

REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADAS DE VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO COM SISTEMA DE PROTEÇÃO CONTRA OCORRÊNCIA DE RESSONÂNCIA ACÚSTICA

Anderson Soares André, Joabel Moya e Arnaldo José Perin

Universidade Federal de Santa Catarina

UFSC – INEP

Florianópolis – SC

Resumo – Neste artigo apresenta-se os principais resultados obtidos até o momento, no projeto de desenvolvimento de um reator eletrônico, que opere lâmpadas de vapor de sódio de qualquer fabricante, em alta frequência e seja capaz de evitar totalmente o fenômeno conhecido como ressonância acústica. Tal fenômeno também é discutido a fim de permitir que o leitor possa compreender a necessidade da implementação do sistema de controle proposto.

Durante o transcorrer do texto são mostrados o circuito de potência, o circuito ignitor e as respectivas formas de onda para mostrar a aplicabilidade do procedimento de projeto.

I. INTRODUÇÃO

A humanidade tem feito uso da iluminação artificial por milhares de anos, mas foi somente no último século que o papel desempenhado pelo sódio na luz do sol e na iluminação artificial foi descoberto. Em 1860, Kirchhoff descobriu que as linhas-D invertidas do espectro do sol, anteriormente observadas por Wollaston e Fraunhofer, são idênticas ao amarelo das linhas-D do sódio na luz emitida por chamas [1].

Planos de utilização artificial das descargas em gases datam de mais de três séculos atrás, no tempo em que os métodos para a remoção do ar dos tubos foram inventados.

O principal problema para obter a lâmpada de sódio de alta pressão foi encontrar um material para o tubo de descarga transmissor de luz e resistente ao ataque do sódio nas altas temperaturas envolvidas. A primeira lâmpada prática foi construída no início dos anos 60 nos Estados Unidos. Nesta mesma época surgiram também as primeiras lâmpadas de vapor metálico. A contínua pesquisa nesta área resultou no aparecimento de lâmpadas com melhor eficiência luminosa, extensa gama de potências e diversificação de modelos.

Apesar do grande aprimoramento na qualidade destas lâmpadas, registrado neste período, a área relacionada aos reatores para as lâmpadas de descarga de alta pressão não seguiu o mesmo ritmo. Assim sendo, no atual estado de conhecimento, deve-se esperar um grande avanço nos próximos anos, assim como ocorreu há pouco tempo atrás com a iluminação fluorescente, na utilização do reator eletrônico em alta frequência para alimentação e controle da potência destas lâmpadas. Um dos desafios para o desenvolvimento e utilização desta tecnologia é decorrente do fenômeno conhecido como ressonância acústica

Outro fator motivador para o trabalho é a necessidade crescente de se obter economia de energia através de

equipamentos elétricos que façam uso mais racional dos recursos disponíveis, sabendo que grande parte da energia elétrica é utilizada em iluminação artificial, a necessidade de se desenvolver sistemas de iluminação mais eficientes torna-se mais importante a cada dia.

Uma das ações mais usuais para se alcançar tal objetivo é a mudança da tecnologia da lâmpada. Por exemplo, é comum proceder-se a troca de lâmpadas de mercúrio por lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão, que apresentam melhor eficiência luminosa lumens/watt. A Fig 1 mostra a comparação da manutenção do nível de luminosidade com o envelhecimento entre lâmpadas de 400W de vapor de mercúrio, de sódio de alta pressão e de vapor metálico.

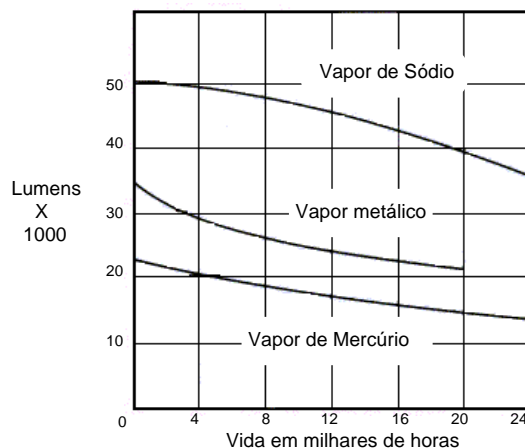


Fig. 1 – Curvas Típicas de Manutenção do Nível de Luminosidade Para Lâmpadas de Alta Pressão de 400W.

