

CONTROLADORES DE LEDS PARA ILUMINAÇÃO COM COMUTAÇÃO DE BAIXA FREQUÊNCIA E ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA

Mateus O. Rabello¹

Nathalia S. Netto²

Pedro H.S Coelli³

Fernando J. Nogueira⁴

RESUMO

Este trabalho tem como objeto principal a avaliação teórica e experimental do uso de controladores comutados na frequência da rede elétrica aplicados ao acionamento de luminárias de iluminação pública (IP) empregando diodos emissores de luz (ou LEDs, do inglês *Light Emitting Diodes*). O estudo apresenta inicialmente uma breve revisão bibliográfica sobre controladores (ou *drivers*) para luminárias LED. Em seguida, é feita a modelagem matemática de um controlador de LEDs baseado no pré-regulador *boost* de elevado fator de potência comutado em baixa frequência (no dobro da frequência da rede, também conhecida como frequência industrial). Uma metodologia de projeto é apresentada sendo aplicada a uma luminária LED de 155 W, que é uma potência típica empregada em iluminação pública. Os resultados experimentais mostram que é possível alcançar elevado fator de potência (0,99), elevado rendimento (95%), reduzida taxa de distorção harmônica da corrente de entrada (10,2%) e obter conformidade com vários quesitos das normativas vigentes.

Palavra Chave: Conversor *Boost*, Controladores, Diodos Emissores de Luz, Eletrônica de Potência.

[1] Graduando em Engenharia Elétrica, voluntário, e-mail: mateusrabello5@gmail.com

[2] Graduando em Engenharia Elétrica, voluntário, e-mail: nathaliasouza@hotmail.com

[3] Graduando em Engenharia Elétrica, voluntário, e-mail: pedrocoelli@hotmail.com

[4] Professor Doutor em Engenharia Elétrica, orientador, e-mail: fernandonogueira@cesjf.br

1. INTRODUÇÃO

Os controladores de LEDs (*drivers*), utilizados para iluminação comumente em alta frequência, podem também ser modelados para atuarem em baixa frequência (DIAS, 2012; NOGUEIRA, 2017).

Esses *drivers*, estudados em eletrônica de potência, são circuitos denominados conversores. De maneira geral, são conversores eletrônicos de potência que têm por finalidade acionar os LEDs (diodos emissores de luz) em uma corrente elétrica definida, de valor médio constante e adequado para não causar aceleração da depreciação do fluxo luminoso emitido pelos LEDs. Fazem a interface entre a rede elétrica, de baixa frequência e tensão senoidal, e a carga formada pelos LEDs.

O conversor proposto no estudo foi um conversor CA-CC do tipo *boost* operando em baixa frequência. Esse conversor é capaz de alcançar um elevado fator de potência e uma reduzida distorção harmônica da corrente de entrada. Além disso, é um circuito que possui reduzido custo de montagem e fácil implementação experimental.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. CONCEITO E IMPORTÂNCIA DOS *DRIVERS* DE LUMINÁRIAS LEDS

As luminárias LED necessitam de um controlador eletrônico para adequar o nível da corrente de alimentação do conjunto de LEDs, uma vez que esses dispositivos são incapazes de regular a corrente quando conectados a rede elétrica (RODRIGUES, 2012). Esses controladores são conhecidos como *drivers* e podem, além de prover o correto funcionamento dos LEDs, incorporar uma série de outras funcionalidades à luminária (como possibilidade de dimerização, telecomunicação, telegerenciamento, etc.). Fazem a interface entre a rede elétrica, de baixa frequência e tensão senoidal, e a carga formada por um ou mais arranjos de LEDs, associados de maneira adequada (paralelo, série, série-paralelo, matricialmente etc.).

Em uma luminária LED, o driver é elemento de menor confiabilidade, por fazer uso de diversos componentes eletrônicos que estão sujeitos a falhas

