

LÂMPADA COMPACTA EMPREGANDO LEDS

Rafael A. Pinto, Marcelo R. Cosetin, Tiago B. Marchesan,
Alexandre Campos e Ricardo N. do Prado
Universidade Federal de Santa Maria – UFSM
Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos - GEDRE
Av. Roraima 1000, Centro de Tecnologia, Sala 171. CEP 97105-900, Santa Maria - RS
Brasil
e-mail: pintosma@gmail.com, marcelocosetin@yahoo.com.br, rnprado@ieee.org

Resumo - Este trabalho tem o objetivo de desenvolver uma lâmpada compacta empregando diodos emissores de luz (LEDs). A proposta visa economia de energia elétrica, alta eficácia luminosa e longa vida útil na substituição de lâmpadas incandescentes ou fluorescentes compactas por LEDs sem qualquer alteração na instalação elétrica. Para alimentar os LEDs através da rede elétrica com corrente contínua, o conversor Buck foi empregado por fornecer uma tensão de saída menor que a de entrada, além da simplicidade e baixo custo do circuito. A carga pode ser composta por 36 a 52 LEDs de alto-brilho conectados em série, resultando em uma tensão de saída no conversor de 90 V a 187 V. A vantagem da conexão em série é que todos os LEDs produzem o mesmo brilho, uma vez que sua intensidade luminosa é proporcional a corrente. A desvantagem é que a falha de um LED pode resultar em um circuito aberto e desligar os demais. Para solucionar este problema, a idéia proposta neste artigo é introduzir Diacs em paralelo com grupos de LEDs. Assim, se um LED falhar, o Diac em paralelo com este grupo fornece um caminho para a corrente, garantindo a operação dos demais grupos. Para validar a idéia proposta, protótipos foram implementados e testados.

Palavras-Chave – Controle de corrente, Conversores CC/CC, Lâmpada a LED, Lâmpada compacta e LEDs como fonte de luz.

COMPACT LAMP USING HIGH-BRIGHTNESS LEDS

Abstract – This paper proposes a circuit for a compact lamp based on light emitting diodes (LEDs). It aims energy savings, high luminous efficacy and high useful life when substituting incandescent or compact fluorescent bulbs by LEDs without any change in the electric system installation. In order to supply the LEDs by mains with a forward current, the Buck converter has been chosen because it provides an output voltage lower than the input one, besides the simplicity and low cost of this circuit. The load can be composed by 36 to 52 high-brightness LEDs connected in series, resulting in a

converter output voltage between 90 V and 187 V. The advantage of series connection is that all LEDs produce the same brightness since its luminous intensity is proportional to the supplied current. The disadvantage is that the damage of one LED can results in an open-circuit, and disconnected the entire group. To solve this problem, the proposed idea on this work is the introduction of Diacs connected in parallel with groups of LEDs. So, if one LED burns the Diac in parallel with this group keeps the current path guaranteeing the operating of the others groups. To verify the proposed idea, the compact lamp has been implemented and tested.

Keywords - Compact lamp, Current control, DC/DC converters, LED lamp and LEDs as light source.

I. INTRODUÇÃO

Aproximadamente 17 % do consumo total de energia elétrica do país é destinado ao uso da iluminação [1]. Portanto, o desenvolvimento de sistemas de iluminação que façam uso dos recursos energéticos de forma racional é de extrema importância.

As lâmpadas incandescentes, amplamente utilizadas na iluminação residencial, estão sendo abolidas em muitos países devido a sua baixa eficiência [2]. A substituição destas lâmpadas por lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) foi uma alternativa encontrada para reduzir o consumo de energia elétrica, uma vez que o rendimento das LFCs é superior ao rendimento das lâmpadas incandescentes.

No entanto, no início dos anos 60 surgiu o Diodo Emissor de Luz (LED), um dispositivo semiconductor que tem como princípio de funcionamento a eletroluminescência, emitindo luz através da combinação de elétrons e lacunas em um material sólido [3].

Primeiramente, ele era utilizado em iluminação indicativa, mas o desenvolvimento de LEDs mais potentes e com maior eficácia luminosa tornou possível sua utilização em iluminação de ambientes. A iluminação semicondutora apresenta diversas vantagens quando comparada às lâmpadas fluorescentes, entre elas a maior eficiência, aumento da vida útil e redução do descarte de elementos químicos nocivos ao meio-ambiente [4] e [5]. O descarte inadequado de LFCs traz prejuízo ao meio ambiente, visto que o mercúrio presente nestas lâmpadas, além dos elementos químicos empregados nos componentes eletrônicos do circuito, pode causar doenças graves em pessoas e animais que entrarem em contato com estas substâncias. Por isso uma lâmpada com longa vida útil é desejável.

Artigo submetido em 15 de maio de 2008; primeira revisão em 15 de outubro de 2008; segunda revisão em 06 de março de 2009. Recomendado para publicação pelos Editores da Seção Especial, João Carlos dos Santos Fagundes e Felix Alberto Farret.

Os LEDs podem ser divididos em três categorias: indicativos, de alto-brilho e de potência. Estes dispositivos não podem ser ligados diretamente à rede elétrica, pois operam com sinais de tensão e corrente diferentes dos sinais fornecidos pela rede, tornando necessário o uso de um conversor para limitar a corrente nos LEDs.

Os conversores Buck, Boost, Buck-Boost e Flyback são bastante conhecidos na literatura e amplamente utilizados para alimentar LEDs [3], [6] e [7]. Alguns autores ainda propõem o uso do Buck-Quadrático e microcontroladores no circuito para controle da corrente nos LEDs [3] e [8].