Através da Fig 1 pode-se notar que uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão de 400W sempre apresenta uma eficiência maior que a apresentada por uma lâmpada de vapor de mercúrio. Tal procedimento é especialmente útil quando se necessita de grande quantidade de luz com baixo custo, sem preocupação com boa reprodução de cores, como ocorre, por exemplo, em estacionamentos.

Uma característica comum à maioria das lâmpadas de descarga é a necessidade de se prover à ignição e subsequente estabilização da descarga, o que torna obrigatória a utilização de equipamentos auxiliares como reatores e, em alguns casos, ignitores.

Os reatores eletromagnéticos são baratos e simples, mas requerem capacitores adicionais para correção do fator de potência, circuitos de ignição separados, são grandes, pesados, apresentam baixa eficiência e normalmente não permitem o controle da potência da lâmpada mediante variações da rede de alimentação CA. A fim de aumentar a



eficiência dos sistemas de iluminação deve-se, portanto, investir na melhoria dos equipamentos auxiliares utilizados. O volume, o peso e a potência perdida nos componentes dos reatores eletrônicos tornam-se significativamente menores com o aumento da frequência.

Em comparação com um reator convencional operando na frequência da rede, como uma consequência do uso de reatores eletrônicos operados em alta frequência, os picos de tensão na extinção e reignição de cada ciclo desaparecem, o que leva a um aumento na vida útil da lâmpada, além do aumento na eficiência luminosa (acima de 8%) devido, principalmente, à redução nas perdas do anodo e do catodo proporcionada pela melhora do fator de potência da lâmpada com o aumento da frequência [2] e [3].

Neste trabalho será apresentado um reator eletrônico que opera lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão em 50kHz, cuja eficiência é maior que a apresentada pelos reatores tradicionais que operam em 50Hz/60Hz, mesmo sabendo que tal condição de operação pode levar ao aparecimento de um fenômeno chamado ressonância acústica.

II. A LÂMPADA DE VAPOR DE SÓDIO

Esta lâmpada é construída com dois bulbos. O bulbo interno, conhecido como tubo de descarga, é construído com um material especial para resistir ao ataque do sódio em altas temperaturas e possui um alto ponto de fusão. O bulbo externo, por sua vez, serve para prevenir o ataque químico aos componentes metálicos internos e, ao mesmo tempo, isolar as partes internas da temperatura externa. A Fig. 2 mostra a aparência típica de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão [1].

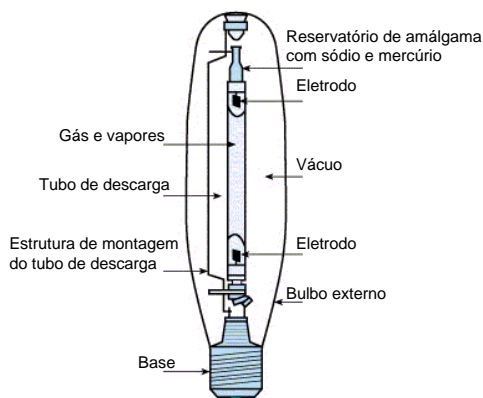


Fig. 2 – Estrutura Básica de Uma Lâmpada de Vapor de Sódio de Alta Pressão.

Como a lâmpada de vapor de sódio não contém um eletrodo auxiliar para a partida, é necessário que se aplique um pulso de alta frequência e alta tensão para ionizar o gás de ignição. Dessa forma, é necessário que o circuito desenvolvido forneça uma tensão adequada que permita uma ignição segura.

Em comparação com outras lâmpadas de descarga, como as fluorescentes, a lâmpada de vapor de sódio de alta pressão apresenta um longo período de aquecimento para atingir a potência nominal. Logo após a ignição, estas lâmpadas apresentam uma baixa tensão de arco e conseqüentemente,

necessitam de um nível de corrente relativamente grande para gerar potência suficiente para aquecer o gás no interior do bulbo até a temperatura de regime.

A. Ressonância Acústica

Quando as lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão são operadas em frequências superiores à frequência da rede, seu funcionamento é afetado pelo surgimento de ondas estacionárias de pressão no gás, conhecidas como ressonância acústica. Tal fenômeno pode levar à mudanças na posição do arco, mudança de cor e instabilidades de operação, que algumas vezes podem causar a extinção do arco. No caso específico das lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão pode-se chegar ao caso extremo em que ocorre a quebra do tubo de descarga [4].

