

# REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES COMERCIAIS UTILIZANDO CONVERSOR BOOST EIE AUTO-OSCILANTE

Érico C. Guimarães, João B. Vieira Jr., Ernane A. A. Coelho, Luiz C. de Freitas, Luiz C. G. Freitas

Universidade Federal de Uberlândia  
Faculdade de Engenharia Elétrica  
Núcleo de Pesquisas em Eletrônica de Potência  
Uberlândia – Minas Gerais  
E-mails: guimaraes.erico@hotmail.com, lcgfreitas@yahoo.com.br

**Resumo** - O presente trabalho apresenta uma proposta de oscilador de potência chaveado com comutação suave, denominado Conversor Boost EIE. Este conversor apresenta técnicas de auto-oscilação permitindo o acionamento das chaves sem a utilização de dispositivos de controle. No que se refere à aplicação deste conversor como reator eletrônico para a alimentação de lâmpadas fluorescentes, foram realizados estudos sobre circuitos estabilizadores e estágios pré-reguladores, assim como a construção de um novo protótipo para a realização de ensaios. Os resultados evidenciaram um equipamento com fortes atrativos comerciais devido à robustez, baixo custo de implementação e conservação da vida útil da lâmpada.

**Palavras-Chave** – Ballast, Boost EIE, Circuito Auto-Oscilante, Inversores, Reatores Eletrônicos.

## ELECTRONIC BALLAST FOR COMMERCIAL FLUORESCENT LAMPS USING SELF-OSCILLATING BOOST EIE CONVERTER APPLIED AS AN INVERTER STAGE

**Abstract** – This paper presents a proposal of switched power oscillator with soft-commutation, named Self-oscillating Boost EIE Converter. Since self-oscillating techniques are used, auxiliary start devices and control circuits are not needed. Concerning its application as an Electronic Ballast for Fluorescent Lamps, studies about establisher circuits and pre-regulators circuits were developed, as well as the construction of a new prototype for testing. The results showed a product with strong commercial appeal because of the robustness, low cost of implementation and conservation of lamp life.

**Keywords** – Boost EIE, Electronic Ballast, Inverters, Self-oscillating Circuits.

## I. INTRODUÇÃO

O desempenho das lâmpadas fluorescentes cresce quando reatores eletrônicos são usados em substituição aos reatores magnéticos. Como os reatores eletrônicos se caracterizam por operarem em alta frequência, consegue-se um aumento da eficiência luminosa, com menor potência elétrica drenada do sistema de alimentação em corrente alternada, propiciando uma melhor eficiência energética.

Além de reduzir o consumo de energia elétrica, obtém-se uma redução de tamanho e peso do sistema através da substituição do reator magnético pelo reator eletrônico tornando o equipamento mais compacto. Consegue-se ainda eliminar os ruídos audíveis e o efeito flicker.

Atualmente, os reatores eletrônicos mais populares, de menor custo, não apresentam os índices desejados de qualidade para o processamento eletrônico de energia elétrica, quais sejam, alto fator de potência, baixa taxa de distorção harmônica da corrente de entrada, alto rendimento e baixa interferência eletromagnética.

Com o objetivo de oferecer uma alternativa para a solução dos problemas supracitados e ainda reduzir os custos de implementação destes equipamentos, este trabalho apresenta uma proposta de conversor de potência auto-oscilante com comutação suave, alto rendimento e baixo custo aplicado como estágio inversor de reatores eletrônicos para a alimentação de lâmpadas fluorescentes comerciais. Quando comparado com topologias já existentes, tal conversor apresenta como vantagem o fato da corrente de oscilação ter sido desviada das chaves principais permitindo uma sensível redução das perdas por condução, além de minimizar as perdas de comutação devido ao chaveamento suave dos interruptores. Este dispositivo apresenta ainda baixo custo uma vez que, através do emprego de técnicas de auto-oscilação, o acionamento das chaves se dá sem a utilização de circuitos de partida e circuitos de controle [1]-[4].

Como contribuição aos trabalhos anteriores, propõe-se a utilização de um circuito estabilizador ligado em série com o tubo de descarga a fim de limitar a corrente de partida e gerar uma condição operacional que conserve a vida útil da lâmpada. Este dispositivo torna-se bastante atrativo devido à característica de dinâmica negativa das lâmpadas fluorescentes pois, observa-se, a partir do momento em que o gás contido no interior do tubo é ionizado, um aumento indefinido da corrente na lâmpada levando à deterioração dos eletrodos e a consequente danificação da lâmpada.



X CEEL - ISSN 2178-8308  
24 a 28 de setembro de 2012  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

## II. CONVERSOR BOOST EIE AUTO-OSCILANTE

Será apresentada a topologia do oscilador de potência chaveado com comutação suave e reduzidas perdas por condução originado da associação entre o conversor *Boost* EIE e o circuito oscilante em malha externa.

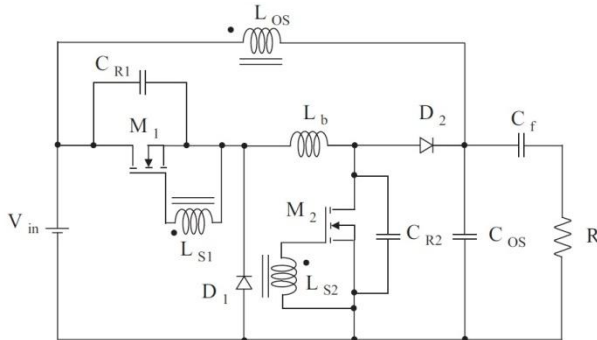


Fig. 1. Conversor Boost EIE Auto-oscilante.

O circuito do conversor CC-CA proposto, retratado na Figura 1, é composto por duas chaves  $M_1$  e  $M_2$  que, quando estão fechadas, promovem o armazenamento de energia pelo indutor do *Boost*,  $L_b$ . Dois diodos ultra-rápidos,  $D_1$  e  $D_2$ , que quando polarizados diretamente, promovem a transferência de energia do indutor de *Boost* para o capacitor  $C_{os}$  e a carga  $R$ . Os capacitores  $C_{r1}$  e  $C_{r2}$ , em paralelo com as chaves  $M_1$  e  $M_2$ , são capacitores de auxílio à comutação suave e em nada interferem no processamento de energia deste conversor. Os indutores  $L_{s1}$  e  $L_{s2}$  estão acoplados magneticamente ao indutor  $L_{os}$  e são responsáveis pela tensão de ataque ao gatilho das chaves  $M_1$  e  $M_2$ . O indutor de oscilação  $L_{os}$  juntamente com o capacitor de oscilação  $C_{os}$ , formam o circuito oscilante e são responsáveis por determinar a frequência de operação do conversor *Boost* EIE.

### A. Princípios de Operação e Etapas de Funcionamento

Para estabelecer o princípio de operação deste conversor, as seguintes considerações devem ser feitas:

- As chaves  $M_1$  e  $M_2$  operam com uma frequência de chaveamento fixa e com razão cíclica igual a 0,5;
- A fonte de tensão  $V_{in}$  é considerada uma simples fonte de tensão CC sem ripple de tensão;

Desta maneira, o funcionamento do conversor *Boost* EIE auto-oscilante pode ser ilustrado, considerando um ciclo de chaveamento, por meio de seis etapas de funcionamento, descritas a seguir.

#### 1) Primeira etapa - crescimento linear da corrente $i_{L_b}$ :

Nesta etapa, têm-se dois circuitos operando simultaneamente. O primeiro circuito, denominado como circuito oscilante, é composto pela fonte de tensão contínua  $V_{in}$ , pelo indutor de oscilação  $L_{os}$ , pelo capacitor de oscilação  $C_{os}$ , pelo capacitor de filtro passa alta  $C_f$  e pela carga  $R$ . O segundo circuito é composto pela fonte de tensão  $V_{in}$ , pelas chaves  $M_1$  e  $M_2$  e pelo indutor do *Boost*  $L_b$ .

Devido a derivada positiva da corrente  $i_{L_{os}}$ , as chaves  $M_1$  e  $M_2$  encontram-se fechadas nesta etapa. Deste modo, a corrente  $i_{L_b}$  cresce linearmente devido a tensão  $V_{in}$  aplicada, fazendo com que haja a transferência de energia da fonte de

tensão  $V_{in}$  para o indutor do *Boost*  $L_b$ . O tempo de condução das chaves  $M_1$  e  $M_2$  é definido pelo pulso de tensão gerado pelos indutores  $L_{s1}$  e  $L_{s2}$  devido a derivada positiva da corrente  $i_{L_{os}}$ . A etapa termina quando a corrente  $i_{L_{os}}$ , devido a oscilação com o capacitor  $C_{os}$ , tem sua derivada invertida desativando as chaves  $M_1$  e  $M_2$ . A Figura 2.a ilustra o circuito equivalente a esta etapa de operação.

#### 2) Segunda etapa – abertura das chaves sob tensão zero:

As chaves  $M_1$  e  $M_2$  saem de condução devido à inversão da derivada da corrente  $i_{L_{os}}$  e da consequente extinção dos pulsos de tensão no gatilho das mesmas. Assim, a corrente  $i_{L_b}$  através do indutor de *Boost*  $L_b$  é desviada das chaves  $M_1$  e  $M_2$  para os capacitores de auxílio à comutação  $C_{r1}$  e  $C_{r2}$  promovendo a carga dos mesmos com corrente constante e igual ao valor de pico da corrente  $i_{L_b}$ .

Esta etapa termina quando a tensão  $V_{C_{r1}}$ , sobre o capacitor  $C_{r1}$ , atinge  $V_{in}$  e a tensão  $V_{C_{r2}}$ , sobre o capacitor  $C_{r2}$ , atinge uma tensão cujo valor é determinado pela tensão de saída  $V_{C_{os}}$  sobre o capacitor  $C_{os}$ . A Figura 2.b ilustra o circuito equivalente a esta etapa de operação.

#### 3) Terceira etapa – decrescimento linear da corrente $i_{L_b}$ :

O terceiro estágio de operação começa enquanto as chaves  $M_1$  e  $M_2$  ainda estão abertas e os diodos  $D_1$  e  $D_2$  são polarizados diretamente. Assim sendo, a energia que foi armazenada pelo indutor de *Boost*  $L_b$  durante o primeiro estágio, é entregue à carga  $R$  e ao capacitor de oscilação  $C_{os}$  por meio dos diodos  $D_1$  e  $D_2$ . Isto assegura a continuidade da oscilação e o fornecimento de energia à carga  $R$ .

A tensão  $V_{C_{r1}}$  permanece com valor constante e igual a  $V_{in}$ , enquanto que a tensão  $V_{C_{r2}}$  acompanha a tensão de saída  $V_{C_{os}}$ . Esta etapa termina quando a corrente  $i_{L_b}$  passa por zero novamente. A Figura 2.c ilustra o circuito equivalente a esta etapa.

#### 4) Quarta etapa – ressonância entre $C_{r1}$ , $C_{r2}$ , $L_b$ e $V_{in}$ :

Este estágio começa quando a corrente  $i_{L_b}$  passa por zero. Durante este estágio, uma oscilação entre os capacitores de auxílio à comutação  $C_{r1}$  e  $C_{r2}$  e o indutor  $L_b$  através da fonte de tensão  $V_{in}$  tem início. Desse modo, a descarga dos capacitores de auxílio à comutação  $C_{r1}$  e  $C_{r2}$  inicia-se através dos diodos intrínsecos das chaves  $M_1$  e  $M_2$ , respectivamente  $D_{s1}$  e  $D_{s2}$ . Enquanto isso, a derivada da corrente  $i_{L_{os}}$  continua com valor negativo e portanto, as chaves  $M_1$  e  $M_2$  ainda se encontram desativadas. Este estágio se finda quando a tensão  $V_{C_{r1}}$  atinge zero. A Figura 2.d ilustra o circuito equivalente a esta etapa.

#### 5) Quinta etapa – completa descarga do capacitor de auxílio à comutação $C_{r2}$ :

Durante esta etapa de operação tem-se a descarga completa do capacitor de auxílio à comutação  $C_{r2}$  através dos diodos intrínsecos  $D_{s1}$  e  $D_{s2}$ . Este estágio se finda quando a tensão  $V_{C_{r2}}$  atinge zero e a corrente de oscilação  $i_{L_{os}}$  tem sua derivada invertida novamente. A Figura 2.e ilustra o circuito equivalente a esta etapa.

#### 6) Sexta etapa – fechamento das chaves $M_1$ e $M_2$ com zero de tensão e corrente:

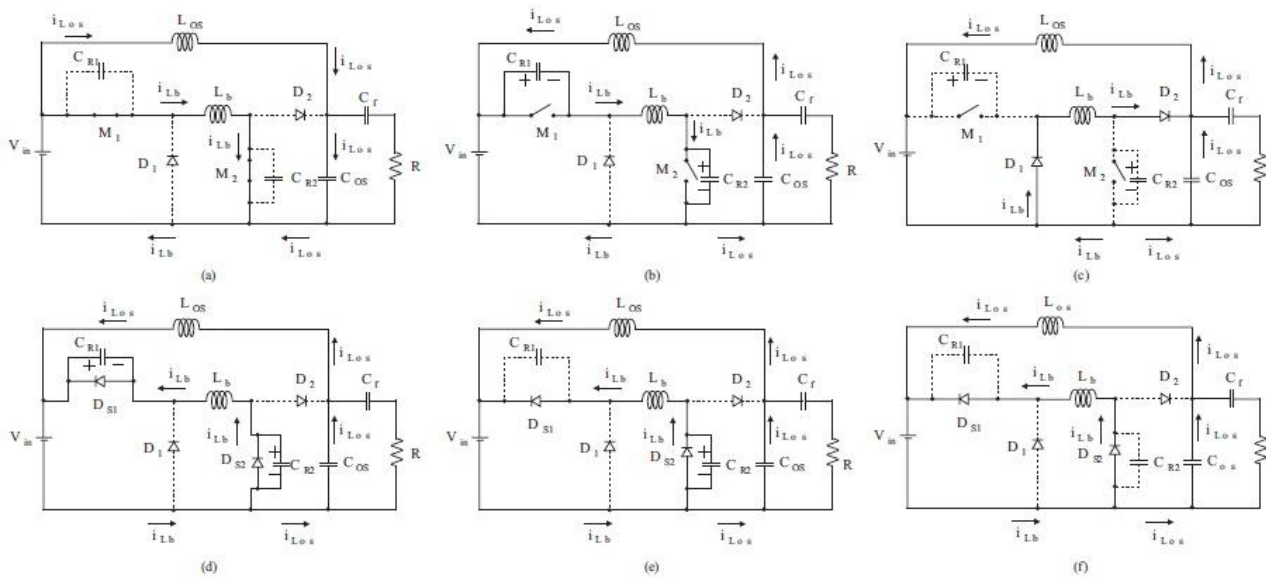


Fig. 2. Etapas de Funcionamento do Conversor *Boost* EIE Auto-oscilante.

Ao final do estágio anterior, quando a derivada da corrente  $i_{L_{OS}}$  assume valor positivo, tem-se um pulso de tensão aplicado ao gatilho das chaves  $M_1$  e  $M_2$  simultaneamente, fazendo com que as mesmas entrem em condução. Devido à inversão da corrente  $i_{L_b}$ , tem-se os diodos intrínsecos  $D_{s1}$  e  $D_{s2}$  em condução e portanto, propiciando o fechamento das chaves  $M_1$  e  $M_2$  com zero de tensão e corrente garantindo a comutação suave das mesmas e dando início a um novo período de chaveamento. A Figura 2.f ilustra o circuito equivalente a etapa final.

Durante toda a operação deste conversor é possível perceber que as chaves apenas conduzem a corrente de carga ou corrente  $i_{L_b}$  através do indutor do *Boost*, isto significa que as mesmas processam apenas a energia entregue à carga, o que deve ser entendido como uma sensível redução das perdas por condução.

### III. CONVERSOR BOOST EIE AUTO-OSCILANTE APLICADO COMO REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES

#### A. Considerações acerca das características construtivas das Lâmpadas Fluorescentes

A lâmpada é constituída por um tubo de vidro, suportado em suas extremidades pelo conjunto coletor-emissor de elétrons. No interior do tubo contém vapor de mercúrio a baixa pressão e uma mistura de gases inertes. O gás inerte além de facilitar a ignição da lâmpada, protege os filamentos contra o bombardeamento excessivo de íons e aumenta a eficiência do processo de emissão da radiação ultravioleta. Os eletrodos têm como função facilitar a transferência de corrente dos condutores de alimentação para o gás. As paredes internas do tubo são revestidas por um composto de fósforo que quando excitado por uma linha de radiação ultravioleta, emite radiação visível.

#### B. Considerações acerca das características operacionais das Lâmpadas Fluorescentes

A ignição da descarga acontece quando um gradiente de potencial elevado é aplicado entre as extremidades da lâmpada. A descarga passa a ser autossustentada quando o processo de geração de íons e elétrons independe dos

elétrons contidos no gás antes do início do processo de ionização do mesmo. A emissão de radiação ocorre nas transições entre estados de maior energia para níveis mais estáveis do átomo de mercúrio, devido ao choque entre as partículas. Para tanto, é necessário aplicar um elevado gradiente de tensão em seus terminais, estabelecendo condições para ionização dos gases contidos no interior dos tubos e, por consequência, acender a lâmpada.

Do ponto de vista operacional, ressalta-se que as lâmpadas fluorescentes apresentam uma característica dinâmica negativa, ou seja, durante o processo de partida, a impedância da lâmpada diminui, fazendo com que haja um crescimento indefinido da corrente, circulando através de seus eletrodos, até a ionização completa do gás. Este fato, ao longo do tempo, faz com que se reduza drasticamente a durabilidade da lâmpada. Portanto, para assegurar maior conservação destes dispositivos, torna-se necessária a utilização de elementos estabilizadores de corrente. Neste contexto, conclui-se que o circuito de estabilização deve operar como uma impedância em série com a lâmpada e tem como finalidade limitar o fator de crista da corrente na lâmpada, aumentar a eficiência e conservar sua vida útil.

Diante desta perspectiva, o dispositivo desenvolvido para obtenção dos resultados experimentais foi o circuito de Estabilização Série-Paralelo Ressonante (LCC) [5], [6], ilustrado na Figura 3, já acoplado ao conversor proposto. O circuito LCC antes da partida da lâmpada possui um baixo fator de qualidade devido à resistência da lâmpada ser praticamente infinita. Desse modo, quando projetado para operar numa frequência próxima à ressonante, obtêm-se elevadas tensões sobre os terminais da lâmpada. Após a partida, a resistência equivalente da lâmpada cai radicalmente, ficando com valores inferiores à reatância capacitiva em paralelo com a mesma.

Analisando a Figura 3, observa-se que o interruptor responsável pela energização do circuito inversor, o qual constitui-se no reator eletrônico proposto como  $S_1$ , foi inserido logo após a ponte retificadora devido à necessidade de se impor uma derivada positiva de corrente no indutor de oscilação capaz de gerar sinais de comando adequados para o acionamentos das chaves  $M_1$  e  $M_2$ , conforme evidenciado na

seção anterior. Embora este sistema de acionamento não apresente falhas, na prática, não é usual dispor de chaves adequadas e condutores suficientes, nas instalações elétricas, para o acionamento do dispositivo em foco. Contudo, como contribuição futura, um circuito RC será utilizado para acionar uma chave semicondutora no barramento CC e, então, poder utilizar um interruptor de manobra no lado CA assim como convém na prática. O diodo  $D_0$  também auxilia na partida do circuito oscilante e em nada interfere no funcionamento do conversor em regime permanente. Este foi inserido no circuito com o intuito de proporcionar um caminho para a descarga da energia armazenada no circuito oscilante (capacitor  $C_{os}$  e indutor  $L_{os}$ ) quando a chave  $S_1$  for desativada, oferecendo assim, condições para realizar uma nova partida. Destaca-se que a necessidade da inserção deste simples dispositivo foi evidenciada recentemente e, constitui, portanto, uma contribuição em relação aos trabalhos anteriores por proporcionar condições para o desenvolvimento de um equipamento com características comerciais.

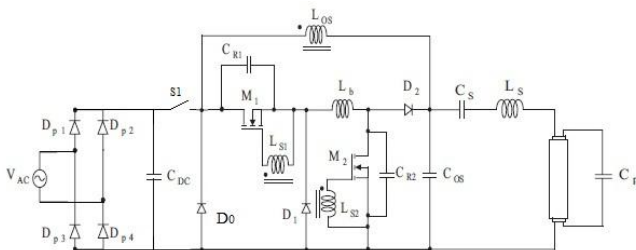


Fig. 3. Reator Eletrônico proposto para alimentar lâmpadas fluorescentes.

#### IV. ANÁLISE EXPERIMENTAL DO REATOR ELETRÔNICO PROPOSTO

A Figura 3 apresenta o oscilador de potência chaveado integrado ao circuito de estabilização LCC, tendo como carga uma lâmpada fluorescente tubular. Com o intuito de comprovar a metodologia de projeto do circuito LCC, foi desenvolvido um protótipo do reator proposto com os parâmetros ajustados de acordo com a Tabela 1. Para a realização dos ensaios utilizou-se uma lâmpada fluorescente tubular do fabricante *Sylvania*, modelo F40W/T10/5000K.

TABELA I

Reator Eletrônico Proposto – Parâmetros Ajustados		
Tensão de entrada	$V_{ac}$	127V
Potência de saída	$P_{out}$	40W
Frequência de oscilação	$f_o$	48kHz
Indutor do Boost	$L_b$	550uH
Indutor de Oscilação	$L_{os}$	1,1mH
Capacitor de oscilação	$C_{os}$	22nF
Capacitores de auxílio à comutação	$C_{R1}$ e $C_{R2}$	3,9nF
Mosfet	$M_1$	IRFP460
Mosfet	$M_2$	IRFBE30
Diodo	$D_1$	MUR160
Diodo	$D_2$	MUR460
Capacitor série	$C_S$	100nF
Indutor série	$L_S$	1,2mH
Capacitor paralelo	$C_p$	2,2nF

Com relação ao tempo de partida da lâmpada, de acordo com a ABNT [7], este deve ser menor do que 100ms para que não haja um desgaste excessivo dos eletrodos. A Figura 4 ilustra a tensão sobre o capacitor  $C_p$  antes e depois da partida da lâmpada. Observa-se que o tempo decorrido entre o instante inicial (acionamento de  $S_1$ ), e o instante em que se tem a completa ionização do gás contido no interior do tubo é menor que 20ms.

A Figura 5 apresenta a forma de onda da tensão sobre o capacitor  $C_p$  em regime permanente. A diferença entre o valor de pico da tensão no semiciclo positivo e negativo é compensada pela equivalência entre a energia contida em ambas as áreas, demonstrando a inexistência de qualquer componente contínua de tensão que alimenta a lâmpada, não comprometendo, dessa forma, a durabilidade do eletrodo. O capacitor  $C_p$  é um componente integrante do circuito de estabilização e é responsável por limitar o nível de tensão durante a partida da lâmpada. Como estudos posteriores, deseja-se implementar um circuito de estabilização que desacople o capacitor  $C_p$  após a ionização do gás, pois este componente fornece, desnecessariamente, um caminho para circulação de corrente nos eletrodos da lâmpada contribuindo para o desgaste dos mesmos.

As tensões e correntes nas chaves  $M_1$  e  $M_2$  são apresentadas nas Figuras 6 e 7, respectivamente, a fim de comprovar a comutação suave das mesmas.

Conforme evidenciado na seção II deste artigo, destaca-se que o conversor estudado também oferece como vantagem a utilização de um simples dispositivo para o acionamento das chaves semicondutoras. Este requer apenas bobinas acopladas ao indutor de oscilação e diodos zener, ligados em anti-série para grampear os níveis máximos de tensão aplicados aos terminais de gatilho das chaves. Este arranjo adiciona simplicidade ao reator eletrônico e promove uma sensível melhora no tempo de subida e descida do sinal de gatilho contribuindo para um aumento da eficiência do conversor proposto. A Figura 8 apresenta a forma de onda de tensão no gatilho das chaves  $M_1$  e  $M_2$ .

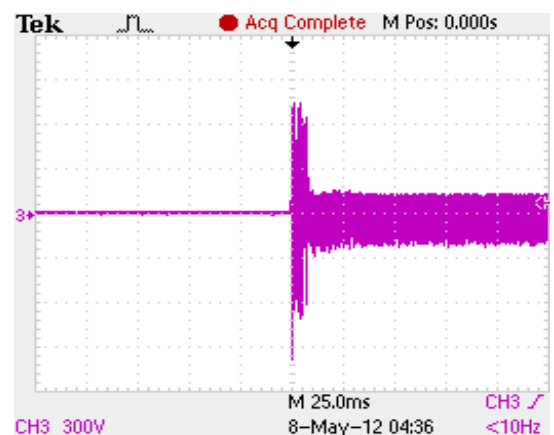


Fig. 4. Tensão no capacitor  $C_p$  destacando o tempo de partida da lâmpada.

## V. CONCLUSÃO

O conversor *Boost* EIE auto-oscilante, aplicado como estágio inversor de reatores eletrônicos para alimentação de lâmpadas fluorescentes comerciais, apresentou ótimas características de operação uma vez que o acionamento das chaves foi realizado sem a utilização de circuitos dedicados, conforme desejado. O protótipo desenvolvido mostrou que a comutação suave foi assegurada, promovendo maior eficiência, e o acionamento da lâmpada, em conformidade com as especificações da norma ABNT, também foi alcançado. Neste particular, destaca-se que os resultados experimentais se demonstram bastante satisfatórios, uma vez que o tempo de partida da lâmpada ficou abaixo de 20ms, assegurando maior durabilidade aos eletrodos.

Como trabalhos futuros os autores pretendem incluir técnicas de correção do fator de potência além de implementar um circuito de partida que remova a corrente dos eletrodos da lâmpada após a ionização do gás, prolongando ainda mais a durabilidade das lâmpadas.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio fundamental do professor orientador. Além do estímulo e bom acolhimento entre os membros do laboratório do NUPEP que propiciou a execução deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] L. C. G. Freitas, "Uma nova proposta de oscilador de potência chaveado com comutação suave", Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Julho de 2003.
- [2] L. C. G. Freitas, M. G. Simões, E. A. A. Coelho, J. B. Vieira Jr. L. C. de Freitas, "A Single Stage PFC Converter Applied as an Electronic Ballast for Fluorescent Lamps," in Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference 2004, pp. 164-169.
- [3] L. C. G. Freitas, M. G. Simões, E. A. A. Coelho, J. B. Vieira Jr. L. C. de Freitas, "A New Proposal of Switched Power Oscillator with Soft-commutation Applied as a HPF Electronic Ballast," in Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference 2004, pp. 143-148.
- [4] L. C. G. Freitas, M. G. Simões, E. A. A. Coelho, J. B. Vieira Jr. L. C. de Freitas, "A New Proposal of Switched Power Oscillator Applied as an Auxiliary Medium Open Loop Power Supply," in Proc. of IEEE Power Electronics Specialist Conference 2003, pp. 600-605.
- [5] A. V. Jr. Joao, E. A. A. Coelho, V. J. Farias, L. C. de Freitas, J. C. Oliveira, A. S. Morais, J. B. Vieira Jr., "High power factor electronic ballast employing a Boost half bridge topology", in Proc. of XIX Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Societ, 2003, pp. 520-524.
- [6] A. V. Jr. Joao, A. R. Vaz, V. J. Farias, L.C. de Freitas, E. A. A. Coelho, J. B. Vieira Jr., "An electronic ballast with high power factor and low voltage stress", in IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, nº 4, pp. 917-926, 2005.
- [7] ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas., "NBR 14417 e 14418 – Reatores Eletrônicos Alimentados em corrente Alternada para Lâmpadas Fluorescentes Tubulares / Prescrições de Desempenho", Dezembro 1999.

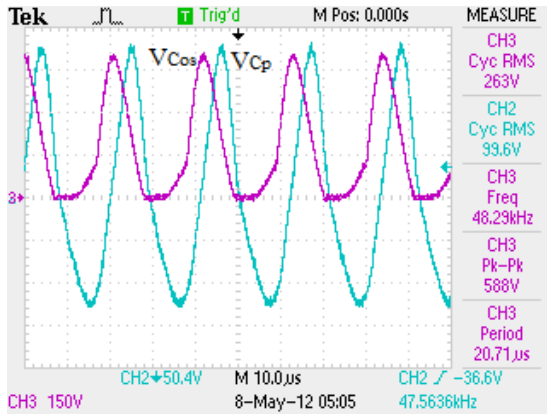


Fig. 5. Tensão no capacitor  $C_p$  e  $C_{os}$  em regime permanente.

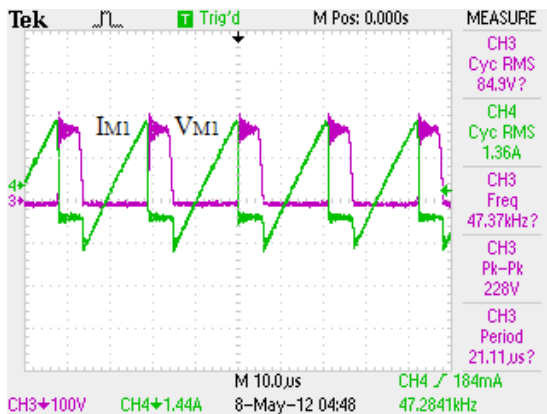


Fig. 6. Formas de onda de tensão e corrente na chave  $M_1$ .

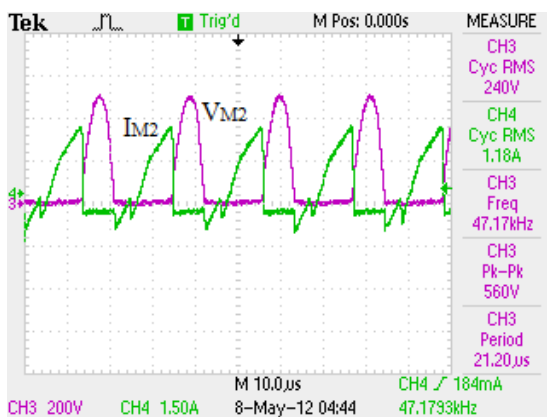


Fig. 7. Formas de onda de tensão e corrente na chave  $M_2$ .

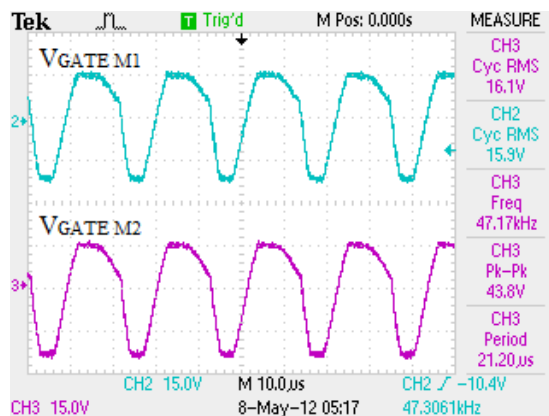


Fig. 8. Tensão no gatilho das chaves  $M_1$  e  $M_2$ .