

## Capítulo IX

# Análise comparativa dos métodos de dimerização de Leds de potência

Por Welbert Rodrigues e Lenin Morais\*

No cenário mundial de aquecimento global e aumento do custo de energia, a economia de energia e o desenvolvimento sustentável tornaram-se um ato fundamental para o desenvolvimento de um país. A ascensão da economia traz consigo um alto consumo de equipamentos eletroeletrônicos, aumentando, com isso, o consumo de energia elétrica de forma expressiva.

Como cerca de 20% da energia elétrica consumida no mundo é gasta com iluminação, há uma necessidade de que esse mercado avance no sentido de oferecer lâmpadas com uma alta eficiência luminosa. Atualmente, os Leds estão sendo utilizados em aplicações tradicionalmente dominadas pelas lâmpadas incandescentes e fluorescentes, sendo utilizados em sinais de trânsito, iluminação interna de veículos, LCD backlighting, iluminação de ambientes arquitetônicos e painéis luminosos com cores plenas.

As lâmpadas incandescentes apresentam uma eficiência luminosa em torno de 8 lm/W a 20 lm/W e somente 8% da energia consumida por elas é transformada em luz visível, sendo o restante irradiado em forma de calor. As lâmpadas fluorescentes possuem uma eficiência próxima de 100 lm/W e as lâmpadas a vapor de sódio em alta

pressão (HPS), atualmente aplicadas em iluminação pública, uma eficiência de 140 lm/W.

Entre as principais características dos diodos emissores de luz (Leds), destacam-se: longa vida útil, podendo chegar a 100.000 horas; tamanho reduzido da luminária; alta eficiência energética, 90lm/W; baixo custo de manutenção, pois não possuem gás ou filamento para emissão de luz, conseqüentemente, apresentam alta resistência a choques e vibrações, o que contribui com o aumento de sua confiabilidade; maior segurança aos usuários, pois eles trabalham em baixos níveis de tensão e corrente para alimentação, podendo ser alimentados por baterias; e simplicidade no seu acionamento, pois não necessitam de ignitor como as lâmpadas fluorescentes.

A eficiência dos Leds tornou-se expressiva somente na última década. Até então eram usados somente como sinalização. No ano de 2002, sua eficiência era em torno de 25 lm/W, em 2007 chegou aos 50 lm/W, sendo capazes de substituir as lâmpadas incandescentes e, atualmente, apresentam quase 100 lm/W, com expectativas de dobrar esse valor até 2020, podendo substituir as lâmpadas HPS, utilizadas para iluminação pública.

**TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS GERAIS DE DIVERSAS LÂMPADAS**

Lâmpada	lm/W	IRC	Vida (horas)
Incandescente	8 a 20	100	1.000
Fluorescente	100	62 a 97	10.000
Fluorescente Compacta	50	62 a 97	10.000
HPS	140	25	40.000
LED	90	85 a 100*	100.000

\*Led na cor branca

A Tabela 1 ilustra a situação atual dos Leds de potência perante as demais lâmpadas. O IRC é o índice de reprodução de cor.

Existem duas principais estratégias de dimerização dos Leds: variação do nível de corrente contínua, que controla a o fluxo luminoso emitido pelos Leds mudando a amplitude da corrente c.c por meio deles; e modulação por largura de pulso (PWM), que usa uma onda quadrada de correntes para alimentação dos dispositivos, assim, o fluxo é alterado variando-se a razão cíclica deste sinal. Os dois métodos são implementados para se fazer uma comparação para ser feita uma comparação.

Para a montagem do protótipo da fonte de alimentação dos Leds, utilizou-se o conversor DC-DC Buck operando no modo de condução contínua MCC. O projeto do controlador da malha de corrente foi feito de modo digital e implementado no DSP (Digital Signal Processor).

### Modelo elétrico do Led e influência da temperatura de junção

O dispositivo utilizado no projeto é o Led branco de 3 W, que emite um fluxo luminoso entre 113 a 250 lumens. A Figura 1 mostra o modelo elétrico simplificado do Led, modelo que representa uma boa aproximação das características elétricas do Led.

