

A INFLUÊNCIA DO REATOR ELETRÔNICO COM PARTIDA PROGRAMADA NA VIDA ÚTIL DA LÂMPADA FLUORESCENTE T5

Anderson S. Santos¹, Marcelo Toss¹, Raphael R. N. Souza², Reinaldo Tonkoski² e Fernando S. dos Reis²

¹Intral S.A. – Indústria de Materiais Elétricos - Laboratório de Reatores Eletrônicos
Travessa Rio Grande, 130, Caixa Postal 219, CEP 95098–750, Caxias do Sul – RS, Brasil
e-mail: anderson@intral.com.br, marcelot@intral.com.br

²Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUCRS
Av. Ipiranga, 6681, Caixa postal 1429, CEP 90619–900, Porto Alegre – RS. Brasil
e-mail: raphael.ronald@gmail.com, tonkoski@gmail.com, fdosreis@puccrs.br

Resumo - Este artigo relata os resultados de uma parceria de sucesso entre Universidade e Empresa. A motivação inicial desta parceria foi o desejo de disponibilizar aos engenheiros da empresa uma formação em nível de mestrado. Este processo conduziu ao desenvolvimento de um estudo acerca da influência dos reatores eletrônicos de partida programada na vida útil das lâmpadas fluorescentes T5, a partir do qual se fundamentou a concepção de um novo reator eletrônico comercial que garante a vida útil da lâmpada (20.000 h) conforme as especificações do fabricante. Este estudo compreende a discussão de dois tipos de testes rápidos de vida útil descritos na bibliografia e utilizados pelos fabricantes nacionais de reatores eletrônicos, buscando verificar o comportamento das lâmpadas fluorescentes T5 sob diferentes métodos de acionamento. Um novo produto industrial, constituído por um reator eletrônico de partida rápida programada com pré-aquecimento de tensão, é desenvolvido para uma lâmpada fluorescente T5 de 28 W. Os resultados demonstram que a topologia proposta para o reator fornece as condições necessárias para que a lâmpada atinja a sua expectativa de vida bem como para permitir o aumento da eficiência energética.

Palavras-Chave – Lâmpada Fluorescente T5, Reatores de Partida Programada e Reator Eletrônico.

THE INFLUENCE OF PROGRAMMED START BALLASTS IN THE LIFETIME OF T5 FLUORESCENT LAMPS

Abstract – This paper analyzes the influence of programmed start ballasts in the lifetime of a T5 fluorescent lamp. Different rapid cycle tests are discussed, including the test used by Brazilian manufacturers, to verify the T5 fluorescent lamp lifetime behavior under different starting methods. A new product, an electronic ballast with programmed rapid-start is proposed for a 28w/T5 fluorescent lamp using voltage-preheating. The results showed that it is possible to achieve the T5 fluorescent lamp rated lifetime using programmed start ballast and to increase power efficiency.

Artigo submetido em 17/10/2008. Revisão em 26/04/2009. Aceito por recomendação do editor Fernando L. M. Antunes.

Keywords - T5 Fluorescent Lamp, Electronic Ballast and Programmed Start Ballasts.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o interesse por equipamentos e sistemas mais eficientes cresceu significativamente. Este fenômeno está vinculado a diversos fatores, tais como:

- Uma maior conscientização, por parte das sociedades modernas, da importância da preservação do meio ambiente;
- O constante crescimento das tarifas de energia elétrica;
- O elevadíssimo custo monetário e ambiental associado à implementação de novos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

No ano de 2001, o Brasil passava por uma séria crise energética. Muitas concessionárias de energia elétrica, com o objetivo de reduzir a demanda, distribuíram gratuitamente lâmpadas fluorescentes compactas para os seus consumidores residenciais de baixa renda sinalizando, desta forma, a importância do segmento de iluminação no cenário energético nacional. Estima-se que a demanda deste segmento corresponda a cerca de 30% de toda a energia consumida no País. Assim, o mercado nacional foi invadido por um grande número de reatores eletrônicos provenientes da Ásia. A maior parte dos fabricantes de reatores eletromagnéticos para lâmpadas fluorescentes passou a desenvolver reatores eletrônicos, os quais vieram a se tornar uma exigência do mercado em função de sua maior eficiência.