Entretanto, para que esta tecnologia possa ser difundida e empregada principalmente na iluminação residencial é fundamental que o conversor seja pequeno e não haja grandes alterações na instalação elétrica existente. Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de iluminação compacto que permita substituir diretamente as lâmpadas incandescentes e LFCs por LEDs. O uso do soquete E-27 (o mesmo utilizado nas lâmpadas tradicionais), facilita a substituição pela lâmpada a LED sem qualquer alteração na instalação elétrica.

II. CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÕES DOS LEDS

A vantagem da utilização de LEDs em sistemas de iluminação é devido à sua alta eficácia luminosa e longa vida útil. Atualmente, esta eficácia alcança 100 lm/W, sendo superior às lâmpadas incandescentes (15 lm/W) e fluorescentes (80 lm/W) [9]. A vida útil de um LED pode atingir até 50.000 horas [10] enquanto lâmpadas incandescentes e LFCs alcançam 1.000 horas e 8.000 horas, respectivamente [9].

O material utilizado no revestimento do LED o torna mais resistente a choques e vibrações, diferentemente das lâmpadas incandescentes e fluorescentes que são protegidas apenas por vidros. Além disso, os LEDs não possuem gás ou filamentos em seu interior e, portanto, não necessitam de um pulso de tensão elevado para ignição. Outra vantagem deste dispositivo é seu tamanho reduzido.

III. CONEXÃO DOS LEDS

A luz emitida por um único LED não é suficiente para iluminar um ambiente da mesma forma que uma lâmpada incandescente. Por isso, é necessário utilizar vários LEDs operando simultaneamente. Um grupo de LEDs pode ser conectado em um circuito de três maneiras diferentes: conexão série, paralela ou série-paralela. A vantagem da conexão série é que todos os LEDs produzem o mesmo brilho, uma vez que a luminosidade é proporcional a corrente que circula pelos dispositivos.

Na conexão paralela todos os LEDs são submetidos à mesma tensão. Porém, a tensão de condução de cada LED pode variar entre 2,5 V e 4 V dependendo do modelo de LED escolhido. Assim, torna-se mais difícil controlar a corrente aplicada em cada braço com este tipo de conexão. Como consequência, pode surgir uma diferença na intensidade luminosa de cada dispositivo.

Na conexão em paralelo de braços de LEDs em série (conexão série-paralela) a tensão aplicada não é tão alta quando na conexão em série ou tão baixa quanto na paralela.

Porém, a complexidade do controle da tensão e corrente nos dispositivos continua sendo a mesma da conexão paralela.

Analisando as três alternativas citadas, aquela que apresentou as melhores vantagens foi a conexão série, por garantir a mesma intensidade luminosa em todos os LEDs através do controle da corrente de um único braço na saída do conversor [6]. Além disso, opera com uma tensão elevada, o que facilita o projeto do circuito quando alimentado pela rede elétrica.

A falha de um LED pode resultar em um circuito aberto ou em um curto-circuito entre os terminais deste dispositivo. Para a conexão em série, o curto-circuito em um LED não apresenta maiores problemas além do não acendimento deste dispositivo, mantendo os demais em funcionamento. No entanto, no caso de um circuito aberto, todos os demais LEDs são desativados, pois o caminho da corrente é interrompido. Esta é a principal desvantagem deste tipo de conexão e que leva muitos autores a não utilizá-la [11].

IV. PROTEÇÃO CONTRA A FALHA DOS LEDS

A idéia proposta para solucionar o problema da falha de um LED é a introdução de Diacs ou outros dispositivos semelhantes, como um zener, em paralelo com grupos de LEDs. Assim, caso ocorra a falha de um dispositivo e este se torne um circuito aberto, a tensão de saída do conversor é aplicada aos terminais do Diac em paralelo com o grupo deste LED. Quando a tensão de disparo do Diac é alcançada, este dispositivo conduz mantendo o caminho para a corrente nos demais grupos de LEDs. A vantagem do uso de Diac em relação ao zener é que a tensão no Diac reduz após o disparo, reduzindo assim a potência dissipada neste dispositivo.

Então, mesmo com a danificação de alguns LEDs, os demais continuam em funcionamento. Esta é uma alternativa simples e de baixo custo que garante a iluminação do ambiente sob pena de redução da intensidade luminosa total, que é proporcional ao número de LEDs desativados, ou até que o LED defeituoso seja substituído.

Esta característica evita o descarte imediato da lâmpada, como acontece com as LFCs e ainda permite a manutenção do sistema através da substituição do dispositivo danificado, uma vez que o custo de um LED é pequeno comparado ao valor total do equipamento.

A utilização de Diacs em paralelo com cada um dos LEDs poderia aumentar o custo total do circuito de forma significativa. Por este motivo é aconselhado utilizar os Diacs com grupos de LEDs, desde que a tensão de condução neste grupo seja inferior à tensão de disparo do Diac, e que a redução da luminosidade da lâmpada não seja significativa.

V. CIRCUITO PROPOSTO

Neste trabalho o conversor Buck foi escolhido por fornecer uma tensão de saída menor que a de entrada, pela simplicidade e baixo custo do circuito comparado às topologias propostas em [3], [6], [7] e [8]. Por se tratar de uma lâmpada compacta, aonde o circuito permanece protegido no interior do suporte, sem ponto de conexão externo, não há necessidade de isolamento e, portanto a utilização de um Flyback aumentaria o tamanho e o custo da lâmpada, sem acrescentar vantagens a esta aplicação.

