

COMPARAÇÃO DE CONVERSORES CC-CC PARA APLICAÇÃO NA ILUMINAÇÃO PÚBLICA COM LEDS DE ALTA POTÊNCIA

ANTONIO G. T. JÚNIOR*, MARCÍLIO A. F. FEITOSA**, MARCELO C. CAVALCANTI*

*PPGEE- Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - UFPE**

Avenida da Arquitetura, s/n Cidade Universitária 50740-550 - Recife-PE-Brasil

*PPTE- Programa de Pós-Graduação em Tecnologia em Energia da Escola Politécnica - UPE***

Rua Benfca no. 455, Madalena 50720-001 - Recife-PE-Brasil

E-mails: agoncalvesgct@gmail.com, marcilio@poli.br, marceloccalcanti@ufpe.br

Abstract— Public lighting with high power LEDs is getting more importance nowadays, but until now it shows several problems, mainly related to electrical circuit of driver (DC-DC converter). This converter presents less life time compared with LED lamp, high cost and low efficiency. With purpose to improve converter performance related to these problems and afterwards to propose a new model, differents converters types were analised with simulations and comparisions between them. The analised configurations were the following types: Buck, Boost and Flyback, with differents arrangements. In these simulations it was decided to study the following electrical characteristics with more importance for these equipments: Power factor, harmonic distortion, output current ripple, output voltage ripple and efficiency.

Keywords— Converters CC-CC, power factor, harmonic distortion, out current ripple, out voltage ripple, efficiency, public lighting, high power LED lamps.

Resumo— A iluminação pública com LEDs de alta potência vem ganhando mais importância a cada dia, mas ainda apresenta diversos problemas, principalmente relacionados ao circuito driver (conversor CC-CC). Esse conversor apresenta vida útil inferior à lâmpada LED, custo elevado e baixa eficiência. Visando melhorar o seu desempenho nesses pontos e posteriormente propor um novo modelo de conversor, diferentes tipos de conversores foram analisados através de simulações e comparados entre si. As configurações analisadas foram as Buck, Boost e Flyback, com diferentes formatações. Nessas simulações foram alvo de estudo as características elétricas mais importantes para tais conversores: Fator de potência, distorção harmônica, ripple de corrente de saída, ripple de tensão de saída e eficiência.

Palavras-chave— Conversor CC-CC, fator de potência, distorção harmônica, ripple de corrente de saída, ripple de tensão de saída, eficiência, iluminação pública, lâmpadas LED de alta potência.

1 Introdução

Em função da maior durabilidade e maior eficiência das lâmpadas LED em relação à maioria das lâmpadas existentes no mercado (incandescentes, fluorescentes, luz mista, vapor de mercúrio e vapor metálico), as luminárias LED estão sendo usadas com grande vantagem na iluminação pública. Essas luminárias montadas com lâmpadas LED utilizam o driver (Conversor CC-CC), com a finalidade de alimentar as lâmpadas com corrente contínua e tensão adequada, em função da carga total da luminária. Considera-se que esse conversor apresenta uma durabilidade, em sua melhor condição, de aproximadamente 50% da vida útil das lâmpadas LED (Leotek, 2017) (Superled, 2017) (JL Iluminação, 2017). Dessa forma, levando em consideração essa baixa durabilidade (Garcia et al., 2009) (Luo et al., 2009) (Chen et al., 2016), verifica-se como oportunidade o desenvolvimento de conversores com melhor performance para o mercado. Outro ponto a ser melhorado nesses conversores, e mais complexo, corresponde à sua baixa eficiência (Long, 2008). Dessa forma estão sendo realizadas simulações, via Simulink, em diversos conversores, com foco inicial nos conversores Buck, Boost, Flyback e suas derivações (Mohan, 1995). Esses resultados de simulação estão sendo comparados, com o objetivo de conseguir os melhores resultados possíveis, entre os referidos converso-

res. Os melhores resultados são: maior eficiência (baixas perdas), baixo custo para o mercado e atendimento às normas da iluminação pública quanto aos requisitos de fator de potência e distorção harmônica (Aneel, 2010) (ABNT, 2012). Vale ressaltar que a avaliação comparativa de custo não foi considerada nesse artigo por não ser o foco dessa pesquisa. O trabalho será dividido em três partes:

- Estudo comparativo entre os conversores Buck, Boost e Flyback, sem controle do fator de potência, e com utilização de um filtro capacitivo após ponte retificadora, visando reduzir o ripple, para alimentação da luminária LED de 112 W.
- Estudo comparativo entre os conversores Buck, Boost e Flyback, com o controle do fator de potência (PFC), e sem o filtro capacitivo, visando principalmente reduzir a distorção harmônica (THD).
- Estudo comparativo entre conversores Buck ambos com controle do fator de potência (PFC), sendo o primeiro com filtro capacitivo, e o segundo sem.

