čuk *et al.* (2010), foi realizado um estudo experimental relativo ao impacto sobre o fator de diversidade decorrente da utilização em conjunto de lâmpadas fluorescentes compactas (CFL, do inglês *Compact Fluorescent Lamp*) com lâmpadas LED. Os fatores de diversidade foram calculados para diferentes configurações de lâmpadas conectadas a um alimentador radial de baixa tensão, além de terem sido realizadas medições das distorções harmônicas totais de corrente (DHT_i). Um total de 30 lâmpadas de sete tipos diferentes foi utilizado no experimento, sendo essas distribuídas uniformemente em cinco grupos com seis lâmpadas cada. A norma

aplicada para análise dos resultados apurados foi a IEC 61000-3-2 (IEC, 2014). A partir da análise dos resultados, constatou-se que uma associação de lâmpadas LED e lâmpadas fluorescentes compactas pode diminuir consideravelmente a quantidade de harmônicos de ordem superior. Por outro lado, os harmônicos de ordem mais baixa não apresentaram redução significativa.

Na pesquisa relatada em Blanco e Parra (2010), analisou-se o efeito nos níveis de distorção harmônica em sistemas de distribuição devido ao uso intensivo de lâmpadas fluorescentes compactas e lâmpadas LED. Nessa análise foram realizados ensaios em um grupo desses dois tipos de lâmpadas para caracterizar a emissão harmônica. Foram testadas diferentes combinações de 29 amostras de lâmpadas fluorescentes compactas e 43 amostras de lâmpadas LED de diferentes fabricantes. Foi possível constatar que o pior cenário é aquele em que apenas as lâmpadas LED foram usadas, enquanto a combinação que utilizou CFL e LED apresentou o melhor resultado. Ademais, foram realizadas simulações em dois sistemas de distribuição diferentes com base nos resultados obtidos nos ensaios realizados. De acordo com as simulações, o uso generalizado de LED e CFL aumentou a distorção de tensão nas redes de distribuição, mas esse efeito depende das características da rede e principalmente do equilíbrio do sistema e das conexões do transformador. De acordo com as simulações, em um circuito de distribuição balanceado, a substituição não causará sérias mudanças nos sinais de tensão. Entre as amostras consideradas, apenas uma tinha potência superior a 25 W. Essa amostra, cuja potência era de 42 W, apresentou a maior DHT_i , com o valor de 136,66%.

No estudo apresentado em Uddin *et al.* (2011) foi realizada uma análise detalhada acerca da emissão de harmônicas decorrente de lâmpadas LED usadas para iluminação doméstica, comercial e industrial. Para tanto, foram analisados os níveis de emissão harmônica de 12 amostras de 7 fabricantes, de potências distintas, todas inferiores a 25 W. A norma utilizada para respaldar o estudo foi a IEC 61000-3-2. Todas as lâmpadas testadas foram projetadas para operar em 240 V e com valores de potências nominais entre 3 W e 10 W. Os valores de DHT_i das lâmpadas variaram entre 30,94% e 174,38%.

No estudo realizado por Kumar, Kumar e Kumar (2019) foi realizada uma análise comparativa acerca das características harmônicas das lâmpadas LED brancas de luz quente e de luz fria. Foram analisadas sete lâmpadas LED, de um mesmo fabricante. As lâmpadas LED brancas quentes possuíam as seguintes potências: 4 W, 7 W, 9 W e 14 W; as lâmpadas brancas frias possuíam potências de 7 W, 9 W e 14 W. Avaliou-se a potência ativa de cada lâmpada, bem como a sua DHT_i , e, para avaliação dos níveis harmônicos, utilizou-se a IEC 61000-3-2. Salienta-se que as lâmpadas LED de 4 W e 7 W não possuem filtro harmônico, enquanto as de 9 W e 14 W o possuem. Além das lâmpadas LED, utilizou-se um analisador de qualidade de energia Fluke 434, uma pinça amperimétrica e um software Fluke para analisar os sinais captados. Ademais, cada lâmpada foi ligada por um mínimo de 10 minutos antes de as medições serem realizadas. Os valores de DHT_i das lâmpadas testadas variaram de 9,5% a 127,5%. A lâmpada LED quente de 4 W e a lâmpada LED fria de 7 W apresentaram as maiores DHT_i (respectivamente, 127,5% e 119,7%) e estavam em desacordo com os limites harmônicos da IEC 61000-3-2. Entre as lâmpadas de 9 W e 14 W, a maior DHT_i foi inferior a 19,3%. Além disso, verificou-se que as lâmpadas quentes apresentam uma maior contribuição para a DHT_i em comparação com as lâmpadas LED brancas frias e que a presença de filtros reduz significativamente a DHT_i .

Alinhado aos trabalhos apresentados, o presente artigo tem como objetivo realizar uma avaliação da DHT_i injetada nos sistemas elétricos por uma amostra das lâmpadas

LED de diferentes fabricantes e potências (4,8 W a 50 W), presentes no mercado brasileiro. Para isso foram registradas as formas de onda de tensão e corrente dessas lâmpadas em operação. Adicionalmente, parâmetros como a potência ativa e o fator de potência também foram calculados. Assim, mensurando esses parâmetros, pretende-se quantificar a DHT_i que tais lâmpadas geram, dando assim uma noção do quanto essa geração de harmônicos pode afetar a QEE para os consumidores finais nos âmbitos residenciais, comerciais e industriais.

O presente artigo segue estruturado da seguinte forma: na seção 2 é descrita a metodologia adotada para a construção e o desenvolvimento do estudo; na seção 3 são analisados e discutidos os resultados obtidos; e na seção 4 são feitas as considerações finais.

2 Metodologia

Para a realização deste estudo, 13 tipos de lâmpadas LED novas, de três dos fabricantes atuantes no mercado brasileiro, foram ensaiados em bancada, e suas formas de onda de tensão e corrente registradas. Na Tabela 1 são apresentadas a potência e a quantidade de lâmpadas ensaiadas, de acordo com o fabricante.

Tabela 1 ▶
Tipos e fabricantes de lâmpadas LED utilizadas.
Fonte: dados da pesquisa

Fabricante	P (W)	Quantidade
1	50	10
1	40	10
1	30	10
1	20	10
1	15	10
1	7	10
1	4,8	10
2	50	10
2	40	10
2	16	9
2	7	9
2	4,8	9
3	7	10

A quantidade de amostras para cada tipo ensaiado variou entre 9 e 10 unidades, visando assim garantir a representatividade estatística do estudo.

