

LÂMPADA COMPACTA EMPREGANDO LEDS DE ALTO-BRILHO

RAFAEL A. PINTO, MARCELO R. COSETIN, TIAGO B. MARCHESAN,
ALEXANDRE CAMPOS E RICARDO N. DO PRADO

Grupo de Estudos e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos - GEDRE
Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS
Av. Roraima 1000, Centro de Tecnologia, Sala 171, CEP 97105-900
E-mails: pintosma@gmail.com, rnprado@ieee.org

Abstract— This paper proposes a circuit for a compact lamp based on high-brightness 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 LEDs of 5 mm connected in series, resulting in a converter output voltage between 90V and 187V. 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 fix 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 breakdown voltage is reached, and the Diac in parallel with this group conduces guaranteeing the operating of the others groups. To verify the proposed idea, the compact lamp has been implemented and tested.

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

Resumo— Este artigo descreve um circuito para uma lâmpada compacta empregando LEDs de alto-brilho. Visando economia de energia elétrica, alta eficácia luminosa e alta 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 uma corrente contínua, o conversor Buck foi escolhido 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 5 mm conectados em série, resultando em uma tensão de saída no conversor de 90V a 187V. 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 trabalho é introduzir Diacs em paralelo com grupos de LEDs. Assim, se um LED falhar a tensão de disparo é alcançada e o Diac em paralelo com este grupo entra em condução, garantindo a operação dos demais grupos. Para validar a idéia proposta, um protótipo foi implementado e testado.

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

1 Introdução

Aproximadamente 20% do total de energia elétrica consumida atualmente é destinada à iluminação. Este fator, juntamente com o aumento do consumo de energia elétrica em outros segmentos tornaram o desenvolvimento de sistemas de iluminação eficientes cada vez mais importante.

As lâmpadas incandescentes, amplamente utilizadas na iluminação residencial, estão sendo abolidas em muitos países devido a sua baixa eficiência. A substituição destas lâmpadas por lâmpadas fluorescentes compactas (LFC) foi uma alternativa encontrada para reduzir o consumo de energia elétrica. No entanto, Diodos Emissores de Luz (LEDs) apresentam maior eficiência e maior vida útil comparados às lâmpadas fluorescentes (Cervi, 2005).

Os LEDs surgiram no início do século XX, onde emissão de luz em um material sólido, causada por uma fonte elétrica, foi reportada e chamada de eletroluminescência. Primeiramente, eram utilizados em iluminação indicativa, mas o desenvolvimento de LEDs mais potentes e com maior eficácia luminosa tornou possível sua utilização em iluminação de ambientes.

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.

Assim, o objetivo deste trabalho é desenvolver um sistema de iluminação compacto que permita substituir diretamente as lâmpadas incandescentes e LFC 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.

Em 2001, após a crise energética que abalou o país, o governo federal estimulou o uso das LFC e estas tomaram um espaço considerável do mercado principalmente na iluminação residencial. No entanto, o que seria uma alternativa para reduzir o consumo de energia elétrica do país tem ocasionado outro problema. A imensa procura por LFC fez com que produtos de baixa qualidade invadissem o mercado. Assim, desde no final de 2007, o governo decidiu fiscalizar os produtos determinando que estes sejam aprovados pelo Instituto Nacional de Metrologia, Normatização e Qualidade Industrial (Inmetro) e pelo Selo Nacional de Conservação de Energia (ENCE) antes de serem comercializados.

Da mesma maneira, as lâmpadas compactas a LEDs existentes no mercado nem sempre visam à qualidade do sistema. Além disso, por ser uma tecnologia emergente, ainda não se chegou a uma conclusão a respeito do circuito ideal para alimentar os LEDs. Portanto, pesquisas de sistemas de iluminação que visam além do baixo custo, a qualidade de iluminação e eficiência energética são de extrema importância e devem ser disseminadas para que as empresas possam aplicar esta tecnologia no mercado, trazendo resultados positivos para a sociedade e para o meio ambiente.

2 Características e Aplicações dos LEDs

A vantagem da utilização de LEDs em sistemas de iluminação é devido à 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) (OSRAM, 2007). A vida útil de um LED pode atingir 60.000 horas enquanto lâmpadas incandescentes e LFC alcançam 1.000 horas e 6.000 horas, respectivamente (Oliveira, 2007).