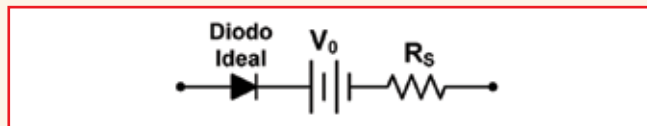


Figura 1 – Modelo elétrico simplificador do Led.

A expressão matemática que descreve o comportamento elétrico do Led é apresentada por (1).

$$V_{LED} = V_0 + R_S \cdot I_{LED} \quad (1)$$

Em que:

$V_{LED}$  – Queda de tensão do Led.

$I_{LED}$  – Corrente do Led.

$V_0$  – Fonte de tensão interna.

$R_S$  – Resistência parasita em série do Led.

Foi realizado o levantamento experimental da curva característica do Led ( $V_{LED} \times I_{LED}$ ), conforme mostrado na Figura 2. A partir da curva é possível definir os parâmetros do modelo do Led.  $R_S = 0,73\Omega$  e  $V_0 = 2,80$  V.

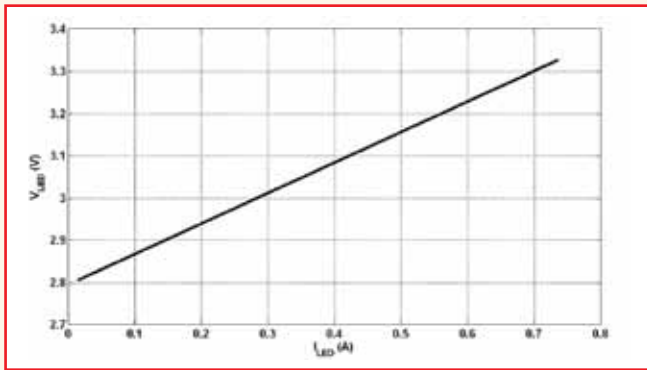


Figura 2 – Curva característica do Led estudado.

O cuidado que se deve ter ao projetar um sistema de iluminação com Led é a influência da temperatura em suas características, como: vida útil e fluxo luminoso. A vida útil do Led decresce exponencialmente com o aumento da temperatura de sua junção, como pode ser visto pela curva da Figura 3. O brilho do Led está diretamente relacionado com a corrente que flui por ele. A corrente no Led decresce com o aumento da temperatura de sua junção, portanto, ao se aumentar a temperatura de operação dos Leds, seu brilho diminui. Como esses Leds possuem uma potência mais elevada, além de possuírem uma pequena área de dissipação térmica, é importante que se faça um projeto para dissipação desse calor gerado.

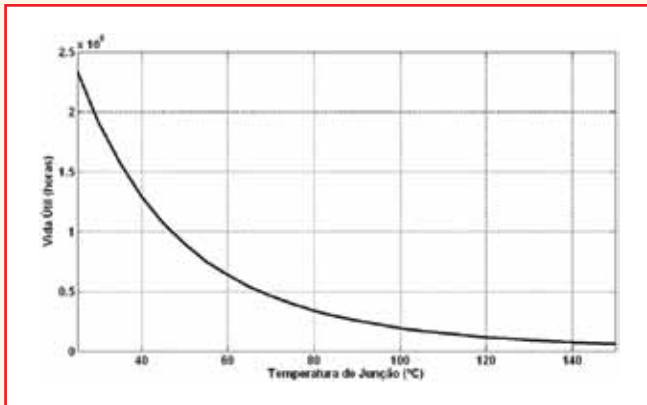


Figura 3 – Vida útil do Led estudado em função da temperatura de junção.

Outra característica do Led é que ele possui um coeficiente negativo de temperatura, ou seja, quando sua temperatura aumenta a resistência série parasita do Led diminui, diferente do que acontece com os condutores elétricos.

### Circuito implementado

O conversor escolhido para o projeto da fonte foi o Buck, devido à sua simplicidade e ao baixo custo, além disso possui um número reduzido de componente e, para a aplicação de Led, ele já apresenta as características necessárias. A fonte foi projetada para acionamento de seis Leds de potência, os quais possuem uma corrente nominal de 700 mA. Portanto, o Buck deve fornecer uma tensão mínima na saída da fonte de 19,87 V. O esquemático implementado é apresentado na Figura 4, em que é mostrado o conversor Buck e os blocos necessários para se fazer

o controle da corrente de saída da fonte. O barramento c.c. da fonte é representado por  $V_E$ , que é a saída do retificador da parte de potência da fonte.