Para a realização dos ensaios, cada lâmpada foi instalada em uma bancada de testes e alimentada com sua tensão nominal de 127 volts eficazes ($127 V_{RMS}$), com variação inferior a 3%. O tempo entre a energização do circuito e a realização das medições foi

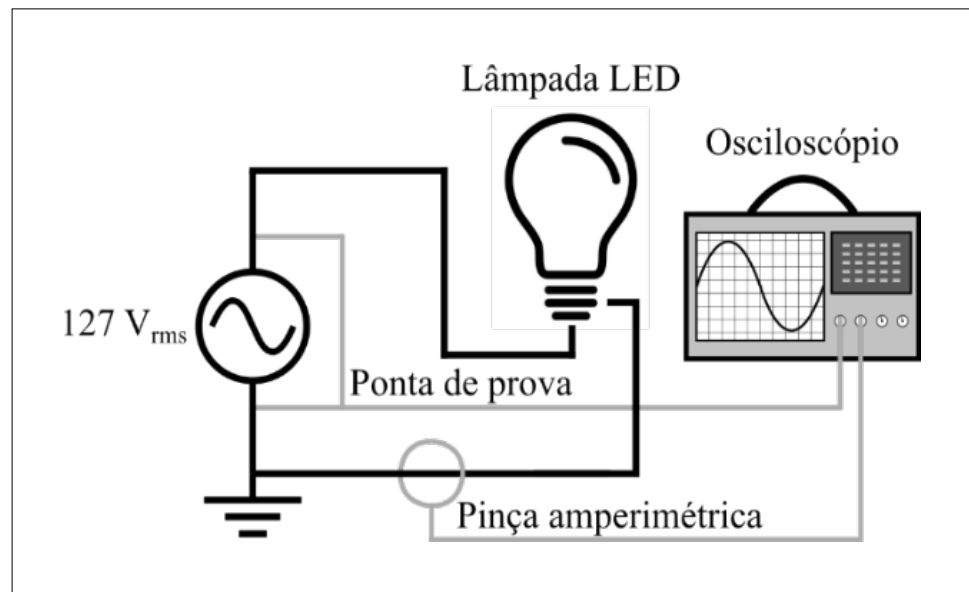
de 15 minutos, sendo esse tempo definido como o tempo de estabilização, conforme a Portaria nº 389/2014 do Inmetro (INMETRO, 2014).

Foi empregado um osciloscópio digital Tektronix MSO5104B (com largura de banda de 1 GHz e taxa de amostragem máxima de 10 GS/s, resolução vertical de 6 bits ou superior a 11 bits em alta resolução) para a detecção e registro das formas de onda de tensão e corrente. Para a captação da forma de onda de tensão e corrente utilizaram-se, respectivamente, uma ponta de prova de tensão (exatidão de 1%) e uma ponta de prova de corrente Keysight 1146B (corrente alternada máxima de pico admitida de 100 A, frequência máxima de até 100 kHz e exatidão de 3%).

Na Figura 2 é apresentado o circuito utilizado para o registro das formas de onda de tensão e corrente das lâmpadas ensaiadas.

Figura 2 ►

Circuito utilizado para o registro das formas de onda de tensão e corrente das lâmpadas ensaiadas.
Fonte: elaborada pelos autores



Diante dos dados coletados, foram calculadas as *DHT* de corrente e tensão de todas as amostras. Segundo Sallam e Malik (2019), a *DHT* do sinal é dada pela Equação 1:

$$DHT\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n A_n^2}}{A_1} \times 100 \quad (1)$$

onde: A_n representa a amplitude do sinal registrado e os subscritos (1, 2, ..., n) indicam a ordem do harmônico. No caso em questão, os sinais registrados foram tensão e corrente, em seus respectivos valores de pico.

Além disso, foi determinado o fator de potência (*FP*) de cada uma das unidades de lâmpadas ensaiadas para estimar o fator de potência médio de cada um dos 13 tipos. Salienta-se que os valores de distorção harmônica total da tensão, de todas as lâmpadas analisadas, foram inferiores a 10%. Dessa forma, segundo Grady e Gilleskie (1993), pode-se considerar a forma de onda do sinal de tensão praticamente senoidal. Sendo

assim, segundo Grady e Gilleskie (1993) e Sallam e Malik (2019), o FP pode ser definido a partir da Equação 2:

$$FP = \frac{\cos \Phi}{\sqrt{1 + DHT_i^2}}, \quad (2)$$

onde: Φ é o ângulo de defasagem entre as componentes fundamentais de corrente e tensão; e $\cos \Phi$ é o fator de potência de deslocamento.

A partir das formas de onda registradas e com a aplicação de uma rotina computacional baseada no método dos mínimos quadrados e utilizando-se o software Octave, determinaram-se, conforme as Equações 1 e 2, os valores de DHT (de corrente e de tensão), $\cos \Phi$ e FP , além das suas respectivas médias e desvios padrões, em função de múltiplas medições, em diferentes amostras, em momentos distintos.

No tocante à injeção de harmônicos decorrente da utilização em larga escala de lâmpadas, há no Brasil a Portaria nº 389 do Inmetro, de 25 de agosto de 2014. Essa portaria estabelece que, para lâmpadas LED com potência nominal superior a 25 W, o fator de potência deve ser maior que 0,92; para lâmpadas LED com potência nominal declarada de 5 W a 25 W, o fator de potência deve ser maior ou igual a 0,70; e não é exigido um fator de potência mínimo para lâmpadas com potência declarada menor que 5 W (INMETRO, 2014).

Relativamente às correntes harmônicas das lâmpadas LED, a Portaria nº 389 do Inmetro (2014) adota os limites presentes na Norma IEC 61000-3-2 (IEC, 2014) para as lâmpadas com potência nominal maior que 25 W. Tal portaria não estabelece limites de correntes harmônicas para lâmpadas com potência nominal menor que 25 W.

A norma IEC 61000-3-2, por sua vez, estabelece limites de correntes harmônicas para lâmpadas com potência tanto inferior quanto superior a 25 W, contudo, os limites impostos são diferentes para cada uma das duas faixas de potência. Sendo assim, a norma IEC 61000-3-2 foi empregada na análise das correntes harmônicas dos tipos de lâmpadas ensaiados.

Ademais, em complemento à determinação da DHT de tensão e corrente, foram calculados os valores das amplitudes das harmônicas para confrontar com os valores recomendados pela norma IEC 61000-3-2 e conseqüentemente pela Portaria Inmetro nº 389/2014.

