

Análise Computacional da Distorção Harmônica de Lâmpadas LED

Reinaldo C. Costa* Eduardo J. Araújo**
Marlon L. G. Salmento***

* Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Itabirito, MG,
(e-mail: reinaldo.cassiano.costa@gmail.com).

** Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Itabirito, MG,
(e-mail: eduardo.araujo@ifmg.edu.br).

*** Instituto Federal de Minas Gerais, Campus Avançado Itabirito,
MG, (e-mail: marlon.gomes@ifmg.edu.br).

Abstract: The use of LED lamps has increased in recent years mainly due to their high luminous efficacy and long lifetime. However, the nonlinear characteristic of this type of load results in a representative generation of harmonics. Thus, the present article seeks to understand in more detail the impact of LED lighting on the electrical system. So, a computational model was implemented in MatLab^{MR} software from the harmonic components of different lamps obtained experimentally. This model enables the analysis of harmonic distortion and power factor of LED lamps combinations of different power and manufacturers, adding dynamism to the analysis of a electric power system with several LED lamps connected. Simulations were performed with combinations of 9 lamps and the six most critical cases were selected. The most critical combination of lamps resulted in a total harmonic distortion up to 114.5 % with power factor of 0.648. In this case, a passive filter implementation allowed the reduction of harmonic distortion to values below 0,2 % with a power factor of 0.987.

Resumo: O uso de lâmpadas LED tem aumentado nos últimos anos em virtude principalmente da sua elevada eficácia luminosa e longa vida útil. Contudo, a natureza não linear deste tipo de carga resulta em uma significativa geração de harmônicos. Desta forma, o presente artigo busca compreender com mais detalhes o impacto da iluminação de LED na rede de energia elétrica. Assim, um modelo computacional foi implementado no software MatLab^{MR} a partir das componentes harmônicas de diferentes lâmpadas obtidas experimentalmente. O modelo possibilita a análise das componentes harmônicas e do fator de potência das combinações de lâmpadas LED de diferentes potências e fabricantes, agregando dinamismo à análise de um sistema de energia elétrica com diversas lâmpadas LED conectadas. Foram realizadas simulações com as combinações de 9 lâmpadas e selecionados os seis casos mais críticos. A combinação mais crítica de lâmpadas resultou em uma distorção harmônica total de até 114,5% com fator de potência de 0,648. Neste caso, a implementação de um filtro passivo possibilitou a redução da distorção harmônica para valores abaixo de 0,2% com fator de potência de 0,987.

Keywords: LED lamps; Power factor; Harmonic distortion; Passive filter; Harmonic components; Power quality.

Palavras-chaves: Lâmpada LED; Fator de potência; Distorção harmônica; Filtro passivo; Componentes harmônicas; Qualidade da energia.

1. INTRODUÇÃO

As lâmpadas LED afetam a qualidade da energia elétrica devido à geração de componentes harmônicas, devido sua característica não linear. Considerando que cada lâmpada LED possui um conversor CA-CC para suprir a alimentação contínua para os LED, este elemento introduz não linearidade e, conseqüentemente, geração de componentes harmônicas que são injetadas no sistema elétrico, provocando distorções harmônicas na instalação (Cattaneo et al., 2017).

Devido ao crescente uso de lâmpadas LED, em razão de características como durabilidade e eficiência energética,

existe uma tendência em aumentar as distorções harmônicas nas redes do sistema elétrico brasileiro. Desta forma, é importante qualificar o conteúdo harmônico gerado de forma a avaliar o impacto destas cargas na qualidade da energia elétrica fornecida (Gonzalez et al., 2012).

As lâmpadas LED possuem potência relativamente baixa quando analisadas individualmente, porém podem ter uma amplitude representativa quando operando simultaneamente, representando uma importante fonte de geração de harmônica (Iagar et al., 2014). Em alguns casos, o conteúdo harmônico está de acordo com as normas vigentes, porém os valores apresentados afetam significativamente o fator de potência da instalação (Mendonça, 2013). No

presente estudo, além da avaliação do conteúdo harmônico das lâmpadas LED, o fator de potência é analisado e comparado com as especificações dos fabricantes.