Dentro deste contexto, o governo federal tem fomentado programas para promover o uso de equipamentos mais eficientes. Um exemplo deste esforço é o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL). A conservação de energia elétrica compreende como objetivo primordial o aumento de eficiência em sua utilização sem prescindir do conforto e das vantagens por ela proporcionados. Significa portanto reduzir o consumo, o que implicará na redução de custos sem comprometer, em momento algum, a eficiência e a qualidade dos serviços. Para o aumento da eficiência em sistemas de iluminação, algumas alterações são realizadas atualmente, como por exemplo: a utilização de lâmpadas fluorescentes em substituição às lâmpadas incandescentes, o emprego de reatores eletrônicos em substituição aos eletromagnéticos, bem como o uso de luminárias com maior rendimento em conjunto com lâmpadas fluorescentes mais eficientes. Lâmpadas fluorescentes mais eficientes estão surgindo com o avanço da tecnologia de fabricação e a utilização de novas matérias-

primas. Na Feira de *Hannover* de 1995, grandes fabricantes europeus apresentaram a lâmpada T5. Trata-se de um novo modelo de lâmpada fluorescente que apresenta uma significativa redução de tamanho em relação à lâmpada T8, possibilitando maior liberdade aos projetistas para o desenvolvimento de luminárias de maior elegância e eficiência. Concebida para ser a sucessora da lâmpada fluorescente T8 [1], a lâmpada fluorescente T5 apresenta reduzida quantidade de mercúrio, buscando contribuir para a preservação do meio ambiente. O fluxo luminoso nestas lâmpadas é praticamente constante durante toda a sua vida útil. Comparativamente às lâmpadas T8, apresentam ainda uma eficiência luminosa superior em 15% (os dados numéricos indicam uma eficiência luminosa de 104 lm/W para uma lâmpada T5 de 28W e de 90 lm/W para uma lâmpada T8 de 32W). A máxima eficiência luminosa para lâmpadas T5 ocorre na temperatura ambiente de 35°C (temperatura mais comum dentro das luminárias), enquanto as lâmpadas T8 atingem o ponto ótimo de operação a 25°C.

Existe um grande debate envolvendo as lâmpadas de alta potência T5HO (*T5 High Output*) e as lâmpadas de vapor metálico de alta pressão (*HQI- Hydrargyrum quartz iodide*). Este debate está relacionado ao ambiente industrial onde a lâmpada encontra-se distante do objeto a ser iluminado. Neste tipo de aplicação, é comum a utilização de lâmpadas de vapor metálico de 400W e, no entanto, estudos têm mostrado que é possível empregar 4 lâmpadas T5HO de 54W com o mesmo desempenho das lâmpadas HQI. Atualmente, as lâmpadas fluorescentes T5 ainda são pouco utilizadas nas instalações brasileiras em função de seu elevado custo em relação às lâmpadas T8, T10 e T12. Contudo, assim como as lâmpadas fluorescentes de 32W/T8 estão substituindo as lâmpadas de 40W/T12, as lâmpadas de 28W/T5 deverão substituir futuramente as lâmpadas de 32W/T8. Através das fotos das diferentes lâmpadas, conforme ilustra a Figura 1, é possível observar a forma pela qual o diâmetro das lâmpadas fluorescentes vem sendo reduzido.

As lâmpadas T5 foram desenvolvidas especialmente para operar com reatores eletrônicos e somente atingem a eficiência nominal quando alimentadas em alta frequência. Garantir que a vida útil nominal das lâmpadas seja atingida é um requisito de extrema importância no desenvolvimento de qualquer reator eletrônico. Este requisito se torna ainda mais significativo no caso das lâmpadas fluorescentes T5 devido ao seu elevado custo.

A partida programada pode ser encarada como uma variante da partida rápida, que se caracteriza pela aplicação de uma reduzida tensão na lâmpada durante o período de pré-aquecimento dos filamentos, conforme evidencia a Figura 2. Este método visa garantir que a lâmpada atinja a expectativa de vida útil prevista pelo fabricante.

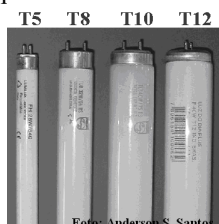


Fig. 1. Lâmpadas fluorescentes comerciais.

As considerações a seguir descrevem a análise e o desenvolvimento de um reator eletrônico com partida

programada para uma lâmpada fluorescente T5 de 28W. Para avaliar a eficiência deste reator (partida programada) em relação ao modelo convencional (partida rápida), um estudo comparativo foi conduzido de maneira a verificar qual dos reatores propicia uma maior vida útil para este modelo de lâmpada fluorescente. Para tanto, ambos os reatores foram submetidos a dois diferentes testes rápidos: um método utilizado por um fabricante nacional de reatores e o método proposto por [2].