3 Resultados e discussão

Na Tabela 2 são apresentados, respectivamente, os valores médios e desvio padrão (σ) de DHT para os sinais de corrente (DHT_i) e tensão (DHT_v) de cada um dos tipos de lâmpadas ensaiadas. Conforme informado na seção de metodologia, uma rotina computacional desenvolvida no Octave foi empregada para realizar os cálculos a partir dos resultados dos ensaios.

Tabela 2 ▶

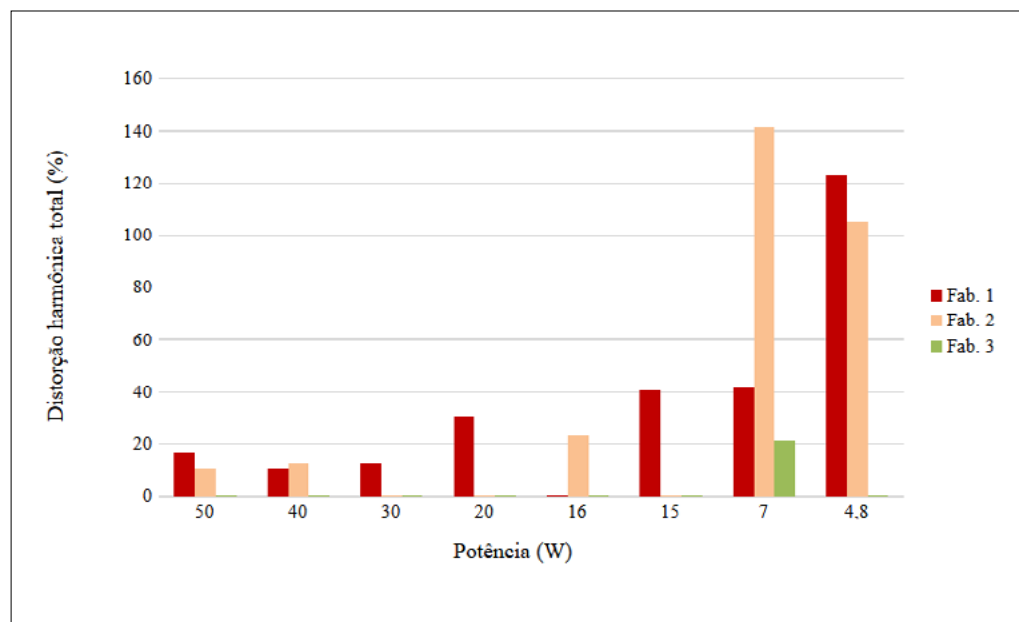
Resultados da *DHT* de corrente e tensão das lâmpadas ensaiadas.
Fonte: dados da pesquisa

Fabricante	P (W)	DHT_i (%)	σ_i	DHT_v (%)	σ_v
1	50	16,532	0,631	2,025	0,340
1	40	10,730	0,516	2,079	0,357
1	30	12,541	0,365	2,017	0,337
1	20	30,526	0,284	2,050	0,327
1	15	40,761	2,057	2,156	0,348
1	7	41,649	2,184	2,142	0,314
1	4,8	122,878	2,813	2,182	0,301
2	50	10,901	0,488	1,965	0,276
2	40	12,670	0,636	2,129	0,516
2	16	23,636	0,687	2,022	0,241
2	7	141,484	2,957	2,050	0,309
2	4,8	104,850	1,152	2,114	0,316
3	7	21,152	0,386	2,102	0,276

Na Figura 3 é apresentado um gráfico de barras gerado a partir dos dados presentes na Tabela 2.

Figura 3 ▶

DHT de corrente em função da potência de cada lâmpada dos três fabricantes selecionados para os ensaios.
Fonte: dados da pesquisa



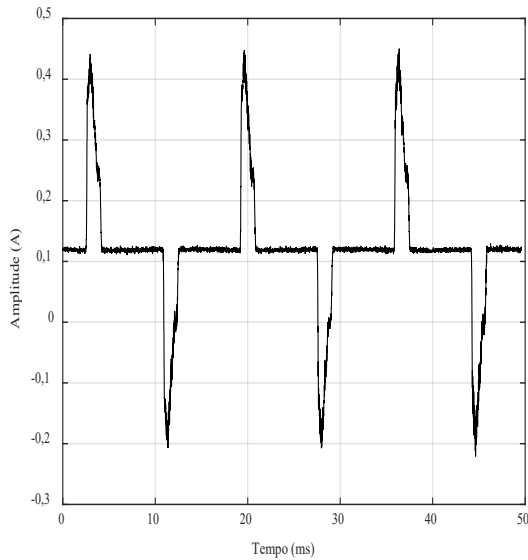
Ao analisar-se a Tabela 2 e a Figura 3, verifica-se quais modelos de lâmpadas possuem as maiores DHT_i , sendo a lâmpada de 7 W do fabricante 2 a que apresentou a maior DHT_i entre as lâmpadas de potência 7 W, como também entre todos os fabricantes e modelos (141,484%).

Figura 4 ▼

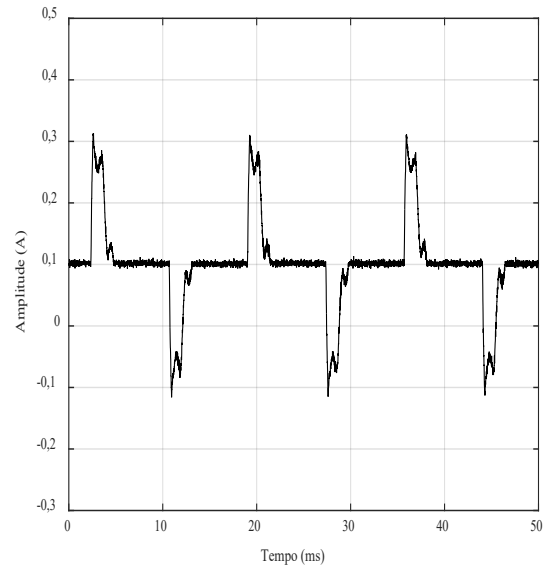
Além disso, na Figura 4 são mostrados três ciclos do sinal de corrente das lâmpadas ensaiadas que apresentaram a maior DHT_i (fabricante 1, potência de 4,8 W e fabricante 2, potência de 7 W e 4,8 W). Na Figura 5 são mostrados três ciclos do sinal de tensão de uma das lâmpadas ensaiadas, especificamente do tipo que apresentou maior DHT_i (fabricante 2, potência 7 W). Com relação à DHT do sinal de tensão, observou-se um máximo de 2,182%, inferior ao valor exigido por norma (3%).