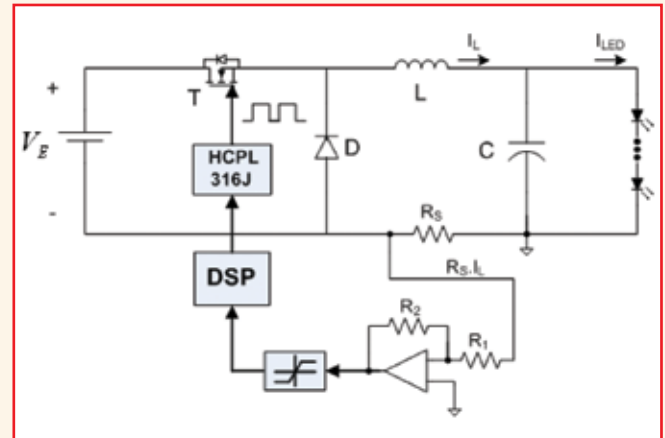


Figura 4 – Esquemático da fonte de corrente para alimentação dos Leds.

A leitura da corrente no indutor do Buck é realizada e enviada à entrada do conversor AD do DSP. Esse valor será comparado internamente com o valor de referência e esse erro serve como ação de controle do controlador, que irá gerar um sinal de controle, o qual será comparado com o sinal de uma portadora triangular, criando, assim, um sinal de PWM. Esse sinal de PWM será enviado à placa do conversor Buck e será o comando do transistor.

O modelamento do conversor Buck foi realizado por variáveis de estado e a função de transferência que relaciona a corrente de saída do conversor em função da razão cíclica do sinal de PWM foi definida. O método escolhido para se projetar o controlador foi o método do fator  $k$ , que é baseado em um algoritmo matemático, que determina os ganhos, os polos e os zeros do controlador de forma a forçar o sistema a desenvolver uma margem de fase e uma banda passante desejada. Optou-se por usar o controlador do Tipo II, que pode ser visto como um controlador PI com um polo em alta frequência, responsável por eliminar erros de estado estacionário e possuir característica de avanço de fase. A função literal desse controlador é apresentada em (2).

$$C(s) = K \frac{s + \omega_z}{s(s + \omega_p)} \quad (2)$$

Ao se realizar o projeto desse controlador, definiu-se os valores dos seus parâmetros:  $K = 21,11 \times 10^4$ ,  $\omega_z = 6,93$  rad/s e  $\omega_p = 91,12$  rad/s. A resposta em frequência desse controlador é apresentado no diagrama de Bode da Figura 5.

Como o controle foi feito de forma digital, teve de ser realizada a discretização dessa função de transferência.

As especificações dos componentes utilizados para o projeto da placa do conversor Buck são listados na Tabela 2. Como sensor de corrente foi utilizado um resistor shunt ( $R_S$ ) de potência de 3W e valor de  $0,33 \Omega$  ligado em série com o indutor.

O transistor IRF540 foi empregado para chavear a tensão do barramento c.c. O diodo do conversor usado na montagem é um diodo schottky, o qual suporta uma corrente de 20 A e tensão de até 100 V. O indutor do filtro LC adquirido para o protótipo apresenta indutância de 1 mH e suporta corrente de até 2,3 A.

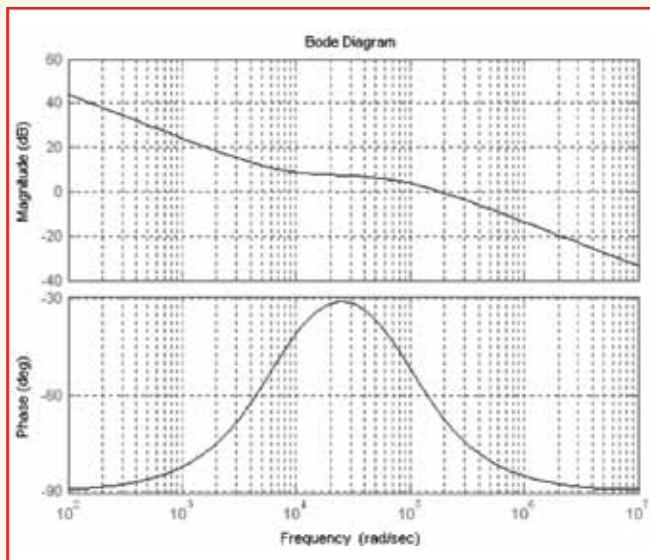


Figura 5 – Diagrama de Bode do compensador Tipo II.

