

Reator Eletrônico Para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 400W Sem Ressonância Acústica

Anderson Soares André

GPSSA – Grupo de Pesquisa em Sistemas de Supervisão Automática

UNISUL – Universidade do Sul da Santa Catarina

E-mail: aandre@unisul.br

Arnaldo José Perin

INEP – Instituto de Eletrônica de Potência

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

E-mail: Arnaldo.perin@inep.ufsc.br

Abstract — Acoustic Resonance phenomenon is the biggest trouble meet to develop high-pressure sodium lamp electronic ballasts. This phenomenon can appear when lamp is operated by a high frequency current and presents as mainly consequences arc path distortions, light fluctuations, arc extinction and, at worst cases, lamp destruction. This way, at this paper high-pressure sodium lamp electronic ballast able to avoid acoustic resonance is proposed.

Index Terms — HID, acoustic resonance, high-pressure sodium lamp.

I. INTRODUÇÃO

O maior desafio enfrentado por projetista para o desenvolvimento de reatores eletrônicos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão é, sem dúvida alguma, o fenômeno conhecido como ressonância acústica [1]. Este fenômeno pode ser registrado quando a lâmpada é alimentada com uma corrente com frequência superior a frequência da rede e ocorre quando a frequência da potência na lâmpada coincide com a frequência natural de ressonância do tubo de descarga.

Como principais consequências da ressonância acústica pode-se citar o aparecimento de distorções no caminho da descarga, flutuações na luz gerada, extinção do arco e, em casos extremos, destruição da lâmpada por aquecimento local do tubo de descarga. Em função destes problemas, as técnicas e reatores para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão não experimentaram a mesma evolução registrada na área dos reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes.

As bandas de frequência de potência em que a ressonância acústica ocorre são basicamente determinadas pela dimensão interna do tubo de descarga, pela distância entre os eletrodos, pela geometria interna do bulbo, pela velocidade do som e pela pressão do gás [2-4]. Conclui-se então que, lâmpadas de diferentes modelos e diferentes fabricantes, podem apresentar comportamentos distintos quanto à ressonância acústica, complicando ainda mais o projeto deste tipo de reator.

A. Técnicas Utilizadas Para Evitar a Ressonância Acústica

Diversas técnicas já foram propostas para evitar o aparecimento da ressonância acústica nas lâmpadas de

vapor de sódio de alta pressão alimentadas por reatores eletrônicos em alta frequência. Entretanto, todas podem ser enquadradas em três grandes categorias:

- Operar a lâmpada em uma frequência distante das faixas de frequência em que a ressonância acústica ocorre.
- Operar a lâmpada sob densidade de potência reduzida das harmônicas individuais.
- Operar a lâmpada com circuitos eletrônicos capazes de detectar a ocorrência da ressonância acústica e mudar a frequência de comutação (solução em tempo real).

Cada uma das soluções apresenta qualidades e problemas inerentes a sua aplicação prática. Em função disto, algumas destas técnicas foram testadas com a ajuda de protótipos, a fim de determinar a melhor escolha para a implementação de uma versão comercial para um reator eletrônico.

II. ESTÁGIO DE SAÍDA

Por ser o responsável direto pela alimentação da lâmpada, o estágio de saída pode ser considerado como sendo o elemento principal de um reator eletrônico. Alguns dados sobre este estágio serão apresentados a fim de explicar a escolha da estrutura para um protótipo final. O inversor em meia-ponte é usado em boa parte das implementações, por representar uma solução eficaz com circuito de comando simplificado e com baixa energia reativa circulante, quando comparado a um inversor em ponte completa.