II. REATOR ELETRÔNICO PROPOSTO

Historicamente, verifica-se que lâmpadas fluorescentes submetidas a ciclos de trabalho de elevada frequência (quando utilizadas em locais de circulação intensa, como corredores de edifícios com miniteiras e/ou sensores de presença) apresentam uma significativa redução em sua vida útil, se comparadas a lâmpadas submetidas a ciclos de trabalho de baixa frequência (lâmpadas acionadas uma vez ao dia em fábricas e escritórios) [3]. Desta forma, para aplicações usuais com frequentes ciclos de liga/desliga, recomenda-se o uso de dispositivos especialmente concebidos para minimizar este efeito, tais como os reatores do tipo partida programada, que buscam preservar a vida útil da lâmpada fluorescente. No entanto, o reator eletrônico de partida rápida é o dispositivo mais usualmente empregado no processo de acionamento. Este acionamento consiste na aplicação simultânea de uma elevada tensão à lâmpada e de uma reduzida tensão aos seus filamentos, conforme ilustra a Figura 2.

Como resultado, este processo gera uma corrente de descarga luminescente (do inglês *glow current*) que conduz a um gradual desprendimento de material emissivo dos filamentos e a um enegrecimento desta região, o que contribui para a redução da vida útil da lâmpada.

O reator eletrônico com partida programada aumenta a vida útil da lâmpada através da redução do efeito da corrente de descarga luminescente [3]. Desta forma, a operação deste reator consiste no pré-aquecimento dos filamentos enquanto a tensão aplicada à lâmpada é mantida baixa para minimizar o efeito da corrente de descarga luminescente. Durante este período de pré-aquecimento, aplica-se aos filamentos uma tensão apenas suficiente para que seja atingida a temperatura de emissão ideal que é de aproximadamente 700°C. Após o intervalo de tempo programado para finalizar a etapa de pré-aquecimento ($t_1 < t < t_2$), a tensão aplicada à lâmpada é elevada até atingir o valor mínimo necessário para a ignição da mesma, reduzindo a perda de material emissivo dos filamentos. É necessário que haja um pequeno intervalo de

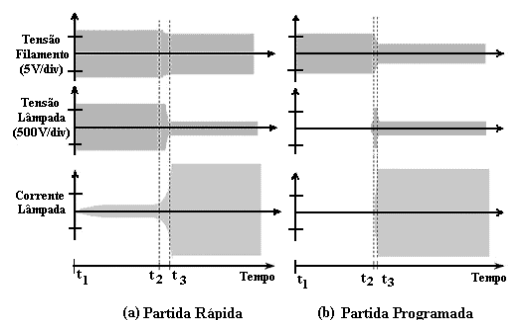


Fig. 2. Métodos de partida: partida rápida e partida programada.

tempo de transição entre os estágios de pré-aquecimento e de operação normal ($t_2 < t < t_3$) para reduzir a perda de material emissivo dos filamentos.

Para maximizar a vida útil da lâmpada e manter a constância de sua eficiência luminosa ao longo deste período, o reator eletrônico deverá cumprir com os seguintes requisitos [4]:

- Os filamentos deverão ser pré-aquecidos até uma temperatura ótima de emissão e, dependendo do tempo disponível para o pré-aquecimento, o reator deverá aplicar a estes filamentos níveis de tensão dentro de limites pré-estabelecidos, de acordo com a Tabela I (os fabricantes das lâmpadas definem R_{SUB} como resistor substituto que representa a resistência dos filamentos nos ensaios em regime permanente).
- Durante o pré-aquecimento, a tensão aplicada à lâmpada deverá ser a mínima possível e somente após os filamentos atingirem a temperatura ótima, a tensão na lâmpada deverá ser elevada até a tensão de ignição. Os limites de tensão de ignição são mostrados na Tabela II.
- Após o acionamento da lâmpada, o reator deverá se comportar como uma fonte de corrente, limitando o fator de crista desta corrente a 1,7.

A seleção do método de pré-aquecimento depende do tipo de filamento e do tempo disponível para a ignição da lâmpada [5]. Duas alternativas podem ser aplicadas para pré-aquecer os filamentos [3]: alimentação por fonte de corrente ou por fonte de tensão.

A. Pré-aquecimento dos filamentos por fonte de corrente

A Figura 3 mostra o diagrama elétrico de um reator eletrônico básico utilizado em muitos circuitos comerciais, e que emprega um inversor do tipo meia-ponte associado a um circuito ressonante do tipo LC série, C paralelo (LCC).

Este modelo de reator apresenta como principais vantagens a simplicidade e a elevada eficiência. Contudo apresenta as seguintes desvantagens:

- Tempo de pré-aquecimento constante, independente da temperatura dos filamentos, o que resulta em um maior desprendimento do material emissivo [5].
- Os filamentos estão dentro do circuito do filtro ressonante LCC constituído por L , C_s , e C_p , resultando

em uma excessiva tensão aplicada à lâmpada durante o pré-aquecimento e uma excessiva corrente no filamento durante a ignição [4].