TABELA 2 – COMPONENTES UTILIZADOS PARA A MONTAGEM DA PLACA DO CONVERSOR BUCK

Componente	Especificação
Indutor	1mH
Capacitor	22 $\mu$ F
Tensão de entrada	23V
Corrente de saída	700mA
Frequência de Chaveamento	40kHz
Diodo	MBR 20100
Driver	HCPL316J
Transistor	IRF540
Resistor shunt	0,33 $\Omega$ /3W

Para acionamento do transistor é proposto um circuito que emprega um driver optoacoplado com desaturação VCE integrado, com detecção e realimentação de estado de falta. A fonte auxiliar para alimentação dos CIs da placa utiliza o CI do tipo DIP-8 MAX253. Nessa configuração do circuito é definido um minitransformador Q4470CL, que possui uma alta capacidade de isolamento.

Para o condicionamento do sinal de corrente medido utilizou-se um amplificador operacional. Os valores dos resistores de precisão ( $\pm 1\%$ ) da Figura 4 são  $R1 = 9,53k\Omega$  e  $R2 = 95,3k\Omega$ , proporcionando um ganho de 20 dB. O circuito de condicionamento adapta a tensão de sua saída na faixa de operação do conversor AD do DSP (0 a 3,3 V).

### Dimerização dos Leds

A variação do fluxo luminoso (dimerização) dos Leds é

baseada na variação linear da corrente contínua aplicada neles ou por modulação por largura de pulso (PWM) da corrente nominal. A principal diferença entre as duas formas de dimerizar o Led é que a primeira impõe variação linear do valor da amplitude da corrente contínua, enquanto na modulação PWM a corrente imposta ao Led é uma onda quadrada com variação da razão cíclica dessa forma de onda.

As duas maneiras de dimerização estão ilustradas na Figura 6. Nos dois casos a corrente média fornecida ao Led é igual.

Ao se dimerizar um Led branco, ocorre um deslocamento do ponto de cromaticidade. Este deslocamento muda a distribuição do espectro da luz, alterando a amplitude, o pico do comprimento de onda e a forma do espectro. E essas alterações apresentam-se de forma diferente dependendo do tipo de dimerização, da variação da corrente contínua ou da modulação PWM. Os resultados obtidos por Dyble, Narendran, Bierman e Klein (ver referências) mostram que o desvio da cromaticidade é menor quando a intensidade luminosa do Led é controlada por meio da modulação PWM. Essa técnica foi adotada como padrão por diversos fabricantes de Leds e nos últimos anos a maioria dos catálogos dos Leds de alta potência passou a referenciar a modulação PWM como forma viável de se controlar o fluxo luminoso do Led.

A alteração do valor da corrente, que flui por meio do Led, afeta o comprimento de onda da luz emitida. Por isso, a dimerização por modulação PWM é mais indicada, pois neste caso é aplicada, o tempo todo, a corrente nominal do Led, mudando apenas a fração de tempo em que a corrente flui por período.