As ressonâncias ocorrem quando a potência da lâmpada varia em uma frequência específica ou em faixas de frequências específicas. Além disso, alguns reatores eletrônicos fornecem à lâmpada uma corrente de alta frequência não senoidal, provocando o aparecimento de um grande conteúdo harmônico na potência da lâmpada, o que também pode causar instabilidades [5]. Uma grande variedade de topologias e métodos de controle têm sido propostos para evitar as instabilidades causadas pela ressonância acústica.

Uma abordagem bastante explorada consiste em operar a lâmpada com frequências em que teoricamente não devem ser registradas ressonâncias. Isto pode ser obtido com a utilização de reatores que alimentam a lâmpada com corrente contínua, em que não há variação da potência entregue à lâmpada, mas nestes casos a lâmpada sofre com outro fenômeno chamado cataforese.

Alguns reatores operando em baixa frequência também são propostos para evitar o problema da ressonância, mas em geral sofrem com problemas de baixa eficiência e de compatibilidade, como o proposto em [3] que opera a lâmpada em 400Hz.

Ainda nesta mesma abordagem encontram-se os reatores que operam acima das frequência em que as ressonâncias devem ocorrer [6-8], mas a eficiência dos conversores fica prejudicada, principalmente em baixas e médias potências e a determinação da mínima frequência em que a ressonância ocorre é um parâmetro ainda não facilmente definido [3].

Uma segunda abordagem é baseada no fato de que um espectro de potência de baixa amplitude pode eliminar a ressonância acústica através de um esquema de comutação randômica em que a frequência central e a largura de banda do ruído injetado são adequadamente escolhidos [3] [8].

De acordo com [10], durante a ocorrência da ressonância acústica, a mudança mais importante no comportamento da lâmpada é o aumento da sua impedância, o que é evidenciado pelo aumento da tensão e redução da corrente na lâmpada. Caso seja necessário, tal comportamento pode ser utilizado para detecção e controle da ressonância [3], [11] e [12-16]. Ainda de acordo com [10], existe uma faixa de frequências de potência entre 91kHz e 110kHz em que as ressonâncias não são detectadas. Através desta informação adotou-se a frequência de comutação do inversor deste estudo como

sendo 50kHz, o que leva a uma frequência de potência de 100kHz.

III. INVERSOR

Todo o estudo aqui apresentado é baseado em um inversor meia-ponte, seguido de um filtro que fornece uma corrente adequada para a lâmpada. O inversor é comutado com frequência fixa (50kHz) e razão cíclica fixa (50%), gerada inicialmente por um circuito integrado 3524 e atualmente por um microcontrolador PIC16C73B. Um circuito bootstrap IR2110 é usado para atacar os MOSFET's a partir do sinal gerando pelo comando.

A tensão CC atualmente utilizada para alimentar o inversor é 300V, já que o protótipo desenvolvido ainda não é dotado de um circuito pré-regulador sendo, portando, alimentado a partir da tensão da rede retificada.

A Circuito de Partida (ignição).

Como já foi citado anteriormente, uma característica comum a maioria das lâmpadas de descarga é a necessidade de uma tensão de ignição maior que a tensão de regime permanente. Para que se pudesse obter a ignição confiável da lâmpada, foram estudados quatro diferentes circuitos.

O primeiro deles é baseado em um circuito proposto por [17] e é apresentado na Fig. 3.

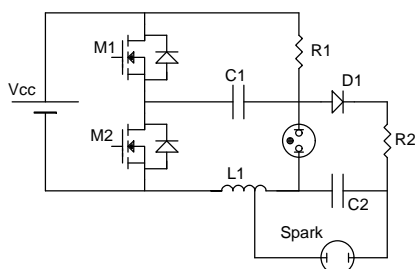


Fig. 3 – Circuito de Ignição Utilizando Cápsula de Gás.

O funcionamento deste circuito pode ser entendido com a ajuda das formas de onda da Fig. 4.