Forma de onda da corrente de lâmpadas ensaiadas:
(a) fabricante 2, potência 7 W;
(b) fabricante 1, potência 4,8 W;
(c) fabricante 2, potência 4,8 W.

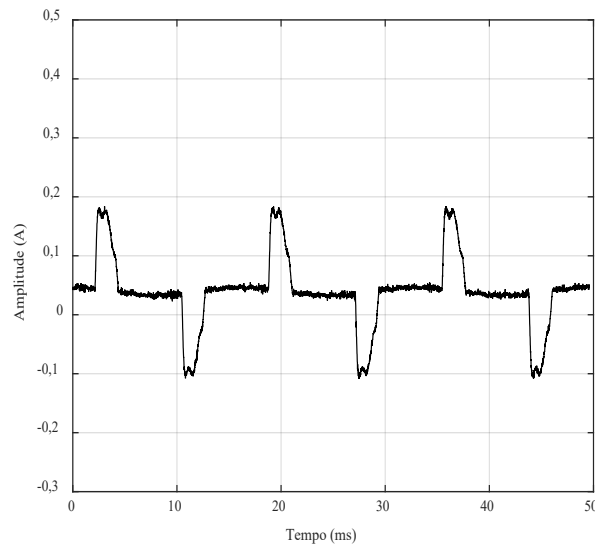
Fonte: dados da pesquisa



(a)



(b)

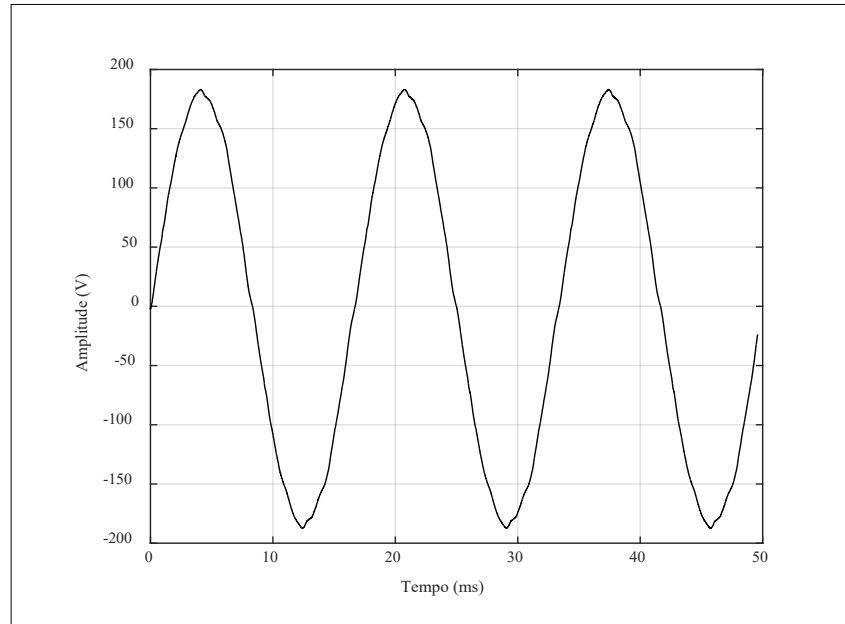


(c)

Figura 5 ▶

Forma de onda da tensão em uma das lâmpadas do fabricante 2, potência 7 W.

Fonte: dados da pesquisa



Em posse dos valores de DHT_i e estimadas as defasagens entre os sinais (Φ), foram calculados os respectivos FP , com o objetivo de confrontá-los com os valores previstos na regulamentação atual. Em seguida, calculou-se a média e o desvio padrão para o FP de cada tipo de lâmpada. Todos os cálculos foram realizados por rotinas computacionais desenvolvidas no ambiente do Octave. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 ▶

Valores médios e desvio padrão dos FP dos tipos de lâmpadas.

Fonte: dados da pesquisa

Fabricante	P (W)	$FP_{Nominal}$	FP	σ_{FP}
1	50	>0,92	0,986	0,001
1	40	>0,92	0,992	0,001
1	30	>0,92	0,989	0,001
1	20	>0,92	0,948	0,003
1	15	>0,7	0,913	0,007
1	7	>0,7	0,915	0,007
1	4,8	>0,4	0,581	0,006
2	50	>0,92	0,991	0,001
2	40	>0,92	0,988	0,001
2	16	>0,9	0,962	0,001
2	7	>0,7	0,535	0,007
2	4,8	>0,4	0,599	0,004
3	7	>0,7	0,952	0,003

Ao analisar as Tabelas 2 e 3, constata-se que os tipos de lâmpadas que possuem os maiores valores médios de *DHT* correspondem aos mesmos que possuem os menores *FP*. A lâmpada de 7 W do fabricante 2 apresentou o pior *FP* (0,535) e a maior *DHT* entre todos os tipos (141,484%). Em contraponto a essa lâmpada, tem-se a lâmpada de 40 W do fabricante 1, que possui o melhor *FP* (0,992) e *DHT* de 10,730%.

Nas Tabelas 4 e 5, respectivamente, são apresentados os níveis recomendados pela Norma IEC 61000-3-2 para cada componente harmônica dos equipamentos categorizados como classe C, classe na qual as lâmpadas LED estão incluídas.

Tabela 4 ►

Limite das correntes harmônicas para equipamentos de iluminação classe C com uma potência ativa superior a 25 W.

Fonte: IEC (2014)

Ordem harmônica (<i>n</i>)	Corrente harmônica máxima admissível, expressa em porcentagem da corrente de entrada na frequência fundamental (%)
2	2
3	30· <i>FP</i>
5	10
7	7
9	5
$11 \leq n \leq 39$ (Somente harmônicas ímpares)	3

Tabela 5 ►

Limite das correntes harmônicas por Watt para equipamentos de iluminação classe C com uma potência ativa inferior a 25 W.