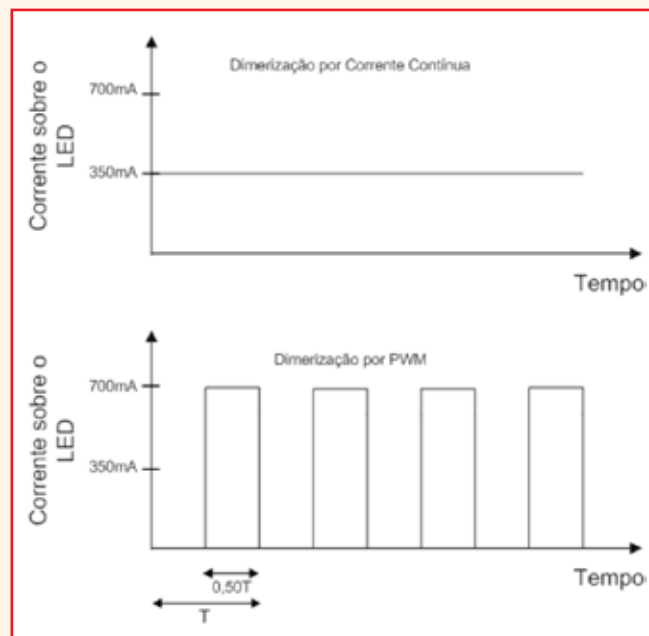


Figura 6 – Formas de onda da corrente no Led para as duas formas de dimerização.

Pelas simulações realizadas para se fazer o projeto da fonte, notou-se que quanto menor a frequência do sinal PWM de referência melhor o comportamento da corrente no indutor e

melhor a resposta do controlador diante dessa variação do sinal de referência. Porém, na prática, essas frequências baixas farão com que os Leds comecem a piscar, ou seja, ocorrerá o efeito de flicker. Nos trabalhos recentemente desenvolvidos nessa área a frequência utilizada para o sinal de referência é de 400 Hz.

### Resultados experimentais

O gráfico da Figura 7 mostra a corrente no indutor do conversor Buck e a tensão nos Leds em uma referência contínua no circuito de controle. Neste caso, os Leds estão funcionando

com a corrente nominal (700 mA).

Observou-se que o ripple da tensão e da corrente nos Leds, neste caso, foi de 3% e 12,5%, respectivamente. A Figura 8 mostra as mesmas grandezas, porém, agora com um sinal de PWM aplicado como referência, sendo a frequência do sinal de 400 Hz e razão cíclica de 50%.

No caso da referência PWM, observou-se um menor ripple na corrente do indutor, de aproximadamente 8%. As curvas da Figura 9 mostram a dimerização por variação da corrente contínua para três níveis de intensidade luminosa: 10%, 50% e 100%.

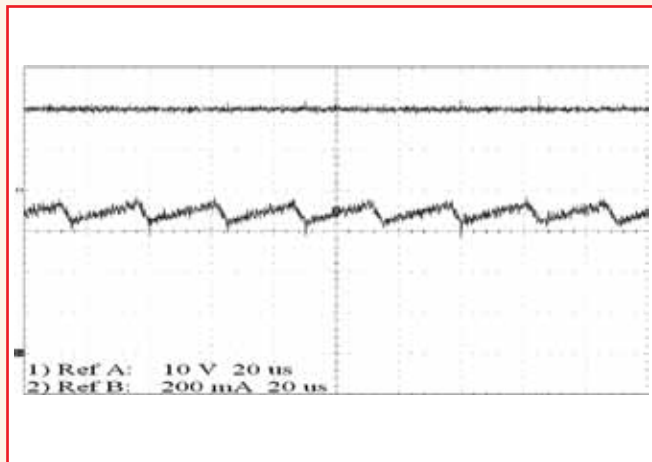


Figura 7 – Tensão no Led e corrente no indutor para uma referência contínua sendo aplicada ao circuito de controle.