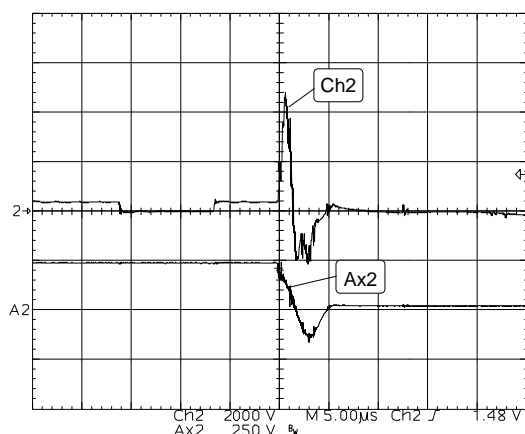


Fig. 4 – Tensões na Lâmpada (Ch2) e no Capacitor C2 (Ax2) Durante a Ignição.

Quando o circuito é alimentado, a lâmpada está desligada e sua impedância é muito alta. Dessa forma, toda a tensão fornecida pelo inversor é aplicada sobre a mesma. Esta tensão é retificada por D1 e carrega C2 através de R2. Quando a tensão sobre C2 (Ax2) alcança a tensão de ruptura

da cápsula de gás, a tensão armazenada em C2 é aplicada em um pequeno número de espiras, gerando uma alta tensão em L1 (Ch2).

Quando ocorre a ignição, a tensão sobre a lâmpada é mais baixa que a registrada enquanto esta não está em funcionamento, por isso a tensão sobre C2 não mais atinge a tensão de ruptura da cápsula de gás. Se por alguma razão não ocorrer a ignição da lâmpada, o capacitor é recarregado e o processo se repete.

Uma segunda opção, utilizando a mesma técnica é baseada no funcionamento do SIDAC, que é um dispositivo bidirecional em tensão e corrente (Fig. 5).

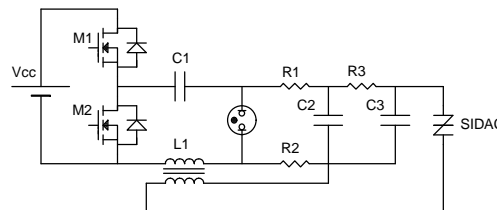


Fig. 5 – Circuito de Ignição Utilizando SIDAC.

Seu funcionamento é similar ao anterior e pode ser assim sumariado: quando a tensão sobre C3 atinge a tensão de ruptura do SIDAC, ele descarrega C3 em um enrolamento auxiliar de L1, gerando a tensão necessária para a ignição da lâmpada. Mais uma vez, após a ignição da lâmpada, a tensão a que o capacitor C3 é submetido atinge níveis inferiores aos necessários para produzir novos pulsos de tensão.

O terceiro circuito analisado utiliza um capacitor auxiliar, conforme sugere a Fig. 6.

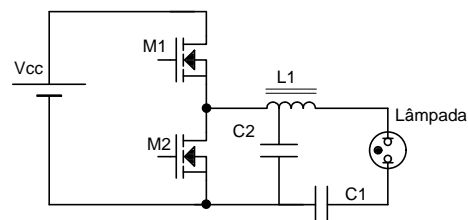


Fig. 6 – Circuito de Ignição Utilizando Capacitor Auxiliar.

Este pequeno capacitor (C2) é conectado em uma derivação do indutor. Quando a lâmpada está desligada o indutor age como um autotransformador e produz a alta-tensão necessária, mostrada na Fig. 7.

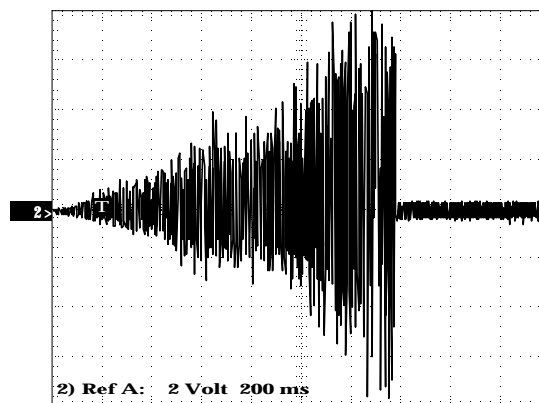


Fig. 7 – Tensão na Lâmpada Durante a Ignição.