Do ponto de vista normativo, conforme a norma IEC-61000-3-2, os equipamentos de iluminação são considerados equipamentos de classe C, sendo divididos em dois tipos: equipamentos com potência maior que 25 W e equipamentos com potência menor ou igual a 25 W. Para os equipamentos com potência menor ou igual a 25 W utilizados no presente estudo, os limites são apresentados na Tabela 1. A norma também apresenta uma alternativa a Tabela 1 requisitando apenas que a corrente da terceira harmônica não exceda 86% da corrente fundamental e da quinta não ultrapasse 61% (Epsma, 2018).

Tabela 1. Norma IEC 61000-3-2.

Ordem harmônica N	Máxima corrente harmônica permitível (mA/W)
3	3.4
5	1.9
7	1.0
9	0.5
11	0.35
$13 \leq n \leq 39$ (somente harmônicas ímpares)	$3.85/n$

Em relação à normalização brasileira, a portaria nº 389 do INMETRO estabelece que para as lâmpadas LED com potência nominal declarada de 5 W a 25 W, o fator de potência deve ser maior ou igual a 0,70. Não é exigido um fator de potência mínimo para lâmpadas com potência menor que 5 W (Inmetro, 2014).

O principal objetivo deste estudo é analisar o conteúdo harmônico e o fator de potência de lâmpadas LED, utilizando um modelo computacional que permite avaliar diferentes cenários de operação do conjunto de lâmpadas, a partir da ativação das fontes de geração de harmônicas (lâmpadas), modeladas com base nas medições individuais previamente realizadas.

2. METODOLOGIA

O fluxograma mostrado na Figura 1 apresenta as principais etapas deste trabalho. Inicialmente, são realizadas medições das componentes harmônicas de corrente das lâmpadas LED em estudo. De posse dos valores das componentes harmônicas, as distorções harmônicas individuais e totais são calculadas para cada tipo de lâmpada. A seguir, as harmônicas das lâmpadas são modeladas por fontes de corrente e os valores de distorção harmônica e fator de potência são obtidos através dos blocos de função matemática do módulo Simulink do software MatLab^{MR}. Posteriormente, são realizados estudos de caso para avaliação do espectro harmônico em diferentes cenários de operação das lâmpadas e propostos filtros para mitigação do conteúdo harmônico.

2.1 Determinação do espectro harmônico

O circuito mostrado na Figura 2 foi utilizado para medição do espectro de distorção harmônica através da função fast fourier transform (FFT) do osciloscópio TBS 1102B-EDU - Tektronix. Para realizar a medição da corrente,

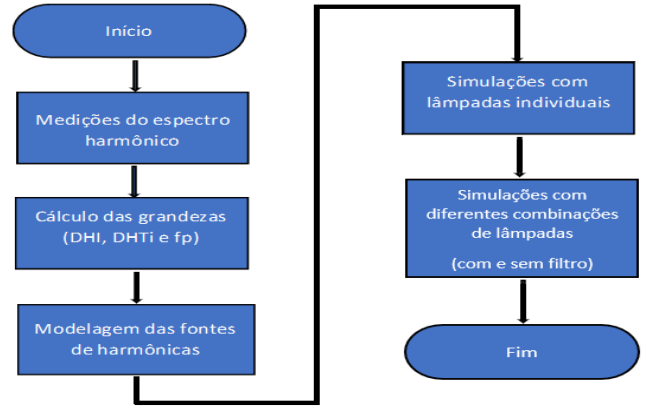


Figura 1. Fluxo da metodologia

foi inserido um resistor de 5Ω, 1W, 5% em série com as lâmpadas. O canal 1 (CH1) foi utilizado para obter a forma de onda da tensão e o canal 2 (CH2) para medição da corrente. As lâmpadas utilizadas no trabalho e suas especificações são mostradas na Tabela 2. Para a medição do espectro harmônico com a função FFT do osciloscópio, foi utilizado a escala horizontal de 250Hz/div e vertical de 10dB/div, sendo possível obter até a 41ª ordem.