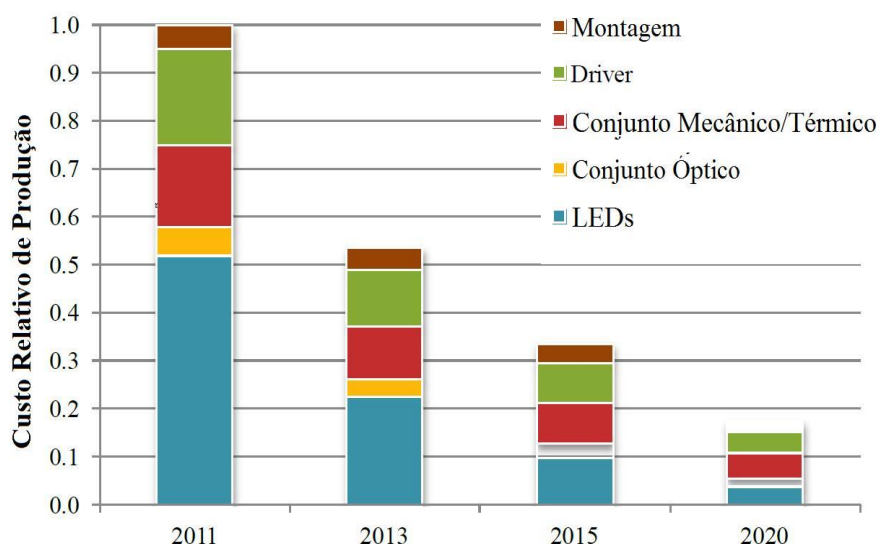
catastróficas e prematuras. Portanto, na construção de uma luminária LED, o tipo de driver escolhido deve ser robusto e confiável o bastante para que a luminária possa atingir o tempo de vida esperado da carcaça e do conjunto de LEDs, que como visto anteriormente, pode chegar a até 100.000 horas. Além disso, é desejável que o driver tenha elevada eficiência, uma vez que a eficiência de conversão do driver tem implicação direta na eficácia luminosa efetiva de uma luminária LED de iluminação pública (ALMEIDA, 2014).

Do ponto de vista da rede elétrica, o driver deve atender requisitos de qualidade de energia impostos por órgãos reguladores. Assim, esperasse que esses dispositivos tenham elevado fator de potência e reduzida distorção harmônica total da corrente de entrada ($THDi$) (RODRIGUES, 2012).

A importância do estudo de drivers também se dá pelo fato de ser um componente que ainda agrega valor considerável no custo de uma luminária LED. Como pode ser observado na Figura 1 (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012), o driver contribui atualmente com cerca de 20% do custo de produção de uma luminária LED. Além disso, é possível verificar que mesmo em projeções futuras, apesar de um menor custo relativo de produção se comparado aos dias atuais, os drivers ainda vão reter uma parcela considerável do custo total das luminárias.

Portanto, estudos que busquem desenvolver *drivers* de longa vida útil, elevada eficiência, elevado fator de potência e baixo custo de produção são de suma importância na área de iluminação de estado sólido.

Figura 1 – Projeção de queda de preço dos componentes básicos de uma luminária LED de iluminação.



Fonte: U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2012.

2.2. TIPOS DE *DRIVERS* DE LEDS

Dois tipos de circuitos têm sido comumente propostos na literatura para fazer o acionamento de luminárias LED, os *drivers* ativos e os *drivers* passivos.

Os modelos de *drivers ativos* são os mais utilizados porque permitem controlar a corrente que flui através dos LEDs. No entanto, costumam ser mais complexos pois utilizam interruptores em sua topologia.

Já os modelos de *drivers passivos* são circuitos mais simples, pois não utilizam interruptores controlados. Contudo, *drivers passivos* não possibilitam o controle da corrente através dos LEDs, que podem sofrer variações mediante perturbações na tensão de entrada ou na carga.

Dentro dos grupos dos *drivers ativos* para LEDs, há aqueles comutados em alta frequência (acima de 20 kHz) e os de baixa frequência, que têm o interruptor do seu conversor principal comutado no dobro da frequência da rede elétrica, em geral, 100 Hz ou 120 Hz. Os *drivers* de baixa frequência, que são tema principal desse artigo, possuem a vantagem de aliarem simplicidade, robustez, baixo custo de montagem e possibilidade de se obter elevado fator de potência e reduzida distorção harmônica da corrente de entrada (NOGUEIRA, 2017).

3. METODOLOGIA

Este trabalho tem como objetivo apresentar um pré-regulador *boost*, como *driver* de uma luminária LED de iluminação. Além disso, este tipo de *driver* dispensa o uso de capacitores eletrolíticos, o que pode garantir a esse dispositivo uma vida útil compatível com a dos módulos de LEDs.

O estudo realizado utilizou o PSIM 9.1 (*software* de simulação de circuitos eletrônicos) para simular as principais formas de onda de tensão e corrente obtidas na entrada e saída desse conversor. Além disso, é possível obter por meio desse *software* outros parâmetros elétricos de relevância, como fator de potência, distorção harmônica total e amplitude das correntes harmônicas desse circuito.