O circuito foi projetado para alimentar os LEDs de alto-brilho com corrente contínua de 23 mA. Entre as diversas formas de onda de corrente utilizadas para alimentar LEDs, àquela que propicia a melhor eficiência luminosa é a corrente contínua [12], [13] e por esta razão foi utilizada neste trabalho. A carga pode ser composta por 36 a 52 LEDs de 5 mm conectados em série, para uma tensão de entrada de 220 V_{RMS}, resultando em uma tensão de saída no conversor entre 90 V e 187 V. O circuito proposto alimentando 49 LEDs de alto-brilho é apresentado na Figura 1. Neste circuito, foram empregados sete Diacs, cada um conectado em paralelo com grupos compostos de sete LEDs em série.

Nesta topologia, a tensão da rede (220 V_{RMS}) é retificada pelos diodos (D₁-D₄) e filtrada pelo capacitor de barramento (C_{bus}). O interruptor é implementado pelo circuito integrado (CI) NCP1013. Este CI foi escolhido pelo fato de operar como interruptor sem a necessidade de um circuito de comando externo. Além disso, possui um pino de realimentação para realizar o controle da corrente de saída do conversor. O NCP1013 opera em alta frequência (100 kHz), evitando ruído audível, e possui baixo consumo [14]. Sua alimentação é feita através de um capacitor (C_N) apenas. A integração do interruptor com o circuito de comando e de controle em um único dispositivo contribui para a redução do tamanho e do custo total do conversor.

Quando o interruptor está conduzindo, a rede transmite energia ao indutor (L), ao capacitor (C_O) e ainda alimenta a carga. Quando o interruptor está em bloqueio, o diodo D₅ conduz e a energia armazenada em L é entregue ao capacitor C_O e à carga. A tensão máxima aplicada no interruptor e no diodo é igual à tensão do capacitor de barramento (V_{Cbus}).

O controle da corrente nos LEDs é feito através de um resistor shunt (R_{SENSE}) conectado em série com a carga [7]. Qualquer alteração na tensão de saída do conversor irá se refletir ao resistor *shunt*, provocando uma alteração na sua corrente. Assim, o objetivo do controlador é manter a tensão neste resistor em um valor fixo para que a corrente neste, e nos demais dispositivos em série, permaneça constante.

Para isso, o controlador interno do NCP1013 monitora a tensão no resistor *shunt* e modifica a razão cíclica da comutação quando necessário, de forma a manter a tensão neste dispositivo igual à referência. Entretanto, para que a potência dissipada no resistor não seja significativa, prejudicando o rendimento do circuito, esta tensão de referência deve ser a menor possível.

A tensão de referência é dada pela tensão de condução do diodo (D_{REF}) mais a tensão base-emissor do transistor (T_C), aproximadamente 1,3 V. Assim, quando a tensão em R_{SENSE} aumentar até atingir 1,3 V, o transistor entra em condução e altera a tensão no pino FB do NCP1013. Esta variação de tensão no pino FB altera a razão cíclica da comutação. O capacitor C_{FB} é recomendado pelo fabricante do CI para reduzir um possível ruído neste pino. O resistor R_C limita a corrente que circula por T_C, aumentando a impedância deste braço. Assim, a corrente que circula em D_{REF} não influencia na corrente dos LEDs. O valor de R_C utilizado é de 1 kΩ.

A corrente nos LEDs é projetada para 23 mA. A tensão de referência é 1,3 V. Assim, o valor de R_{SENSE} é igual a 56 Ω, determinado em (1).

$$R_{SENSE} = \frac{V_{DREF} + V_{TBE}}{I_{LEDs}} \quad (1)$$

Onde:

- R_{SENSE} - Resistor shunt para controle da corrente de saída.
- V_{DREF} - Tensão de condução do diodo D_{REF}.
- V_{TBE} - Tensão base-emissor do transistor T_C.
- I_{LEDs} - Corrente aplicada aos LEDs.

A potência dissipada no resistor é somente 30 mW. E a potência total nos LEDs é aproximadamente 3,6 W.

O circuito de proteção contra a falha de algum LED foi implementado empregando um Diac do modelo DB3 em paralelo com cada um dos sete grupos. A tensão máxima do LED utilizado pode chegar a 3,6 V e, portanto o grupo terá uma tensão máxima de 25,2 V. Este valor é inferior à tensão de disparo mínima do Diac (28 V). Assim, é descartada a possibilidade de o DB3 disparar enquanto os LEDs em paralelo estiverem operando normalmente.

Se a corrente que circula pelo interruptor interno do NCP1013 for menor que 25 % da corrente nominal (350 mA), o CI entra no modo de espera. Esta característica reduz o consumo do NCP1013, no entanto causa um ruído audível no indutor (devido ao desligamento repetitivo do CI em baixa frequência), o que não é desejável. Portanto, o conversor Buck deve ser projetado para operar no modo de condução descontínuo, obtendo uma corrente média na saída pequena (23 mA) com um pico de corrente desejável no interruptor. Então, o indutor é projetado para que a corrente

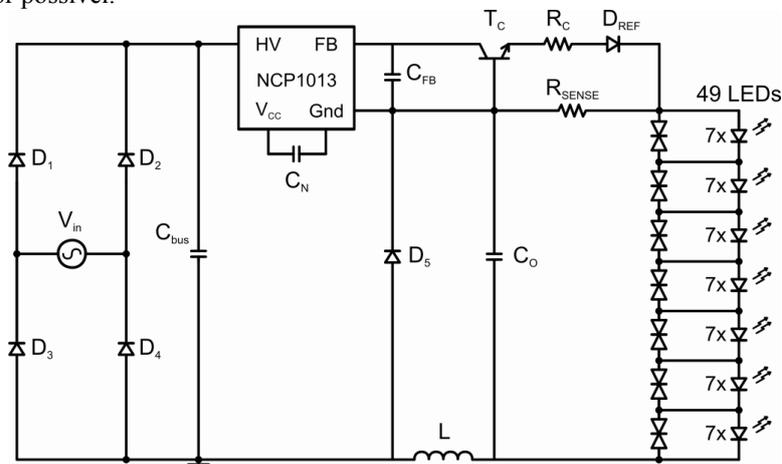


Fig. 1. Circuito proposto para a implementação da lâmpada compacta empregando LEDs.