A. Ignitor

O nível de tensão necessário para garantir a ignição de uma lâmpada de vapor de sódio de alta pressão, de acordo com a norma IEC, é 2.775V +/- 25V [5]. Um estudo sobre diversos circuitos de ignição aplicáveis a reatores eletrônicos é apresentado em [6-7]. Através dos resultados apresentados é possível apontar o circuito ignitor por pulso de tensão com centelhador como sendo a melhor opção, por apresentar baixa sensibilidade a componentes parasitas e porque sua tensão de saída pode ser facilmente ajustada através de relação de transformação utilizada. Além disso, este circuito ignitor é facilmente acoplado ao circuito inversor em meia-ponte com filtro LC, sem a

Reator Eletrônico Para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 400W Sem Ressonância Acústica

necessidade de grandes alterações topológicas, como se pode observar na Fig. 1.

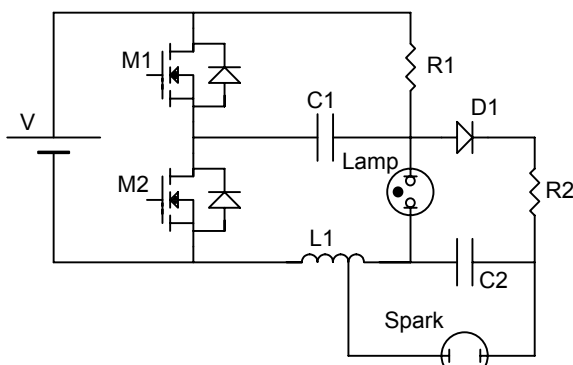


Fig. 1. Inversor com ignitor integrado.

O funcionamento deste circuito de ignição pode ser entendido com a ajuda das formas de onda da Fig. 2. Quando o circuito é energizado, a impedância da lâmpada é muito alta, fazendo com que toda a tensão fornecida pelo inversor seja aplicada sobre a mesma. Esta tensão é retificada pelo diodo D1 e carrega o capacitor C2 através de R2. Quando a tensão nas placas do capacitor C2 (Ax2) atinge a tensão de ruptura (“breakdown”) do centelhador, a energia armazenada no capacitor é aplicada sobre algumas espiras do indutor L1, fazendo surgir, por indução, a alta tensão necessária para a ignição da lâmpada (Ch2 na Fig. 2).

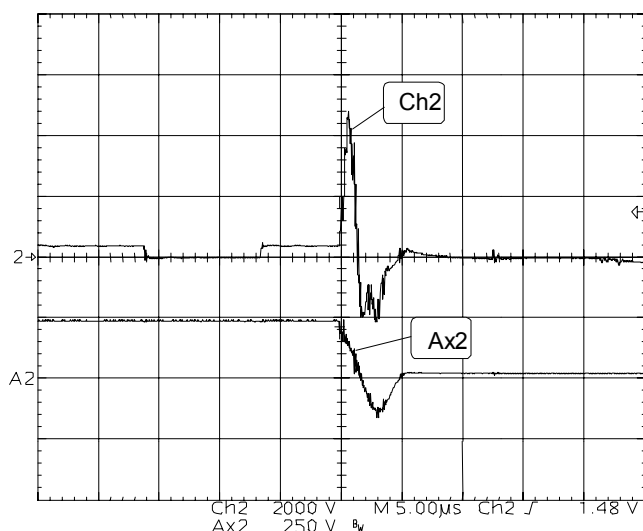


Fig. 2. Tensão no capacitor C2 (Ax2) e na lâmpada (Ch2) durante o transitório de ignição.

Quando a lâmpada entra em funcionamento, a tensão de arco que se estabelece é muito menor que o valor anteriormente registrado, o que impede que a tensão sobre o capacitor C2 atinja a tensão de ruptura do centelhador novamente. Se por algum motivo a lâmpada não entrar em funcionamento, o capacitor C2 é recarregado e o processo

se repete até que o conversor seja desligado ou até que a ignição seja obtida. Este circuito básico foi utilizado para realizar os testes práticos com diversos métodos para eliminação da ressonância acústica.

B. Reator usando faixa de frequência livre

A primeira técnica para eliminação de ressonância acústica testada é baseada na operação da lâmpada em uma frequência de potência teoricamente livre do fenômeno. De acordo com [8], para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 400W, existe uma banda de frequência de potência livre da ressonância acústica que vai de 91kHz até 110kHz, o que levou a escolha de uma frequência de comutação de 50kHz. Um protótipo controlado por um microcontrolador PIC16F873 foi implementado para testar o método.

Os resultados obtidos demonstraram que, quando a frequência de comutação é exatamente 50kHz (Fig. 3), não há registro da ocorrência da ressonância acústica. Entretanto, pequenas mudanças nesta frequência, para valores como 49kHz e 51kHz, causaram o aparecimento da ressonância em algumas amostras de lâmpada analisadas, colocando em xeque tal técnica. Vale citar porém, que as ressonâncias registradas eram de pequena intensidade.

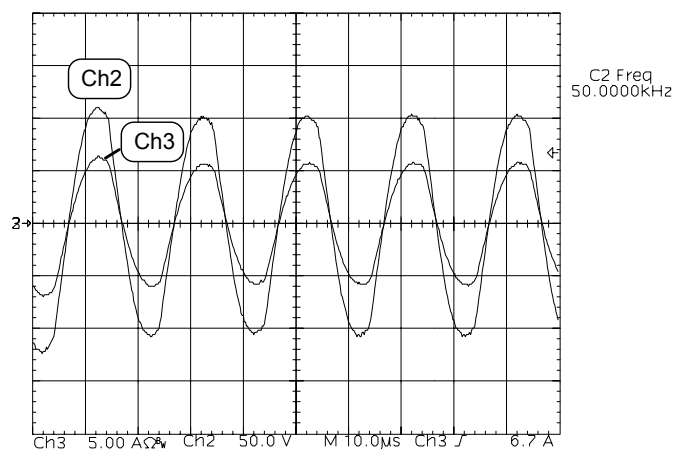


Fig. 3. Tensão e corrente na lâmpada em regime.

C. Reator usando modulações especiais por variação de frequência (MVF) e inversão de fase da corrente (MVI)

Usando o mesmo circuito apresentado no item anterior, através de pequenas mudanças no software do microcontrolador, foi possível implementar duas modulações especiais. A primeira delas, baseada na variação periódica da frequência de comutação do inversor, promove o espalhamento espectral da potência entregue à lâmpada, que passa a ser operada sob densidade de potência minimizada das harmônicas individuais.

Reator Eletrônico Para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 400W Sem Ressonância Acústica

Vários testes desta modulação foram realizados na faixa de frequência de comutação situada em torno de 20,6kHz porque, de acordo com [9] e [10], esta é a pior situação para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão de 400W. Testes também foram realizados em frequências de comutação mais altas como em torno de 40kHz e 50kHz e, em todos os casos, a ressonância foi eliminada ou drasticamente amenizada.

A segunda modulação especial é baseada na idéia de que uma variação constante na fase da corrente da lâmpada perturba a excitação da ressonância acústica, e foi inicialmente proposta como uma solução para evitar o fenômeno em lâmpadas de tubo pequeno, como as lâmpadas de vapor metálico, usando uma inversão de 90° [11]. Com base nestes dados, dois ângulos de inversão da corrente foram testados: 90° e 180°. A fim de garantir a qualidade dos testes realizados, mais uma vez foram utilizadas frequências de comutação como 20,6kHz, 40kHz e 50kHz. Os resultados obtidos com as amostras de lâmpadas analisadas mostraram que o número de períodos entre cada inversão da fase da corrente não afetou o resultado da técnica.

Em todas as amostras analisadas a inversão em 180° apresentou resultados satisfatórios, entretanto o ângulo de inversão de 90° não apresenta os mesmos resultados, permitindo o aparecimento da ressonância acústica em algumas das amostras analisadas. A Fig. 4 mostra a tensão de gate de um dos transistores e a corrente na lâmpada a fim de demonstrar como a inversão de 180° é obtida.

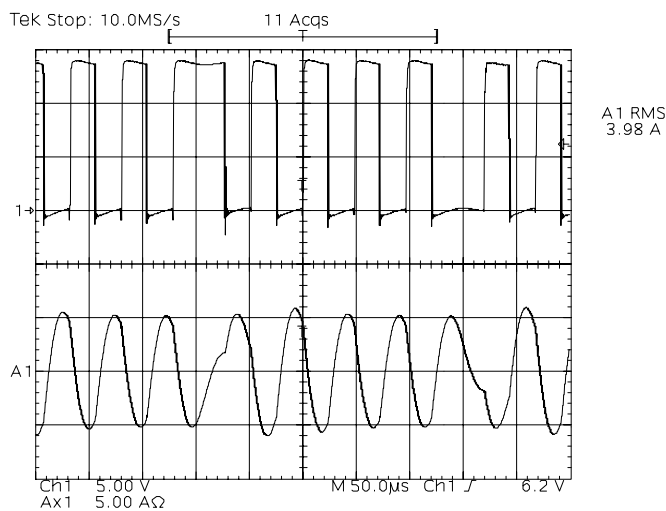


Fig. 4. Tensão no “gate” de um dos transistores e corrente na lâmpada com inversão de 180° da corrente.

D. Reator usando detecção da ressonância acústica pela envoltória em baixa frequência da corrente na lâmpada

Uma última abordagem analisada, utilizando o circuito inversor em meia-ponte, é baseada no conceito do controle em tempo real. Neste circuito, um microcontrolador analisa a envoltória em baixa frequência da corrente na

lâmpada e, caso a ressonância acústica ocorra, o ponto de operação do conversor é alterado. Isto pode ser feito porque, quando a lâmpada opera sem ressonância, a envoltória em baixa frequência da corrente apresenta o mesmo formato da ondulação da tensão no capacitor de barramento (Fig. 5).

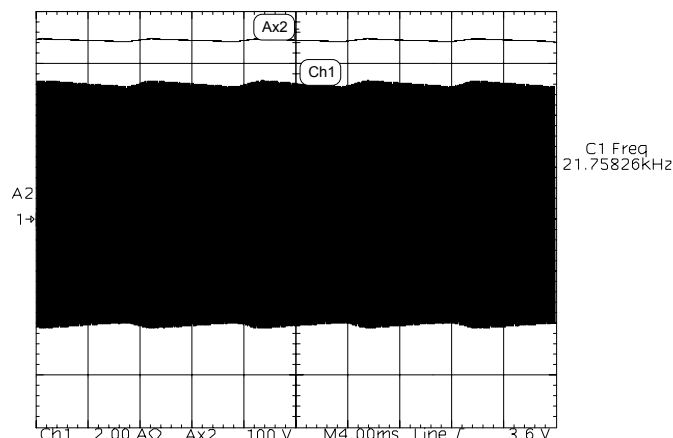


Fig. 5. Corrente na lâmpada (Ch1) e tensão no barramento CC (Ax2) em regime – sem ressonância.

Por outro lado, quando ocorre a ressonância acústica, os picos e vales da envoltória em baixa frequência da corrente na lâmpada não se parecem com a ondulação da tensão do capacitor de barramento, em função da variação da impedância instantânea da lâmpada (ver Fig. 6).

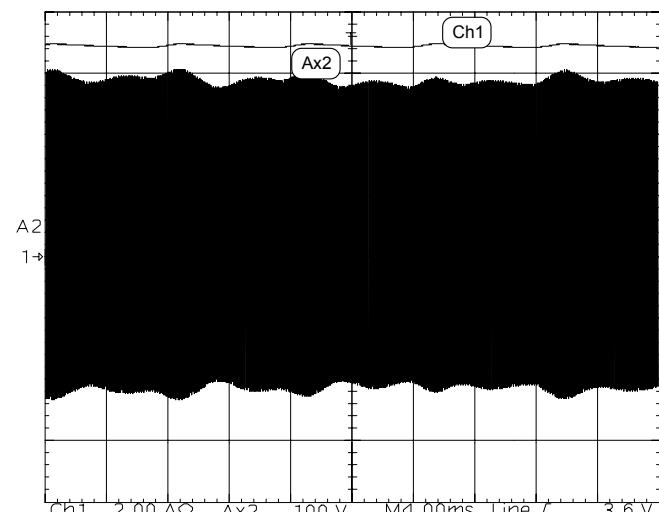


Fig. 6. Corrente na lâmpada (Ax2) e tensão no barramento CC (Ch1) em regime – com ressonância.

As oscilações não periódicas desta envoltória podem facilmente ser utilizadas como parâmetro de análise da ocorrência do fenômeno. Tal detecção é possível através da utilização de um circuito como aquele mostrado na Fig. 7, que gera um sinal quadrado com frequência e razão cíclica dependentes desta envoltória.

Reator Eletrônico Para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 400W Sem Ressonância Acústica

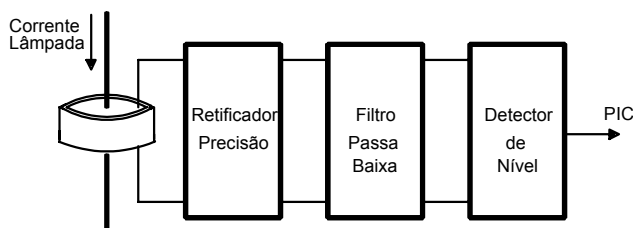


Fig. 7. Diagrama de blocos do circuito para detecção da ressonância acústica.

No protótipo implementado, o sinal de saída deste estágio de detecção é aplicado em um dos terminais de um microcontrolador PIC 16F873. A Fig 8 mostra os sinais do filtro passa-baixa e do detector de nível, quando a lâmpada opera normalmente.

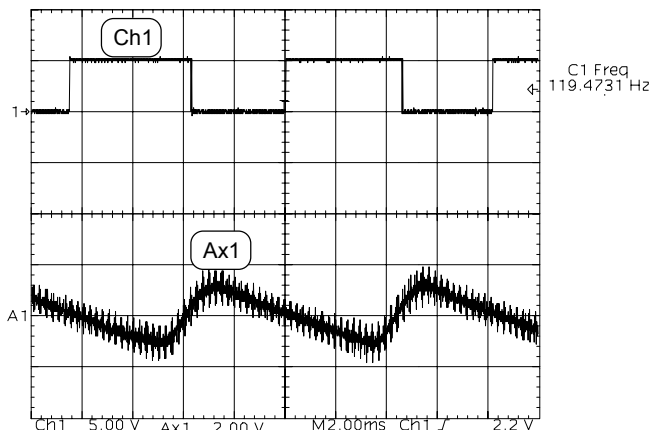


Fig. 8. Tensão na saída do filtro passa-baixa (Ax1) e na saída do detector (Ch1) – Sem ressonância.

Por outro lado, as formas de onda da aquisição apresentada na Fig. 9, mostram o comportamento destas mesmas grandezas durante a ocorrência da ressonância acústica.

Através do software desenvolvido, o microcontrolador mede a duração dos períodos em que o sinal do circuito detector é baixo e, quando as variações persistem por dez ciclos consecutivos, o circuito altera a frequência de comutação do inversor. Após esta alteração, o circuito aguarda por mais sessenta segundos a fim de verificar se o circuito atingiu um ponto estável de operação. Caso as oscilações persistam, novas mudanças de frequência de comutação são executadas.

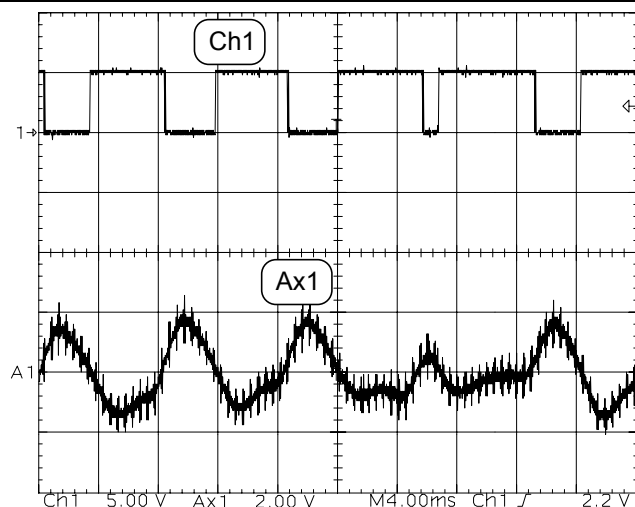


Fig. 9. Tensão na saída do filtro passa-baixa (Ax1) e na saída do detector (Ch1) – Com ressonância.

A sensibilidade apresentada pelo circuito é bastante grande, pois o mesmo foi capaz de detectar pequenas alterações do comportamento em algumas amostras de lâmpadas, mesmo quando o arco ainda não apresentava distorções visíveis.

A Fig. 10 mostra uma fotografia do circuito de comando, onde aparecem os três circuitos integrados utilizados e o sensor de corrente implementado com um núcleo toroidal.

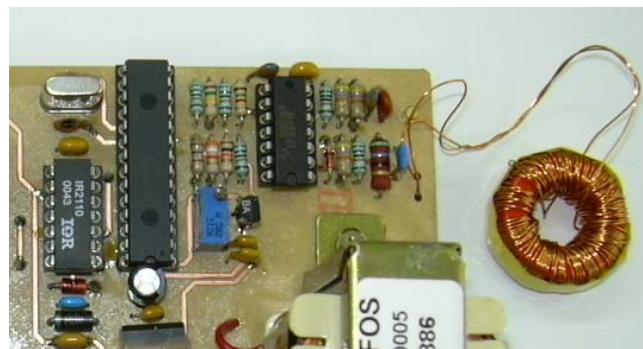


Fig. 10. Fotografia do circuito de comando implementado.

E. Reator usando corrente de baixa frequência

Uma opção consagrada na literatura como solução para os problemas inerentes à ocorrência da ressonância acústica é a utilização de circuitos eletrônicos capazes de fornecer corrente de baixa frequência para a lâmpada [12]. Tal técnica apresenta-se como uma solução viável porque permite que se utilize um inversor operando em alta frequência, o que reduz o volume ocupado pelos elementos reativos (quando comparado com um reator operando na frequência da rede), ao mesmo tempo em que se fornece para a lâmpada uma corrente em uma frequência próxima daquela para a qual a mesma foi projetada.

Reator Eletrônico Para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 400W Sem Ressonância Acústica

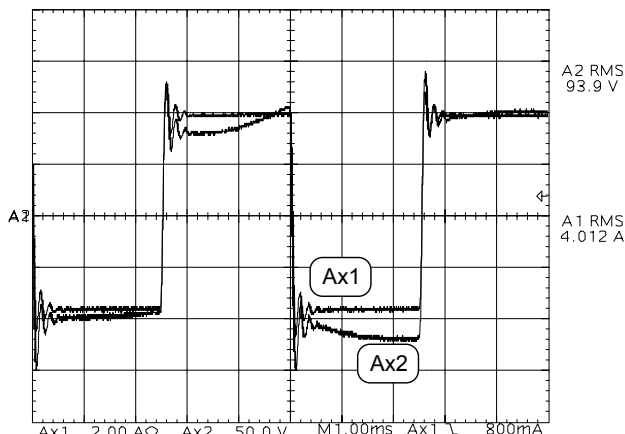


Fig. 11. Tensão (Ax2) e corrente (Ax1) na lâmpada com reator baixa frequência.

Além disso, com modulação adequada, é possível fazer com que a corrente entregue à lâmpada seja quadrada, o que idealmente leva a uma frequência da potência nula. A análise desta técnica foi realizada com a ajuda de um inversor em ponte-completa seguido de um filtro LLC. Com tal configuração não foram detectadas ressonâncias em nenhuma das amostras de lâmpadas analisadas.

As formas de onda de tensão e corrente na lâmpada, relativas a esta técnica, são apresentadas na Fig. 11.

F. Análise das metodologias estudadas

A implementação prática destas quatro técnicas de eliminação da ressonância acústica, permitiu que se chegasse às seguintes conclusões:

1) *Frequência livre*: Opção economicamente viável, porém de baixa confiabilidade, já que a frequência em que o fenômeno ocorre depende dos parâmetros construtivos da lâmpada, como pressão do gás e distância entre os eletrodos, que variam entre os modelos e com a vida útil da lâmpada.

2) *Modulações especiais*: Os resultados demonstraram que a técnica elimina ou ameniza a ressonância, mesmo quando a lâmpada é operada em frequências consideradas críticas, sendo, portanto, indicada para aplicação em frequências não críticas, como uma forma de reduzir a possibilidade de ocorrência do fenômeno. Um grande atrativo desta técnica é o seu baixo custo de implementação.

3) *Deteção pela envoltória*: Técnica extremamente eficaz, porém com implementação mais complexa, pois demanda a utilização de sensores, filtros e microcontrolador.

4) *Baixa frequência*: Circuito com bons resultados quanto à eliminação da ressonância acústica, porém com grande peso e volume quando comparado com as demais opções testadas.

Dessa forma, optou-se pelo circuito com detecção pela envoltória da corrente para a implementação do protótipo final.

III. ESTÁGIO DE ENTRADA

Para que se pudesse implementar um protótipo comercialmente viável, com potência de saída 400W, é indispensável que se implemente um estágio que proporcione a correção do fator de potência da corrente de entrada. Por ser uma estrutura consagrada, implementou-se um conversor BOOST em condução contínua, comandado pelo circuito integrado 3854, com estrutura clássica, conforme se pode observar na Fig. 12.

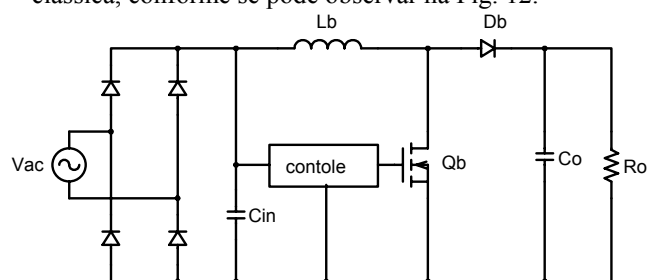


Fig. 12. Conversor BOOST.

A aquisição da Fig. 13 mostra a tensão e a corrente de entrada com a lâmpada em regime permanente. O fator de potência obtido foi superior a 0,99.

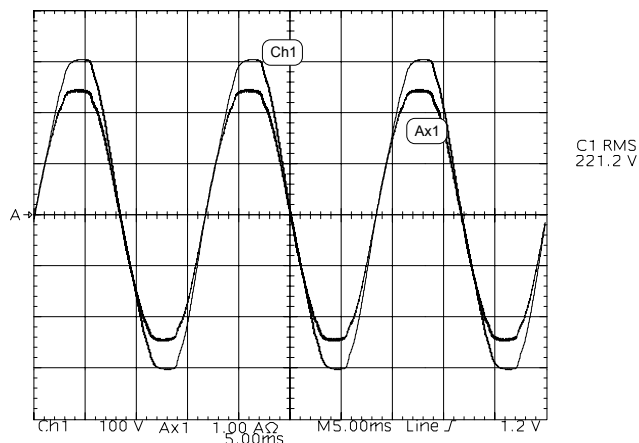


Fig. 13. Tensão e corrente de entrada com o conversor BOOST.

Protótipos utilizando conversor "charge-pump" e filtro Valley-fill modificado também foram implementados, entretanto os resultados práticos obtidos demonstram que o fator de crista da corrente na lâmpada atinge níveis relativamente elevados, inviabilizando sua utilização.

IV. PROTÓTIPOS COMPLETOS

Dois protótipos foram completos foram concebidos ao final deste estudo. O primeiro deles foi implementado

Reator Eletrônico Para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão de 400W Sem Ressonância Acústica

utilizando o inversor meia-ponte com detecção da ressonância pela envoltória da corrente na lâmpada e um conversor BOOST para correção do fator de potência. Tais estruturas foram utilizadas por terem apresentado os melhores resultados nos estudos iniciais.

O segundo protótipo conjugou as técnicas de modulação especial no inversor, em uma frequência não crítica, e o conversor BOOST, já que esta é a técnica de menor custo de implementação.

O primeiro protótipo foi utilizado para alimentar várias amostras de lâmpadas de diferentes fabricantes e apresentou excelentes resultados quanto a detecção e eliminação da ressonância acústica, mesmo quando o circuito foi programado para operar em frequências de comutação consideradas críticas, além de alto fator de potência de entrada, sendo então adequado para aplicações comerciais.

O segundo protótipo, por estar operando em uma faixa de frequência não crítica, também alimentou diversas amostras de lâmpadas sem que se registrasse o aparecimento da ressonância acústica.

IV. CONCLUSÃO

A análise de diversos circuitos aplicáveis aos estágios de entrada e saída de reatores eletrônicos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão foi apresentada.

Através dos resultados obtidos, pode-se afirmar que todas as técnicas apresentam qualidades e limitações, podendo ser aplicadas dentro de suas limitações. Entretanto, a conjunto formado pelo conversor BOOST e uma solução de tempo real, capaz de detectar a ocorrência da ressonância acústica, apresentou os melhores resultados dentro das condições de análise a que cada protótipo foi submetido, ou seja, pode ser projetado para operar em qualquer faixa de frequência de comutação, podendo ser considerado um projeto universal.

O protótipo utilizando modulação especial, por outro lado, também evitou o aparecimento da ressonância e representa uma opção com menor custo de implementação, já que não necessita de filtros e sensores e pode utilizar um microcontrolador mais simples.

Testes de campo ainda são necessários para determinar a durabilidade e a confiabilidade do conjunto, quando exposto a intempéries.

REFERÊNCIA

- [1] S. A. Anderson and J. P. Arnaldo, "Electronic ballast for high pressure sodium lamps" *COBEP 2001*.
- [2] S. A. Anderson, J. P. Arnaldo, C. T. Cícero, M. Joabel, "Electronic ballast for high-pressure sodium lamps with acoustic resonance avoidance". *COBEP 2003*.
- [3] J. W., Denneman., "Acoustic resonance in high frequency operated low wattage metal halide lamps". *Philips Journal of Research*, 1983.
- [4] F. A., Correa. "Estudo de ignitores de pulsos superpostos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão". Dissertação de mestrado submetida à Escola Politécnica de USP – São Paulo, 2000.
- [5] S. A. Anderson and J. P. Arnaldo, "Ignitor of electronic ballast for HID sodium lamps" *COBEP 2001*.
- [6] F. A., Correa. "Estudo de ignitores de pulsos superpostos para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão". Dissertação de mestrado submetida à Escola Politécnica da USP – São Paulo, 2000.
- [7] S. Ben-Yaakov; M. Gulko.; D. Medini. "Design and performance of an electronic ballast for high-pressure sodium (HPS) lamp". *IEEE Transaction on Industrial electronics*, vol. 44, 1997, pp: 486-491.
- [8] Witting, H. L., "Acoustic resonances in cylindrical high-pressure arc discharge". *J. Appl. Phys.*, Vol. 49, n°5, May 1978, pp 2680-2683.
- [9] S.A. Anderson, "Sistema eletrônico para lâmpadas de vapor de sódio de alta pressão" Tese de Doutorado – UFSC, 2004.
- [10] Witting, H. L., "Acoustic resonances in cylindrical high-pressure arc discharge". *J. Appl. Phys.*, Vol. 49, n°5, May 1978, pp 2680-2683.
- [11] Ganser, H. G. and Kersten, R., Schäfer, R. and Stormberg, H. P., "Method of operating a high-pressure metal vapor discharge lamp and circuit arrangement for carrying out this method". U.S. Patent number 4,705,991, November 1987.
- [12] Ponce, M.; López, A.; Correa, J; Arau, J. Electronic ballast with high frequency square waveform to avoid acoustic resonance.