

REATOR ELETRÔNICO MICROCONTROLADO ORIENTADO A LÂMPADA DE MERCÚRIO 125W

Luiz Fernando Alves Guedes*

Henrique A. C. Braga**

RESUMO

Este trabalho descreve a análise, simulação computacional e projeto de um reator eletrônico microcontrolado orientado a uma lâmpada de mercúrio de 125W. O sistema é baseado no acionamento em alta frequência (80 kHz) de um estágio integrado de conversor buck com conversor flyback (duas saídas CC) que, por sua vez, alimentam a lâmpada em baixa frequência (100 Hz) por meio da comutação de dois mosfets. O estágio integrado buck-flyback funciona como um conversor CA-CC de elevado fator de potência, promovendo uma saída CC dupla controlada em corrente. Todo o sistema é monitorado e controlado por um microcontrolador tipo PIC, cuja programação foi realizada em assembly, de forma a se viabilizar o acionamento em alta frequência do estágio inicial. A lâmpada é acionada em frequência baixa a fim de se evitar o fenômeno das ressonâncias acústicas. O modelo da lâmpada é obtido experimentalmente empregando-se algoritmos genéticos. Os resultados teóricos e experimentais convergem e apontam para as vantagens do sistema no sentido de promover uma ignição segura e preservação da vida útil da lâmpada.

Palavras-chave: Iluminação pública. Reatores eletrônicos. Lâmpada de mercúrio. Onda-quadrada.

1 Introdução

O modo de vida do ser humano é definido através da capacidade de percepção do mundo ao seu redor. Os cinco sentidos humanos é que permitem transmitir ao cérebro informações fundamentais para que esse possa interpretá-las, o que permite o desenvolvimento e a qualidade de vida do ser.

Segundo Kanashiro (2003, p. 156). “[...] a visão é o sentido mais utilizado pela espécie humana por proporcionar uma maior quantidade de informações (espaço, distância, luz, cor, contraste) [...]”. Desta forma, uma boa iluminação do ambiente em que vivemos, seja em casa, no trabalho ou nas vias públicas é fundamental para garantir que este aguçado sentido continue a proporcionar uma percepção completa do que se vive.

De modo a permitir aos habitantes desfrutar, plenamente, do espaço público no período noturno, garantir a segurança pública e prevenir a criminalidade, existe o sistema de iluminação pública, além de promover a valorização e destaque de monumentos, embelezarem ruas, prédios e paisagens (BARBOSA, 1998).

Logo o estudo de novas tecnologias para iluminação pública visando à eficiência energética do conjunto é tema atual e de constante estudo. Este trabalho apresenta estudo sobre um tipo específico de

* Graduado em Engenharia Elétrica na UFJF e Bolsista de Iniciação Científica (BIC/UFJF)

** Professor Orientador do Departamento de Circuitos Elétricos – UFJF - henrique.braga@ufjf.edu.br ; Departamento de Circuitos Elétricos, Faculdade de Engenharia; Endereço: Rua Herman Toledo, 117, São Pedro, Juiz de Fora, MG, CEP: 36037-210

reator eletrônico micro-controlado, capaz de acionar lâmpadas de iluminação pública a Vapor de Mercúrio de Alta Pressão. O mesmo, também pode ser aplicado às lâmpadas a Vapor de Sódio e Halogênios Metálicos.

A existência dos convencionais reatores eletromagnéticos, difundidos no sistema de iluminação pública, permite levantar a interessante questão: “Porque estudar e construir um reator eletrônico micro-controlado, sendo que os convencionais funcionam?” A resposta a esta questão é bem explicada através da seguinte assertiva:

Supondo que um reator eletrônico micro-controlado seja capaz de ‘dimerizar a lâmpada’, ou seja, controlar a quantidade de potência entregue à mesma, seria possível programar um processo de redução da potência entregue ao ponto de luz em função tempo. Assim, em determinada hora da madrugada pode-se dimerizar a lâmpada (por exemplo, de 80% a 90% da potência nominal conforme a necessidade de iluminação do ambiente, por um período de 2 a 3 horas, evitando-se assim, reduzir a vida útil da lâmpada). Desta forma obtém-se um aumento na eficiência do processo de iluminação pública. (Informação Verbal).³

2 Reator Eletrônicos Microcontrolado para Lâmpadas HID VM-125W

Para construção deste tipo de reator eletrônico são necessárias algumas etapas de conversão de energia, essas são descritas a seguir e ilustradas na Fig. 1.