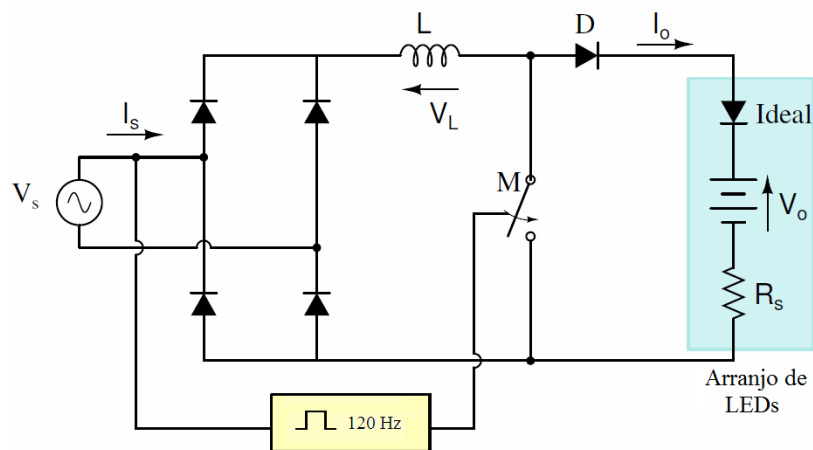
Os cálculos foram baseados na modelagem matemática do conversor *boost* comutado em frequência industrial, na condição de interruptor fechado e na condição de interruptor aberto.

3.1 MODELAGEM MATEMÁTICA

Foi feita a modelagem matemática do conversor *boost* da Figura 2 considerando seu interruptor (M) como uma chave aberta e como chave fechada. Posteriormente, a partir das equações obtidas, foi possível calcular as principais variáveis do circuito e constatar seus resultados por meio da simulação do circuito utilizando o PSIM 9.1.

Para atuar a chave M, é emitido um pulso unitário de duração de T_{on} no início de cada semiciclo da tensão de entrada do circuito ($V_s = 0V$), o que corresponde a uma frequência de 120Hz (considerando que a frequência da tensão de entrada seja, $V_s = 60 \text{ Hz}$).

Figura 2 - Conversor CA-CC do tipo *boost* como *driver* para LEDs.



Fonte: Autor.

A. Intervalo em que o interruptor M esta fechada $0 < t < T_{on}$

No intervalo de tempo entre 0 e T_{on} , o interruptor M se encontra fechado e obtém se a equação (1):

$$v_s(t) = v_L(t) = V_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = L \cdot \frac{di_{s1}}{dt}, \quad (1)$$

sendo que i_{s1} é a corrente de entrada no primeiro estágio de operação, v_L é a tensão aplicada ao indutor e V_p é a tensão de pico na entrada do circuito.

A partir da expressão (1), pode-se isolar a corrente de entrada por meio da equação diferencial (2):

$$di_{s1} = \frac{V_p}{L} \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) dt \quad (2)$$

Portanto, ao se resolver a equação diferencial mostrada em (2), é possível obter a expressão da corrente de entrada que representa o estágio em que o interruptor M se encontra fechado (3):

$$i_{s1}(t) = \frac{V_p}{\omega \cdot L} (1 - \cos(\omega \cdot t)) \quad (3)$$

O pico de corrente de entrada (i_m) no primeiro estágio de operação é dado pela equação (4) e ocorre quando $t = T_{on}$.

$$I_m = \frac{V_p}{\omega \cdot L} (1 - \cos(\omega \cdot T_{on})) \quad (4)$$

B. Intervalo em que a chave M está aberto $T_{on} < t < T_f$

No intervalo de tempo entre T_{on} e T_f , a chave M se encontra aberta. Assim, é possível obter a equação (5):

$$V_p \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) = L \cdot \frac{di_{s2}}{dt} + V_0 + R_s \cdot i_{s2}(t) \quad (5)$$

Desenvolvendo o equacionamento anterior por meio de equações diferenciais, se obtém a equação (6), que representa a corrente de entrada nesse estágio de operação:

$$i_{s2}(t - T_{on}) = a \cdot e^{\frac{-(t - T_{on})}{\tau}} - b \quad (6)$$

Na qual 'a' e 'b' são dados pelas equações (7) e (8) respectivamente:

$$a = \frac{V_0}{R_s} + \frac{V_p}{\omega \cdot L} - \frac{V_p \cdot R_s^2}{\omega \cdot L \cdot Z^2} [\cos(\omega \cdot T_{on}) + \omega \cdot \tau \cdot \text{sen}(\omega \cdot T_{on})] \quad (7)$$

$$b = \frac{V_0}{R_s} + \frac{V_p \cdot R_s}{Z^2} [\omega \cdot \tau \cdot \cos(\omega \cdot t) - \text{sen}(\omega \cdot t)] \quad (8)$$

Em que $\tau = L/R_s$ e $Z^2 = [(\omega \cdot L)^2 + R_s^2]$.

Nesse estágio, é possível observar que a corrente de entrada é igual a corrente que flui no arranjo de LEDs.