Outra vantagem do LED é seu tamanho reduzido, além de resistência a choques e vibrações e o fato de não possuem gás ou filamentos em seu interior.

3 Conexão dos LEDs

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 2,5V e 4V. Assim, torna-se mais difícil controlar a corrente aplicada aos dispositivos 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 saída do conversor (Oliveira, 2007). 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 (OSRAM, 2004).

4 Proteção Contra a Falha dos LEDs

A idéia proposta para solucionar o problema da falha de um LED é a introdução de Diacs 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.

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 provisoriamente até que o LED defeituoso seja substituído, sob pena de redução da intensidade luminosa total, que é proporcional ao número de LEDs desativados.

Esta característica evita o descarte da lâmpada, como acontece com as LFC e ainda permite a manutenção do sistema com custo reduzido, uma vez que o custo de um LED é pequeno comparado ao valor total do equipamento. O descarte inadequado de LFC traz prejuízo ao meio ambiente, visto que o mercúrio presente nestas lâmpadas pode causar graves doenças em pessoas e animais que entrem em contato com esta substância, e por isto deve ser evitado.

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

5 Circuito Proposto

Os conversores Buck, Boost, Buck-Boost e Flyback são bastante conhecidos na literatura e amplamente utilizados para alimentar LEDs (Van der Broeck, 2007). 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. 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 com uma corrente contínua de 23 mA. A carga pode ser composta por 36 a 52 LEDs de 5 mm conectados em série, para uma tensão de entrada de $220V_{RMS}$, resultando em uma tensão de saída no conversor entre 90V e 187V.

Entre as diversas formas de onda de corrente utilizadas para alimentar LEDs, aquela que propicia a melhor eficiência luminosa é a corrente contínua (Schmid, 2007 e Sauerländer, 2006) e por esta razão foi utilizada neste trabalho. O circuito proposto alimentando 49 LEDs é apresentado na Fig. 1.

Neste circuito, a tensão da rede ($220V_{RMS}$) é retificada pelos diodos (D_1 - D_4) e filtrada pelo capacitor de barramento (C_{bus}). O interruptor é implementado pelo circuito integrado 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, possui baixo consumo e baixo custo (ON Semiconductor, 2007). Sua alimentação é feita através de um capacitor (C_N) apenas.

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 D_5 conduz e a energia armazenada em L é entregue ao capacitor C_O e a carga. A tensão máxima aplicada no interruptor e no diodo é igual a tensão do capacitor de barramento ($V_{C_{bus}}$).

O controle da corrente nos LEDs é feito através de um resistor shunt (R_{SENSE}) conectado em série com a carga (Van der Broeck, 2007). Quando a tensão no resistor varia, e conseqüentemente sua corrente, o controlador interno do NCP1013 altera a razão cíclica com o objetivo de manter a tensão de referência. Esta tensão de referência deve ser a menor possível para não prejudicar o rendimento do circuito.

Quando a tensão em R_{SENSE} aumentar até atingir a tensão de condução do diodo (D_{REF}) mais a tensão base-emissor do transistor (T_C), aproximadamente 1,3V, este dispositivo conduz e altera a tensão no pino FB. Esta variação de tensão no pino FB altera a razão cíclica. O capacitor C_{FB} é recomendado pelo fabricante do CI para reduzir um possível ruído neste pino. A corrente nos LEDs é projetada para 23 mA. A tensão de referência é 1,3V. Assim, o valor de R_{SENSE} é igual a 56Ω , determinado pela equação (1).

$$R_{SENSE} = \frac{V_{D_{REF}} + V_{T_{BE}}}{I_{LEDs}} \quad (1)$$

Onde:

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

A potência dissipada no resistor é somente 30mW. E a potência total nos LEDs é aproximadamente 3.6W.

Os LEDs foram divididos em sete grupos empregando um Diac do modelo DB3 em paralelo com cada um dos grupos. A tensão máxima do LED utilizado pode chegar a 3,6V e, portanto o grupo terá uma tensão máxima de 25,2V, inferior à tensão de disparo mínima do Diac (28V).

Se a corrente que circula pelo interruptor interno do NCP1013 for menor que 25% da corrente nominal (350mA), 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 (23mA) com um pico de corrente desejável no interruptor.