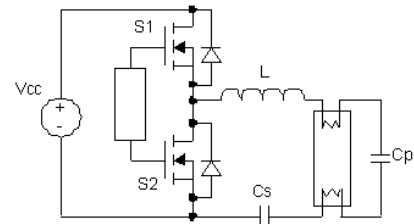


Fig. 3. Diagrama do circuito elétrico de um reator eletrônico convencional LCC série-paralelo.

B. Pré-aquecimento dos filamentos por fonte de tensão

Para reduzir as desvantagens intrínsecas à topologia da Figura 3, o circuito pode ser modificado de forma a garantir a redução da corrente nos filamentos e da tensão aplicada à lâmpada.

Uma proposta com esta característica de operação consiste no pré-aquecimento dos filamentos e envolve a utilização de uma fonte de tensão, como mostra a Figura 4. Conforme a ilustração, este circuito é baseado em um conversor multi-ressonante, usando enrolamentos secundários do indutor ressonante para pré-aquecer os filamentos.

Este circuito é constituído por dois filtros ressonantes: um filtro LCC formado por L_1 , C_1 e C_2 alimentando a lâmpada e um filtro LC série, composto por L_2 e C_3 , destinado a alimentar os filamentos da lâmpada durante a etapa de pré-aquecimento. Assim, é importante notar que as frequências de ressonância de ambos os filtros devem ser diferentes, possibilitando a seleção entre os modos de operação de pré-aquecimento e de ignição através da variação da frequência do circuito de comando dos transistores do inversor. No entanto, mesmo durante a operação da lâmpada, uma reduzida tensão permanece sendo aplicada aos filamentos, consumindo uma pequena e desnecessária parcela de energia.

Para eliminar este problema, o reator desenvolvido possui um interruptor adicional (S_3) em série com o filtro LC série, conforme ilustra a Figura 5, cuja função é eliminar o consumo de energia nos filamentos após o período de pré-aquecimento.

Assim, após este período de pré-aquecimento, o reator apresenta uma operação similar à observada nos reatores de partida instantânea, os quais são recomendados pela norma IEC60081, à exceção dos reatores dimmerizáveis.

O circuito de acionamento opera em duas diferentes frequências: a frequência de pré-aquecimento e a frequência de operação, de forma que a primeira é maior que a segunda, conforme indicado na Figura 6.

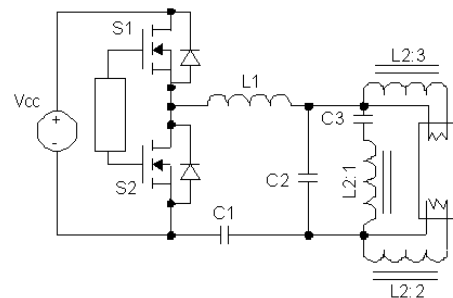


Fig. 4. Reator eletrônico com pré-aquecimento por fonte de tensão.

TABELA I

Lâmpadas T5 Convencionais – Pré-Aquecimento Controlado por Tensão

Tipo de Lâmpada	Tempo de pré-aquecimento	R_{SUB}		
			0,5s	1,0s
14, 21, 28, 35 W	Mín. (V)	30 Ω		
14, 21, 28, 35 W	Máx. (V)	30 Ω		

Fonte: Philips Silhouette T5 [6].

TABELA II

Lâmpadas T5 Convencionais – Tensão de Ignição

Tipo de lâmpada,		10°C a 60°C	
Temperatura ambiente			
14 W	Máx. durante o pré-aquecimento	V_{ef}	130 V
	Mín. para ignição	V_{ef}	230 V
21 W	Máx. durante o pré-aquecimento	V_{ef}	200 V
	Mín. para ignição	V_{ef}	340 V
28 W	Máx. durante o pré-aquecimento	V_{ef}	240 V
	Mín. para ignição	V_{ef}	425 V
35 W	Máx. durante o pré-aquecimento	V_{ef}	275 V
	Mín. para ignição	V_{ef}	530 V

Fonte: Philips Silhouette T5 [6].

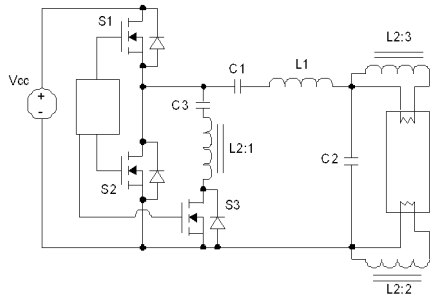


Fig. 5. Topologia do reator eletrônico proposto, baseado no pré-aquecimento por fonte de tensão.