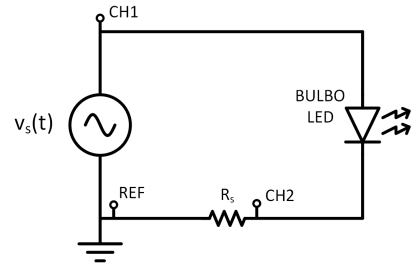


Figura 2. Circuito utilizado nas medições com osciloscópio.

1

Tabela 2. Lâmpadas LED - bulbo, E27, 100-240V, 50-60Hz.

Lâmpada	Fabricante	Potência (W)	Fator de Potência
L1	A	8	> 0,7
L2	A	13,5	> 0,7
L3	A	6	> 0,92
L4	B	9	≥ 0,7
L5	C	4,5	> 0,4
L6	A	4,5	> 0,4
L7	D	4	> 0,5
L8	B	8	≥ 0,8
L9	B	9	≥ 0,5

A medição do fator de potência de deslocamento $\cos \phi_1$, o qual é baseado no ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente da componente fundamental da corrente, foi realizada através da função $\cos \varphi$ do alicate wattímetro True RMS KR-3000 - Akrom.

2.2 Cálculos da distorção harmônica e do fator de potência

De posse dos valores obtidos nas medições, foram calculados o nível das distorções harmônicas e o fator de potência de cada lâmpada.

Cálculo da distorção harmônica. A distorção harmônica individual de corrente (DHI) e a distorção harmônica total (DHT_i) foram calculadas através das Equações (1) e (2), respectivamente:

$$DHT_i = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h=max} (I_h)^2}}{I_1} \times 100, \quad (1)$$

onde h é o índice de cada componente harmônica e I_1 é a componente harmônica fundamental.

$$DHI = \frac{I_h}{I_1} \times 100, \quad (2)$$

onde h é índice de cada componente harmônica e I_1 é a componente harmônica fundamental.

Cálculo do fator de potência. De posse do fator de potência de deslocamento obtido nas medições realizadas com alicate wattímetro e com o valor de distorção harmônica total calculado através da Equação (2), foi calculado o fator de potência (fp) para cada lâmpada LED através da Equação (3):

$$fp = \frac{\cos \phi_1}{\sqrt{1 + DHT^2}}, \quad (3)$$

onde o $\cos \phi_1$ é o fator de potência de deslocamento e DHT é a distorção harmônica total de corrente.

2.3 Modelo computacional

No ambiente de simulação, cada harmônica de corrente foi modelado por uma fonte de corrente, conforme mostrado na Figura 3 até a harmônica de ordem 41. As fontes de corrente foram parametrizadas com os valores das amplitudes de cada componente harmônica obtidas através das medições com osciloscópio, com o ângulo de defasagem entre a tensão e corrente obtido na medição com wattímetro e com a frequência referente ao múltiplo da componente fundamental.

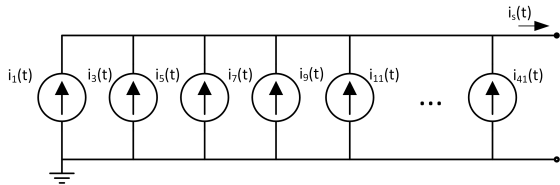


Figura 3. Modelo das fontes de harmônicos

Após inserção das fontes de corrente, foram incluídos os blocos e funções matemáticas do Simulink do software MatLab^{MR} para determinação das taxas de distorção harmônicas e cálculo do fator de potência, conforme mostrado no circuito equivalente da Figura 4.

O modelo computacional foi utilizado inicialmente para simular cada lâmpada individualmente para fins de comparação dos resultados do modelo com as medições previamente realizadas. Com base na frequência de cada harmônico, os filtros LC's para eliminação do conteúdo harmônico foram calculados com base na Equação (4). A frequência ressonante do filtro (f_0) é dada por:

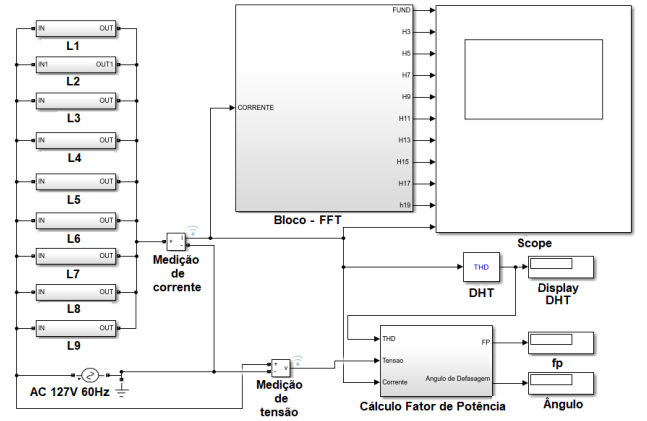


Figura 4. Blocos de funções para determinação da distorção harmônica e cálculo do fator de potência

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_h C_h}}, \quad (4)$$

em que L_h é a indutância e C_h é a capacitância do filtro de cada componente harmônico. A Figura 5 ilustra os filtros LC's inseridos no modelo.

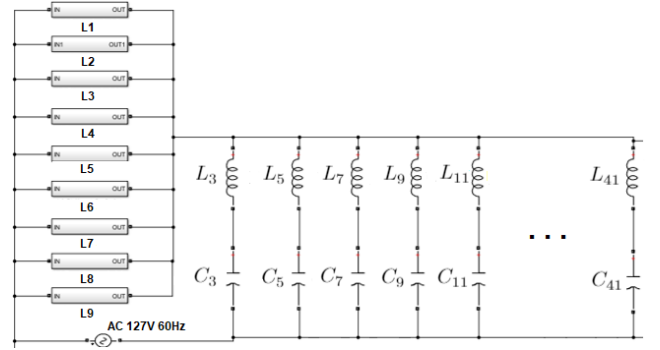


Figura 5. Fontes geradoras de harmônicos e filtros LC's.

Posteriormente, foram realizadas simulações com as combinações de lâmpadas e selecionado os três casos mais críticos de combinações de lâmpadas do ponto de vista de harmônicos e fator de potência. Adicionalmente, foram especificados filtros passivos para mitigação dos harmônicos para os casos selecionados.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Resultados das medições e cálculos de distorção harmônica e fator de potência

A Tabela 3 apresenta os resultados da distorção harmônica total (DHT_i) e do fator de potência (fp) para cada lâmpada obtidos através das medições e cálculos complementares e observa-se que todas as lâmpadas atendem a portaria n° 389 do INMETRO exceto a L9.

Nota-se que os maiores níveis de distorções harmônicas estão nas lâmpadas com fator de potência especificados pelos fabricantes como maiores que 0,4 ou 0,5. O valor do fator de potência decresce à medida que aumenta o nível de distorção harmônica. O maior nível de distorção harmônica foi obtido para a lâmpada L9. O espectro harmônico obtido

Tabela 3. Resultados dos cálculos da DHTi e do fator de potência.

Lâmpada	fp Fabricante	DHTi(%)	fp Calculado
L1	> 0,7	12,46	0,989
L2	> 0,7	23,10	0,972
L3	> 0,92	18,98	0,975
L4	\geq 0,7	32,79	0,948
L5	> 0,4	110,51	0,669
L6	> 0,4	67,49	0,798
L7	> 0,5	93,78	0,668
L8	\geq 0,8	24,47	0,970
L9	\geq 0,5	116,78	0,631

através das medições com osciloscópio e as formas de onda de tensão e corrente para esta lâmpada são apresentados nas Figuras 6 e 7, respectivamente. Observa-se que a amplitude da corrente do espectro harmônico desta lâmpada decresce à medida que a frequência aumenta e que a simetria da forma de onda da corrente justifica a presença somente de harmônicos de ordem ímpar.