2 Metodologia

Uma decisão importante foi à escolha da luminária LED de 112 W. Foi necessária uma avaliação minuciosa, para escolha da luminária mais adequada, entre diversos tipos existentes na literatura, e no

mercado. A luminária LED de 112 W é composta por 112 LEDs de 1,0 W, com aletas difusoras posicionadas horizontalmente, em substituição às aletas verticais de outras luminárias, trazendo o seguinte benefício: Temperatura máxima nas aletas e base de 45°C, contra 61,7°C de temperatura máxima da luminária com aletas verticais, tendo com base em ambos os casos a temperatura ambiente de 25°C. Essa redução significativa de temperatura nas aletas e base, trás como vantagem redução da mesma temperatura na junção dos LEDs, gerando maior extração óptica (maior fluxo luminoso) e maior tempo de vida. A potência de 112 W para a luminária LED corresponde a uma potência média, a qual pode ser usada em ruas principais e secundárias, dependendo da distribuição dos postes no projeto luminotécnico. Como primeiro exemplo pode ser citado para ruas secundárias, postes individuais com apenas uma luminária de 112 W (1 pétala). Como segundo exemplo, considerando ruas principais, pode ser citada iluminação unilateral com 2 luminárias de 112 W por poste (2 pétalas em cada poste perfazendo 224 W). Para os exemplos citados, pode-se considerar uma distância média entre postes de 35 m, e altura útil das luminárias no poste de 8 m (variáveis do projeto luminotécnico), desde que atenda a iluminância da via, conforme norma NBR-5101/2012. Portanto diversos arranjos podem ser realizados com a luminária de 112 W, desde que sejam utilizadas pétalas por poste (pétalas com 1, 2, 3 ou 4 luminárias), aumentando significativamente a sua aplicação.

Foram realizadas várias simulações, com foco inicial nos conversores Buck, Boost e Flyback e suas derivações. Uma derivação importante foi a utilização ou não de filtro capacitivo após a ponte retificadora, influenciando significativamente nos resultados obtidos. A segunda importante variação nos circuitos simulados foi realizada com a inclusão ou não do controle do fator de potência (PFC). Com essa alteração, foram gerados resultados bem diferentes nas características elétricas desses conversores. A terceira alteração possível nos circuitos analisados foi quanto à conexão entre os 112 LEDs de 1,0 W, na luminária, com possibilidades de ligação série/paralelo ou somente ligação em série. Dessa forma foi detectada a tensão correta para aplicação na luminária, com diferenciação entre os conversores Book, Boost e Flyback. Com o objetivo de obter a tensão de saída do conversor em aproximadamente 48V, optou-se pela ligação em série/paralelo (07 ramais de 16 LEDs de 1,0 W em série, ligados em paralelo), para os conversores Buck e Flyback. Para esses dois circuitos foi considerada uma redução da tensão de saída, em comparação com tensão de pico após retificação, ou seja, circuitos abaixadores de tensão. Para o circuito com conversor Boost, utilizou-se uma ligação em série dos 112 LEDs de 1,0 W, gerando uma tensão de saída superior à tensão de pico após retificação. Para esse caso, consideramos esse circuito como elevador de tensão.

Para todas as simulações realizadas, foi utilizado o software Matlab/Simulink, referência R2015b. O

uso desse software possibilitou após ajustes da potência final da luminária LED para 112 W, a obtenção dos gráficos e consequentemente dos resultados das características elétricas principais dos conversores envolvidos. As características envolvidas foram as seguintes: fator de potência, distorção harmônica, percentual do ripple de corrente na saída, percentual do ripple de tensão na saída e a eficiência do conversor. O percentual do ripple de corrente de saída é dado por

$$\%Ripple_{I_o} = \frac{\Delta I_o}{I_o} \times 100, \quad (1)$$

onde ΔI_o é a variação da corrente de saída (*ripple*) e I_o é a corrente de saída do conversor. O percentual do ripple de tensão de saída é dado por

$$\%Ripple_{V_o} = \frac{\Delta V_o}{V_o} \times 100, \quad (2)$$

onde ΔV_o é a variação da tensão de saída (*ripple*) e V_o é a tensão de saída do conversor. A eficiência do conversor é dada por

$$\eta = \frac{V_o I_o}{P_{in}} \times 100, \quad (3)$$

onde P_{in} é a potência de entrada do conversor.

Esses parâmetros foram analisados e escolhidos porque representam as características elétricas principais dos circuitos estudados, influenciando nos resultados finais a se obter. Os resultados finais obtidos influenciam diretamente nos objetivos finais que se deseja para o conversor, ou seja: vida mais longa, maior extração óptica (fluxo luminoso), maior eficiência, e um possível custo competitivo.

3 Estudo comparativo entre os conversores

3.1 Buck/Boost/Flyback sem o controle do fator de potência PFC e com filtro capacitivo após retificação

Os circuitos elétricos dos referidos conversores, submetidos à simulação, via Simulink, são os seguintes:

a) Circuito elétrico do conversor Buck para luminária LED de 112 W, sem controle do fator de potência, e com filtro capacitivo após retificação, conforme apresentado na Figura 1.