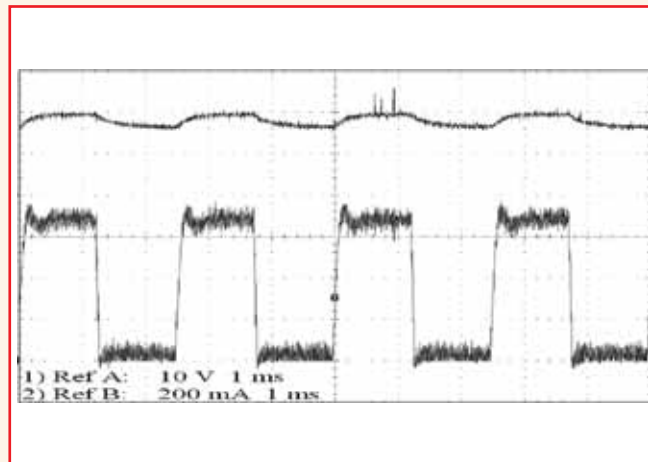
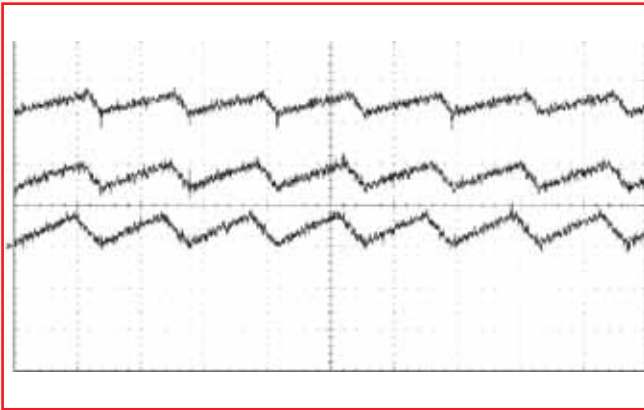
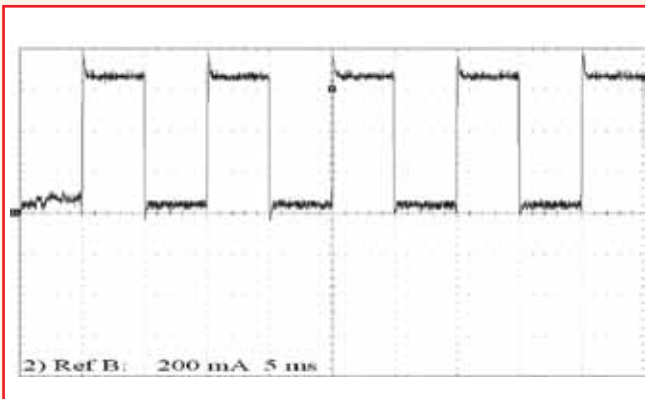


Figura 8 – Tensão no Led e corrente no indutor para uma referência PWM de 400 Hz sendo aplicada ao circuito de controle.

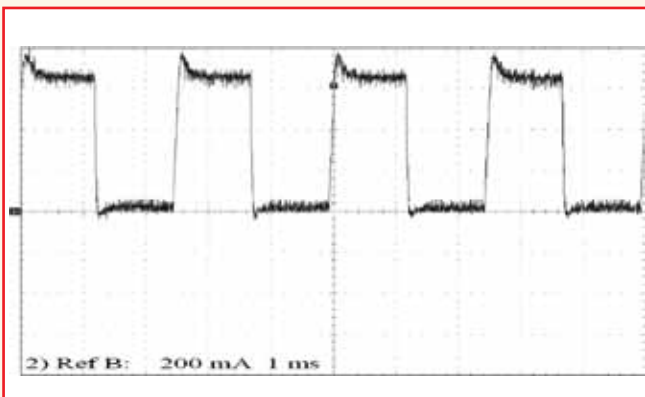


**Figura 9 – Dimerização por variação da corrente contínua de três níveis de intensidade: 10%, 50% e 100%.**

Como pode ser visto, quanto menor o nível de corrente, maior a ondulação da corrente no indutor. Foram registrados os ripple em cada uma das situações: 170%, 34% e 12,5%. Os gráficos das Figuras 10 e 11 fazem uma comparação para uma frequência de chaveamento de 100 kHz, da corrente no indutor quando se tem um sinal de PWM com frequências diferentes: 100 Hz e 400 Hz, respectivamente.



**Figura 10 – Corrente no indutor para uma referência PWM de 100 Hz e frequência de chaveamento de 100 kHz.**



**Figura 11 – Corrente no indutor para uma referência PWM de 400 Hz e frequência de chaveamento de 100 kHz.**

Observa-se que quanto menor a frequência do sinal PWM melhor o comportamento da corrente, mas para frequências muito baixas ocorrerá a cintilação da luz emitida pelos Leds.

Nos testes realizados com a fonte foi observado que para frequências superiores a 120 Hz os Leds não mais apresentavam esse efeito. Nos trabalhos recentemente realizados nessa área, a frequência utilizada para o sinal de referência é de 400 Hz. Ao se fazer uma comparação da corrente no indutor para frequências de chaveamento diferentes – Figura 8 (40 kHz) e Figura 11 (100 kHz) – quanto maior a frequência de chaveamento melhor será o comportamento da fonte, mas essa frequência é limitada, no caso do controle digital, à capacidade do processador empregado no projeto.