O filtro de interferência eletromagnética é responsável por proporcionar para a rede uma menor distorção harmônica em alta frequência. Sua construção é fundamental para proteção contra ruídos no sistema por parte do circuito do reator.

Um circuito retificador é necessário para converter a corrente elétrica alternada em corrente contínua pulsante. Após a conversão, a etapa de correção de fator de potência tem como objetivo garantir o fornecimento de uma tensão contínua constante a partir da tensão retificada (pulsante), além de proporcionar um alto fator de potência para a rede com a menor distorção harmônica.

As lâmpadas de descarga não podem ser alimentadas diretamente por uma fonte de tensão, devido à mesma exigir corrente da rede elétrica de maneira ilimitada. Logo, é necessário utilizar um conversor de energia com comportamento de fonte de corrente capaz de controlar a corrente aplicada à lâmpada. O conversor CC/CC utilizado para construção da fonte de corrente também é responsável por adequar o nível de tensão proveniente do estágio de correção de fator de potência ao nível da tensão de operação da lâmpada de descarga. Por fim, o uso de um inversor em baixa frequência é necessário para comutação do sentido da corrente aplicada à lâmpada pela fonte de corrente.

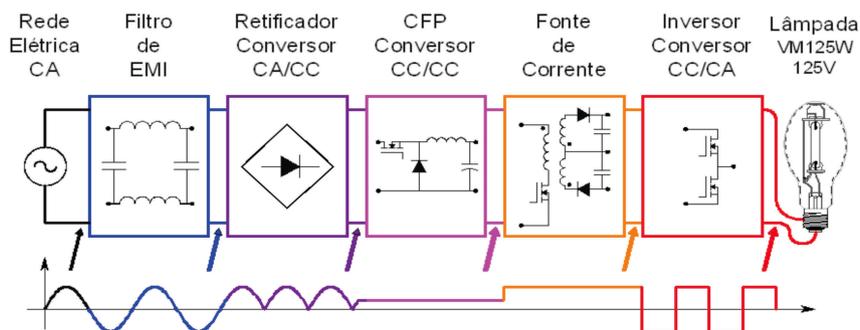


Fig. 1: Esquema do Funcionamento Básico de um Reator Eletrônico

³ Palestra do Professor Arnaldo José Perin, aos alunos de graduação da Universidade Federal de Juiz de Fora (Mini-curso “Técnicas Modernas de Iluminação”, 4º Seminário de Eficiência Energética, novembro de 2007).

3 Configuração

Para construção do reator eletrônico, o estágio de correção do fator de potência pode ser construído utilizando os conversores CC/CC conhecidos em diversas literaturas: Forward, Flyback, Buck (reductor) e Buck-Boost (reductor-elevador), Sepic, Cúk e Zeta. E para o controle de corrente na lâmpada qualquer conversor que apresente a característica de fonte de corrente como os conversores: Flyback, Sepic, Cúk, etc.

Na escolha dos tipos de conversores, para os estágios de correção de fator de potência e fonte de corrente foram adotados o conversor Buck e Flyback, respectivamente. A Fig. 2 ilustra os conversores de modo integrado, ou seja, com o uso de um único mosfet.

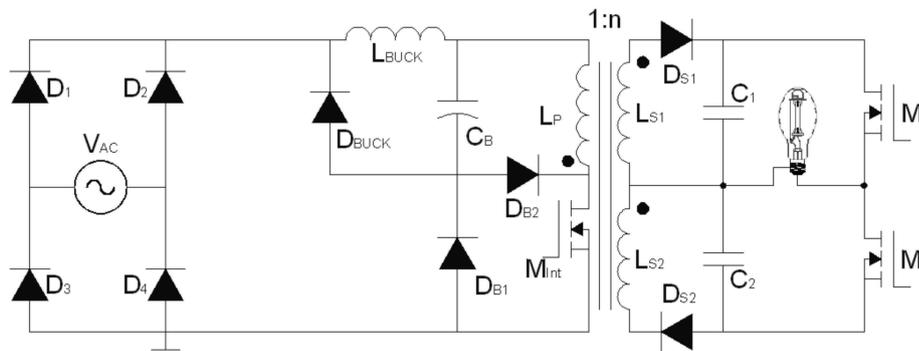


Fig. 2: Circuito Esquemático do Reator Eletrônico

A escolha destes dois conversores foi baseada nas conclusões do estudo apresentado por Dalla Costa (2008), onde as principais vantagens são: baixos valores de tensão, baixa dissipação de potência e moderado valor de corrente no mosfet integrado dos conversores Flyback e Buck. E ainda, elevado fator de potência do reator através do uso do conversor Buck e dimensão dos elementos magnéticos reduzidos.