Fonte: IEC (2014)

Ordem harmônica (<i>n</i>)	Corrente harmônica máxima admissível por Watt (mA/W)
3	3,4
5	1,9
7	1
9	0,5
11	0,35
$13 \leq n \leq 39$ (Somente harmônicas ímpares)	$\frac{3,85}{n}$

Ressalta-se que, para lâmpadas com potência inferior a 25 W, há uma alternativa à forma de avaliação adotada. Uma segunda forma de avaliação aponta que a corrente do terceiro harmônico, expressa como uma porcentagem da corrente fundamental, não deve exceder 86% e a corrente do quinto harmônico não deve exceder 61%. Além disso, a forma de onda da corrente de entrada deve ser tal que atinja o limite de corrente de 5% antes ou a 60°, tenha seu valor de pico antes ou a 65° e não caia abaixo do limite de corrente de 5% antes de 90°, referenciado a qualquer cruzamento de zero da tensão de alimentação fundamental. O limite atual é 5% do valor de pico absoluto

mais alto que ocorre na janela de medição, e as medições do ângulo de fase são feitas no ciclo que inclui esse valor de pico absoluto (IEC, 2014). Contudo, os requisitos utilizados na primeira forma de avaliação adotada neste artigo, que abrange diversas ordens harmônicas, foram considerados mais abrangentes e adequados para estimar a conformidade com a Norma IEC 61000-3-2.

Na Tabela 6 e na Figura 6 são apresentados os valores médios percentuais da corrente harmônica para cada ordem harmônica, obtidos a partir dos valores dos ensaios processados pelas rotinas computacionais, para as lâmpadas de potência superior a 25 W.

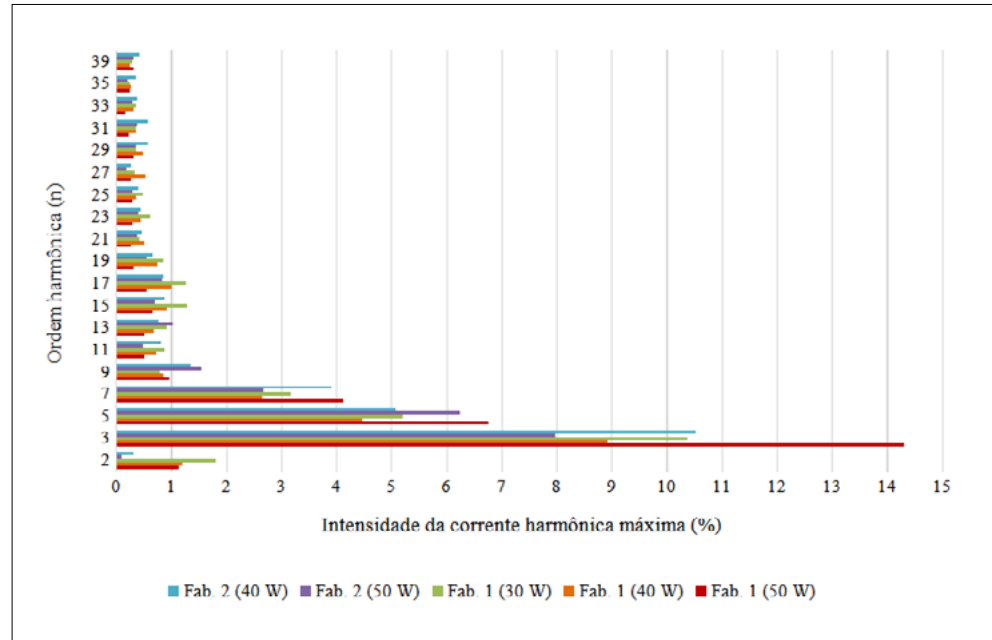
Tabela 6 ▶
Intensidade percentual da corrente harmônica máxima das lâmpadas com potência superior a 25 W.
Fonte: dados da pesquisa

<i>n</i>	Fabricante 1			Fabricante 2	
	50 W	40 W	30 W	50 W	40 W
2	1,141	1,203	1,795	0,101	0,319
3	14,296	8,912	10,365	7,964	10,511
5	6,764	4,467	5,200	6,232	5,074
7	4,113	2,636	3,158	2,664	3,910
9	0,960	0,840	0,775	1,542	1,345
11	0,509	0,726	0,877	0,483	0,814
13	0,509	0,675	0,924	1,030	0,773
15	0,659	0,909	1,286	0,688	0,865
17	0,553	1,007	1,255	0,831	0,857
19	0,315	0,740	0,851	0,538	0,645
21	0,273	0,512	0,427	0,384	0,458
23	0,290	0,447	0,612	0,406	0,436
25	0,291	0,343	0,478	0,292	0,394
27	0,276	0,532	0,340	0,183	0,266
29	0,317	0,490	0,349	0,348	0,566
31	0,224	0,362	0,362	0,380	0,567
33	0,157	0,309	0,346	0,277	0,364
35	0,242	0,260	0,246	0,210	0,356
37	0,316	0,251	0,284	0,299	0,416
39	0,245	0,232	0,161	0,294	0,341

Figura 6 ►

Intensidade percentual da corrente harmônica máxima das lâmpadas com potência superior a 25 W.

Fonte: dados da pesquisa



Nas Tabelas 7 e 8 e nas Figuras 7 e 8 são apresentados os valores médios para cada componente harmônica, para lâmpadas de potência até 25 W.

Tabela 7 ►

Intensidade das harmônicas máximas por Watt das lâmpadas com potência inferior a 25 W.

Fonte: dados da pesquisa

n	Fabricante 1			
	20 W	15 W	7 W	4,8 W
3	2,36	1,87	1,62	5,46
5	0,89	1,42	0,78	4,01
7	0,14	1,76	1,16	2,54
9	0,36	0,73	0,62	1,48
11	0,24	0,40	0,10	0,86
13	0,05	0,77	0,36	0,71
15	0,11	0,41	0,24	0,94
17	0,10	0,09	0,08	1,05
19	0,07	0,30	0,06	0,99
21	0,06	0,21	0,05	0,80
23	0,04	0,09	0,09	0,60
25	0,04	0,10	0,03	0,52
27	0,02	0,07	0,07	0,42
29	0,04	0,05	0,07	0,35
31	0,03	0,06	0,04	0,36
33	0,02	0,06	0,04	0,38
35	0,03	0,05	0,05	0,34
37	0,03	0,06	0,05	0,24
39	0,02	0,05	0,03	0,20

Tabela 8 ▶

Intensidade das harmônicas máximas por Watt das lâmpadas com potência inferior a 25 W.
 Fonte: dados da pesquisa

n	Fabricante 2		Fabricante 3	
	16 W	7 W	4,8 W	7 W
3	1,655	7,524	6,603	0,760
5	1,492	6,038	4,447	0,703
7	0,530	4,433	2,443	0,234
9	0,274	3,080	1,206	0,072
11	0,404	2,036	0,968	0,082
13	0,150	1,258	0,987	0,042
15	0,109	0,891	1,074	0,104
17	0,161	1,224	1,051	0,107
19	0,113	1,369	0,745	0,067
21	0,063	1,200	0,442	0,037
23	0,057	1,027	0,421	0,057
25	0,098	0,935	0,361	0,034
27	0,062	0,923	0,374	0,040
29	0,053	0,824	0,383	0,041
31	0,070	0,609	0,338	0,029
33	0,061	0,472	0,213	0,026
35	0,042	0,521	0,224	0,033
37	0,054	0,583	0,248	0,035
39	0,051	0,586	0,171	0,031