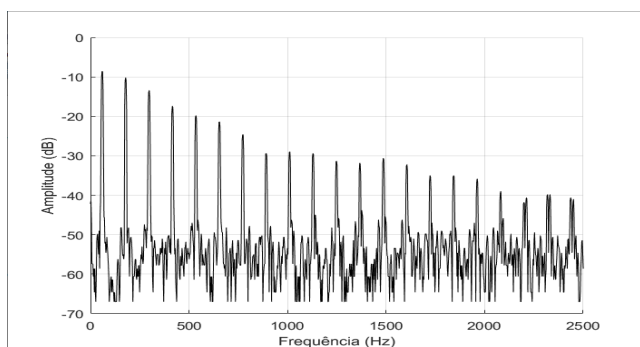


Figura 6. Espectro harmônico da L9.

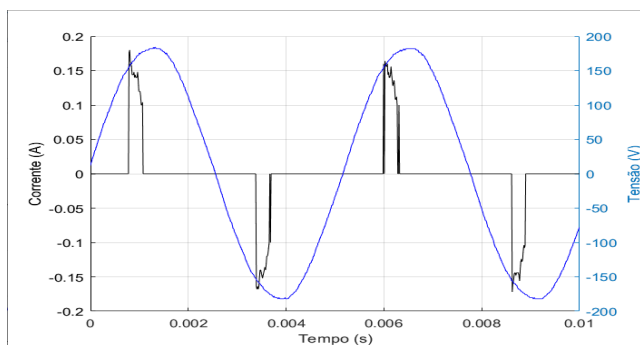


Figura 7. Formas de onda da tensão e corrente da lâmpada L9.

3.2 Análise dos resultados com base na norma IEC 61000-3-2

A Tabela 4 apresenta os resultados da análise das distorção harmônica de cada lâmpada em relação aos limites estabelecidos pela norma IEC 61000-3-2 (Tabela 1). Observa-se que somente as lâmpadas 1 a 3 atendem todos os limites normativos e as lâmpadas 5, 7 e 9 não atendem a nenhum dos limites da norma. As demais lâmpadas não atendem para ordens de harmônicos específicos.

A Figura 8 mostra um comparativo dos limites estabelecidos pela norma IEC 61000-3-2 e os valores das correntes

Tabela 4. Análise de distorção harmônica em relação à norma IEC 61000-3-2.

Lâmpada	Resultado
L1	Atende
L2	Atende
L3	Atende
L4	Não atende para $h = 29$
L5	Não atende para todos h
L6	Não atende, exceto para $h = 5, 7$ e 29
L7	Não atende para todos h
L8	Não atende para $h = 11$
L9	Não atende para todos h

harmônicas obtidas através das medições para a lâmpada L9, considerando seu elevado nível de distorção harmônica total. É possível observar que a amplitude das harmônicas é superior a, no mínimo, duas vezes o limite estabelecido pela norma para todas as componentes consideradas.

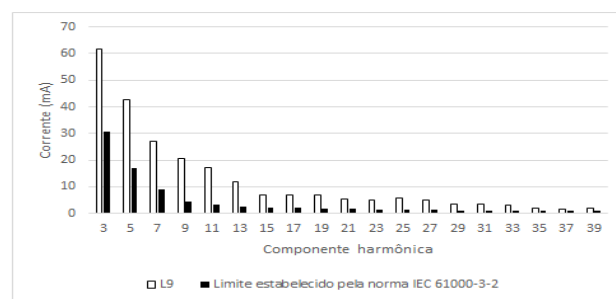


Figura 8. Análise das componentes harmônicas da lâmpada L9 em relação aos limites da norma IEC 61000-3-2.

3.3 Resultados do modelo computacional

Resultados das simulações de lâmpadas individuais Nas simulações das fontes geradoras de harmônicas, foram obtidos os valores de distorção harmônica total e fator de potência apresentados na Tabela 5 para cada lâmpada. Os resultados obtidos são relevantes para validar o modelo computacional, considerando a boa aproximação em comparação com os resultados das medições e cálculos previamente realizados.

Tabela 5. Resultados da simulação para DHTi e fator de potência.