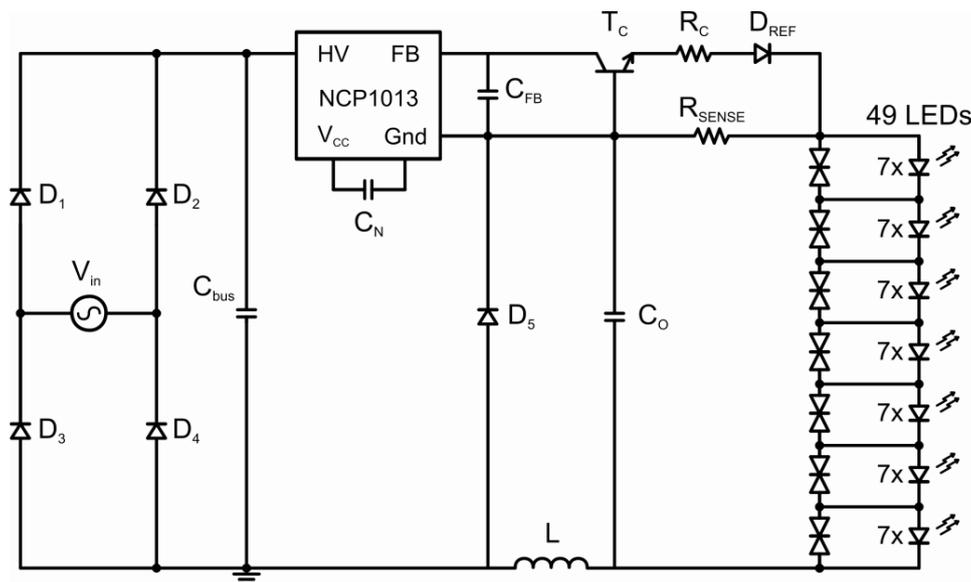


Figura 1. Circuito Proposto.

O indutor é projetado para que a corrente no NCP1013 alcance 25% do seu valor nominal. O valor é determinado pela equação (2) (Erickson, 2000).

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

Onde:

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

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 215V, 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 389V, 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 2,5V e 3,6V. Como a carga também pode ser composta por 36 a 52 LEDs, a tensão de saída do conversor (V_o) deverá ser especificadas para valores entre 90V e 187V mais 1,3V da tensão de referência. A corrente de pico mínima deverá atingir pelo menos 25% do valor nominal do interruptor (igual a 88mA). A freqüência de comutação é 100kHz 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 1,6mH 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 da equação (3). A razão cíclica mínima neste projeto será 8,6%.

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

Onde:

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

A corrente máxima no interruptor ocorre nesta situação e pode ser obtida através da equação (4). O valor da corrente máxima é de aproximadamente 160mA, 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. O valor é determinado pela equação (5) (Erickson, 2000). A ondulação da tensão de saída (ΔV) foi especificada em 350mV. O valor de C_o utilizado no projeto é de 2,2 μ F.

$$C_o = \frac{V_{0\max} \times (1 - D_{\max})}{8 \times \Delta V \times L \times f_s^2} \quad (5)$$

A mesma topologia também pode ser aplicada para operar como bivolt, detectando automaticamente a tensão de entrada (110V_{AC} ou 220V_{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.

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 ou enrolamentos auxiliares.

6 Resultados Experimentais

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 LFC, um circuito com 49 LEDs foi implementado em uma superfície esférica. A forma de onda da tensão no resistor R_{SENSE} é apresentada na Fig. 2, o qual mostra que o controle atua, seguindo a tensão de referência. Conseqüentemente, como pode ser visto na Fig. 3, a corrente nos LEDs permanece constante e igual ao valor projetado (22,46mA).

As formas de onda da tensão e corrente no interruptor são mostradas na Fig. 4. A comutação é realizada com uma razão cíclica de aproximadamente 16%, resultando em uma tensão de saída de 160,5V. A corrente de pico no interruptor atinge 144mA 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 (12mA).

O consumo da lâmpada foi de 3,8W. 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 um curto-circuito e a tensão em R_{SENSE} , e consequentemente a corrente nos LEDs (35 LEDs), permaneceram constantes como mostram as Fig. 5 e 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 di-crônicas. A Fig. 7 mostra a forma de onda da tensão em R_{SENSE} e a Fig. 8 a tensão e corrente nos LEDs. A tensão no resistor seguiu a referência, limitando a corrente nos LEDs em 20mA.

A lâmpada foi testada atingindo 60 LUX a um metro de distância do luxímetro com 49 LEDs, aproximadamente o mesmo valor encontrado para uma lâmpada fluorescente compacta de 8W e 900 LUX para o circuito de 36 LEDs com iluminação direcional.