O filtro LCC foi desenvolvido para atuar na frequência de operação e o filtro LC série para atuar na frequência de pré-aquecimento. Durante este período de pré-aquecimento, os enrolamentos secundários (L2:2: L2:3) alimentam os filamentos e o filtro LC série C paralelo mantém reduzida a tensão aplicada à lâmpada. Após este período, a frequência muda para frequência de operação e uma alta tensão é aplicada ao capacitor C2, fornecendo a tensão necessária para a ignição da lâmpada.

III. CRITÉRIO DE PROJETO

O projeto do reator eletrônico consiste no dimensionamento do filtro LCC (responsável pela geração da tensão de ignição e bloqueio da componente contínua evitando o desgaste prematuro dos eletrodos), e na determinação dos valores dos componentes do filtro LC série que, associado aos enrolamentos auxiliares e ao interruptor S₃, é responsável pelo pré-aquecimento dos filamentos.

A. Filtro LCC

O dimensionamento do filtro LCC é baseado no estudo realizado por Prado et al. [7][8]. Este método consiste na escolha do correto ângulo de fase ϕ para o filtro. A metodologia do ângulo de fase utiliza as seguintes aproximações:

- Aproximação fundamental [9].
- A lâmpada fluorescente é representada por um resistor variável de valor R em operação e 10R na partida [9]
- Os componentes do filtro são considerados ideais e invariantes no tempo.

B. Filtro LC

O indutor L₂ é constituído por três enrolamentos em um mesmo núcleo, sendo um deles a indutância própria (L₂) e os demais empregados para alimentar os filamentos. Em conjunto com o capacitor C₃, este indutor forma o filtro LC série, o qual é responsável pelo pré-aquecimento dos filamentos. Durante esta etapa de operação, o interruptor S₃ é acionado e o filtro LC é conectada ao circuito de potência. O dimensionamento destes componentes pode ser realizado a partir da função de transferência (que representa a relação

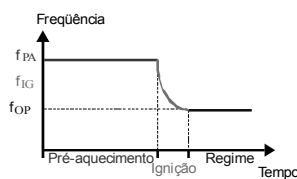


Fig. 6. Frequência de pré-aquecimento, ignição e operação.

entre a tensão aplicada aos filamentos da lâmpada e a tensão nos terminais do inversor deste circuito - V_{RE}/V_E), conforme é representado em (1).

$$\left| \frac{V_{RE}}{V_E} \right| = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{1}{U^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{U Q_L}\right)^2}} \quad (1)$$

Onde: $Q_L = \frac{R_E}{\omega_0 L_2} = \omega_0 R_E C_3$, $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_3}}$, $\omega = 2\pi f_{PA}$, $U = \frac{\omega}{\omega_0}$ e f_{PA} representa a frequência de pré-aquecimento.

Esta expressão pode ser facilmente obtida através do circuito equivalente de pré-aquecimento refletido no primário. A Figura 7 ilustra este circuito, onde os resistores R_{F1} e R_{F2} representam as resistências dos filamentos e R_E representa a resistência equivalente dos dois filamentos refletida no primário de L₂.

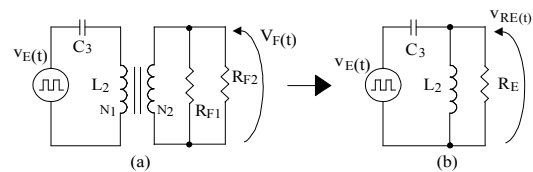
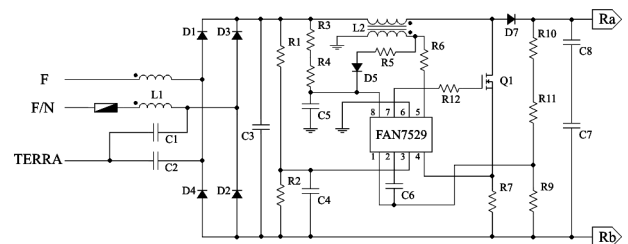