no NCP1013 alcance 25 % do seu valor nominal. O valor da indutância é determinado em (2) [15].

$$L = \frac{E_{\min} - V_{0\max}}{I_{pk}} \times \frac{D_{\max}}{f_s} \quad (2)$$

Onde:

- E_{\min} - Tensão de entrada mínima do conversor.
- $V_{0\max}$ - Tensão de saída máxima do conversor.
- D_{\max} - Razão cíclica máxima.
- I_{pk} - Corrente de pico no NCP1013.
- f_s - Frequência de chaveamento.

Para o projeto adequado do conversor devem-se especificar os limites de variação da tensão de entrada devido à ondulação do capacitor C_{bus} e uma possível flutuação da tensão da rede. O valor de E_{\min} utilizado neste projeto foi de 215 V, resultado da tensão mínima do barramento considerando a ondulação do capacitor (10 %) e uma flutuação da tensão da rede de 25 % abaixo do valor nominal. O valor de E_{\max} foi especificado em 389 V, sendo 25 % acima do valor nominal da tensão da rede.

Para o modelo de LED utilizado a tensão de condução em cada dispositivo pode variar entre 2,5 V e 3,6 V. Como a carga também pode ser composta por 36 a 52 LEDs, a tensão de saída do conversor (V_O) deverá ser especificada para valores entre 90 V e 187 V mais 1,3 V da tensão de referência. A corrente de pico mínima deverá atingir pelo menos 25 % do valor nominal do interruptor (igual a 88 mA). A frequência de comutação é 100 kHz e a razão cíclica será a variável a ser ajustada pelo controlador interno do NCP1013.

Assim, especificando um valor de projeto para D_{\max} de 50 % e fazendo uso da equação (2), encontra-se um valor de aproximadamente 1,6 mH para o indutor do conversor Buck utilizado. A razão cíclica mínima acontece quando a tensão de entrada é máxima e a tensão de saída é mínima, e pode ser obtida através de (3). A razão cíclica mínima neste projeto será 8,6 %.

$$D_{\min} = \sqrt{\frac{\left(\frac{8 \times L \times f_s \times I_O}{V_{Omin}}\right)}{\left(\frac{2 \times E_{\max}}{V_{Omin}} - 2\right)^2}} \quad (3)$$

Onde:

- D_{\min} - Razão cíclica mínima.
- L - Valor do indutor do conversor Buck.
- f_s - Frequência de chaveamento.
- I_O - Corrente nos LEDs.
- V_{Omin} - Tensão de saída mínima do conversor.
- E_{\max} - Tensão de entrada máxima do conversor.

A corrente máxima no interruptor ocorre nesta situação e pode ser obtida através de (4). O valor da corrente máxima é de aproximadamente 160 mA, sendo inferior ao valor máximo do NCP1013.

$$I_{pk} = \frac{E_{\max} - V_{0\min}}{L} \times \frac{D_{\min}}{f_s} \quad (4)$$

O capacitor C_O é projetado para limitar a ondulação da tensão de saída em valores pequenos, sem comprometer o tamanho do circuito. Seu valor é determinado em (5) [15]. A ondulação da tensão de saída (ΔV) foi especificada em 350 mV. O valor de C_O utilizado no projeto é de 2,2 μ F e a tensão máxima aplicada é de 200 V (tensão de saída do conversor).

$$C_o = \frac{V_o \times (1 - D)}{8 \times \Delta V \times L \times f_s^2} \quad (5)$$

O circuito também pode ser projetado para operar como bivolt, detectando automaticamente a tensão de entrada (110 V_{AC} ou 220 V_{AC}) se forem utilizados 28 LEDs. Este número é determinado pela tensão de saída do conversor Buck que deve ser compatível com os limites mínimo e máximo da razão cíclica do NCP1013 (0 a 72%). Para isto é necessário apenas modificar o valor do indutor.

A mesma topologia também pode ser utilizada com LEDs de potência. A corrente nominal de um LED de potência é superior à do LED de alto-brilho, bem como o fluxo luminoso emitido. Assim, a quantidade de LEDs empregados pode ser reduzida.

Neste projeto são empregados 5 LEDs de potência (Luxeon Rebel LXML-PWN1-0080) conectados em série, resultando em uma tensão de saída entre 13 V e 20 V. Estes dispositivos são alimentados com uma corrente contínua de 300 mA [10].

O conversor Buck, neste caso, pode ser projetado para operar no modo de condução contínua, já que a corrente que circula pelo interruptor é superior a 25 % do seu valor nominal, evitando que o CI entre no modo de espera. A vantagem deste modo de operação é a possibilidade de alimentar a carga com uma corrente contínua sem a necessidade do capacitor de saída (C_O).

Para isso, o valor o indutor deve ser projetado para limitar a variação da corrente na carga em valores pequenos. A maior ondulação acontece quando a tensão de entrada é máxima e tensão de saída é mínima, conforme (6) [15]. A indutância que satisfaz as especificações do projeto é de 12 mH.

$$\Delta I_L = \frac{E_{\max} - V_{Omin}}{2 \times L} \times \frac{D}{f_s} \quad (6)$$

Onde:

- ΔI_L - Ondulação da corrente no indutor e na carga.
- E_{\max} - Tensão de entrada máxima do conversor.
- V_{Omin} - Tensão de saída mínima do conversor.
- D - Razão cíclica do conversor.
- L - Valor do indutor do conversor Buck.
- f_s - Frequência de chaveamento.