4 Simulações e Resultados Computacionais

A simulação de um circuito eletrônico em computador é fundamental para verificar se o circuito foi corretamente dimensionado. Esta, também serve de ferramenta para analisar do funcionamento do circuito e verificar se o mesmo está operando conforme previsto pela teoria. O programa de simulação adotado foi o PSIM (Powersim Inc. Versão 6.0).

Neste trabalho foi reproduzido um modelo de simulação visando reproduzir as formas de onda de tensão e de corrente da lâmpada mais semelhantes com a prática. Assim, estrutura do modelo da lâmpada de descarga é baseada em processos físicos que ocorrem no interior da lâmpada, tais como: relações de tensão e corrente da lâmpada, perdas por condução e perdas por radiação. (CARVALHO R. apud YAN, W. et al., 2005).

Assim os processos do modelo são definidos por cinco equações apresentadas a seguir.

$$\frac{dT(T_{(t)}, t)}{dt} = a_1 (P_{IN} - P_{RAD} - P_{COND})$$

A equação representa o balanço energético no interior do tubo de descarga. Em que, o aumento da temperatura no interior da lâmpada é igual à potência de entrada, definida por P_{IN} , menos as perdas por radiação, P_{RAD} e as perdas por condução térmica, P_{COND} . Uma constante ajustável do modelo é definida por a_1 .

A potência de entrada pode também ser calculada pela equação.

$$P_{IN} = R_L \times i_L(t)^2$$

Em que, R_L é o valor da resistência equivalente da lâmpada e $i_L(t)$ é a corrente da lâmpada de descarga ao longo do tempo.

As perdas por radiação representam a segunda equação que é definida em.

$$P_{RAD} = a_2 \exp\left[-\frac{e a_3}{k T}\right]$$

Em que: e é a carga de um elétron, seu valor é aproximadamente igual a $1,6021 \times 10^{-19} C$. k , é o valor da constante de Boltzmann, e seu valor é aproximadamente $1,3806 \times 10^{-23} m^2 kg s^{-2} K^{-1}$. T , é a temperatura do gás no interior da lâmpada, a_2 e a_3 são constantes ajustáveis do modelo.

As perdas térmicas por condução definem a terceira equação do modelo, está é apresentada na equação .

$$P_{COND} = a_4 (T - T_0)$$

Em que a_4 é uma constante do modelo e T_0 é a temperatura do arco na parede do tubo. Segundo YAN, W. e outros (2005, p. 2) o valor de T_0 pode ser adotado como 1000K para lâmpadas de descarga como as de vapor de mercúrio em alta pressão.

A quarta equação define a resistência equivalente da lâmpada, está é apresentada na equação .

$$R(T) = \frac{L}{\int \sigma_e(T) dA} = a_5 T^{-3/4} \exp\left[\frac{e a_6}{2 k T}\right]$$

Em que, L , é o comprimento do arco de descarga, A , a área da seção transversal do arco, $\sigma_e(T)$, a condutividade elétrica do arco, e, a_5 e a_6 são constantes ajustáveis do modelo.

A ultima equação do modelo foi obtida através de meios empíricos. Essa representa a queda dinâmica dos eletrodos. Segundo Yan W. e outros (2002, p. 3) “[...] o modelo da lâmpada só com equações dos processos energéticos, não prevê um efeito de histerese nas características V–I na lâmpada para uma gama de altas frequências [...]”. Portanto como forma de resolver o problema, o efeito da queda dinâmica nos eletrodos da lâmpada é incluído no modelo. Considerando que a lâmpada de descarga é energizada a partir de uma rede de corrente alternada, a queda da tensão dinâmica nos eletrodos durante meio ciclo da tensão de alimentação da rede é apresentada na equação.

$$V_{ele}(t) = A e^{-Bt} \text{sen}(2 C \pi f t) + D t$$

Em que A , B , C e D são constantes ajustáveis do modelo e f é a frequência da rede em Hertz.