Lâmpada	DHTi(%) Simulado	DHTi(%) Calculado	fp Simulado	fp Calculado
L1	12,47	12,46	0,989	0,989
L2	23,11	23,10	0,972	0,972
L3	18,98	18,98	0,976	0,976
L4	32,80	32,79	0,948	0,948
L5	110,50	110,51	0,670	0,670
L6	67,43	67,49	0,799	0,798
L7	93,72	93,78	0,669	0,669
L8	24,48	24,47	0,970	0,970
L9	116,70	116,78	0,631	0,631

Em relação às formas de onda de corrente obtidas pela simulação e as formas de onda medidas com osciloscópio. Conforme o exemplo apresentado na Figura 9 para a lâmpada L9 (maior conteúdo harmônico), observa-se uma boa similaridade entre as mesmas, assegurando que o modelo

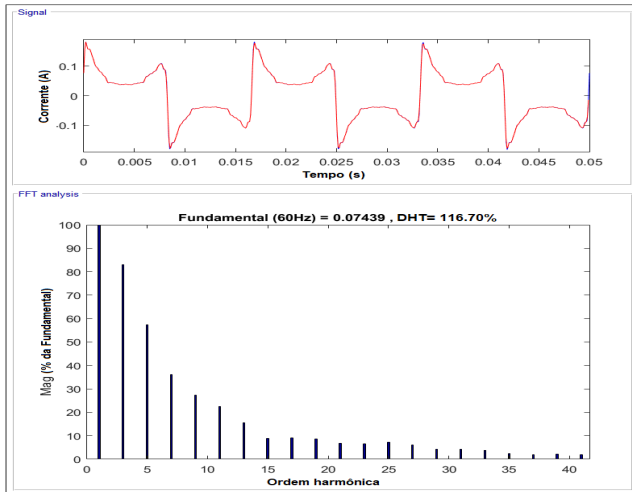


Figura 9. Forma de onda da corrente e espectro harmônico da lâmpada L9.

computacional proposto reflete com boa aproximação os resultados obtidos através das medições.

A partir da Equação 4, foram especificados valores de capacitores e indutores para mitigação dos harmônicos das lâmpadas, conforme apresentado na Tabela 6. Assumindo um valor de capacitor de $100\mu F$, os valores de indutância foram calculados a partir da frequências de cada componente harmônico até a 41ª ordem.

Tabela 6. Valores dos componentes dos filtros para cada ordem de harmônico

Harmônico	Frequência (Hz)	Capacitor (μF)	Indutor (mH)
3	180	100	7,82
5	300	100	2,81
7	420	100	1,44
9	540	100	0,869
11	660	100	0,582
13	780	100	0,416
15	900	100	0,313
17	1020	100	0,243
19	1140	100	0,195
21	1260	100	0,160
23	1380	100	0,133
25	1500	100	0,113
27	1620	100	0,0965
29	1740	100	0,0837
31	1860	100	0,0732
33	1980	100	0,0646
35	2100	100	0,0574
37	2220	100	0,0514
39	2340	100	0,0463
41	2460	100	0,0419

Através da simulação das fontes geradoras de harmônicas com a inclusão de filtros passivos LC's sintonizados até a 41ª ordem, foram obtidos os valores de DHTi e de fator de potência apresentados na Tabela 7. Observa-se redução considerável em todas as distorções harmônicas, com valores de $DHTi$ abaixo de 0,2 % e valores de fator de potência maior que 0,96 para todas as lâmpadas.

Com a incorporação dos filtros passivos LC's sintonizados até a 41ª ordem de harmônicas, a forma de onda de corrente de cada lâmpada se aproximou de uma senoide,

Tabela 7. Resultados da simulação para DHTi e Fator de Potência com inclusão de filtros passivos LC.

Lâmpada	DHTi(%)	Fator de Potência
L1	0,07	0,996
L2	0,07	0,997
L3	0,05	0,992
L4	0,05	0,997
L5	0,08	0,997
L6	0,19	0,962
L7	0,06	0,970
L8	0,05	0,998
L9	0,14	0,969

indicando a redução do conteúdo harmônico, conforme exemplificado na Figura 10 para a lâmpada L9.