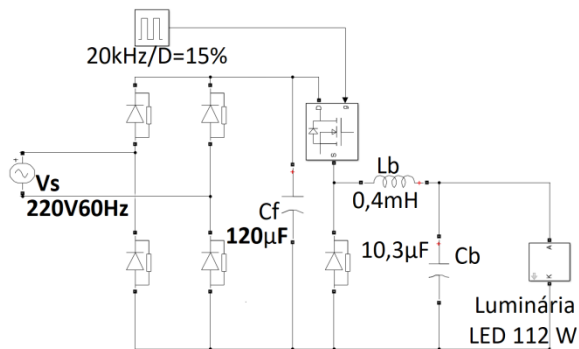


Figura 1. Circuito elétrico do conversor Buck para luminária LED de 112 W, conforme item “a”.

Na Figura 2 estão apresentadas as formas de onda da tensão e da corrente de entrada desse circuito.

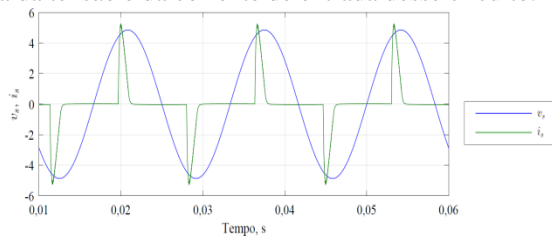


Figura 2. Formas de onda da tensão e corrente de entrada do conversor Buck para luminária LED 112 W sem PFC.

Na Figura 3 estão apresentadas as formas de onda da tensão e da corrente de saída desse circuito.

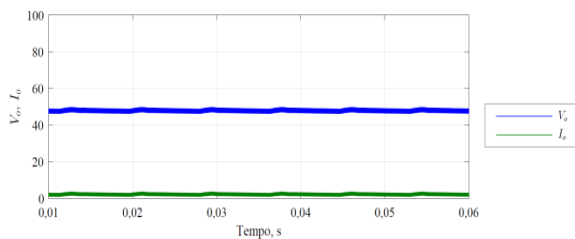


Figura 3. Formas de onda da tensão e corrente de saída do conversor Buck para luminária LED 112 W sem PFC

Esse circuito elétrico alimenta a luminária LED de 112 W, com medições de corrente e tensão de saída. Possui filtro passa-baixa, da concepção Buck, com diodo e chave mosfet com comando PWM, antes do filtro. Apresenta filtro capacitivo antes da ponte retificadora, e fonte de alimentação 220 V / 60 Hz, com medições de corrente e tensão de entrada.

b) Circuito elétrico do conversor Boost com luminária LED de 112 W, sem controle do fator de potência, e com filtro capacitivo após retificação, conforme mostrado na Figura 4.

Esse circuito elétrico alimenta a luminária LED de 112 W, com medições de corrente e tensão de saída, possui a formatação Boost, com chave mosfet com comando PWM. Usa filtro capacitivo após a ponte retificadora, e alimentação 220 V / 60 Hz, com medições de corrente e tensão de entrada.

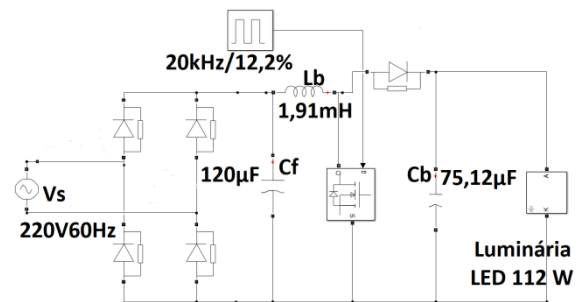


Figura 4. Circuito elétrico do conversor Boost com luminária LED de 112 W, conforme item “b”.

c) Circuito elétrico do conversor Flyback, para luminária LED de 112 W, sem controle do fator de potência, e com filtro capacitivo após ponte retificadora, conforme mostrado na Figura 5.

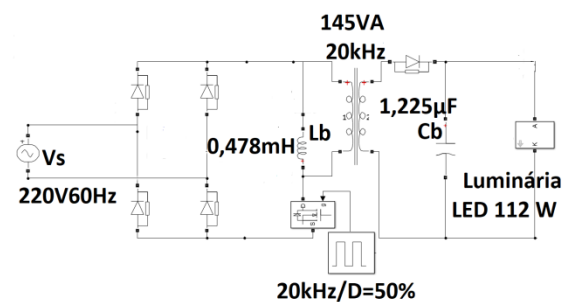


Figura 5. Circuito elétrico do conversor Flyback para luminária LED de 112 W, conforme item “c”.