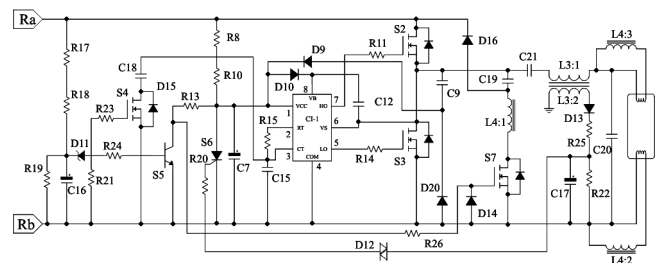
Fig. 7. Circuito equivalente de pré-aquecimento, (a) circuito completo, (b) circuito refletido ao primário.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Um protótipo de reator eletrônico empregando o método de partida descrito neste trabalho foi dimensionado e construído visando à alimentação de lâmpadas fluorescentes de 28W/T5, com o objetivo de viabilizar a análise proposta e a validação da metodologia de projeto do circuito de pré-aquecimento. A Figura 8 ilustra o diagrama esquemático completo deste circuito cuja estrutura envolve um corretor de fator de potência (PFC) implementado por um conversor elevador operando no modo de condução crítico (o qual está associado em cascata ao reator eletrônico).



(a) Circuito corretor do fator de potência.



(b) Reator eletrônico.

Fig. 8. Circuito completo do reator eletrônico proposto.

A Figura 9 apresenta uma foto do produto industrial desenvolvido. A Tabela III apresenta as especificações

técnicas, os parâmetros do filtro ressonante e os principais componentes do circuito implementado. Os resultados experimentais obtidos para o reator proposto são apresentados na Figura 10.



Fig. 9. Reator eletrônico para lâmpada T5.

O bom desempenho do PFC pode ser verificado pela característica de entrada do reator industrial, apresentada na Figura 10.a e pelos resultados do fator de potência e distorção harmônica medidos experimentalmente e sintetizados na Tabela IV. A tensão aplicada aos eletrodos e aos filamentos da lâmpada durante a etapa de pré-aquecimento e partida é apresentada nas Figuras 10.b e 10.c, respectivamente. Conforme proposto, observou-se a partida programada com tempo de pré-aquecimento de aproximadamente 2 s e tempo de transição inferior ao valor máximo recomendado, que é de 100 ms [10]. Durante o processo de pré-aquecimento, a tensão aplicada aos eletrodos da lâmpada é de aproximadamente 40 V e, portanto, encontra-se muito abaixo do limite máximo de 240 V apresentado na tabela II. Da mesma forma, a tensão aplicada aos filamentos da lâmpada (6,57 V) atende as especificações

técnicas, conforme a tabela I. Estes resultados demonstram a validade da metodologia de projeto e a concordância do protótipo com os limites impostos pelo fabricante. Ambos os interruptores principais do reator eletrônico S1 e S2 da Figura 5 operam em comutação suave por tensão nula (ZVS - Zero Voltage Switching) na entrada em condução, pois o diodo que se encontra em antiparalelo com o interruptor que deve assumir a corrente da lâmpada, está conduzindo esta corrente no momento da comutação, conforme pode ser observado na Figura 10.d. Esta figura apresenta a tensão e a corrente em um dos interruptores do circuito de potência em regime permanente (note que as formas de onda são idênticas em S1 e S2). É importante ressaltar que ambos os interruptores operam em comutação suave (tensão nula), o que reduz de forma significativa as perdas por comutação. As perdas no interruptor S3 são desprezíveis posto que o mesmo permanece fechado durante a etapa de pré-aquecimento e aberto durante a operação da lâmpada. A Figura 10.e exibe as formas de onda de tensão e corrente na lâmpada em alta frequência a partir das quais fica evidente a característica predominantemente resistiva da lâmpada T5 operando em alta frequência. Ambas as formas de onda são aproximadamente senoidais devido à ação do filtro de saída. Esta característica resulta na obtenção de um baixo fator de crista. Para a medição do fator de crista da corrente da lâmpada, deve-se levar em consideração a modulação em baixa frequência na determinação da corrente eficaz. No presente projeto, este parâmetro foi obtido com o auxílio de um *Ballast Analyser* configurado para medir fator de crista da corrente na lâmpada. A tabela IV apresenta os resultados obtidos.

O circuito de acionamento foi implementado usando um circuito integrado dedicado (IR2153). A frequência de comutação adotada para regime de operação f_{OP} foi de 40 kHz e a frequência de pré-aquecimento f_{PA} foi de 80 kHz para garantir um bom desacoplamento entre ambos os filtros ressonantes.

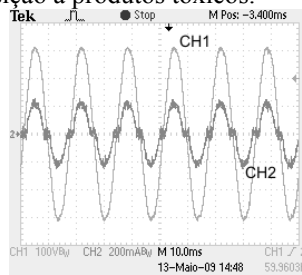
Em princípio, pode chamar a atenção o fato de se utilizar um circuito de comando dedicado neste projeto e, entretanto, o uso deste circuito foi adotado para conferir ao reator um grau de flexibilidade não permitido por sistemas auto-oscilantes. É importante ainda ressaltar que a produção em larga escala é facilitada pelo uso destes componentes, os quais são facilmente encontrados no mercado nacional. Desta forma, elimina-se a necessidade de uma produção sob medida dos componentes adicionais associados aos circuitos auto-oscilantes.