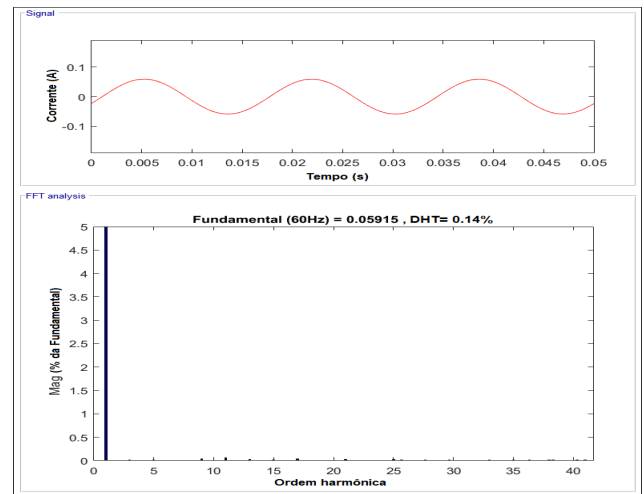


Figura 10. Forma de onda da corrente e espectro harmônico da lâmpada L9 com a inserção de filtro passivo LC.

Resultados das simulações com combinações de lâmpadas

Diante da boa aproximação dos resultados das medições/cálculos com os valores obtidos utilizando a ferramenta computacional, foram realizadas simulações adicionais considerando as combinações de diferentes lâmpadas e identificados os seis casos mais críticos em relação ao conteúdo harmônico gerado e fator de potência. A Tabela 8 apresenta os resultados das combinações mais críticas, com e sem a inserção dos filtros passivos LC's. No pior cenário, ou seja, a combinação das lâmpadas L5 e L9 sem filtro, a distorção harmônica total (DHTi) é de 114,5% para um fator de potência (fp) igual a 0,648. Os filtros implementados para as demais combinações também foram efetivos na mitigação dos harmônicos e, conseqüentemente, resultaram em aumento do fator de potência.

Tabela 8. Resultados das simulações para combinações mais críticas.

Combinações	DHTi(%)		fp	
	sem filtro	sem filtro	com filtro	com filtro
L5/L9	114,50	0,648	0,13	0,987
L5/L9/L7	109,20	0,657	0,11	0,995
L9/L7	108,70	0,646	0,13	0,982
L5/L6/L9	103,80	0,680	0,11	0,990
L5/L7	102,40	0,680	0,12	0,994

A forma de onda da corrente e o espectro harmônico da combinação mais crítica são mostrados na Figura 11.

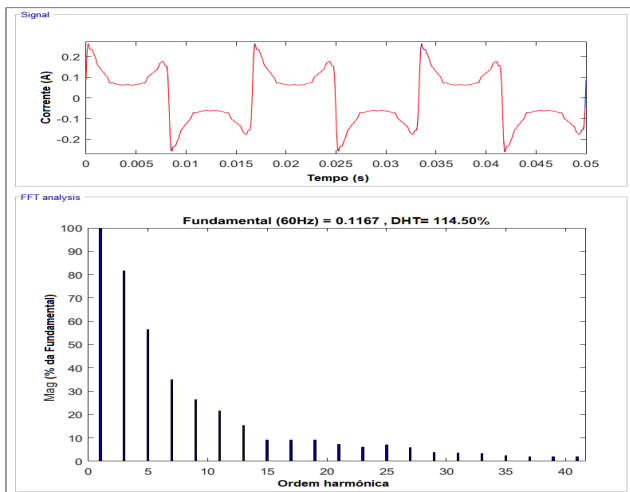


Figura 11. Forma de onda da corrente e espectro harmônico da combinação de lâmpadas L5/L9 sem filtro LC.

Com a inclusão dos filtros passivos LC's sintonizados até a 41ª ordem harmônica na simulação da combinação da L5 com a L9 foi obtida uma distorção harmônica de 0,13 % e o fp igual a 0,987. A forma de onda da corrente e espectro harmônico estão apresentados na Figura 12. Nota-se a efetividade dos filtros na redução da distorção harmônica, resultando em uma forma de onda mais próxima de uma senoide.