Esse circuito alimenta a luminária LED de 112 W, com medições de corrente e tensão de saída. Apresenta a concepção flyback, com autotransformador isolando a saída, chave mosfet com comando PWM, ligada à indutância de magnetização. Usa filtro capacitivo antes da ponte retificadora, com alimentação 220 V / 60 Hz.

Os resultados obtidos com essas simulações estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Tabela comparativa entre os conversores Buck/Boost/Flyback, sem controle PFC, e com filtro capacitivo após retificação, para luminária LED de 112 W.

Características do driver	Conversor Buck Com Luminária LED 112 W	Conversor Boost Com Luminária LED 112 W	Conversor Flyback Com Luminária LED 112 W
Fator de Potência	0,975	0,975	0,975
Distorção Harmônica THD	109,58%	120,87 %	92,76 %
Ripple da Corrente de Saída	106,9 %	7,17 %	192,0 %
Ripple da Tensão de Saída	7,27 %	1,02 %	21,5%
Eficiência	73,8 %	71,9 %	70,4 %

Com relação ao fator de potência, pode-se observar na Tabela 1, que o valor obtido na simulação dos três conversores foi o mesmo. Esse valor está aprovado para iluminação pública, que exige um valor mínimo de 0,92, conforme Resolução Normativa ANEEL nº 414/2010 (capítulo VIII / Secção IV/ Artigo 95).

Para a segunda característica “Distorção Harmônica (THD)”, os três resultados são muitos elevados. Para o conversor Buck com luminária LED de 112 W, o THD obtido foi de 109,58%. Para o conversor Boost com luminária LED de 112 W, o THD foi de 120,87%. Para o conversor Flyback para luminária LED de 112 W, o THD obtido foi de 92,76%. Para esses três conversores, não haverá possibilidade de aplicação na Iluminação Pública, pois o valor máximo aceitável é de $THD < 20\%$.

Para a terceira característica “Ripple de Corrente de Saída”, obtivemos um resultado excelente no conversor Boost, com ripple de 7,17%, pois até 10% esse ripple pode ser considerado muito bom. Para os demais conversores o ripple obtido foi muito elevado (106,9% no conversor Buck e 192,0% no conversor Flyback). De qualquer forma não existe impedimento para uso na iluminação pública, com esses valores, embora aumente o consumo do conversor reduzindo a sua eficiência.

Para a quarta característica, “Ripple de Tensão de Saída”, os resultados obtidos, foram considerados entre excelente e razoável. O resultado desse ripple no conversor Buck para luminária LED de 112 W, foi de 7,27%, o qual considera-se excelente, porque ficou abaixo de 10%. Para o conversor Boost com luminária LED de 112 W, o ripple de tensão ficou em 1,02%, e, portanto um resultado também excelente, quando comparado com 10%. Para o conversor Flyback com luminária LED de 112 W, o resultado de 21,5%, está sendo considerado apenas razoável, porque ficou acima de 10% e não muito distante desse último valor. Os baixos valores do ripple de tensão foram influenciados pelo filtro capacitivo após retificação, nesses conversores.

A quinta e última característica incluída na tabela “Eficiência”, resultou em valores próximos para os três conversores, e da ordem superior a 70%. Para o conversor Buck com luminária LED de 112 W, a eficiência obtida foi de 73,8%, considerada a maior entre os três conversores comparados. Para o conversor Boost com luminária LED de 112 W, obteve-se uma eficiência de 71,9%, considerada um valor intermediário entre os três conversores comparados. Finalmente para o conversor Flyback com luminária LED de 112 W, a eficiência obtida foi de 70,4%, sendo considerada a menor entre os três conversores comparados. Esses valores de eficiência obtidos foram considerados bons e devem ser indicados para uso.

3.2 Controle PFC

A estratégia do controle do fator de potência PFC (Cheng et al., 2013) adotada pode ser vista na Figura 6. Note que existem duas malhas de controle: a primeira com referência externa de tensão V_{ref} , e a segunda com referência interna. A malha de controle de tensão utiliza um filtro passa baixas de segunda ordem (Kanaan et al., 2012) na tensão de saída do conversor V_o como sinal de realimentação. A malha de tensão utiliza um controlador proporcional inte-

gral (PI). A saída do PI multiplicada pela tensão de entrada V_{in} , apropriadamente adequada por um fator de escala, gera a referência interna para a malha de corrente, realimentada pela corrente do indutor i_{Lb} . A malha de corrente utiliza um controlador por histerese, cuja saída aciona o gatilho da chave semicondutora.

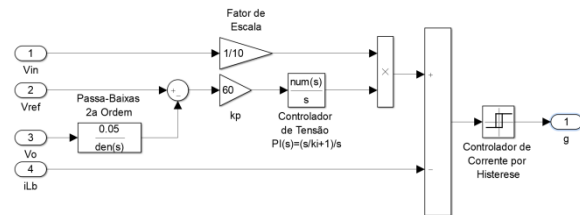


Figura 6. Controle do Fator de Potência PFC.