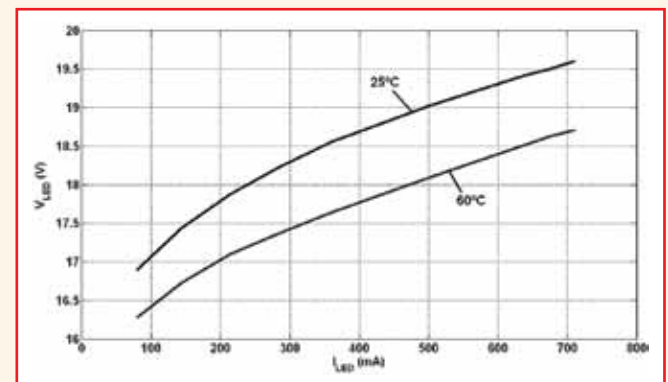
Para analisar a influência da temperatura na curva característica do Led, variou-se o valor da corrente que fluía pelos Leds e mediu-se a queda de tensão sobre eles para duas temperaturas: 25 °C e 60 °C. Os valores medidos foram colocados na Tabela 3 e, a partir deles, calculou-se a curva característica do Led para essas duas temperaturas. Essas curvas estão apresentadas no gráfico da Figura 12.

**TABELA 3 – CORRENTE E TENSÃO SOBRE OS LEDS PARA AS TEMPERATURAS DE 25 °C E 60 °C**

$I_{LED}$ (mA)	$V_{LED}$ (V) - 25°C	$V_{LED}$ (V) - 60°C
80	16,90	16,28
145	17,44	16,73
215	17,88	17,13
285	18,23	17,37
360	18,56	17,64
500	19,02	18,09
640	19,33	18,52
675	19,50	18,63
710	19,60	18,71

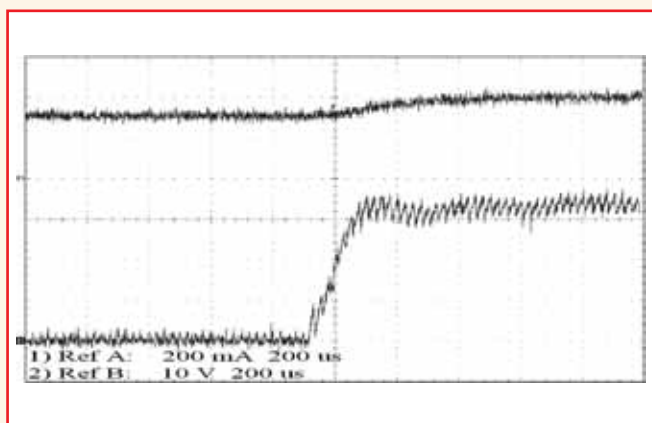
Ao se analisar os dados da Tabela 3, comprova-se que realmente o Led possui um coeficiente negativo de temperatura. Para a temperatura de 25 °C, a resistência série é de  $R_S = 0,72 \Omega$  e para a temperatura de 60 °C de  $R_S = 0,64 \Omega$ .

Por fim, para validar a dinâmica do controlador Tipo II implementado, aplicou-se um degrau de corrente de zero para o valor nominal (700 mA) e a resposta transitório foi salva e apresentada na Figura 13. No gráfico são mostradas as curvas de corrente no indutor e tensão sobre os Leds. Como se pode



**Figura 12 – Curva característica do Led para duas temperaturas: 25 °C e 60 °C.**

ver o controlador responde bem a perturbação e possui um tempo de resposta muito rápido.



**Figura 13 – Tensão nos Leds e corrente no indutor do Buck com aplicação de um degrau de corrente.**

### Conclusão

Com os resultados pode-se concluir que a dimerização por modulação PWM é muito mais vantajosa do que a dimerização por variação da corrente contínua. Os níveis de intensidades luminosas, além de maiores, são mais bem definidos e a ondulação da corrente no indutor apresentou-se menor para a referência PWM. No laboratório, ao se variar a frequência do sinal de PWM imposto como referência ao circuito de controle, foi nítida a cintilação da luz emitida pelos Leds para frequências inferiores a 120 Hz. A corrente do indutor apresentou um melhor comportamento com frequências mais baixas, porém, como a fonte de corrente alimentará um dispositivo emissor de luz, isso se torna inconveniente. Com isso, a frequência adotada para dimerização PWM é de 400 Hz.