A corrente média na saída e a corrente eficaz na saída (correntes que fluem no arranjo de LEDs) são dadas pelas respectivas equações (9) e (10):

$$I_{o \text{ médio}} = \frac{\omega}{\pi} \int_{T_{on}}^{T_f} i_{s2}(t) dt \quad (9)$$

$$I_{o \text{ eficaz}} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \int_{T_{on}}^{T_f} [i_{s2}(t)]^2 dt} \quad (10)$$

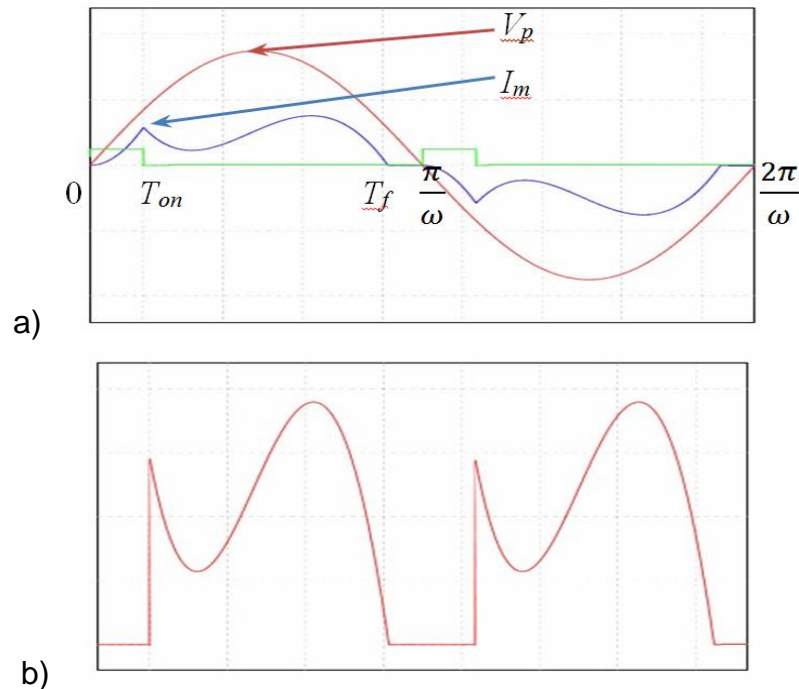
Diferente da corrente de saída, a corrente de entrada deve ser calculada a partir do valor de T_f , como representado na equação (11):

$$I_{S \text{ Eficaz}} = \sqrt{\frac{\omega}{\pi} \left(\int_0^{T_{on}} [i_{s1}(t)]^2 dt + \int_{T_{on}}^{T_f} [i_{s2}(t)]^2 dt \right)} \quad (11)$$

Baseando-se na modelagem desse conversor e nas características do arranjo de LEDs utilizado, é possível concluir que os principais parâmetros a serem levados em consideração no projeto desse conversor são L e T_{on} .

Em decorrência, estabelecendo os valores de V_p , V_o , R_s , os valores adequados para a indutância L e o tempo T_{on} em que a chave permanece fechada, as formas de onda de interesse desse conversor podem ser esboçadas como na Figura 3.

Figura 3 - Esboço das formas de onda do boost de baixa frequência: a) Tensão (vermelho) e corrente (azul) de entrada e sinal de disparo do interruptor (verde) e (b) corrente na saída.



Fonte: Autor.

Ao final, devem ser levadas em consideração as seguintes questões durante o projeto:

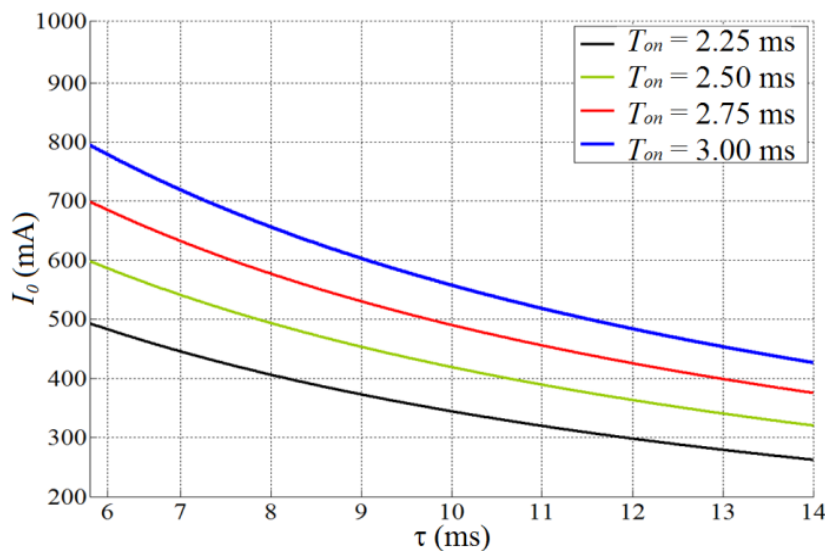
- O tempo T_{on} deve ser maior que um valor mínimo para evitar uma descontinuidade na corrente de entrada localizado entre o T_{on} e o T_f e impedir um aumento indesejável dos harmônicos injetados na rede, o que poderia ocasionar redução do fator de potência.
- O valor médio de corrente na saída e o valor de pico da corrente sobre os LEDs deve ser menor que os valores máximos dados pelo fabricante dos LEDs, a fim de evitar que os LEDs sejam danificados.