3.3 Buck/Boost/Flyback com o controle do fator de potência PFC e sem filtro capacitivo após retificação

Os circuitos elétricos dos referidos conversores, submetidos à simulação, via Simulink, são os seguintes:

a) Circuito elétrico do conversor Buck para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência, e sem o filtro capacitivo após retificação, conforme mostrado na Figura 7.

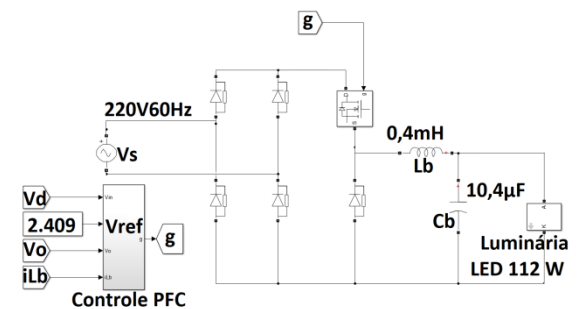


Figura 7. Circuito elétrico do conversor Buck para luminária LED de 112 W, conforme item “a”.

Na Figura 8 estão indicadas as formas de onda da tensão e corrente de entrada desse circuito, com as escalas adaptadas para comparação. Na Figura 9 estão indicadas as formas de onda da tensão e corrente de saída desse circuito elétrico.

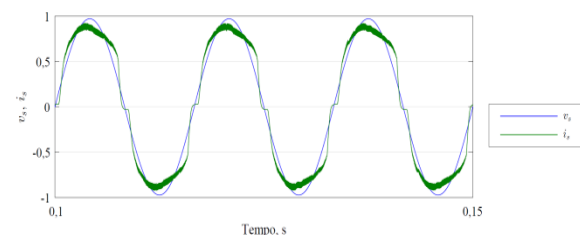


Figura 8. Formas de onda da tensão e corrente de entrada para o conversor Buck com luminária LED de 112 W.

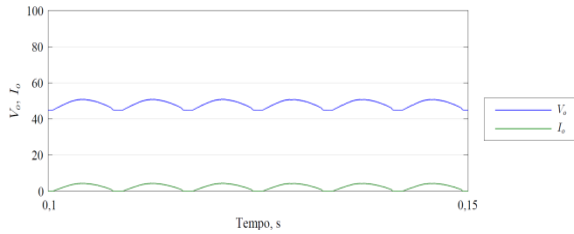


Figura 9. Formas de onda da tensão e corrente de saída para o conversor Buck com luminária LED de 112 W.

Esse circuito elétrico alimenta a luminária LED de 112 W, com medições de corrente e tensão de saída. Apresenta a configuração Buck com o filtro passa-baixa. Utiliza chave mosfet após filtro, conectada com o controle do fator de potência, com quatro entradas (tensão de referência V_{ref} / tensão de saída após retificação V_d / tensão de saída na luminária LED V_o / Corrente no indutor I_{lb}). O valor ajustado da tensão de referência V_{ref} , foi de 2,409 V, obtendo-se uma tensão de saída V_o igual a 47,864 V, com uma potência de saída ajustada P_o de 112 W. Utiliza ponte retificadora e fonte de alimentação 220 V / 60 Hz, com medições de corrente e tensão de entrada. Não utiliza filtro capacitivo após a ponte retificadora.

b) Circuito elétrico do conversor Boost para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência, e sem o filtro capacitivo após retificação, conforme apresentado na Figura 10.

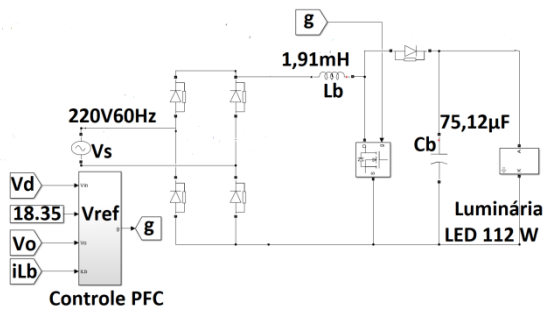


Figura 10. Circuito elétrico do conversor Boost para luminária LED de 112 W, conforme item “b”.

Esse circuito elétrico alimenta a luminária LED de 112 W, com medições de corrente e tensão de saída. Apresenta a configuração Boost, com chave mosfet conectada ao controle do fator de potência (PFC), com quatro entradas (tensão de referência V_{ref} / tensão de entrada V_d / tensão de saída V_o / corrente no indutor I_{lb}). A tensão de referência V_{ref} foi ajustada para 18,35 V, obtendo-se uma tensão de saída V_o de 367,21 V, para uma potência de saída ajustada P_o de 112 W. Utiliza ponte retificadora e fonte de alimentação 220 V / 60 Hz, com medições de corrente e tensão de entrada. Não utiliza filtro capacitivo após ponte retificadora.

c) Circuito elétrico do conversor Flyback para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência, e sem o filtro capacitivo após retificação, conforme mostrado na Figura 11.