Figura 7 ▶

Intensidade das harmônicas máximas por Watt das lâmpadas com potência inferior a 25 W.
 Fonte: dados da pesquisa

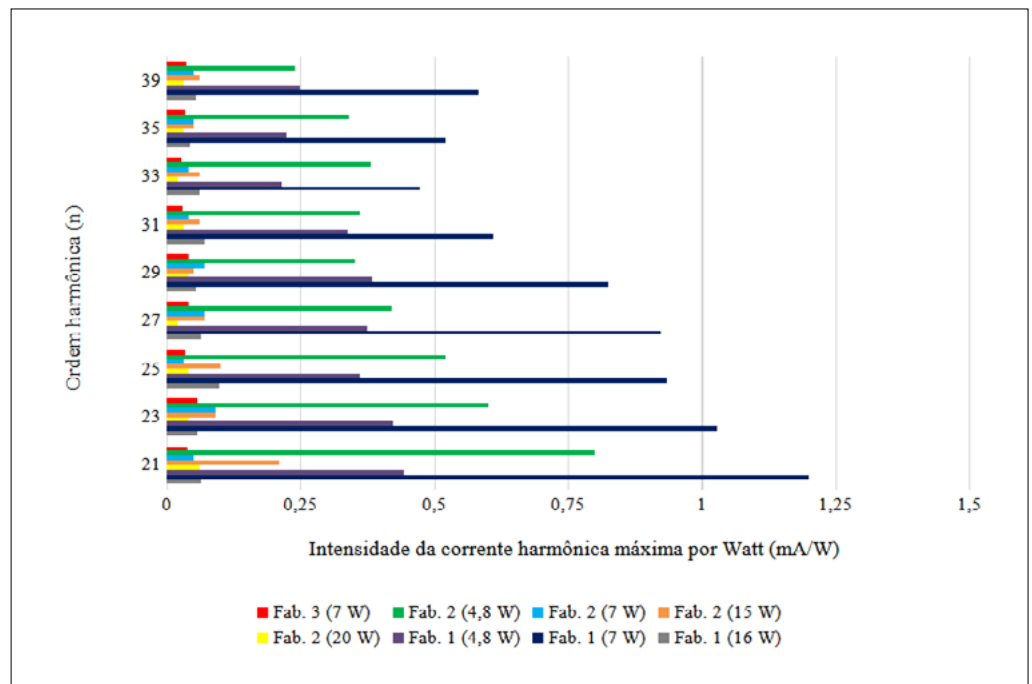
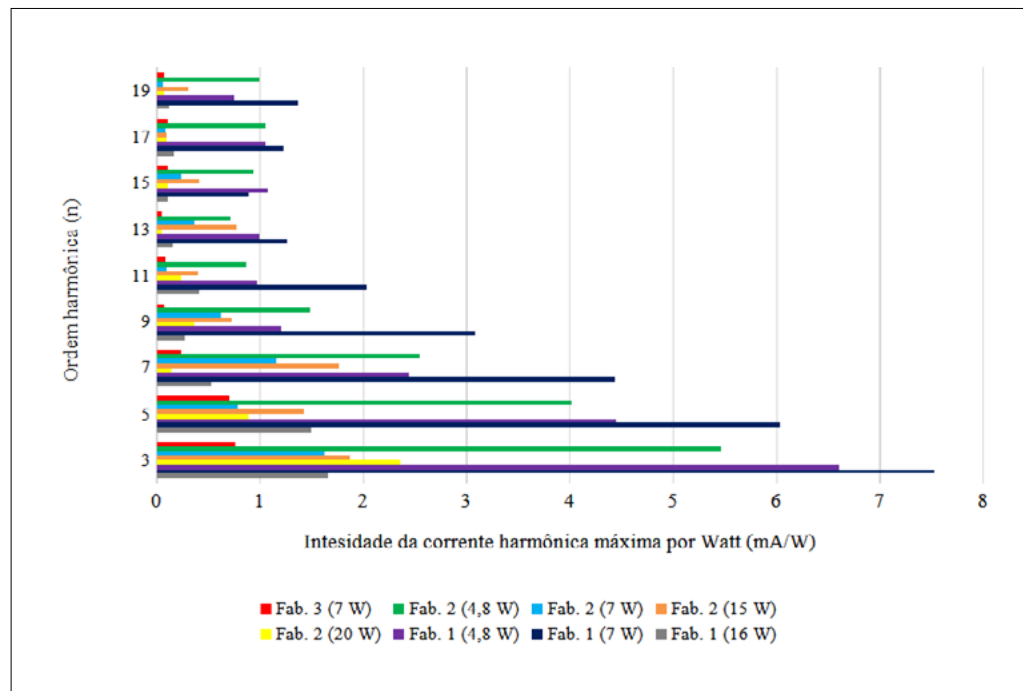


Figura 8 ►

Intensidade das harmônicas máximas por Watt das lâmpadas com potência inferior a 25 W.

Fonte: dados da pesquisa



De acordo com os resultados apresentados nas Tabelas 7 e 8 e nas Figuras 7 e 8, seis modelos de lâmpadas (75% do total dos tipos com potência abaixo de 25 W ensaiados) apresentaram valores em desconformidade com a norma em determinadas componentes harmônicas (tais valores encontram-se destacados em negrito nas Tabelas 7 e 8). Destaca-se o baixo desempenho das lâmpadas do fabricante 1, nas potências de 7 W e 4,8 W, e do fabricante 2, na potência de 4,8 W, que ultrapassaram a recomendação em todas as componentes harmônicas.

Como anteriormente destacado, a Portaria Inmetro nº 389/2014 não faz restrição ao conteúdo harmônico injetado pelas lâmpadas com potência inferior a 25 W. Contudo, a referida portaria faz restrições ao fator de potência dessas lâmpadas. O tipo de lâmpada do fabricante 2 (potência de 7 W) foi o único que infringiu o limite inferior de fator de potência determinado pela Portaria Inmetro nº 389/2014.

Analisando simultaneamente todos os resultados apresentados nas Tabelas 6, 7 e 8, constata-se que, dos 13 tipos ensaiados, 6 (46,15%) estão em desconformidade com o que é recomendado pela IEC 61000-3-2.