Segundo Carvalho (apud YAN, W. et al, 2002, p. 3) as constantes A , B , C e D presentes na equação são determinadas em função da frequência conforme apresenta na Tab.1.

Tabela 1: Valor das Constantes A , B , C e D para Diferentes Valores de Frequências.

| | 50Hz | 52kHz | 400kHz |
|---|------|---------|-----------|
| A | 70 | 70 | 70 |
| B | 1500 | 400.000 | 3.500.000 |
| C | 6 | 1 | 1 |
| D | 1000 | 250.000 | 2.000.000 |

Usando as equações físicas do modelo da lâmpada de descarga passa-se ao estudo de busca das constantes do modelo, a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 e a_6 . A busca pode ser realizada através do uso de um algoritmo computacional de interação denominado de Algoritmos Genéticos (GA).

Usando um programa elaborado em MATLAB, foi possível obter as constantes do modelo da lâmpada para simulação no PSIM. Usando um computador Pentium® 4 CPU 3.00Ghz, 2,00GB de RAM, a convergência do algoritmo demorou cerca de 1 hora e meia com 100 interações. As constantes obtidas para o modelo foram:

$$a_1=14627 \quad a_2=1358,6 \quad a_3=0,4869 \quad a_4=0,5282 \quad a_5=142,07 \quad a_6= 1,06$$

Ao incluir o modelo no circuito de simulação pode-se obter as formas de onda de tensão e corrente sobre a lâmpada de vapor de mercúrio de 125W, esta é ilustrada na figura 5.

Através das formas de onda de tensão e corrente sobre a lâmpada vapor de mercúrio 125W, disposto na Fig. 3, pode-se concluir que, por meio das simulações do reator eletrônico proposto usando o modelo apresentado, é possível fornecer de maneira adequada tensão e corrente à lâmpada de modo a garantir o seu correto funcionamento sobre potência nominal.

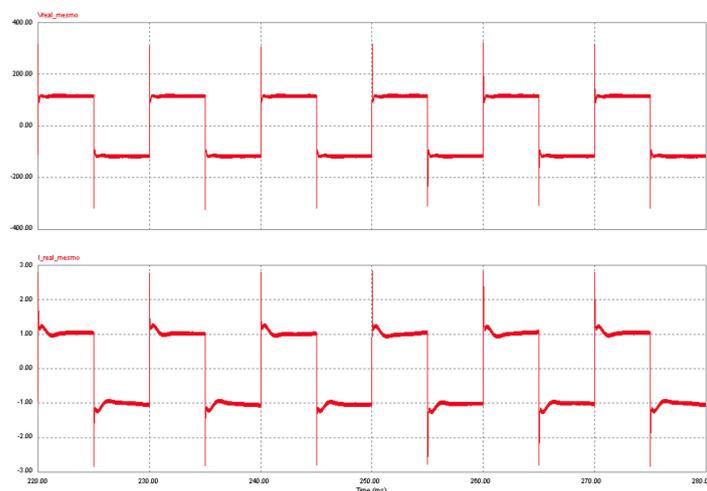


Fig. 3: Tensão na Lâmpada (acima) e Corrente na Lâmpada (abaixo).

Atualmente foi desenvolvido um protótipo e este está sobre estudo experimental no Núcleo de Iluminação Moderna da Universidade Federal de Juiz de Fora (NIMO-UFJF). O protótipo construído é apresentado na Fig. 4.

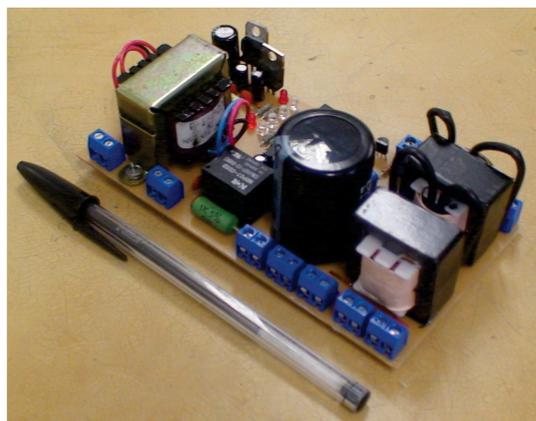


Fig. 4: Protótipo em Estudo do Reator de Onda Quadrada

5 Conclusão

Até o atual estágio, este projeto descreveu uma proposta de implementação de um reator eletrônico aplicado ao acionamento de lâmpadas de vapor de mercúrio, com potência de 125W. Seu acionamento é feito com tensão e corrente aplicado em onda quadrada de baixa frequência. Através de simulações computacionais verificou-se que o reator implementado é capaz de acionar a lâmpada VM de 125W de maneira satisfatória.