A Fig. 9 mostra a foto do protótipo do circuito proposto. A Fig. 10 mostra a foto da lâmpada empregando 49 LEDs e a Fig. 11 a foto do protótipo empregando 36 LEDs.

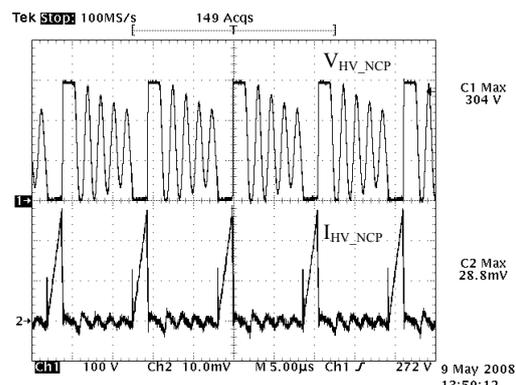


Figura 4. Tensão e corrente no interruptor do NCP1013 (100V/div, 50mA/div, 5µs).

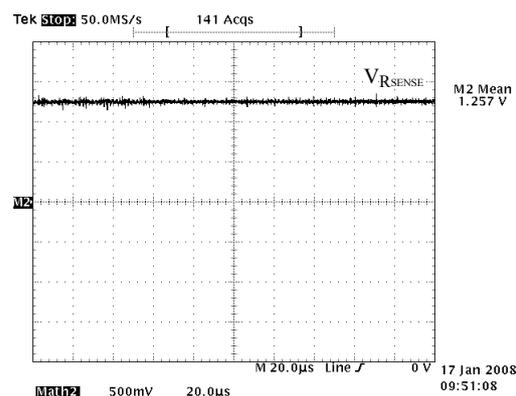


Figura 5. Tensão no resistor R_{SENSE} para 35 LEDs (2 Diacs em funcionamento) (500mV/div, 20µs).

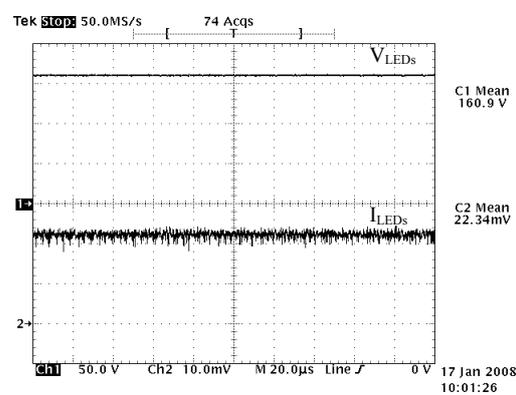


Figura 6. Tensão e corrente aplicado aos 35 LEDs (2 Diacs em funcionamento) (50V/div, 10mA/div, 20µs).

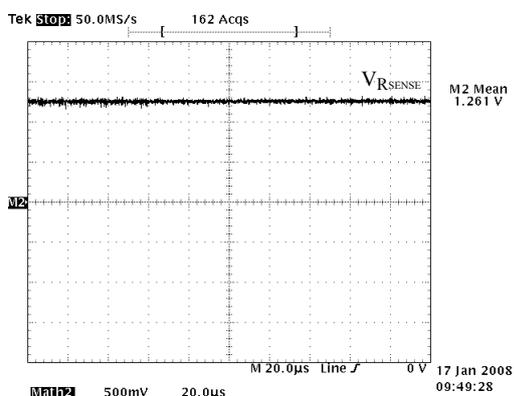


Figura 2. Tensão no resistor R_{SENSE} para 49 LEDs (500mV/div, 20µs).

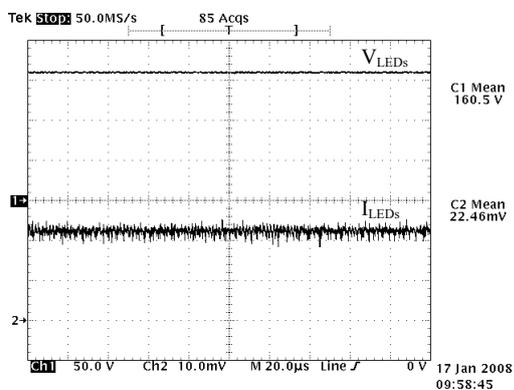


Figura 3. Tensão e corrente aplicada aos 49 LEDs (50V/div, 10mA/div, 20µs).