Quando a lâmpada entra em funcionamento, o efeito do capacitor é praticamente eliminado e o filtro mantém a tensão e a corrente da lâmpada dentro dos patamares especificados.

O último circuito testado é formado pelo tradicional filtro LCC normalmente utilizado nos reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes (Fig. 8).

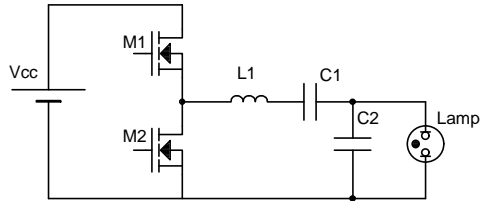


Fig. 8 – Circuito de Ignição Utilizando Filtro LCC.

Uma característica importante deste filtro é o fato de poder ser utilizado como ignitor porque, ao contrário do filtro LC utilizado nas estruturas anteriores, pode fornecer uma alta tensão nos terminais de saída. Dessa forma, ele pode executar duas funções: filtrar a corrente da lâmpada e fornecer a tensão de ignição.

A equação (3.1) demonstra o comportamento do ganho do filtro LCC em função da variação da relação entre os valores dos capacitores que compõe o filtro (x), da frequência de comutação (ω_s), da frequência de ressonância do filtro (ω_o) e do fator de qualidade do filtro.

$$G = \frac{1}{\sqrt{(1+x)^2 \left[1 - \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} \right)^2 \right]^2 + \frac{1}{Q^2} \left(\frac{\omega_s}{\omega_o} - \frac{\omega_o}{\omega_s} \cdot \frac{x}{x+1} \right)^2}} \quad (3.1)$$

Através da equação (3.1), pode-se traçar a função de transferência do filtro LCC (Fig. 9). Através desta figura pode-se observar que, através da combinação adequada dos parâmetros do filtro, pode-se obter altas tensões de saída.

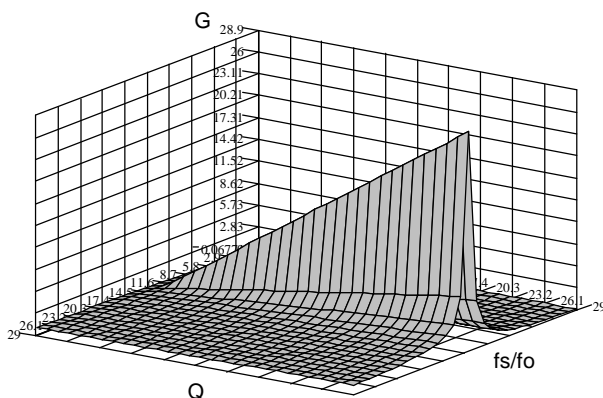


Fig. 9 – Função de Transferência do Filtro LCC.

A observação da Fig. 9 permite que se conclua que um dos parâmetros mais importantes no projeto deste filtro é garantir uma frequência de ressonância do filtro próxima da frequência de comutação do inversor durante a ignição.

A Fig. 10 mostra a tensão na lâmpada durante o processo de ignição. Tal figura mostra que este filtro permite a ignição da lâmpada com uma tensão mais baixa que os circuitos anteriormente apresentados. Este comportamento deve-se a característica do filtro LCC que proporciona níveis de corrente relativamente altos.

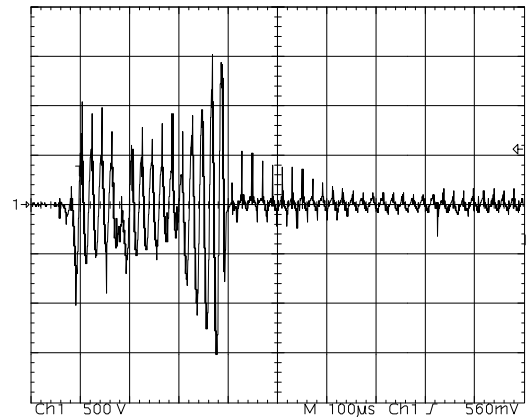


Fig. 10 – Tensão na Lâmpada Durante a Ignição.

III. RESSONÂNCIAS DETECTADAS

Conforme citado anteriormente, a frequência de comutação de 50kHz foi escolhida com base nos dados apresentados em [10], segundo os quais não deveriam ser detectadas ressonâncias. No entanto, foram detectadas várias ressonâncias, já que foram testadas lâmpadas de diferentes fabricantes e com diferentes tempos de uso. Uma das ressonâncias registradas pode ser observada na foto da Fig. 11, onde o arco está deformado nas extremidades.



Fig. 11 – Foto da Lâmpada Durante Ocorrência da Ressonância.

Tais registros serviram como indicação para a necessidade eminente de se implementar um controle efetivo da ressonância acústica, já que a mesma é afetada por diversos fatores, como geometria interna do tubo de descarga, pressão e composição do gás e todos estes fatores mudam de acordo com o fabricante e durante a vida útil da lâmpada.

IV. Protótipo Final

Como citado anteriormente, os primeiros protótipos implementados eram comandados por circuito integrado do tipo 3524. Tais protótipos foram implementados para que se pudesse fazer o estudo dos circuitos ignitores e os ajustes de layout necessários para esta aplicação que envolve altas tensões transitórias.

Para que se pudesse iniciar a implementação de um sistema que realmente evitasse a ocorrência da ressonância, optou-se por utilizar um microcontrolador que monitorasse o comportamento da lâmpada e mudasse a frequência de operação no caso da ocorrência de alguma ressonância. O microcontrolador inicialmente escolhido foi o PIC16C73B.

Além disso, através dos estudos anteriormente propostos, optou-se pela utilização do circuito ignitor com cápsula de gás, devido aos bons resultados obtidos. No entanto, o

circuito foi levemente alterado para que pudesse se adequar ao novo controle implementado (Fig. 12).

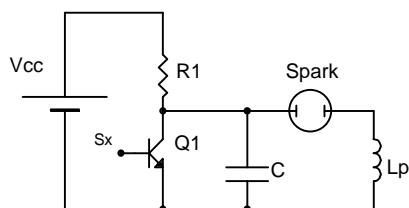


Fig. 12 – Circuito de Ignição Utilizando Cápsula de Gás Acoplado ao Microcontrolador.

Nesta nova configuração, o capacitor que fornece a energia para a ignição deixa de ser carregado através do filtro de saída do inversor e passa a ser carregado diretamente do barramento CC. Além disso, no momento em que se atinge a tensão de ruptura da cápsula de gás, esta é aplicada em um enrolamento auxiliar do indutor de filtro, ao invés de ser aplicada a um trecho do enrolamento principal do mesmo indutor. Tal alteração foi feita para que o microcontrolador pudesse controlar, através do sinal Sx, o tempo em que o circuito de ignição permanece tentando fazer com que a lâmpada entre em funcionamento. Dessa forma, decorrido um tempo pré-determinado, o transistor Q1 é acionado, impedindo que o capacitor C seja carregado, o que evita que o reator permaneça aplicando pulsos indefinidamente nos terminais de saída, mesmo que a lâmpada esteja danificada ou não esteja conectada.

O monitoramento da ignição da lâmpada é feito com a ajuda de um sensor de corrente que mede a presença ou não de corrente circulando através do indutor principal.

Na Fig. 13 apresenta-se a foto do protótipo implementado, ao lado da lâmpada em funcionamento.

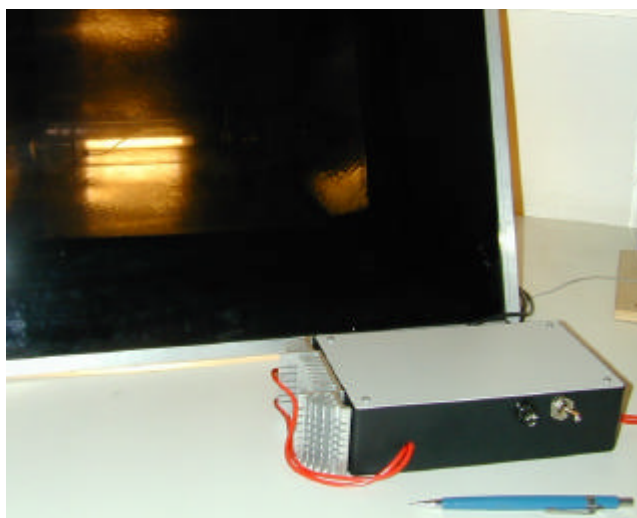


Fig. 13- Foto do Protótipo Implementado.

Tal protótipo é desprovido de circuito de correção de fator de potência, sendo portanto o inversor alimentado a partir de 310V.

Na Fig. 14 são apresentadas a tensão e a corrente na lâmpada em regime. Os valores de tensão e corrente obtidos na prática estão próximos dos valores de projeto, havendo pequenas diferenças que podem ser atribuídas ao tempo de vida útil da lâmpada utilizada no ensaio.

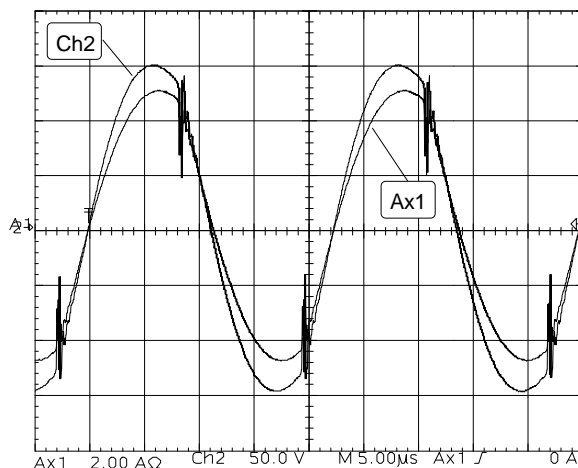


Fig. 14 – Tensão e Corrente na Lâmpada em Regime.

Finalmente, apresenta-se na Fig. 15 o fluxograma do programa do microcontrolador no estágio atual da implementação.

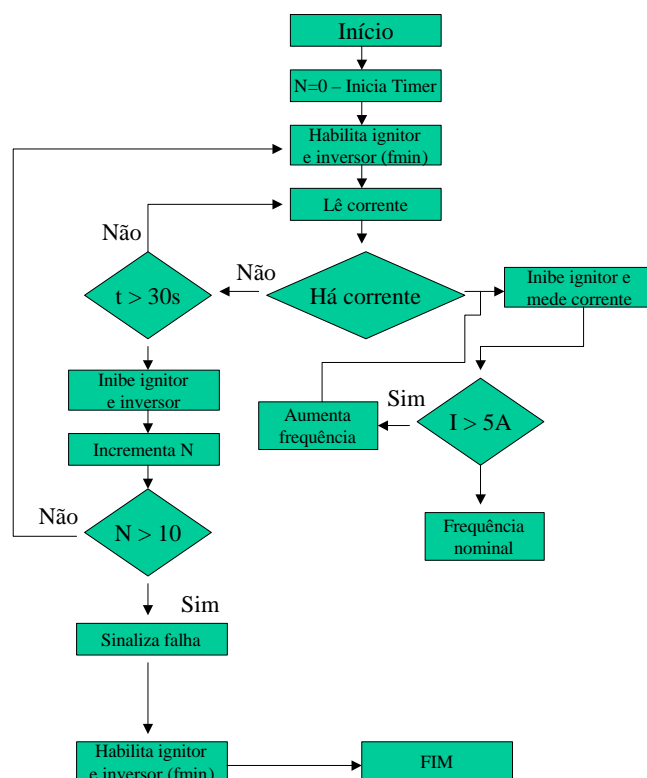


Fig. 15 – Fluxograma Implementado no Microcontrolador Para Controle do Funcionamento do Reator.

Para que se possa executar o controle da ressonância acústica de forma eficaz, como se pretende, ao fluxograma da Fig 15 serão acrescentadas novas instruções após a estabilização da corrente. Quando a frequência de comutação do inversor tender para a frequência nominal de comutação, o microcontrolador passará a fazer leituras periódicas de tensão e de corrente na lâmpada para, a partir da potência instantânea na mesma, controlar a ressonância.

Além disso, como o protótipo final será ter como estágio de entrada um retificador com correção do fator de potência utilizando conversor boost, o microcontrolador deverá

desabilitar também o boost (além do inversor e do ignitor) nos casos em que a lâmpada não entrar em funcionamento.

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou o estudo sobre o desenvolvimento de um reator para operar lâmpadas de vapor de sódio em alta frequência. Um breve estudo teórico sobre este tipo de lâmpada foi apresentado. Através dessas informações foi possível escolher a topologia para obter a ignição e estabilização da lâmpada, bem como a frequência de comutação a fim de evitar a ressonância. Embora a frequência escolhida fosse teoricamente livre de ressonâncias, o fenômeno foi observado quando se operou a lâmpada com frequência próxima a nominal (49kHz e 51kHz), o que comprovou a necessidade do desenvolvimento de uma técnica mais eficiente para evitar a ressonância acústica. Baseado nisso iniciou-se a implementação do controle de ressonância com a ajuda de um microcontrolador que, embora ainda não exerça controle efetivo sobre a potência da lâmpada e monitoramento da impedância da mesma, já mostrou ser bastante interessante por permitir o uso de controles de difícil implementação em circuitos analógicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Groot, J. J.; Vliet, J.A. J. M. *The High-Pressure Sodium Lamp*. Philips Technical Library, 1986.
- [2] Campell, J. H., *High discharge lamps on high-frequency power*. Journal of the Illuminating Engineering Society, December 1969, pp 713 – 722.
- [3] Yan, W., Ho, Y. K. E., Hui, S. Y. R., *Investigation on methods of eliminating acoustic resonance High-Intensity-Discharge (HID) lamps*. IEEE Industry Application Society 2000, pp 3399 – 3406.
- [4] Campell, J. H., *High discharge lamps on high-frequency power*. Journal of the Illuminating Engineering Society, December 1969, pp 713 – 722.
- [5] Denneman, J. W. *Acoustic resonance in high frequency operated low wattage metal halide lamps*. Philips Journal of Research, 1983.
- [6] Ohsato, M. H., Mao, Q., Ohguchi, H., Shimizu, T., Kimura, G., and Takagi, H. *Megahertz operation of voltage-fed inverter for HID lamps using distributed constant line*. IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 34, No. 4, 1998, pp. 747-751.
- [7] Redl, R. and Paul, J. D., *A new high-frequency and high-efficiency electronic ballast for HID lamps: topology, analysis, design, and experimental results*. IEEE APEC Proceedings, March 1999, pp 486-492.
- [8] Gulko, M. and Ben-Yaakov, S., *A MHz electronic ballast for automotive-type HID lamps*. IEEE Power Electronics Specialists Conference, 1997, pp. 39-45.
- [9] Laskai, L. Enjeti, P. Pitel, I. J., *White-noise modulation of high frequency high-intensity discharge lamp ballasts*. IEEE Trans. Industry Applications, Vol. 34, No. 3, 1998, pp. 597-605.
- [10] Witting, H. L. *Acoustic resonances in cylindrical high-pressure arc discharge*. J. Appl. Phys., 45, May 1978 – America Institute of Physics.
- [11] Peng, H., Ratanapanachote, Enjeti, P., Laskai, L. and Pitel, I. *Evaluation of acoustic resonance in metal halide (MH) lamps and an approach to detect its occurrence*. IEEE Industry Application Society 1997, pp 2276 - 2283.
- [12] Ozawa, M., Kamitani, T., Koyama, N., Horii, S., Miyazaki, K., Yoshikawa, N., Saito, T., Ito, K., Gyoten, M. and Waki, A., *Apparatus for controlling the power to a discharge-lamp*. U.S. Patent number 5,365,152, 1994.
- [13] Ukita, N., Nakamura, T. and Hnazaki, Y., *Lighting apparatus for discharge-lamp*. U.S. Patent number 5,434,474, 1995.
- [14] Eriguchi, H., Nishimura, H. Yamamoto, M. Iwahori, Y. and Kamoi, T., *Stable high frequency high discharge lamp lighting device avoiding acoustic resonance. an with lamp power*. U.S. Patent number 5,491,386, 1996.
- [15] Holtslag, A. H., *Method and controller for detecting arc instabilities in gas discharge lamps*. U.S. Patent number 5,569,984, 1996.
- [16] Caldeira, P., Bourdillon, L., Holtslag, A. H. and Qian, J., *Controller for a gas discharge lamp with variable inverter frequency an with lamp power and bus voltage control*. U.S. Patent number 5,623,187, 1997.
- [17] Ben-Yaakov, S.; Gulko, M.; Medini, D. *Design and performance of an electronic ballast for high-pressure sodium (HPS) lamp*. IEEE Transaction on Industrial electronics, vol. 44, 1997, pp: 486-491.