3.2 PROJETO DO CONVERSOR

A fim de avaliar o conversor CA-CC do tipo *boost* descrito na seção anterior, um *driver* compatível com o nível de potência de uma luminária LED de iluminação pública é proposto. Essa luminária possui um arranjo de 100 LEDs Philips Luxeon R LXA7PW40 distribuídos em 4 módulos de 16 LEDs e 3 módulos de 12 LEDs associados em série. Esses 100 LEDs podem ser modelados por uma resistência interna R_s igual a $25,40 \Omega$ e uma tensão de joelho V_o igual a $270,01 \text{ V}$. Assim, é esperado alimentar esses LEDs com uma corrente média de 500 mA .

Utilizando o suporte do software matemático MATLAB, é possível traçar as curvas da corrente de saída do pré-regulador *boost* obtidas a partir da expressão (8) para diferentes valores de T_{on} e τ (que é função de L), como visto na Figura 4.

Figura 4 - Corrente média de saída em função da variação de τ e T_{on} .



Fonte: Autor.

Baseado nos possíveis valores encontrados na Figura 4, simulações foram realizadas por meio do Software PSIM 9.1 para verificar que parâmetros levam o pré-regulador *boost* de baixa frequência a obter conformidade com a norma IEC 61000-3-2 Classe C (IEC, 2014) e a fornecer a corrente média desejada para o arranjo de LEDs da luminária proposta. Os valores escolhidos foram T_{on} igual a $2,75 \text{ ms}$ e L igual a 375 mH .

O circuito de comando do MOSFET M foi implementado por meio de um comparador LM393 e um circuito integrado 555 em configuração monoestável ajustado para gerar um pulso de 2,75 ms.

O pulso de saída desse circuito de comando é gerado sempre que a senóide da tensão de entrada passa pelo zero, acionando o MOSFET durante o intervalo de tempo T_{on} .

Portanto, os principais parâmetros esperados para a luminária LED e os principais componentes do *driver* proposto são listados respectivamente nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 - Parâmetros da Luminária LED.

Parâmetros	Valor
Potência de saída	~143 W
Tensão de Pico de Entrada, V_p	311 V
Corrente Média no LED, I_o	500 mA
Tempo de chaveamento, T_{on}	2,75 ms
Indutância, L	375 mH
Fluxo Luminoso	~ 14.000 lm

Fonte: Autor

Tabela 2 - Principais componentes do protótipo.

Componentes	Modelos
Interruptor (Transistor)	IRF 840
Ponte Retificadora	2kBP06M
Indutor	Reator reutilizado de 375 mH
CI de Chaveamento	CI 555
Detector de Zero	LM 393
LED	Philips Luxeon R LXA7PW40

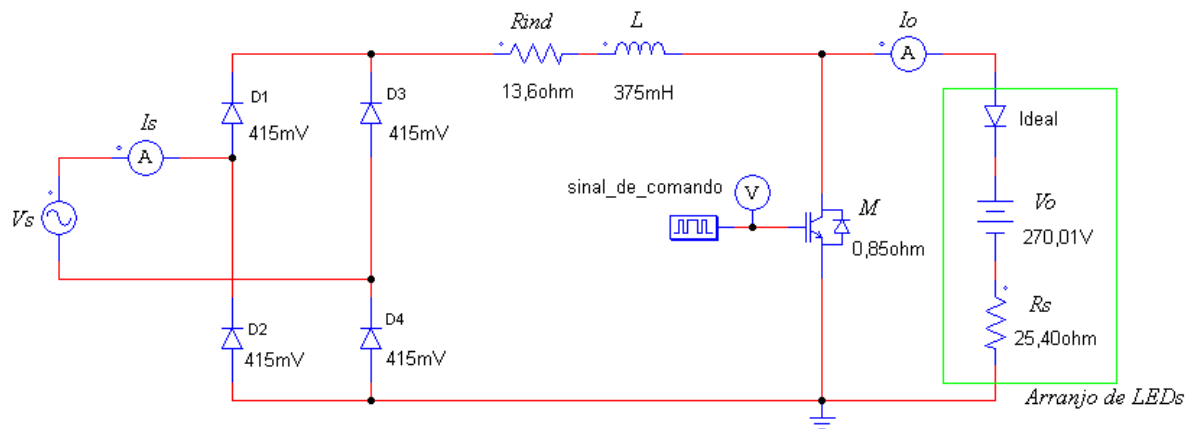
Fonte: Autor

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO

O circuito simulado através do PSIM 9.1 é mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Circuito do pré-regulador *boost* simulado no Software PSIM.