A inclusão do modelo da lâmpada nas simulações tende a tornar o processo computacional mais semelhante com a prática. O modelo é composto por equações matemáticas elaboradas em conjunto com constantes ajustáveis, a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 e a_6 . Usando um programa desenvolvido em MATLAB foi possível de obter as constantes do modelo físico da lâmpada baseadas em alguns dados experimentais e por iterações com uso das diversas técnicas envolvendo algoritmos genéticos, essas, amplamente difundidas na literatura atual.

O estudo experimental deste reator é o tema de atual pesquisa no Núcleo de Iluminação Moderna da Universidade Federal de Juiz de Fora (NIMO-UFJF) e após a sua conclusão será implementado um controle de potência com o uso de um microcontrolador, este, tem por finalidade promover a idéia de atuar no processo de eficiência energética do sistema de iluminação pública por meio do controle da potência entregue na lâmpada.

A 125W MERCURY LAMP DRIVEN BY A MICROCONTROLLED ELECTRONIC BALLAST

ABSTRACT

This paper describes the analysis, simulation and design of a microcontrolled electronic ballast driving a 125W mercury lamp. The system is based on a high frequency (80 kHz) buck converter, operating in discontinuous mode, which is integrated to a flyback converter (two DC outputs) that drives the lamp at low frequency (100 Hz) by switching two mosfets in a complementary way. The integrated power stage buck-flyback converter operates as an AC-DC high power factor regulator, promoting a dual-controlled DC output current. The entire system is monitored and controlled by a PIC microcontroller, which has been programmed in assembly language in order to make it possible to gate the high frequency front stage switch. The lamp operates at low frequency aiming to avoid the phenomenon of acoustic resonances. The lamp model is obtained experimentally employing genetic algorithms. The theoretical and experimental results seem to validate the system advantages, promoting a safe ignition and preserving the lamp life.

Keywords: Lighting, electronic ballasts, mercury lamp, square-wave;

Referências

BARBOSA, R. et al. **Manual de Iluminação Pública Eficiente**. Rio de Janeiro: PROCEL/Eletróbrás, 1998.

CARVALHO, R. **Modelo de uma Lâmpada HID em PSIM e SIMULINK**. Disponível em: <<http://tochadisserta.awardspace.com/>>. Acesso em: 26 jun. 2010.

DALLA COSTA, M. A. **Compensación de resonancias acústicas em lámparas de descarga em halogenuros metálicos por médio de onda cuadrada de baja frecuencia**: caracterización de lám-

paras y propuesta de nuevas topologías de alimentación. 2008. Tese (Doutorado)-Universidade de Oviedo, Gijón, Astúrias, 2008.

GARCÍA, J. G., et al. Series Igniters Effects in Metal Halide Lamps Operation with High Frequency Ballasts: study and minimization. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 22, no. 3, p.889-898, 2007.

KANASHIRO, M. **A cidade e os sentidos: sentir a cidade. Desenvolvimento e Meio Ambiente**, n. 7, p. 155-160, jan./jun. 2003.

ROSITO, L. H. **As origens da iluminação pública no Brasil**. O setor elétrico. São Paulo, n.36, jan. 2009. Disponível em: <<http://www.osetoreletrico.com.br>> Acesso em: 23 maio 2010.

TOMM, F. L. **Projeto de reatores eletrônicos para HID baseado no conversor chopper AC**. 2007. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2007.

YAN, W. et al. A universal Pspice model for HID lamps. **In IEEE Transactions on industry applications**, v. 41, no. 6, p.1594-1602, 2005.

_____. Genetic algorithm optimised high-intensity-discharge lamp model, **Electron. Lett.**, v. 38, no.3, p.110 –112, Jan., 2002.