5 Conclusões

De acordo com os resultados apresentados neste estudo, foi possível traçar um panorama acerca das características de *DHT* e *FP* de lâmpadas LED encontradas no mercado brasileiro.

Foi possível constatar que todas as marcas e tipos ensaiados apresentaram fatores de potência em conformidade com as exigências da Portaria nº 389 do Inmetro, de 25 de agosto de 2014, exceto a lâmpada do fabricante 2, tipo 7 W. Esta apresentou um *FP* de 0,535, inferior ao limite mínimo de 0,7. Verificou-se também que as lâmpadas com *DHT* de corrente mais elevadas apresentaram o menor fator de potência. Os valores de *DHT* de corrente e *FP* para as lâmpadas com potência superior a 25 W variaram, respectivamente, no intervalo de 10,730% a 16,532% e

de 0,986 a 0,992. Os valores de *DHT* de corrente e *FP* para as lâmpadas com potência inferior a 25 W variaram, respectivamente, no intervalo de 21,152% a 141,484% e de 0,535 a 0,986.

Analisando-se todos os exemplares ensaiados, os valores de *DHT* de corrente e *FP* variaram, respectivamente, no intervalo de 10,730% a 141,484% e de 0,535 a 0,992.

Em relação aos níveis das ordens harmônicas dos tipos ensaiados, quando confrontados com a norma IEC 61000-3-2, constatou-se que, dos 13 tipos de lâmpadas estudados, 6 apresentaram amplitudes máximas de corrente harmônica superiores às máximas admitidas em norma. Entre as lâmpadas com potência nominal abaixo de 25 W, seis dos oito tipos estão em desconformidade com a norma, enquanto para as lâmpadas com potência superior a 25 W, todas estão alinhadas à IEC 61000-3-2 e conseqüentemente à Portaria Inmetro nº 389/2014.

Considerando todos os tipos de lâmpadas ensaiados, verificou-se que 46,15% destes não atendem as recomendações da IEC 61000-3-2. Salienta-se que as lâmpadas cuja potência é inferior a 25 W – não abarcadas por regulamentação nacional – estão, em sua maioria, em desconformidade com a IEC 61000-3-2, sendo essa a norma-base da recomendação do Inmetro. Além disso, mesmo não sendo o cerne deste trabalho, pode-se supor que as altas distorções harmônicas medidas são imputadas aos conversores utilizados nas lâmpadas LED. Entretanto, necessita-se analisar profundamente os componentes eletrônicos dos exemplares de lâmpadas LED estudados para corroborar essa suposição. Sendo assim, é desejável que a regulação nacional passe a considerar a análise de *DHT_i* de lâmpadas de potência inferior a 25 W, visando à conservação da QEE ao consumidor final. Nesse sentido, espera-se que, em trabalhos futuros, seja possível avaliar as características de *DHT*, *FP* e os efeitos da interação entre harmônicas de conjuntos de lâmpadas LED associadas em paralelo e realizar um levantamento do impacto das lâmpadas de baixa potência em instalações típicas.

Agradecimentos

Agradecemos ao Prof. Dr. Álvaro de Medeiros Maciel, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, ao Prof. Dr. Luciano de Macedo Barros e ao Prof. Dr. Douglas Bressan Riffel, da Universidade Federal de Sergipe, pelos conhecimentos transmitidos que auxiliaram a pesquisa e pelo apoio na realização dos experimentos. Agradecemos ainda à Comercial Aliança Limitada, a Marcilene Santos Calazans e a Diego Augusto Rodrigues Barboza, pela cessão das lâmpadas que serviram como material-base para o desenvolvimento deste estudo.

Financiamento

Esta pesquisa não recebeu financiamento externo.

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Referências

ADRAGNA, C.; GRITTI, G.; RACITI, A.; RIZZO, S. A.; SUSINNI, G. Analysis of the input current distortion and guidelines for designing high power factor quasi-resonant flyback LED drivers. **Energies**, v. 13, n. 11, 2989, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112989>.

BLANCO, A. M.; PARRA, E. E. Effects of high penetration of CFLS and LEDs on the distribution networks. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP 2010), 14., 2010, Bergamo. **Proceedings** [...]. Bergamo: IEEE, 2010. p. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625420>.

CHANG, W.-H.; CHEN, D.; NIEN, H.-S.; CHEN, C.-H. A digital boost converter to drive white LEDs. *In*: ANNUAL IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION, 23., 2008, Austin. **Proceedings** [...]. Austin: IEEE, 2008. p. 558-564. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEC.2008.4522776>.

CHO, J.; PARK, J. H.; KIM, J. K.; SCHUBERT, E. F. White light-emitting diodes: history, progress, and future. **Laser & Photonics Reviews**, v. 11, n. 2, 1600147, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/lpor.201600147>.

COSTA, F. F. **Estimação de harmônicos e inter-harmônicos em sistemas elétricos**. 2005. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2005. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/3217>. Acesso em: 23 abr. 2022.

ČUK, V.; COBBEN, J. F. G.; KLING, W. L.; TIMENS, R. B. An analysis of diversity factors applied to harmonic emission limits for energy saving lamps. *In*: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HARMONICS AND QUALITY OF POWER (ICHQP 2010), 14., 2010, Bergamo. **Proceedings** [...]. Bergamo: IEEE, 2010. p. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICHQP.2010.5625406>.

DI MAURO, S.; MUSUMECI, S.; RACITI, A.; VASTA, G. Analysis of the current harmonics injected into the power grid by dimmable LED lamps. *In*: AEIT INTERNATIONAL ANNUAL CONFERENCE, 2016, Capri. **Proceedings** [...]. Capri: IEEE, 2016. p. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.23919/AEIT.2016.7892796>.

EDISON, T. A. **Electric lamp**. Depositante: Thomas Alva Edison. Patente US223898A. Depósito: 4 nov. 1879. Concessão: 27 jan. 1880. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US223898A/>. Acesso em: 28 out. 2023.

FRIEDRICH, M.; HANS-JOACHIM, S.; EDMUND, G. **Metal vapor lamp**. Depositante: Osram GmbH. Patente US2182732A. Depósito: 19 dez. 1927. Concessão: 5 dez. 1939. Disponível em: <https://patents.google.com/patent/US2182732A/>. Acesso em: 28 out. 2023.