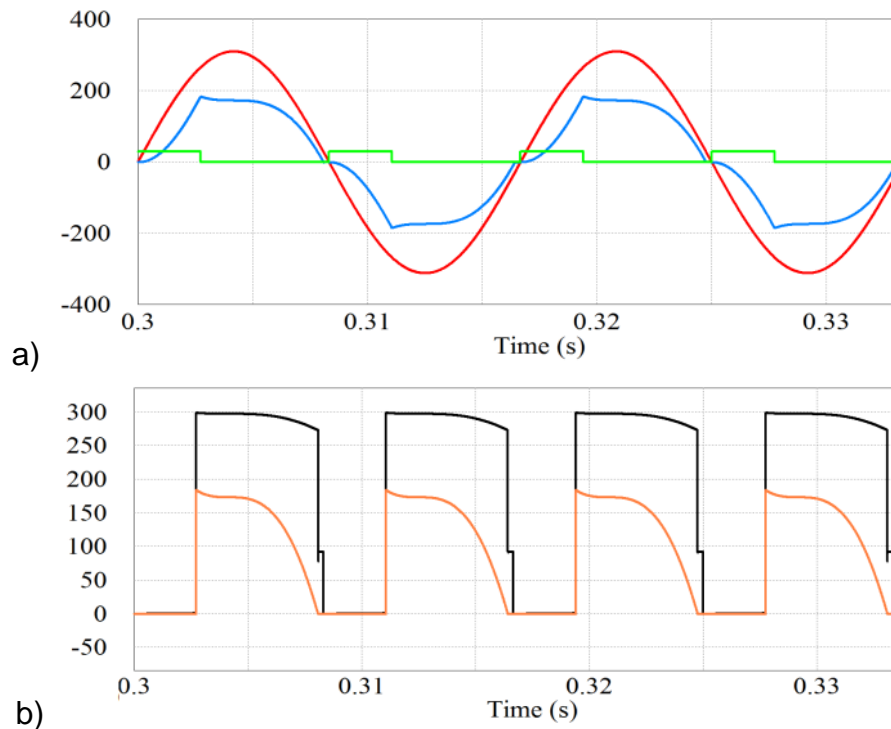
Fonte: Autor.

O modelo elétrico do arranjo de LEDs foi obtido através da regressão linear da tensão aplicada diretamente ao arranjo em função da corrente que flui através dos LEDs (I_o). As características dos LEDs obtidas foram R_s igual a 25.40 ohms e V_o igual 270,01 V. O valor de indutância L e o tempo da chave M fica fechada é de L igual a 375 mH e T_{on} igual a 2,75 ms, como mostrado na Tabela 1.

A fim de se ter resultados mais próximos de um circuito real, também foram levados em consideração, de acordo com a folha de dados desses componentes, a queda de tensão dos diodos da ponte retificadora (415 mV) e a resistência entre a fonte e o dreno do interruptor M quando ele está conduzindo (0,85 Ω). Além disso, foi estimada uma resistência de 13,6 Ω para o enrolamento do indutor.

Os resultados de simulação mostrados na figura 6 foram obtidos a partir de uma tensão de entrada de 220 V eficazes. Nesta simulação, foi possível atingir um fator de potência de 0,989 com uma distorção harmônica total da corrente de entrada ($THDi$) de 11,4%. A corrente média na saída foi de 500 mA, com picos de 1020 mA (inferior ao limite de 1200 mA definido pelo fabricante). A potência de entrada total foi de aproximadamente 155,4 W, enquanto a potência de saída total foi de 147,8 W.

Figura 6 - Resultados de simulação do pré-regulador *boost* (a) Tensão de entrada (vermelho), 180 x corrente de entrada (azul) e pulsos de chaveamento (verde); (b) 180 x corrente de saída (laranja) e tensão de saída (preto).



Fonte: Autor.

4.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

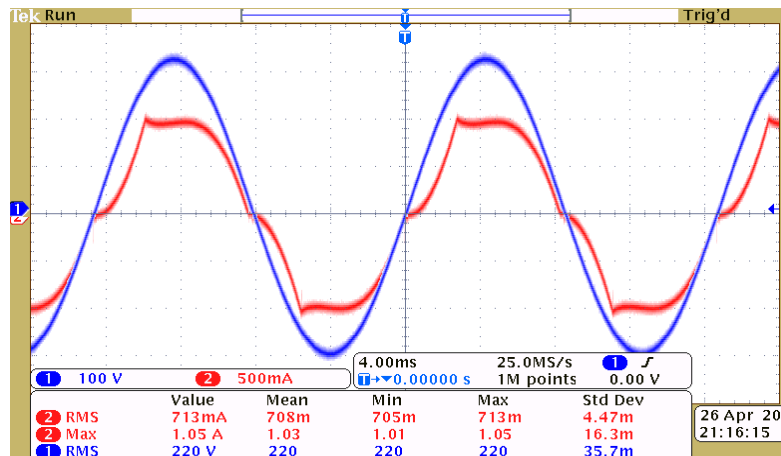
O protótipo do controlador *boost* de baixa frequência foi implementado em laboratório e utilizado para acionar uma luminária de 100 LEDs Philips Luxeon RLXA7PW40 associados em série.