O valor de R_{SENSE} é igual a 2,2 Ω pode ser obtido através de (1). Porém, para que as perdas neste resistor não sejam significativas, uma vez que a corrente neste caso é maior, a tensão de referência foi reduzida para aproximadamente 0,65 V, determinado pela queda de tensão do transistor T_C apenas, sem a contribuição do diodo D_{REF} utilizado anteriormente.

A potência máxima dissipada no resistor é de 195 mW. E a potência total nos LEDs é aproximadamente 4,5 W.

O valor do resistor R_{SENSE} determina a intensidade da corrente nos LEDs quando alimentados pela rede elétrica. Se este elemento for substituído por um resistor variável, será possível alterar o valor da corrente nos LEDs e conseqüentemente proporcionar a variação da intensidade luminosa da lâmpada.

Como a tensão de saída máxima é 20 V, a variação da razão cíclica realizada pelo NCP1013 permite a operação do conversor através da rede elétrica com tensão de entrada universal (90 V_{AC} a 240 V_{AC}), facilitando a aplicação da lâmpada em qualquer sistema elétrico.

Outra vantagem deste circuito é que sua implementação não está restrito a um fabricante específico, visto que existem circuitos semelhantes ao NCP1013 comercializados também por outras empresas. Além disso, os fabricantes propõem o uso destes circuitos normalmente para controle de tensão de saída utilizando opto acopladores, enquanto neste trabalho está aplicado ao controle de corrente sem empregar opto acopladores, enrolamentos auxiliares ou microcontroladores.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A. Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Alto-Brilho

Para validar a idéia proposta e analisar a qualidade do projeto realizado, dois protótipos foram desenvolvidos. Para uma iluminação uniforme com características semelhantes às lâmpadas incandescentes e LFCs, um circuito com 49 LEDs foi implementado em uma superfície esférica. A forma de onda da tensão no resistor R_{SENSE} é apresentada na Figura 2, o qual mostra que o controle atua, seguindo a tensão de referência. Conseqüentemente, como pode ser visto na Figura 3, a corrente nos LEDs permanece constante e igual ao valor projetado (22,46 mA).

As formas de onda da tensão e corrente no interruptor são mostradas na Figura 4. A comutação é realizada com uma razão cíclica de aproximadamente 16 %, resultando em uma tensão de saída de 160,5 V. A corrente de pico no interruptor atinge 144 mA evitando que o NCP1013 entre em modo de espera. O valor médio desta corrente pode ser utilizado para calcular a potência de entrada do circuito (12 mA). O consumo da lâmpada foi de 3,8 W. O rendimento do conversor foi de aproximadamente 95 %.

Com o objetivo de simular a falha de LEDs, dois desses dispositivos foram removidos do circuito. Assim, os Diacs conectados em paralelo com o grupo que continham os dispositivos removidos tornaram-se condutores e a tensão em R_{SENSE} , e conseqüentemente a corrente nos LEDs remanescentes (35 LEDs), permaneceram constantes como mostram a Figura 5 e a Figura 6, respectivamente.

Para analisar o comportamento da lâmpada com a carga mínima, um circuito com 36 LEDs foi implementado, em uma superfície plana, resultando em uma iluminação direcional, similar as lâmpadas dicróicas. A Figura 7 mostra a forma de onda da tensão em R_{SENSE} e a Figura 8 a tensão e corrente nos LEDs. A tensão no resistor seguiu a referência, limitando a corrente nos LEDs em 20 mA. A Figura 9 mostra a foto do protótipo do circuito proposto. A Figura 10 mostra a foto da lâmpada empregando 49 LEDs e a Figura 11 a foto do protótipo empregando 36 LEDs.

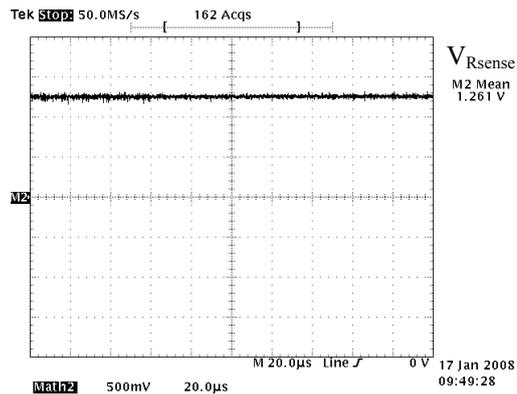


Fig. 2. Tensão no resistor R_{SENSE} para 49 LEDs (500mV/div, 20µs).

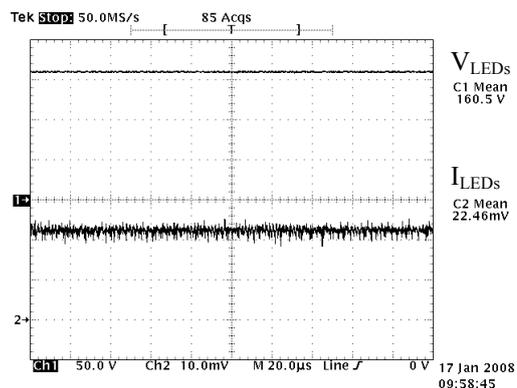


Fig. 3. Tensão e corrente aplicada aos 49 LEDs (50V/div, 10mA/div, 20µs).