GRADY, W. M.; GILLESKIE, R. J. Harmonics and how they relate to power factor. *In*: EPRI POWER QUALITY ISSUES & OPPORTUNITIES CONFERENCE AND EXHIBITION, 4., 1993, San Diego. **Proceedings** [...]. San Diego: Electric Power

Research Institute (EPRI), 1993. p. 1-8. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/376834>. Acesso em: 28 out. 2023.

GU, L.; RUAN, X.; XU, M.; YAO, K. Means of eliminating electrolytic capacitor in AC/DC power supplies for LED lightings. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 5, p. 1399-1408, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2016662>.

IEC – INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 61000-3-2:2014** – Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 3-2: Limits - Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤ 16 A per phase). Londres: British Standards Institute, 2014.

INMETRO – INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. **Portaria no 389, de 25 de agosto de 2014**. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base. Rio de Janeiro: Inmetro, 2014. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/rtac002154.pdf>. Acesso em: 19 jun. 2021.

IQBAL, M. N.; KÜTT, L.; SHABBIR, N.; ASAD, B. Comparison of current harmonic emission by different lighting technologies. *In: INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE ON POWER AND ELECTRICAL ENGINEERING OF RIGA TECHNICAL UNIVERSITY (RTUCON)*, 61., 2020, Riga. **Proceedings** [...]. Riga: IEEE, 2020. p. 1-6. DOI: <https://dx.doi.org/10.1109/RTUCON51174.2020.9316615>.

JARKOVOI, M.; IQBAL, M. N.; KÜTT, L. Analysis of harmonic current stability and summation of LED lamps. *In: ELECTRIC POWER QUALITY AND SUPPLY RELIABILITY CONFERENCE (PQ); SYMPOSIUM ON ELECTRICAL ENGINEERING AND MECHATRONICS (SEEM)*, 2019, Kardla. **Proceedings** [...]. Kardla: IEEE, 2019. p. 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1109/PQ.2019.8818237>.

KUMAR, K. J.; KUMAR, G. B.; KUMAR, R. S. Harmonic impacts of warm and cool white LED bulbs. *In: GLOBAL CONFERENCE FOR ADVANCEMENT IN TECHNOLOGY (GCAT)*, 2019, Bangalore. **Proceedings** [...]. Bangalore: IEEE, 2019. p. 1-5. DOI: <https://doi.org/10.1109/GCAT47503.2019.8978456>.

KUMAR, K. J.; KUMAR, G. B.; KUMAR, R. S. Photometric assessment of warm and cool white LED bulbs. **Journal of Optics**, v. 49, n. 4, p. 476-484, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12596-020-00640-4>.

LAMAR, D. G.; ZÚÑIGA, J. S.; ALONSO, A. R.; GONZÁLEZ, M. R.; ÁLVAREZ, M. M. H. A very simple control strategy for power factor correctors driving high-brightness LEDs. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 24, n. 8, p. 2032-2042, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2009.2020900>.

LIU, X.; WAN, Y.; DONG, Z.; HE, M.; ZHOU, Q.; TSE, C. K. Buck–boost–buck-type single-switch multistring resonant LED driver with high power factor and passive current balancing. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 35, n. 5, p. 5132-5143, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2942488>.

MAXWELL, K. The Rise of LEDs and the beginning of the end for CFLs. **Guidehouse Insights**, 9 mar. 2016. Disponível em: <https://guidehouseinsights.com/news-and-views/the-rise-of-leds-and-the-beginning-of-the-end-for-cfls>. Acesso em: 9 maio 2022.

MUTHU, S.; SCHUURMANS, F. J.; PASHLEY, M. D. Red, green, and blue LED based white light generation: issues and control. *In: IEEE INDUSTRY APPLICATIONS CONFERENCE; IAS ANNUAL MEETING, 37.*, 2002, Pittsburgh. **Conference Record [...]**. Pittsburgh: IEEE, 2002a. p. 327-333. DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2002.1044108>.

MUTHU, S.; SCHUURMANS, F. J.; PASHLEY, M. D. Red, green, and blue LEDs for white light illumination. **IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 8, n. 2, p. 333-338, 2002b. DOI: <https://doi.org/10.1109/2944.999188>.

QU, X.; WONG, S.-C.; TSE, C. K. Resonance-assisted buck converter for offline driving of power LED replacement lamps. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 26, n. 2, p. 532-540, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2010.2065242>.

REYES, M. A.; GALLAGHER, S.; SAMMARCO, J. J. Evaluation of visual performance when using incandescent, fluorescent, and LED machine lights in mesopic conditions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 49, n. 5, p. 1992-1999, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2013.2261272>.

SALLAM, A. A.; MALIK, O. P. Harmonics in electric distribution systems. *In: SALLAM, A. A.; MALIK, O. P. Electric Distribution Systems*. 2. ed. Piscataway: IEEE Press, 2019. p. 379-402. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781119509332.ch14>.

TORRES, I. S. M.; SOUSA, F. P. F.; FERREIRA, T. V.; LUCIANO, B. A. Lâmpadas fluorescentes e distorções harmônicas: eficiência energética e qualidade de energia elétrica. *In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (CBQEE)*, 8., 2009, Blumenau. **Anais [...]**. Blumenau: FURB, 2009. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/242681596_Lampadas_Fluorescentes_e_Distorcoes_Harmonicas_Eficiencia_Energetica_e_Qualidade_de_Energia_Eletrica. Acesso em: 28 out. 2023.

UDDIN, S.; SHAREEF, H.; MOHAMED, A.; HANNAN, M. A. An analysis of harmonics from LED lamps. *In: ASIA-PACIFIC SYMPOSIUM ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, 2012*, Singapore. **Proceedings [...]**. Singapore: IEEE, 2012. p. 837-840. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEMC.2012.6238014>.

UDDIN, S.; SHAREEF, H.; MOHAMED, A.; HANNAN, M. A.; MOHAMED, K. LEDs as energy efficient lighting systems: a detail review. *In: IEEE STUDENT CONFERENCE ON RESEARCH AND DEVELOPMENT, 2011*, Cyberjaya. **Proceedings [...]**. Cyberjaya: IEEE, 2011. p. 468-472. DOI: <https://doi.org/10.1109/SCOReD.2011.6148785>.

VAN DER BROECK, H.; SAUERLANDER, G.; WENDT, M. Power driver topologies and control schemes for LEDs. *In: ANNUAL IEEE APPLIED POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND EXPOSITION (APEC 07)*, 22., 2017, Anaheim. **Proceedings [...]**. Anaheim: IEEE, 2007. p. 1319-1325. DOI: <https://doi.org/10.1109/APEX.2007.357686>.