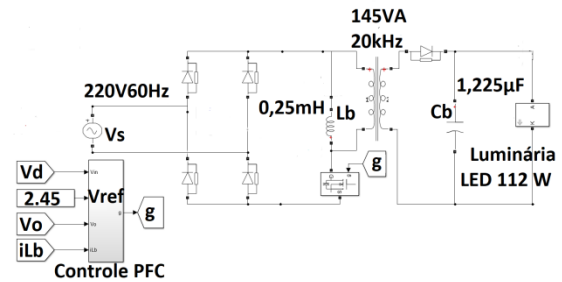


Figura 11. Circuito elétrico do conversor Flyback para luminária LED de 112 W, conforme item “c”.

Esse circuito elétrico alimenta a luminária LED de 112 W com medições de corrente e tensão. Apresenta a configuração Flyback com transformador isolando a saída, e com chave mosfet conectada no indutor de magnetização. No controle do fator de potência (PFC), apresenta quatro saídas (tensão de referência V_{ref} / tensão de entrada após retificação V_d / tensão de saída V_o / corrente no indutor I_{lb}). A tensão de referência V_{ref} foi ajustada para 2,45 V, obtendo-se uma tensão de saída V_o igual a 50,2045 V, para uma potência de saída ajustada P_o de 112 W. Apresenta fonte de alimentação 220 V / 60 Hz, com medições de corrente e tensão de saída.

Os resultados obtidos com essas simulações estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Tabela comparativa entre os conversores Buck, Boost e Flyback, para luminária LED de 112 W, conforme item 3.2.

Características do driver	Conversor Buck PFC Com Luminária LED 112 W	Conversor Boost PFC Com Luminária LED 112 W	Conversor Flyback PFC Com Luminária LED 112 W
Fator de Potência	0,963	0,977	0,964
Distorção Harmônica THD	15,89%	16,16 %	19,76 %
Ripple da Corrente de Saída	174,0 %	29,9 %	194,0 %
Ripple da Tensão de Saída	12,7 %	4,4 %	21,6%
Eficiência	74,6 %	72,0 %	57,2 %

Para a primeira característica “Fator de Potência”, os resultados obtidos foram os seguintes: a) 0,963 para o conversor Buck com luminária LED de 112 W; b) 0,977 para o conversor Boost para luminária LED de 112 W; c) 0,964 para o conversor Flyback para luminária LED de 112 W. Para os três casos, a aplicação na iluminação pública é viável, porque atende a Resolução nº 414/2010 (Capítulo VIII / Seção IV / Artigo 95), que define 0,92 como o fator de potência mínimo na iluminação pública. Esses valores foram ajustados pelo controle do fator de potência (PFC).

Para a segunda característica “Distorção Harmônica (THD)”, os valores obtidos foram os seguintes: a) 15,89% para o conversor Buck para luminária LED de 112 W; b) 16,16% para o conversor Boost para luminária LED de 112 W; c) 19,76% para o conversor Flyback com luminária LED de 112 W.

Para os três valores obtidos, todos atendem às necessidades da iluminação pública, ou seja, THD < 20%. Portanto nesse aspecto, esses conversores podem ser usados na iluminação pública. Esses baixos valores de THD foram obtidos pelo controle do fator de potência (PFC), associado com a não utilização do capacitor após retificação.

Para a terceira característica “Ripple de Corrente de Saída”, os valores obtidos foram os seguintes: a) 174,0% no conversor Buck com luminária LED de 112 W; b) 29,9% para o conversor Boost com luminária LED de 112 W; c) 194,0% para o conversor Flyback com luminária LED de 112 W. Portanto os valores dos conversores Buck e Flyback apresentaram valores muito elevados causando maior perda no conversor e prejudicando a sua eficiência, porém podem ser usados. Para o Conversor Boost, o ripple de 29,9% é considerado apenas regular, também podendo ser usado.

Para a quarta característica “Ripple de Tensão da Saída”, os valores obtidos foram os seguintes: a) 12,7% no conversor Buck para luminária LED de 112 W; b) 4,4% no conversor Boost para luminária LED de 112 W; c) 21,6% no conversor Flyback para luminária LED de 112 W. O valor do ripple do conversor Boost é considerado excelente porque ficou abaixo de 10%. O valor do ripple do Conversor Buck, é considerado muito bom, porque ficou um pouco acima de 10%. O valor do ripple do conversor Flyback foi considerado apenas regular, e acima de 10%. Portanto esses resultados são adequados para uso.

Para a quinta característica, “Eficiência”, os valores obtidos foram os seguintes: a) 74,6% para o conversor Buck com luminária LED de 112 W; b) 72,0% para o conversor Boost com luminária LED de 112 W; c) 57,2% para o conversor Flyback com luminária LED de 112 W. As eficiências dos conversores Buck e Boost são consideradas boas devendo ser indicadas para uso. A eficiência do conversor Flyback é baixa causando aumento no consumo do conversor, e devido a essa baixa eficiência, deve ser evitada o seu uso.