Quando a lâmpada se aproxima do final de sua vida útil, o seu funcionamento passa a ser instável, ocorrendo como consequência um excessivo aquecimento de sua base, o que pode resultar em danos ao soquete e até mesmo na quebra da mesma na região próxima à base, como no caso apresentado na Figura 11. Por esse motivo, os reatores eletrônicos comerciais possuem um circuito de proteção que detecta o aumento de corrente no circuito de saída. O sensoriamento é obtido através de um enrolamento auxiliar no indutor de saída L3:2 (Figura 8). A tensão obtida por este enrolamento auxiliar é retificada e filtrada. Caso haja um aumento de corrente no circuito de saída, a tensão retificada aumenta até atingir a tensão de disparo de um *diac* que, em conjunto com o *SCR*, retira a alimentação do circuito integrado IR2153, bloqueando assim o circuito inversor. O reator eletrônico

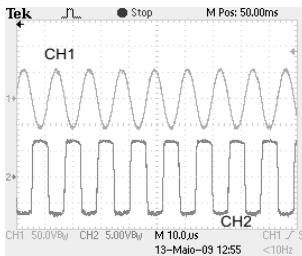
TABELA III
Parâmetros

Dados de Entrada	
Tensão de entrada	$V_{IN} = 220 V_{ef}, 60 Hz$
Potência de saída	$P = 28 W$
Resistência equivalente da lâmpada	$R = 995 \Omega$
Tensão de barramento	$V_{CC} = 400 V_{ef}$
Tempo de pré-aquecimento	2 segundos
Frequência de operação	$f_{OP} = 40 kHz$
Frequência de pré-aquecimento	$f_{PA} = 80 kHz$
Parâmetros do Circuito de Comando	
R_1	Resistor 470 k Ω +470 k Ω /1/5 W
R_2	Resistor 82 k Ω /1/3 W
R_3, R_4, R_5, R_6	Resistor 10 k Ω /1/3 W
R_7	Resistor 40 k Ω +40 k Ω /1/5 W
R_8	Resistor 8,9 k Ω /1/3 W
R_9, R_{10}, R_{11}	Resistor 56 Ω /1/3 W
C_1, C_3	Capacitor Eletrolítico 47 μF /50 V
C_2, C_4	Capacitor Plástico 1 nF/50 V
C_8	Capacitor Plástico 100 nF/50 V
D_1	Diodo Zener 13 V/1/2 W
D_2, D_3, D_4, D_5	Diodo 1N4937
S_1, S_2	Transistor Bipolar BC337
S_3, S_4	MOSFET's IRF830
S_5	MOSFET IRF730
CI	Circuito de Comando IR2153
Parâmetros do Filtro	
C_5	Capacitor Plástico 100 nF/400 V_{CC}
C_6	Capacitor Plástico 27 nF/400 V_{CC}
C_7	Capacitor Plástico 3,9 nF/2000 V_{CC}
L_1	Indutor Ressonante 4,4 mH
L2:1	Indutor Ressonante 2,4 mH
L2:2, L2:3	Enrolamento secundário 2,5 μH

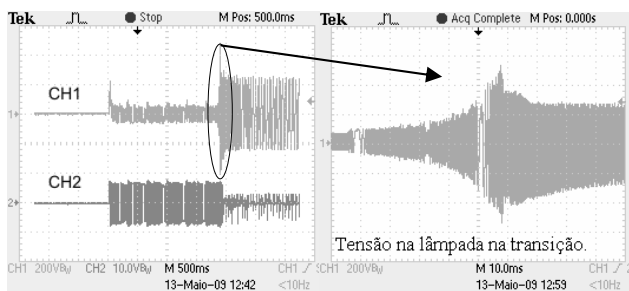
proposto incorpora esta função, protegendo o usuário contra a possível exposição a produtos tóxicos.



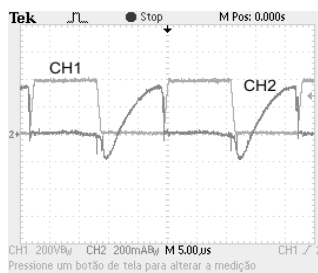
a. Tensão (CH1 100 V/div) e corrente (CH2 0,2 A/div) na entrada do PFC, considerando uma escala de tempo de 10 ms/div.