Os parâmetros elétricos foram obtidos com o auxílio do osciloscópio TEKTRONIX DPO-3014 e do wattímetro YOKOGAWA WT-230.

O indutor de 375 mH utilizado na montagem do conversor foi reaproveitado de um reator eletromagnético. O circuito de comando é formado por um comparador LM339, responsável pela detecção do instante em que a tensão de entrada passa pelo zero e por um circuito integrado 555, configurado no modo monoestável e ajustado através de um potenciômetro para fornecer um pulso de chaveamento de duração T_{on} igual a 2,75 ms. Por fim, um transistor MOSFET IRF840 foi utilizado como o interruptor do pré-regulador *boost*.

A Figura 7 mostra as formas de onda de tensão e corrente de entrada do *driver* obtidas pelo osciloscópio. O fator de potência obtido foi de 0,98 com uma distorção harmônica total da corrente de entrada de 10,7%. A potência total na entrada do circuito foi de 155 W.

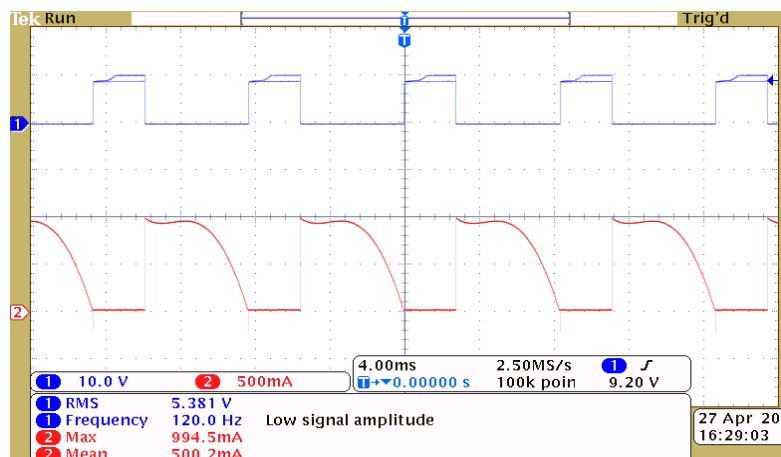
Figura 7 - Formas de onda do pré-regulador *boost*: Tensão de entrada (azul) e corrente de entrada (vermelho). Escalas do Osciloscópio: 100V/div, 500 mA/div e 4ms/div.



Fonte: Autor.

A Figura 8 mostra a forma de onda de corrente de saída do controlador *boost* (corrente no arranjo de LEDs) e os pulsos de chaveamento de duração iguais a T_{on} de 2,75 ms no *gate* do MOSFET. É possível observar que a corrente média é de 500 mA com valores de pico de aproximadamente de 1 A. A potência de saída total medida foi de 147 W (pode se observar que os resultados experimentais se aproximaram dos valores encontrados na simulação).

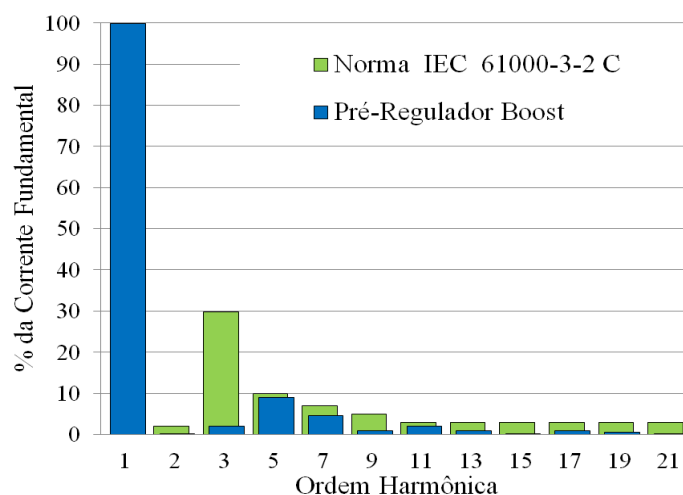
Figura 8 - Formas de onda do pré-regulador *boost*: Corrente de saída (vermelho) e pulsos de MOSFET (azul). Escalas do Osciloscópio: 10V/div, 500 mA/div e 4ms/div.



Fonte: Autor.

A Figura 9 mostra a comparação das componentes harmônicas da corrente de entrada com os limites estabelecidos pela norma IEC 61000-3-2 Classe C, onde é possível constatar que o *driver* projetado esta em conformidade com esta norma.