A dimerização por corrente contínua apresentou como principal desvantagem o aumento do ripple da corrente no indutor ao se diminuir a intensidade de luz, podendo chegar a até 200% para correntes próximas de 10% da nominal. Outro fato a ser observado ao se utilizar o Led para iluminação é o desenvolvimento de um projeto de dissipação térmica para que os Leds não trabalhem em temperaturas muito elevadas e assim não prejudicar suas características.

### Referências

- JUNIOR, E. M. S. *Estudo de Novas Estruturas de Reatores Eletrônicos para Leds de Iluminação*. Tese de Doutorado, UFSC, Florianópolis/SC, Brasil, 2007.
- COSTA, R. E. *Sistematização do projeto de reatores eletrônicos para alimentação de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão para iluminação pública*. Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria/RS, Brasil, 2009.
- MORAIS, L. M. F. *Estudo, análise e implementação de formas de onda de tensão sintetizadas através de PWM, com estágio de ignição e de correção de fator de potência para reatores*

*eletrônicos para lâmpadas HPS*. Tese de Doutorado, UFMG, Belo Horizonte/MG, Brasil, 2007.

- OLIVEIRA, A. M. *Sistemas de iluminação distribuída utilizando Leds acionados por dois conversores flyback integrados*. Dissertação de Mestrado, UFSM, Santa Maria/RS, Brasil, 2007.
- DEMIASN JR., E.; TREVISIO, C. H. G.; GALLO, C. A.; TOFOLI, F. L. *Non-Isolated DC-DC Converters With Wide Conversion Range Used to Drive High-Brightness LEDs*. *Brazilian Power Electronics Conference – Cobep*, p. 598-605, 2009.
- COSTA, M. A. D.; COSTA, G. H.; SANTOS, A. S.; SCHUCH, L.; PINHEIRO, J. R. *A High Efficiency Autonomous Street Lighting System Based on Solar Energy and LEDs*. *Brazilian Power Electronics Conference – Cobep*, p. 265-273, 2009.
- SÁ JR.; E. M.; POSTIGLIONE, C. S.; SANTIAGO, R. S.; ANTUNES, F. L. M.; PERIN, A. J. *Self-oscillating Flyback Driver for Power LEDs*. *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, p. 2.827-2.832, 2009.
- GARCIA, J.; COSTA, M. A. D.; ALONSO, J. M. *Dimming of High-Brightness LEDs by Means of Luminous Flux Thermal Estimation*. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 24, n. 4, p. 1.107-1.114, April 2009.
- *DataSheet do LED EDEW-KLC8-B3 da Edison Opto Corporation*. Disponível em: <<http://www.edison-opto.com.tw>>. Acesso em: 13 fev. 2011.
- LEI, W. H.; MAN, K. *A general approach for optimizing dynamic response buck converter*.
- AND8143/D – *On Semiconductor*, Rev. 0, 2004. Application Note.
- DYBLE, M.; NARENDRAN, N.; BIERMAN, A.; KLEIN, T. *Impact of dimming white LEDs: Chromaticity shifts to different dimming methods*. *Fifth International Conference on Solid State Lighting*, p. 291-299, 2005.

**WELBERT ALVES RODRIGUES** é engenheiro eletricista e mestre em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente, é professor substituto da Universidade Federal de Minas Gerais e do ensino técnico - Cefet/CT Vespasiano.

**LENIN MARTINS FERREIRA MORAIS** é engenheiro eletricista, mestre e doutor em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Minas Gerais. Atualmente é professor adjunto 3 da Universidade Federal de Minas Gerais. É coordenador do curso de graduação em Engenharia Elétrica. É membro do IEEE Power Electronics Society e do IEEE Industrial Electronics Society.

**Continua na próxima edição**  
**Confira todos os artigos deste fascículo em**  
**[www.osetoreletrico.com.br](http://www.osetoreletrico.com.br)**  
**Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados**  
**para o e-mail [redacao@atituedeeditorial.com.br](mailto:redacao@atituedeeditorial.com.br)**