3.4 Buck com o controle do fator de potência PFC, com e sem filtro capacitivo após retificação.

Os circuitos elétricos dos referidos conversores, submetidos à simulação, via Simulink, são os seguintes:

a) Circuito elétrico do conversor Buck para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência, e sem filtro capacitivo após retificação, conforme mostrado na Figura 4 e detalhado imediatamente antes da Figura 4.

b) Circuito elétrico do conversor Buck para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência, e

com filtro capacitivo após retificação, conforme apresentado na Figura 12.

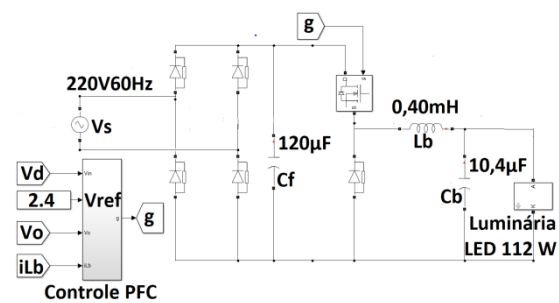


Figura 12. Circuito elétrico do conversor Buck para luminária LED de 112 W, conforme item “b”.

Esse circuito alimenta a luminária LED de 112 W, com medições de corrente e tensão de saída. Apresenta a configuração Buck com o filtro passa-baixa. Utiliza chave mosfet após o filtro, conectada com o controle do fator de potência (PFC), com quatro entradas (tensão de referência Vref / tensão de saída após retificação Vd / tensão de saída na luminária LED Vo / corrente no indutor Ilb). A tensão de referência Vref, foi ajustada para 2,4 V, obtendo-se uma tensão de saída Vo igual a 48,039 V, para uma potência de saída ajustada Po de 112 W. Utiliza filtro capacitivo após retificação, com medição de tensão. Utiliza ponte retificadora e fonte de alimentação 220 V / 60 Hz, com medições de tensão e corrente de entrada. Os resultados obtidos com essas simulações estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Tabela comparativa entre os conversores Buck conforme item 3.3.

Características do driver	Conversor Buck Com Luminária LED de 112 W com Controle PFC e sem Capacitor após Retificação	Conversor Buck Com Luminária LED de 112 W com Controle PFC e com Capacitor após a Retificação
Fator de Potência	0,963	0,974
Distorção Harmônica THD	15,89%	178,71 %
Ripple de Corrente de Saída	174,0 %	25,0 %
Ripple de Tensão de Saída	12,7 %	1,65%
Eficiência	74,6 %	69,8 %

Para a primeira característica “Fator de Potência”, os resultados obtidos foram os seguintes: a) 0,963 para o conversor Buck com luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência (PFC) e sem filtro capacitivo após retificação; b) 0,974 para o conversor Buck com luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência (PFC), e com filtro capacitivo após retificação.

Para os dois casos, a aplicação na iluminação pública é viável, porque atende à Resolução nº 414/2010 (Capítulo VIII / Seção IV / Artigo 95), que define 0,92 como o valor mínimo do fator de potência na iluminação pública. Esses valores foram ajustados pelo controle do fator de potência (PFC).

Para a segunda característica “Distorção Harmônica (THD)”. Os valores obtidos foram os seguintes: a) 15,89% para o conversor Buck para luminária

LED de 112 W, com controle do fator de potência e sem filtro capacitivo após a retificação; b) 178,71% para o conversor Buck com luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência, e com filtro capacitivo após retificação. Para os dois valores obtidos, apenas o item “a” atende às necessidades da iluminação pública com THD < 20%. Portanto nesse aspecto, apenas o conversor com controle do fator de potência e sem filtro capacitivo após retificação, atende ao requisito THD da iluminação pública. Esse baixo valor de THD, foi obtido com ajuda do controle do fator de potência, associado com a não utilização do capacitor após retificação.

Para a terceira característica “Ripple de Corrente de Saída” os resultados obtidos foram os seguintes: a) 174,0% para o conversor Buck com luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência (PFC), e sem filtro capacitivo após retificação; b) 25,0% para o Conversor Buck com Luminária LED de 112 W, com o controle do fator de potência (PFC), e com filtro capacitivo após retificação. Para o item “a”, consideramos esse ripple muito elevado, aumentando o consumo do conversor e reduzindo a sua eficiência, porém pode ser utilizado. Para o item “b”, considera-se apenas um ripple regular, podendo ser utilizado sem problemas.