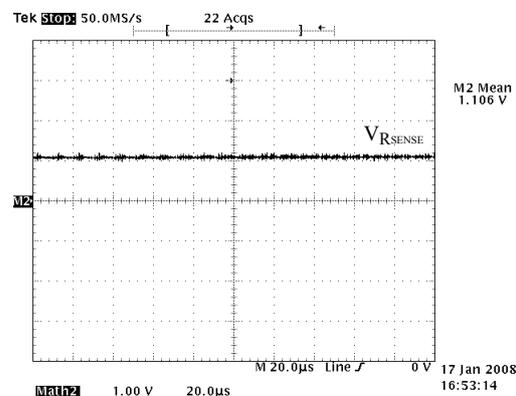


Figura 7. Tensão no resistor R_{SENSE} para 36 LEDs (1V/div, 20µs).

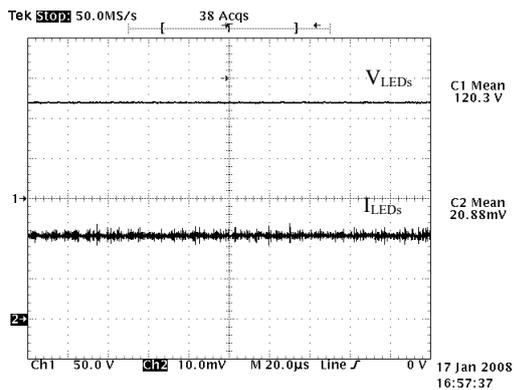


Figura 8. Tensão e corrente aplicado aos 36 LEDs (50V/div, 10mA/div, 20µs).



Figura 9. Protótipo do circuito.



Figura 10. Protótipo da lâmpada com 49 LEDs.



Figura 11. Protótipo da lâmpada com 36 LEDs.

7 Conclusão

Este trabalho apresentou o projeto para uma lâmpada compacta empregando LEDs de alto-brilho, com o objetivo de substituir lâmpadas incandescentes e fluorescentes compacta. O circuito proposto é simples e de baixo custo. O uso de LEDs permite maior

eficiência e maior vida útil do sistema comparado aos sistemas tradicionais. O projeto permite alimentar de 36 a 52 LEDs de 5 mm conectados em série.

Um protótipo foi desenvolvido e os resultados experimentais mostraram que a corrente nos LEDs foi mantida constante, validando a idéia proposta. O sistema garante a 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.

Outra contribuição do circuito proposto é o controle da corrente nos LEDs sem a utilização de opto acopladores fazendo uso de um circuito integrado simples e de baixo custo. A mesma topologia também pode ser utilizada para a substituição de LFC de potências maiores se forem utilizados LEDs com maior eficácia luminosa. A alimentação com entrada bivolt estende o campo de aplicação desta lâmpada.

Referências Bibliográficas

- Cervi, M., Pappis, D., Marchesan, T. B., Campos, A., Prado R. N. (2005). A Semiconductor Lighting System Controlled Through a Lin Network to Automotive Application. *Industry Applications Conference IAS*.
- Erickson, R. W. (2000). *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed.; Norwell, MA Kluwer Academic Publishers.
- Oliveira, A. A. M. de, Marchesan, T. B., Campos, A., Prado R.N. (2007). Distributed Emergency Lighting System LEDs Driven by Two Integrated Flyback Converters. *Industry Applications Conference IAS*.
- ON Semiconductor. Folha de especificações NCP101x (2007). <<http://www.onsemi.com>>
- OSRAM. (2004). Comparison of LED Circuits. *Application Note*. <<http://www.osram.com>>
- OSRAM. (2007). <<http://www.osram.com>>
- Sauerländer, G., et al. (2006). Driver Electronics for LEDs. *Industry Applications Conference, 41th IAS Annual Meeting*, vol 5, pp. 2621-2626.
- Schmid, M., Kuebrich, D., Weiland, M., Duerbaum, T. (2007). Evaluation on the Efficiency of Power LEDs Driven with Currents Typical to Switch Mode Power Supplies. *Industry Applications Conference IAS*.
- Van der Broeck, H., Sauerlander, G., Wendt, M. (2007). Power Driver Topologies and Control Schemes for LEDs. *Applied Power Electronics Conference (APEC)*, pp. 1319-1325.