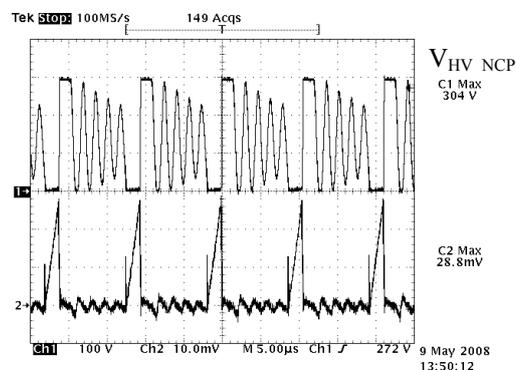


Fig. 4. Tensão e corrente no interruptor do NCP1013 (100V/div, 50mA/div, 5µs).

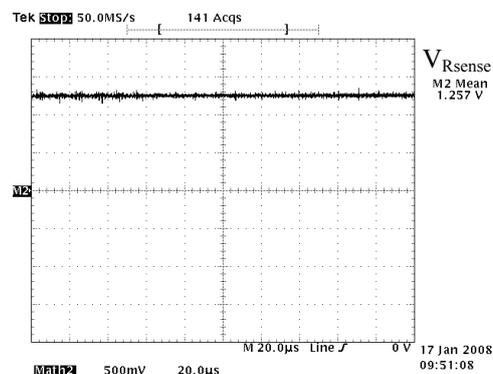


Fig. 5. Tensão no resistor R_{SENSE} para 35 LEDs (2 Diacs em funcionamento) (500mV/div, 20µs).

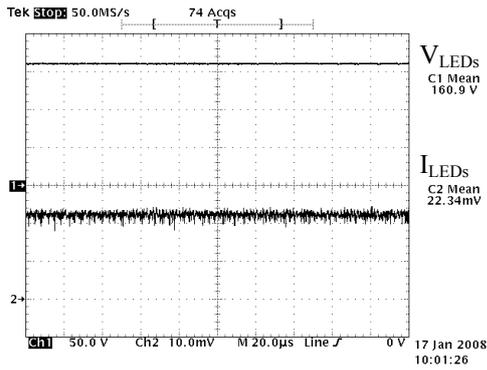


Fig. 6. Tensão e corrente aplicado aos 35 LEDs (2 Diacs em funcionamento) (50V/div, 10mA/div, 20µs).

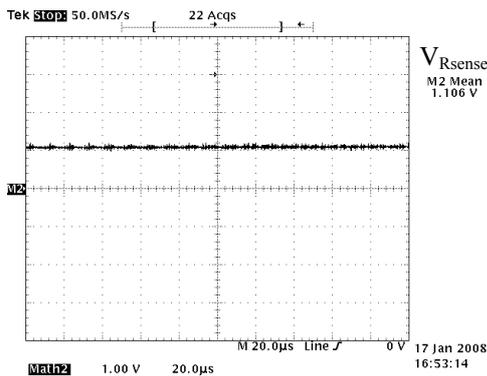


Fig. 7. Tensão no resistor R_{SENSE} para 36 LEDs (1V/div, 20µs).

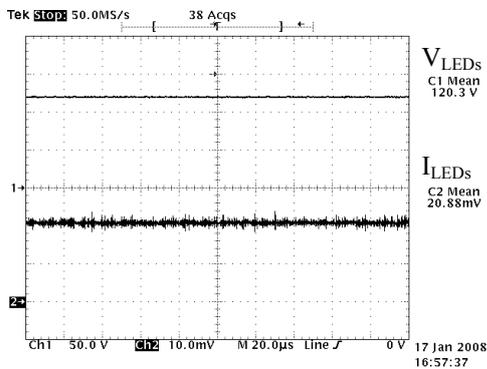


Fig. 8. Tensão e corrente aplicado aos 36 LEDs (50V/div, 10mA/div, 20µs).

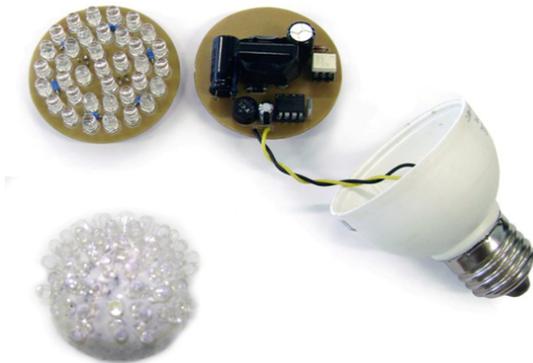


Fig. 9. Protótipo do circuito.



Fig. 10. Protótipo da lâmpada com 49 LEDs.



Fig. 11. Protótipo da lâmpada com 36 LEDs.

B. Lâmpada Compacta Empregando LEDs de Potência

O circuito empregando LEDs de potência também foi implementado de forma a analisar o funcionamento da idéia proposta. A tensão de barramento (V_{Cbus}) e a corrente no interruptor do Buck são mostradas na Figura 12. Devido à pequena ondulação da corrente no indutor do Buck, mostrada na Figura 13, a corrente nos LEDs é mantida constante sem a necessidade de um capacitor de saída no conversor.

Para analisar o funcionamento do circuito sob entrada universal (90 V_{CA} a 240 V_{CA}), a tensão de barramento (V_{Cbus}) e a corrente nos LEDs são mostradas na Figura 14. O controlador mantém a corrente nos LEDs (300 mA) mesmo com a variação da tensão de entrada.

A Figura 15 mostra a tensão e corrente nos LEDs. Através da Figura 12 e da Figura 15 é possível calcular a potência de entrada e saída do circuito, respectivamente. O rendimento encontrado foi aproximadamente 90 %. A Figura 16 mostra as fotos do protótipo desenvolvido.

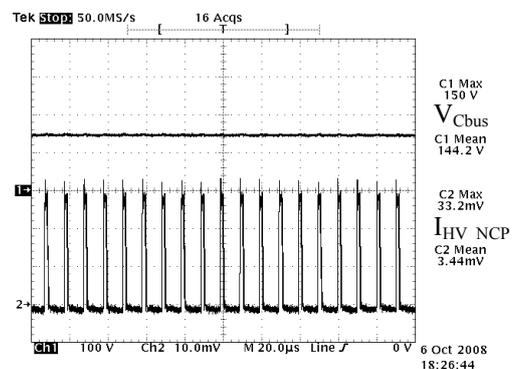


Fig. 12. Tensão no barramento e corrente no interruptor do Buck (100 V/div, 100 mA/div, 20 µs).

VII. AVALIAÇÃO DA IDÉIA PROPOSTA

Para avaliar as contribuições da idéia proposta, os sistemas de iluminação implementados foram analisados e comparados com os sistemas semelhantes existentes no mercado, como lâmpadas incandescentes, fluorescentes compactas e lâmpadas dicróicas. As características consideradas nesta análise foram o custo, iluminância emitida e potência do equipamento.

A lâmpada incandescente possui luminosidade uniforme, pois a iluminância emitida em todas as direções é a mesma. Já para a lâmpada fluorescente compacta o mesmo não acontece. O ponto que apresenta a maior intensidade luminosa é a lateral da lâmpada, que é normalmente direcionado para as paredes do ambiente e não para os objetos a serem iluminados.

A lâmpada compacta empregando 49 LEDs de alto-brilho, proposta neste trabalho, apresentou uma luminosidade uniforme, semelhante à lâmpada incandescente. Isto devido à disposição dos LEDs em uma superfície radial. A iluminância medida na parte frontal e lateral deste equipamento foi a mesma, e atingiu valores próximos ao obtido no ponto de maior luminosidade de uma lâmpada fluorescente compacta de 8 W (60 lux). Além disso, a potência necessária para o funcionamento da lâmpada foi significativamente menor, apenas 3,8 W.

A lâmpada compacta proposta, empregando 36 LEDs de alto-brilho, foi comparada a uma lâmpada dicróica (de 20 W e 600 lux) devido à semelhança de apresentar uma iluminação direcional. A lâmpada implementada apresentou uma luminosidade 1,5 vezes maior (900 lux) com uma potência de 2,7 W. O mesmo equipamento também foi comparado a uma lâmpada comercial empregando 18 LEDs de alto-brilho (1,2 W e 267 lux). Embora a quantidade de LEDs seja diferente, a relação entre a iluminância e potência também foi superior para o sistema proposto.

A lâmpada proposta empregando LEDs de potência apresentou uma iluminância na sua parte frontal superior à da lâmpada incandescente de 60 W e da LFC de 14 W. A potência na lâmpada é de 5 W.

Atualmente, as lâmpadas existentes no mercado nacional empregando LEDs, são comercializadas a valores entre vinte e cinco e quarenta reais, e são constituídas de 12 a 36 LEDs. O custo dos componentes utilizados no circuito proposto foi de aproximadamente cinco reais. O custo total da lâmpada para 49 LEDs foi de treze reais.

VIII. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um sistema de iluminação eficiente empregando LEDs, com o objetivo de substituir lâmpadas incandescentes e fluorescentes compactas. O uso de LEDs é justificado devido à maior eficiência e longa vida útil destes dispositivos. O projeto permite alimentar tanto LEDs de alto-brilho quanto de potência conectados em série.

Três protótipos foram desenvolvidos e comparados aos produtos encontrados no mercado. A luminosidade emitida pelas lâmpadas propostas foi superior às demais. Além disso, o circuito proposto é simples, de baixo custo. Os resultados experimentais mostram que a corrente nos LEDs é mantida constante, validando a idéia proposta. O sistema garante a

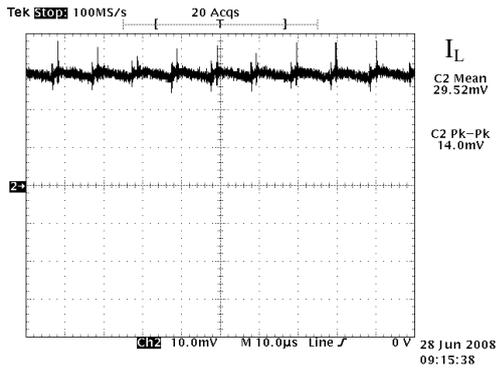


Fig. 13. Corrente no indutor (100 mA/div, 10 µs).

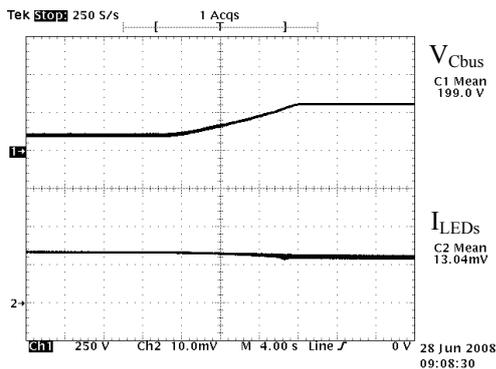


Fig. 14. Tensão no barramento para 90 V_{CA} a 240 V_{CA} e corrente nos LEDs (250 V/div, 200 mA/div, 4 s).

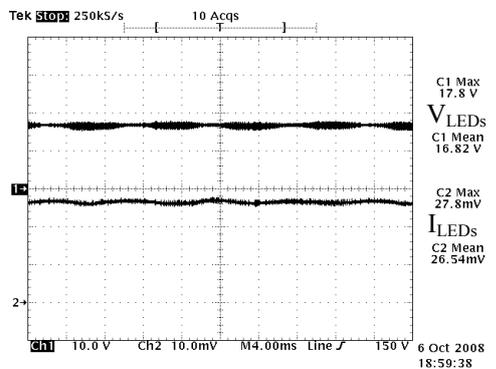


Fig. 15. Tensão e corrente nos LEDs (10 V/div, 100 mA/div, 4 ms).



Fig. 16. Protótipo da lâmpada empregando LEDs de potência.

operação do circuito mesmo com a falha de alguns LEDs, garantindo a iluminação provisória do ambiente, o que não acontece com as demais lâmpadas. Além disso, o sistema permite que o LED defeituoso seja substituído reduzindo o custo de manutenção e evitando o descarte desnecessário da lâmpada. O baixo consumo da lâmpada a LED justifica o projeto e o desenvolvimento de novos sistemas de iluminação mais eficientes.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio financeiro da CAPES através de bolsa de estudos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. J. C. da Costa. *Iluminação econômica: cálculo e avaliação*. EDIPUCRS, 561 p., 2005.
- [2] PHILIPS. “Energia eficiente: incandescente”. <<http://www.energiaeficiente.com.br/tag/incandescente>>. Acesso em: 23 set. 2008.
- [3] E. M. Sá Junior. “Estudo de novas estruturas de reatores eletrônicos para LEDs de iluminação”. Exame de Qualificação (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.
- [4] J. D. Bullough. “Lighting answers: LED Lighting Systems.” *National Lighting Product Information Program, Lighting Research Center, Rensselaer Polytechnic Institute*. Vol. 7, Issue 3, 2003.
- [5] M. Cervi et al. “A semiconductor lighting system controlled through a LIN network to automotive application”. *Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting*, v. 3, p. 1603-1608, 2005.
- [6] A. A. M. Oliveira. “Sistema de iluminação distribuída utilizando LED’s acionados por dois conversores Flyback integrados”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- [7] H. Van Der Broeck, G. Sauerländer, M. Wendt. “Power driver topologies and control schemes for LEDs”. *Applied Power Electronics Conference*, p. 1319-1325, 2007.
- [8] A. E. Demian Junior et. al. “LED Lamp Drive Using Microcontroller-Based Quadratic Buck Converter”. *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, p.346, 2007.
- [9] OSRAM. <<http://www.osram.com.br>>. Acesso em: 30 set. 2007.
- [10] LUXEON. “Power light source Luxeon Rebel: LXML-PWN1-0080”. Folha de Especificação, 2008.
- [11] OSRAM. “Comparison of LED circuits”. Nota de aplicação, 2004.
- [12] M. Schmid et al. “Evaluation on the efficiency of power LEDs driven with currents typical to switch mode power supplies”. *Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting*, 2007.
- [13] G. Sauerländer et al. “Driver electronics for LEDs”. *Conference Records of Industry Applications Society Annual Meeting*, v. 5, p. 2621-2626, 2006.
- [14] ON SEMICONDUCTOR. “Self-supplied monolithic switcher for low standby-power offline SMPS: NCP101x”. Folha de Especificação, 2007.
- [15] R. W. Erickson. “*Fundamentals of power electronics*”. Norwell: MA Kluwer Academic Publishers, 2. ed., 2000.

DADOS BIOGRÁFICOS

Rafael Adaime Pinto nasceu em Santa Maria, Brasil, em 1984. É graduado em Engenharia Elétrica desde 2007 pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). É pesquisador do grupo GEDRE (Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos) desde 2002 e atualmente é estudante de doutorado do curso de pós-graduação da mesma Universidade. Suas principais áreas de interesse incluem sistemas de iluminação inteligentes, reatores eletrônicos, conversores CC/CC, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de descarga de alta pressão e LEDs.

Marcelo Rafael Cosetin nasceu em Horizontina, Brasil, em 1985. É estudante do curso de Engenharia Elétrica desde 2006 pela UFSM. É pesquisador do grupo GEDRE (Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos) desde 2007. Suas principais áreas de interesse incluem sistemas de iluminação inteligentes, reatores eletrônicos, conversores CC/CC, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de descarga de alta pressão e LEDs.

Tiago Bandeira Marchesan nasceu em Santa Maria, Brasil, em 1980. Possui graduação em Engenharia Elétrica desde 2003 e doutorado (2008) pela UFSM. É pesquisador do grupo GEDRE (Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos) desde 2000. Suas principais áreas de interesse incluem reatores eletrônicos, modelagem e simulação de conversores e lâmpadas de descarga de alta pressão.

Alexandre Campos nasceu em Criciúma, Brasil, possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFSM (1981), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1986) e Ph.D. em Engenharia Elétrica pela Concordia University, Montreal (1994). Atualmente é Professor Associado na UFSM. Atua principalmente nos seguintes temas: reatores eletrônicos, conversores estáticos de potência, compensadores e filtros estáticos de potência, sistemas de iluminação, sistemas lógicos programáveis e processamento de sinais.

Ricardo Nederson do Prado nasceu em Itapiranga, Brasil, em 1961. Possui graduação em Engenharia Elétrica pela UFSM (1984), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1987), doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1993) e pos-doutorado pela Fraunhofer Institute Autonomie Intelligente Systeme (2006). Atualmente é Professor Associado da Universidade Federal de Santa Maria e responsável pelo grupo GEDRE (Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos). Suas principais áreas de interesse incluem reatores eletrônicos, lâmpadas fluorescentes, lâmpadas de descarga de alta pressão e LEDs.