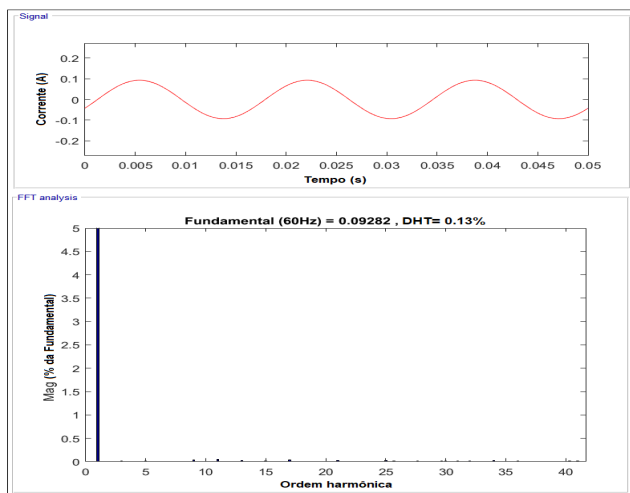


Figura 12. Forma de onda da corrente e espectro harmônico da combinação de lâmpadas L5/L9 com filtro LC.

A Tabela 9 apresenta o comparativo entre o resultado da combinação mais crítica obtida através da simulação sem filtros passivos com o resultado obtido através do experimento de um sistema de iluminação realizado em laboratório. Observa-se uma boa aproximação entre os resultados computacionais e experimentais, tanto para a distorção harmônica quanto para o fator de potência.

4. CONCLUSÃO

As lâmpadas LED são dispositivos que afetam diretamente a qualidade da energia elétrica em função do significativo

Tabela 9. Resultado da combinação mais crítica obtida experimentalmente e através da simulação.

Combinações	DHTi(%)		fp	
	Experim.	Experim.	Simulada	Simulada
L5/L9	115,02	0,643	114,50	0,648

conteúdo harmônico gerado, o qual ficou evidenciado nas medições realizadas previamente à implementação do modelo computacional, não atendendo os limites normativos em alguns casos. Através do modelo computacional proposto, foi possível avaliar diferentes cenários de operação de um sistema de iluminação com lâmpadas LED de diferentes fabricantes e identificar as combinações com maior nível de distorção harmônica e, conseqüentemente, menor fator de potência. O modelo computacional possibilita uma análise dinâmica, simulando cenários e avaliando a resposta de filtros passivos. Para o pior caso de combinação de lâmpadas (L5 e L9), foi obtido um nível de distorção harmônica de 114,5% com fator de potência de 0,648. Com a inserção dos filtros, a distorção harmônica desta combinação de lâmpadas foi reduzida para valores abaixo de 0,2% e o fator de potência obtido foi de 0,987, atendendo a norma IEC 61000-3-2 e a portaria nº 389 do INMETRO.

Em trabalhos futuros, os autores visam aplicar a metodologia proposta neste artigo em sistemas reais de iluminação para fins de comparação dos resultados de distorção harmônica e fator de potência obtidos computacionalmente com resultados experimentais, identificando cenários críticos de operação e propondo soluções para mitigação dos efeitos do conteúdo harmônico sobre as instalações elétricas e lâmpadas. A análise computacional proposta pode ser aplicada a outros tipos de cargas, contribuindo com uma análise mais abrangente da distorção harmônica e soluções para mitigação dos seus efeitos.

REFERÊNCIAS

- Cattaneo, M.M., Pacheco, R.S., and Chinazzo, T. (2017). *Análise dos harmônicos em lâmpadas LED disponíveis no Brasil*. Master's thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Epsma (2018). European power supply manufacturers association. harmonic current emissions: Guidelines to the standard in 61000-3-2. *EPSMA, jul. 2018*.
- Gonzalez, M.L., Silva, M.M., Althoff, F., and Silva, S.R. (2012). Distorções harmônicas geradas por algumas cargas não lineares com tensões senoidais. *IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 1–6.
- Iagar, A., Popa, G.N., and Dinis, C.M. (2014). The influence of home nonlinear electric equipment operating modes on power quality. *WSEAS Transactions on Systems*, 13, 357–367.
- Inmetro (2014). 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*.
- Mendonça, G.L.M.T. (2013). *Correntes Harmônicas em Lâmpadas Compactas – Sistema de Aquisição e Processamento de Sinal e Impacto nas Instalações Elétricas*. Master's thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa.