

REATOR ELETRÔNICO DIMERIZÁVEL PARA LÂMPADA FLUORESCENTE UTILIZANDO CONVERSOR BOOST INTEGRADO COM INVERSOR MEIA PONTE

Morais, J. S., Moraes, A. S., Vincenzi, F. R. S., Custódio, A. G., Vieira Junior, J. B.

Universidade Federal de Uberlândia - UFU
Faculdade de Engenharia Elétrica - FEELT
e-mail: morais.aniel@gmail.com

Resumo- Este artigo apresenta um reator eletrônico de alto fator de potência utilizado para acionar e controlar a luminosidade de lâmpadas fluorescentes. O conversor utilizado apresenta um único estágio de processamento da energia onde o estágio de correção de fator de potência e o estágio de acionamento da lâmpada foram integrados. A integração visa simplificar a estrutura de potência do conversor e conseqüentemente torná-lo economicamente mais atrativo. O controle da luminosidade é proporcionado pela variação da frequência de acionamento dos interruptores do conversor. Resultados de simulação computacional são apresentados ao final deste artigo.

Palavras-chave: Reator Eletrônico, Boost, PFC, Lâmpada Fluorescente, Dimerização.

Área do Conhecimento:

Introdução

O consumo de energia elétrica vem aumentando sistematicamente de forma direta e indireta. O aumento geométrico do consumo de energia elétrica é extremamente preocupante e deve ser acompanhado de uma política de racionalização do uso desta energia.

O aumento direto do consumo de energia elétrica por parte dos consumidores residenciais está relacionado à crescente quantidade de equipamentos elétricos dentro das casas. O crescimento indireto do consumo de energia se deve à maior industrialização, pois cada vez mais se consomem produtos que utilizaram energia no seu processo de produção.

Nesse contexto, as lâmpadas se apresentam como uma das cargas mais expressivas para consumidores residenciais. Um aumento da eficiência dessas cargas representa grande economia de energia para o sistema.

A ampla utilização de lâmpadas fluorescentes alimentadas por reatores eletrônicos em ambientes residências, comerciais e industriais torna o estudo dos reatores eletrônicos de grande interesse em relação às características de consumo de energia e a distorções harmônicas presentes na corrente solicitada da rede elétrica.

Em se tratando de sistemas de iluminação, verifica-se que houve um grande avanço tecnológico nos equipamentos do setor. O desenvolvimento tecnológico de lâmpadas fluorescentes mais eficientes e compactas e o surgimento de novas gerações de reatores utilizados nessas lâmpadas foram alguns dos progressos verificados nos últimos anos.

No campo de projetos de reatores eletrônicos, existem grandes desafios, entre eles pode-se citar o desenvolvimento de estruturas de elevada eficiência que conciliem baixo custo com o atendimento às especificações das normas de regulamentação do setor de iluminação.

Diante desse cenário, esse trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um reator eletrônico para o acionamento de lâmpadas fluorescentes com controle da intensidade luminosa, que apresente para a rede elétrica um elevado fator de potência e uma baixa distorção harmônica na corrente segundo (KAISER, 1988) e (KAISER; MARQUES, 2006).

Reatores Eletrônicos para Lâmpadas Fluorescentes

Embora a solução utilizando reatores eletrônicos seja mais complexa, menos robusta e tenha um custo inicial maior, esta se torna atrativa pelo fato do sistema apresentar maior eficiência, proporcionando assim, uma economia de energia elétrica a médio e a longo prazo em relação aos sistemas com reatores eletromagnéticos.

Os reatores eletrônicos podem ser classificados de acordo com: o método de ignição da lâmpada, a potência capaz de fornecer às lâmpadas, pela presença de estágio de correção de fator de potência e pela capacidade de controlar a intensidade luminosa da lâmpada. A norma vigente no Brasil para os reatores eletrônicos é a NBR14418 – Prescrições de desempenho. A Figura 1 ilustra o diagrama de blocos de um típico reator eletrônico com alto fator de potência.

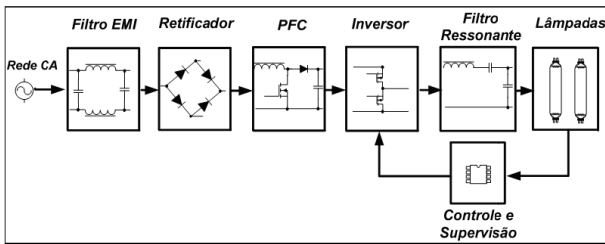


Figura 1 - Diagrama de blocos de um reator eletrônico com alto fator de potência.

Como se pode observar na Figura 1, um conversor padrão possui dois estágios ativos, um denominado PFC (correção de fator de potência) e outro inversor (responsável por tornar uma tensão contínua em alternada). Na Figura 2 propõem-se uma estrutura integrada no qual estes dois estágios ativos serão substituídos por apenas um.

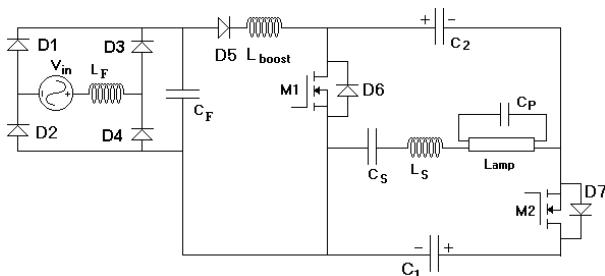


Figura 2 - Reator eletrônico proposto.

As duas propostas possuem filtros de entrada e saída, retificador, e a estrutura PFC+Inversor integrada, o número de interruptores diminui de 3 para 2 segundo (MORAIS, 2004).

Modelagem da Lâmpada Fluorescente

Quando os reatores eletrônicos operam em um ponto fixo de operação, ou seja, tensão e corrente constantes e conseqüentemente potência constante, a lâmpada pode ser modelada como uma simples resistência elétrica de valor constante o que torna a análise do sistema simples.

Por outro lado quando o mesmo deve atuar sobre a lâmpada variando a sua luminosidade o ponto de operação da lâmpada não será mais constante, as características V-I (tensão - corrente) são alteradas durante uma operação dimerizada (variação da intensidade luminosa), cujo método que o modelo deve admitir é uma resistência variável, em função do valor eficaz da potência do processo.

Através dos dados experimentais e utilizando um software específico, (WAKABAYASHI; CANESIN, 2005) determinou uma equação geral de quarto grau para a tensão sobre a lâmpada, onde é apresentada na equação (1).

$$V(T, P) = v_0(T) + v_1(T) \cdot P + v_2(T) \cdot P^2 + v_3(T) \cdot P^3 + v_4(T) \cdot P^4 \quad (1)$$

Para projetos de reatores eletrônicos, é importante obter a resistência equivalente da lâmpada, a qual será usada em simulações para analisar a potência processada pelo reator, durante a operação dimerizada. Esta resistência equivalente ($R_{eq}(T, P)$) pode ser facilmente obtida através da equação (2).

$$R_{eq}(T, P) = \frac{V^2(T, P)}{P} \quad (2)$$

Este modelo “complexo” de lâmpada é analisado através dos efeitos da temperatura ambiente e da freqüência de chaveamento nominal de operação nas características estáticas da lâmpada fluorescente tubular. A metodologia para obter o modelo é baseada em algumas regressões matemáticas bidimensionais usadas para determinar o comportamento da lâmpada fluorescente de acordo com as diferentes variáveis independentes, nomeadas: Potência processada entre a lâmpada e a temperatura ambiente. Além do que, este modelo pode ser facilmente convertido para um modelo de resistência equivalente da lâmpada, onde pode ser utilizado para desenvolvimento de reatores.

O modelo proposto por (WAKABAYASHI; CANESIN, 2005), é baseado em diferentes dados experimentais, obtidos pela implementação de reatores eletrônicos operando em diferentes freqüências de chaveamento (f_{nom}) e diferentes temperaturas ambientes (T).

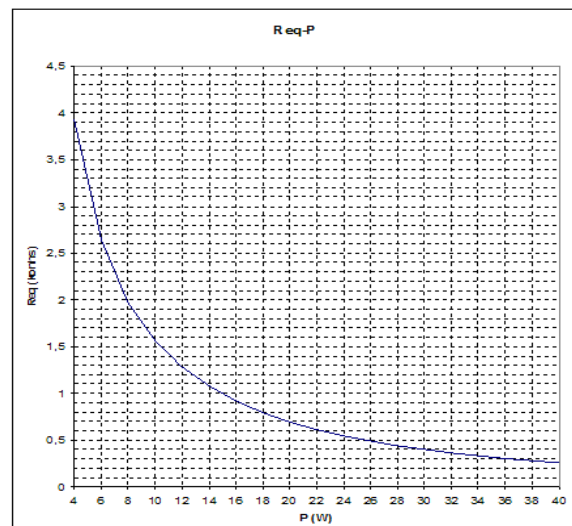


Figura 3 - R_{eq} versus P, para temperatura constante.

É importante concluir do exposto acima que a lâmpada possui um comportamento não-linear onde a potência processada pela lâmpada e

conseqüentemente sua luminosidade são inversamente proporcionais à tensão aplicada sobre a mesma. A Figura 3 apresenta a curva com o comportamento da resistência equivalente da lâmpada fluorescente em função da potência de acordo com a equação (2), já a Figura 4 apresenta o modelo utilizado em simulação para representar o comportamento da lâmpada fluorescente.

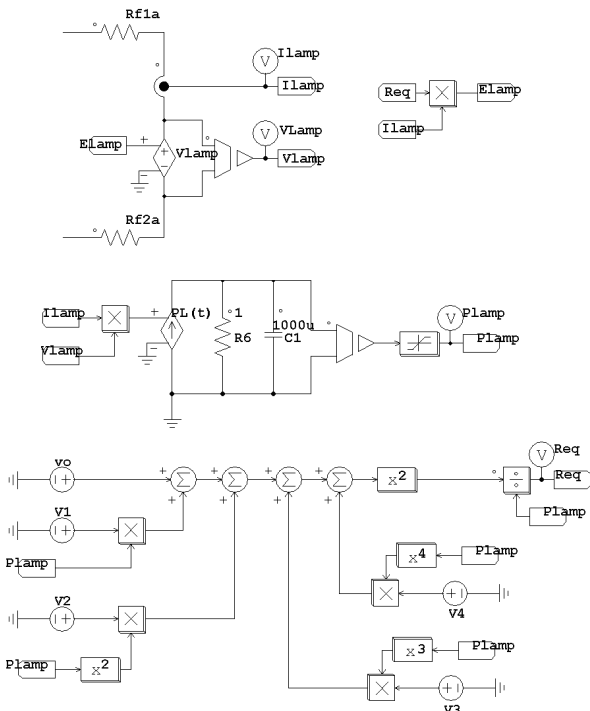


Figura 4 - Modelo da lâmpada fluorescente utilizado em simulação.

Sem este modelo não seria possível realizar a simulação computacional que permite emular o comportamento do sistema proposto quando variando a sua luminosidade.

Descrição do Reator Eletrônico Proposto

O circuito de potência do conversor proposto é mostrado na Figura 2, ele é composto por uma fonte de tensão monofásica, pelo filtro de entrada, pela ponte retificadora, pelo conversor Boost, pelo circuito de estabilização série paralelo ressonante (L_{CC}) e pelo circuito inversor (MORAIS, 2004).

O conversor Boost é responsável pela correção do fator de potência, sendo formado pelo diodo D_5 , pelos capacitores C_1 e C_2 , pelo indutor L_{Boost} e pela chave M_1 .

O circuito inversor é formado pelas chaves M_1 e M_2 e pelos capacitores C_1 e C_2 . A utilização da chave M_1 simultaneamente pelo conversor Boost e pelo circuito inversor caracteriza a integração dessas duas etapas de processamento de potência.

O filtro de entrada, responsável pela atenuação das harmônicas de alta frequência provenientes do chaveamento, é formado pelo indutor L_F e o capacitor C_F .

O circuito de estabilização L_{CC} é formado pelo indutor L_S e pelos capacitores C_S e C_P .

Modos de Operação

Este conversor boost opera no modo de condução descontinua (DCM) da corrente, ou seja, a corrente no indutor de boost durante um período de chaveamento cresce linearmente enquanto o interruptor M_1 estiver fechado, assim que este é comandado a abrir a corrente decresce linearmente até se tornar nula, durante um pequeno intervalo de tempo a corrente no indutor de boost será nula.

Outro modo de operação em que este conversor poderá trabalhar é o modo de operação crítico (CCM), neste modo de operação não existe o intervalo de tempo em que a corrente será nula, assim que a corrente atingir o valor zero o interruptor será comandado a conduzir e a corrente cresce linearmente novamente. Este modo de operação tem como vantagens frente ao anterior, melhor fator de potência, melhor rendimento e como desvantagem a complexidade da estratégia de controle conforme (MORAIS, 2004).

Etapas de Operação

As etapas de operação a seguir apresentam o funcionamento do conversor operando no modo de condução descontinuo. Entretanto a operação do mesmo no modo de condução crítica é idêntica excluindo-se a 5ª etapa, passando diretamente da 4ª para a 1ª.

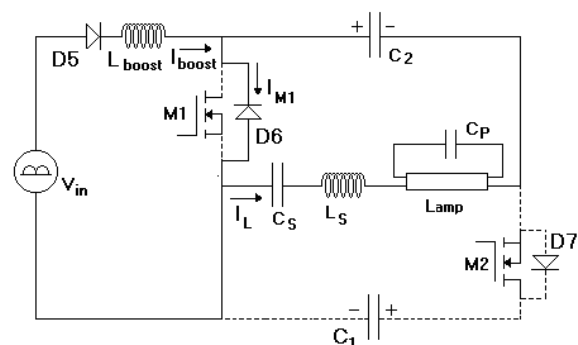


Figura 5 – Primeira Etapa de Operação.

1ª Etapa $[t_0, t_1]$ – Esta etapa começa quando a chave M_2 é desligada e a chave M_1 é ligada em modo ZVS (*Zero Voltage Switch*). A tensão de entrada é aplicada ao indutor L_{Boost} . Conseqüentemente a corrente I_{Boost} aumenta

linearmente, considerando que a tensão permanece aproximadamente constante durante um período de chaveamento. A corrente I_{M1} é igual a soma das correntes I_{Boost} e I_L , e circula através do diodo D_6 , ver Figura 5.

2ª Etapa [t_1, t_2] – Esta etapa começa quando a corrente no diodo D_6 é anulada e passa a circular pela chave M_1 . A corrente I_{Boost} continua a aumentar linearmente. A corrente na chave M_1 é igual à soma das correntes I_{Boost} e I_L , ver Figura 6.

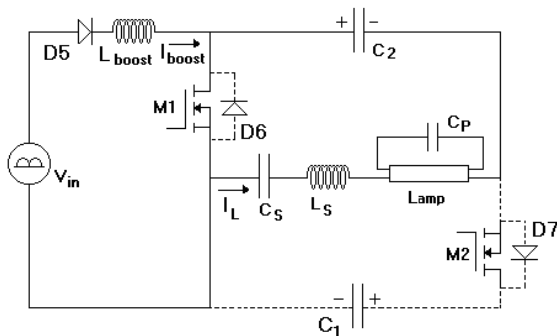


Figura 6 – Segunda Etapa de Operação.

3ª Etapa [t_2, t_3] – Esta etapa começa quando a chave M_1 é desligada, e conseqüentemente a corrente I_{M1} passa a circular pelo diodo D_7 , e a chave M_2 é ligada em modo ZVS. A corrente I_{Boost} decresce linearmente enquanto carrega os capacitores C_1 e C_2 . No instante t_3 , a corrente I_{M2} circulando pelo diodo D_7 se torna nula, ver Figura 7.

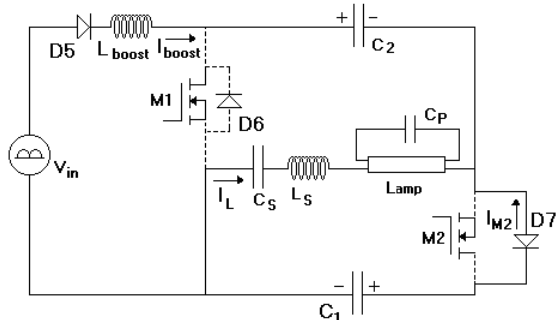


Figura 7 – Terceira Etapa de Operação.

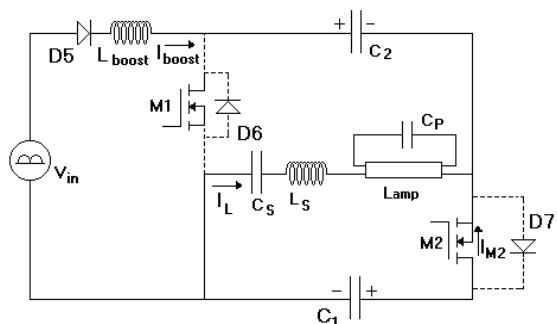


Figura 8 – Quarta Etapa de Operação.

4ª Etapa [t_3, t_4] – Esta etapa começa quando a corrente I_{M2} que circulava pelo diodo D_7 atinge zero e passa a circular através da chave M_2 . A corrente I_{Boost} continua decrescendo linearmente até atingir zero, ver Figura 8.

5ª Etapa [t_4, t_5] – Esta etapa tem início quando a corrente I_{Boost} se torna nula. A corrente I_L circula através da chave M_2 , ver Figura 9. Esta etapa de operação não existirá no modo de condução crítico.

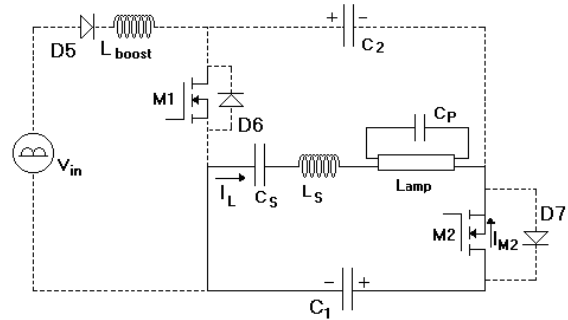


Figura 9 – Quinta Etapa de Operação.

A Figura 10 apresenta as formas de onda esperadas para o conversor proposto.

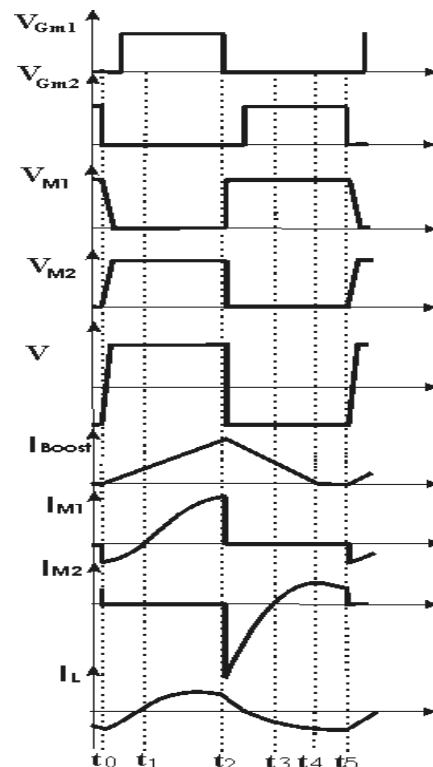


Figura 10 – Formas de onda de tensões e correntes do conversor proposto.

Método de dimerização

Para promover o controle da luminosidade de uma lâmpada fluorescente precisa-se controlar a potência processada por esta lâmpada, devido às características dos reatores boost operando em modo de condução descontínua (DCM) ou crítica (CCM), pode-se controlar a potência fornecida pelo conversor à carga (lâmpada + filtro L_{CC}) através da variação da frequência de chaveamento ou da variação da razão cíclica, uma terceira alternativa é a combinação das duas ações variar a frequência e a razão cíclica simultaneamente conforme (HUI et al., 2001), (CHEN et al., 2005) e (TSENG et al., 2007).

Aumentando-se a frequência de chaveamento do conversor a potência fornecida à lâmpada diminui, entretanto diferentemente de uma carga linear a tensão sobre a lâmpada aumenta quando a potência diminui.

Resultados de Simulação

Os resultados de simulação para uma lâmpada de 36 W foram obtidos de acordo com os parâmetros apresentados na Tabela I.

Tabela 1 - Componentes Utilizados na Simulação

Componentes	Especificação
L_{boost}	1,3 mH
C_1 e C_2	47 μ F
L_S	1,3 mH
C_S	100nF
L_{in}	1,5mH
C_{in}	680nF
S_1	IRF840
S_2	IRF840
D_5	UF4007
D_1, D_2, D_3 e D_4	1N4007

A Figura 11 apresenta o circuito eletrônico simulado no programa PSIM®, Convém salientar que para representar a lâmpada foi utilizado o modelo descrito na Figura 4.

Em simulação observou-se que para controlar a potência sobre a lâmpada de 36W (potência nominal) até a aproximadamente 13,5W (37,5% da potência nominal) foi necessária uma elevação da frequência de 55kHz até 150kHz respectivamente mantendo a razão cíclica constante e igual a 0,43.

As Figura 12 e Figura 13 apresentam as formas de onda obtidas da simulação do conversor da

Figura 11 com frequência de chaveamento 55kHz e razão cíclica de 0,43 (43%).

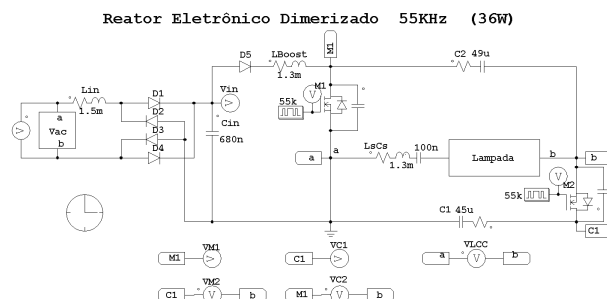


Figura 11 – Reator eletrônico dimerizado.

A Figura 12 (a) apresenta a tensão e a corrente de entrada do conversor cujos valores eficazes são 127V e 328mA respectivamente. Figura 12 (b) apresenta as tensões nos capacitores C_1 e C_2 e a resistência equivalente da lâmpada.

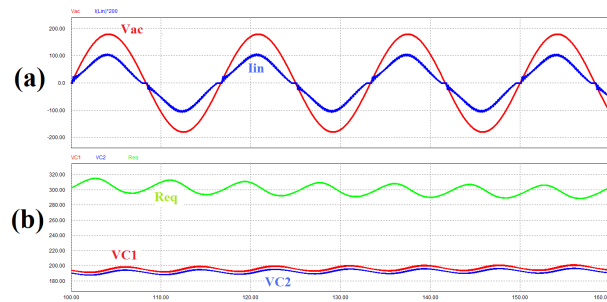


Figura 12 – (a) Tensão e corrente na entrada do conversor, (b) Tensões nos capacitores C_1 e C_2 e resistência equivalente da lâmpada.

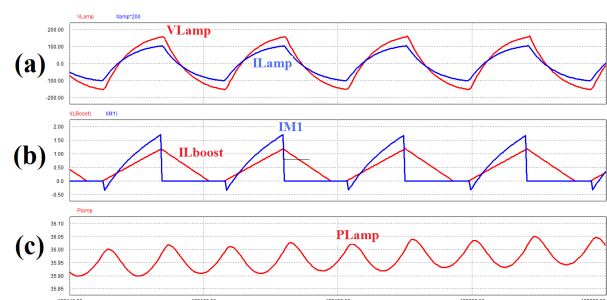


Figura 13 – (a) Tensão e corrente na lâmpada, (b) Correntes no indutor de Boost e no interruptor M_1 e (c) Potência instantânea processada pela lâmpada.

A Figura 13 (a) apresenta a tensão e a corrente na lâmpada fluorescente cujos valores eficazes são 105V e 350mA respectivamente. A Figura 13 (b) apresenta as correntes no indutor de Boost e no interruptor M_1 . A Figura 13 (c) apresenta a potência instantânea processada pela lâmpada.

As Figura 14 e Figura 15 apresentam as formas de onda obtidas da simulação do conversor da

Figura 11 com frequência de chaveamento 150kHz e razão cíclica de 0,43 (43%).

A Figura 14 (a) apresenta a tensão e a corrente de entrada do conversor cujos valores eficazes são 127V e 137mA respectivamente. A Figura 14 (b) apresenta a resistência equivalente da lâmpada. A Figura 14 (c) apresenta as tensões nos capacitores C_1 e C_2 .

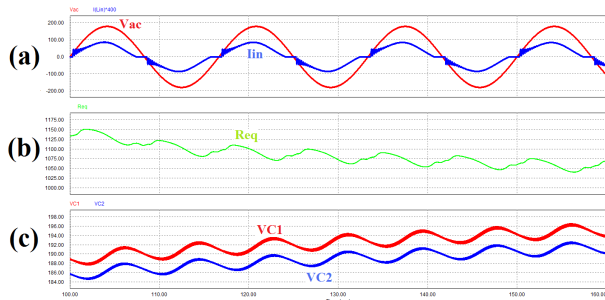


Figura 14 – (a) Tensão e corrente na entrada do conversor, (b) Resistência equivalente da lâmpada, (c) Tensões nos capacitores C_1 e C_2 .

A Figura 15 (a) apresenta a tensão e a corrente na lâmpada fluorescente cujos valores eficazes são 126V e 118mA respectivamente. A Figura 15 (b) apresenta as correntes no indutor de Boost e no interruptor M_1 . A Figura 15 (c) apresenta a potência instantânea processada pela lâmpada.

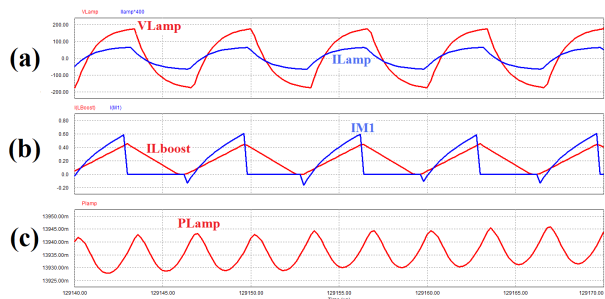


Figura 15 – (a) Tensão e corrente na lâmpada, (b) Correntes no indutor de Boost e no interruptor M_1 e (c) Potência instantânea processada pela lâmpada.

Discussão

Conforme pudemos observar analisando as formas de onda simuladas apresentadas nas Figuras 12 a 15, a potência na lâmpada diminuiu à medida em que a frequência de chaveamento aumentou de 55kHz para 150kHz. A tensão de entrada do conversor é sempre constante, entretanto, a corrente varia com a frequência de chaveamento e conseqüentemente a potência processada também.

Outros valores simulados poderiam ter sido apresentados, entretanto, estes foram considerados os mais importantes.

Conclusão

Este artigo apresentou um reator eletrônico de alto fator de potência utilizado para acionar e controlar a luminosidade de uma lâmpada fluorescente. O conversor utilizado apresenta um estágio de correção de fator de potência integrado ao estágio de acionamento da lâmpada. A variação da frequência de acionamento dos interruptores do conversor proporcionou a variação da potência processada pela Lâmpada e conseqüentemente de sua luminosidade.

O próximo passo será a implementação em laboratório deste conversor.

Referências

- CHEN, Y.-T.; LIN, W.-M.; LIU, Y.-H. Analysis and Design of a Dimmable Electronic Ballast Controlled by a Switch-Controlled Capacitor. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 52, No 06, p.1564-1572, 2005.
- HUI, S. Y. R.; LEE M. L.; CHUNG H. S.-H; HO, Y. K., "An Electronic Ballast with Wide Dimming Range, High PF, and Low EMI", **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 16, No 04, p.465-472, 2001.
- KAISER, W. Conversor Eletrônico de Elevada Eficiência para a Alimentação de Lâmpadas Fluorescentes Tubulares. Tese de Doutorado, USP - 1988.
- KAISER, W.; MARQUES, R. P.; CORREA, A. F. Impact of Current Crest Factor at High and Low Frequency Operation on Fluorescent Lamp Electrodes. **IEEE Industry Applications Conference (IAS'2006)**, v. 1, p.236-241, 2006.
- MORAIS, A.S. Novas Topologias, Análises, Projeto e Experimentação de Fontes de Alta Frequência para Lâmpadas Fluorescentes Tubulares. Dissertação, UFU - 2004.
- TSENG, M. H.; YANG, H. T.; CHIU, H. J.; MOU, S. C. Single-Stage Voltage Source Charge Pump Electronic Ballast with Switched-Capacitor Dimmer for Multiple Fluorescent Lamps. **Power Conversion Conference (PCC '07)**, p.727-730, 2007.
- WAKABAYASHI, F. T.; CANESIN, C. A. An Improved Procedure for LCC Resonant Filter of Dimmable Electronic Ballasts for Fluorescent Lamps, Based on Lamp Model", **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 20, No 05, p.1186-1196, 2005.