Para a quarta característica “Ripple de Tensão de Saída”, os resultados obtidos foram os seguintes: a) 12,7% para o conversor Buck para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência (PFC), e sem filtro capacitivo após retificação; b) 1,65% para o conversor Buck para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência (PFC), e com filtro capacitivo após a retificação. Para o item “b”, o ripple encontrado é excelente, ou seja, inferior a 10% e deve ser utilizado sem problemas na iluminação pública. Para o item “a”, o ripple é muito bom, pois está próximo de 10% porém um pouco acima, podendo ser aplicado no mercado sem problemas.

Para a quinta característica “Eficiência”, os valores obtidos foram os seguintes: a) 74,6% para o conversor Buck para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência (PFC), e sem filtro capacitivo após retificação; b) 69,8% para o conversor Buck para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência (PFC), e com filtro capacitivo após a retificação. Para o item “a”, consideramos uma boa eficiência, e para o item “b” consideramos uma eficiência de regular para boa, ou seja, aproximadamente 70%. Para ambos os casos, os conversores podem ser utilizados na iluminação pública.

4 Conclusões

Este artigo apresentou como contribuição um estudo comparativo entre os diversos tipos de conversores (Buck, Boost e Flyback), proporcionando uma análise dos requisitos de desempenho (ABNT, 2012) (ANEEL, 2010). Foi considerado o “Conversor Buck para luminária LED de 112 W, com controle do fator de potência (PFC), e sem o filtro capacitivo após

retificação”, como o melhor conversor, em função dos resultados obtidos. Esses resultados são justificados pela inclusão do controlador PFC que regulou o Fator de Potência em 0,963, acima do valor mínimo regulamentado em 0,920 (ANEEL, 2010). Com o controlador PFC também se obteve uma distorção harmônica igual a 15,89%, atendendo à exigência da iluminação pública com THD \leq 20%. Isso também se deve ao fato da não inclusão do capacitor após retificação, obtendo-se uma menor distorção da forma de onda da corrente de entrada. O Ripple de Tensão de Saída obtido 12,7% é considerado um valor muito bom, pois está próximo de 10% com pequena perda, ajudando na eficiência. A Eficiência de 74,6% é considerada a maior eficiência entre todos os conversores apresentados, e para o mercado considera-se como uma boa eficiência. Evidentemente que novos artificios podem ser usados para diminuir o ripple de corrente, visando incrementar ainda mais à eficiência total desse conversor.

Referências Bibliográficas

- ABNT, 2012, Iluminação Pública – Procedimento. Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT NBR 5101(04/05/2012).
- ANEEL, 2010, Resolução Normativa nº 414 (09/09/2010), Capítulo VIII da Cobrança e do Planejamento (Seção IV do Fator de Potência e do Reativo Excedente / Artigo nº 95).
- Cheng, Chun-An & Cheng, Hung-Liang & Chung, Tsung-Yuan. (2013). A Novel Single-Stage High-Power-Factor LED Street-Lighting Driver With Coupled Inductors. Conference Record - IAS Annual Meeting (IEEE Industry Applications Society). 50. 1-7. 10.1109/IAS.2013.6682546.
- Chen, P. -Y., Pan, C. -T., and Liu, Y. -H. (2016) A long lifetime passive LED driver with power factor correction. Int. J. Circ. Theor. Appl., 44: 2058–2071. doi: 10.1002/cta.2210.
- Garcia, J and Calleja, A.J and Coraminas, E.L and Gacio, D and Ribas, J. (2009). Electronic Driver without Electrolytic Capacitor for Dimming High Brightness LEDs. Dept. of Electrical Engineering EEC-IEL Research Group, University of Oviedo, Asturias, SPAIN.
- JL – ILUMINAÇÃO, 2017, Ficha de Especificação Técnica Luminária Modular LED, tipo EXL 1006, para uso em iluminação Pública, composta com módulos com LED Lighting Class CREE. Atendimento @Loja JL.com.
- Kanaan, H. Y and Al-Haddad, K (19th June 2012). Modeling and multi-loop feedback control design of a SEPIC power factor correction in single-phase rectifiers. Saint – Joseph University, Faculty - of Engineering – ESIB, Mar Roukoz, Mkalles, P.B. 11-0514, Riad El-Solh, Beirut 1107 2050.
- Leotek, 2017, GreenCobra LED Street Light, GCL G-Series Specification Data Sheet, USA.

- Long, X and Liao, R and Zhou, J (29th march 2008). Development of street lighting system-based novel high-brightness LED modules. Physics Department, Choongging Normal University, Choongging 400044 Republic of China.
- Luo, X and Xiong, W and Cheng, T and Liu, S (12th May 2009). Temperature Estimation of high-power light emitting diode street lamp by a multi-cheap analytical solution. School of Energy and Power Engineering, Wuhan, Hubei 430074.
- Mohan, N and Undeland, T.M and Robbins, W.P (1995). POWER ELETRONICS – Converters, Applications and Design. Second Edition.
- Superled, 2017, Fichas de Especificação Técnica, Série COB, Série SL – LTN e Série AC, Brasil.