Figura 9 - Conteúdo harmônico da corrente de entrada do pré-regulador *boost* comparado aos limites estabelecidos pela norma IEC 61000-3-2 Classe C.

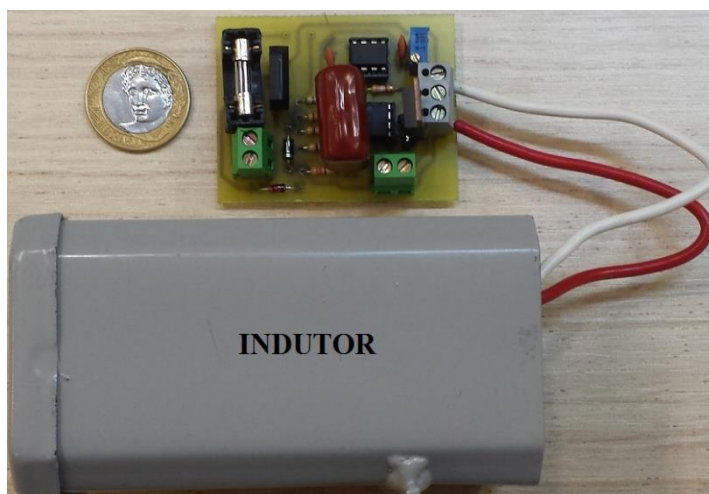


Fonte: Autor.

A eficiência total do conversor foi de 94,84% (valor maior que o recomendado pela *U.S. Department of Energy*), com as maiores perdas ocorridas no indutor (6,9 W).

Por fim, a Figura 10 mostra a foto do protótipo do pré-regulador *boost* proposto neste trabalho.

Figura 10 - Fotografia do protótipo do pré-regulador *boost* de baixa frequência aplicado como driver de luminárias LED de iluminação pública.



Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

Este trabalho, realizou um estudo da utilização de um conversor do tipo *boost* em baixa frequência como um *driver* de uma luminária LED de iluminação.

Foi realizado a modelagem matemática dessa topologia e realizado simulações com auxílio de *softwares* para comprovar a modelagem efetuada.

Com os resultados da simulação, foi desenvolvido um protótipo de laboratório deste *driver* para acionar uma luminária LED de 155 W. Com base nesses dados, foram obtidos resultados experimentais de demonstraram um elevado fator de potência, uma baixa taxa de distorção harmônica de corrente de entrada e uma elevada eficiência.

O protótipo desse circuito foi implementado após os parâmetros básicos de projeto serem obtidos através de simulação no *software* PSIM 9.1. Os resultados experimentais mostram um elevado fator de potência (0,99), uma reduzida distorção harmônica total da corrente de entrada (10,2%) e uma elevada eficiência (aproximadamente 95%, já incluídas as perdas ocorridas no circuito de comando). Outro ponto importante é a ausência de capacitores eletrolíticos e o reduzido número de componentes, o que pode garantir uma maior confiabilidade e vida útil ao *driver*. Além disso, essa topologia que se mostrou simples e de baixo custo, atende a norma IEC 61.000-3-2 Classe C.

ABSTRACT

The main objective of this work is the theoretical and experimental evaluation of the use of low frequency LED driver applied to street lighting. The study initially presents a brief bibliographic review of LED luminaire drivers. Next, the mathematical modeling of an LED driver based on the high power factor low frequency boost pre-regulator (twice the grid frequency, also known as the industrial frequency) is performed. A design methodology is presented being applied to a 155 W LED luminaire, which is a typical power used in street lighting. Experimental results show that it is possible to achieve high power factor (0.99), high efficiency (95%), reduced total harmonic distortion of input current (10.2%) and obtain compliance with various requirements of currents standarts.

Keywords: Boost Converter, LED Drivers, LEDs, Power Electronics.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. S. **Síntese de Conversores Ressonantes com Alto Fator de Potência e Alta Eficiência Para o Acionamento de Diodos Emissores de Luz**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2014.
- DIAS, M. P. **Avaliação do Emprego de um Pré-Regulador Boost de Baixa Frequência no Acionamento de LEDs de Iluminação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2012.
- IEC. **IEC 61000-3-2 – Limits for Harmonics Current Emissions (equipment input current < 16 A per phase)**. International Electrotechnical Commission. 2014.
- NOGUEIRA, F. J. **Controladores de LEDs para iluminação pública com elevado fator de potência comutados no dobro da frequência da rede elétrica**. (Doutorado em Engenharia Elétrica). UFJF, Juiz de Fora, 2017.
- RODRIGUES, C. R. B. S. **“Contribuições ao Uso de Diodos Emissores de Luz em Iluminação Pública”**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2012.
- U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan**, Abril de 2012.