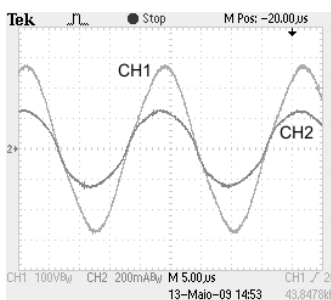
b. Tensão lâmpada (CH1 50 V/div) e tensão de filamento (CH2 5 V/div), considerando uma escala de tempo de 10 μs/div.



c. Tensão lâmpada (CH1 200 V/div), tensão de filamento (CH2 10 V/div) e detalhe da etapa de transição.



d. Tensão (CH1 200 V/div) e corrente (CH2 0,2 A/div) no interruptor S1, considerando uma escala de tempo de 5 μs/div.



e. Tensão (CH1 100 V/div) e corrente (CH2 0,2 A/div) na lâmpada, considerando uma escala de tempo de 5 μs/div.

Fig. 10. Formas de onda do protótipo industrial.



Fig. 11. Lâmpada T5 danificada por aquecimento excessivo da base.

A Tabela IV, que sintetiza os resultados obtidos a partir de medidas realizadas neste protótipo, também atesta a eficácia do reator. Um pequeno ajuste foi realizado na frequência de comutação para compensar as perdas causadas pelas não idealidades dos componentes.

O reduzido rendimento obtido é atribuído aos seguintes fatores: à presença de um estágio PFC; ao consumo dos circuitos de alimentação, controle e acionamento e ao fato de que o reator apresentado aciona apenas uma lâmpada. Por conseguinte, a potência útil é reduzida e, desta forma, qualquer pequeno dispêndio de energia ocasionado por esses circuitos auxiliares torna-se significativo. Entretanto, se fosse considerado, por exemplo, o acionamento de duas lâmpadas, o rendimento se elevaria de 88% para aproximadamente 94%.

V. TESTE DE CICLOS: MÉTODO IESNA

A Sociedade de Engenharia de Iluminação da América do Norte (*Illuminating Engineering Society of North America - IESNA*) especifica uma metodologia de teste para a determinação da vida útil das lâmpadas fluorescentes. Esta metodologia foi elaborada a partir de ensaios realizados com um grande número de amostras de lâmpadas fluorescentes submetidas a um ciclo no qual permaneciam ligadas por um período de 3 horas e desligadas por um período de 20 minutos (ciclo 3h/20min). Este ciclo se repete até que ocorra a falha de 50% do total de amostras, determinando-se assim a vida útil da lâmpada. Como este ciclo resultou em elevadíssimos valores de vida útil, métodos de ciclos rápidos têm sido recentemente propostos e realizados buscando reduzir o tempo necessário à realização em laboratório de ensaios para a determinação da vida útil das lâmpadas [2].

A vida útil das lâmpadas fluorescentes é determinada através da perda do revestimento emissor de elétrons nos eletrodos. O revestimento dos eletrodos sofre erosão quando a lâmpada é ligada. Evaporação e erosão adicionais ocorrem durante a sua operação em regime permanente. A temperatura do eletrodo afeta diretamente este processo, reduzindo a vida útil da lâmpada. Dadas as dificuldades verificadas para a medição direta da temperatura do eletrodo [2], a resistência deste pode ser utilizada como parâmetro para estimar este valor. Um parâmetro que está sendo investigado é a relação entre a resistência a quente do

TABELA IV
Resultados Obtidos

Ensaio Elétrico	
Potência de entrada	31,2W
Corrente de entrada	0,140A
Fator de potência	0,99
Distorção harmônica total da corrente de entrada	7,2%
Potência de saída	27,5W
Frequência de saída	39,0kHz
Rendimento	88%
Fator de crista de corrente da lâmpada	1,5

eletrodo (resistência R_H medida logo após o período de pré-aquecimento) e a resistência a frio (resistência R_C medida com a lâmpada desligada, considerando um tempo mínimo de 5 minutos após a lâmpada ter sido apagada). O valor da relação R_H/R_C deve estar situado entre 4,25 e 6,25 de maneira a garantir a adequada temperatura do eletrodo para a ignição. Desta forma, a resistência do eletrodo pode ser usada para avaliar a vida útil da lâmpada fluorescente [11] [12].

Utilizando a resistência dos eletrodos como medida indireta para a temperatura dos mesmos, Davis et al. [2] propõem um ciclo de teste rápido para lâmpadas T8 e lâmpadas fluorescentes compactas, no qual a variável de controle é o tempo em que a lâmpada permanece desligada. Esta metodologia foi aplicada neste trabalho às lâmpadas T5 para determinar de forma aproximada o tempo em que a lâmpada deve permanecer desligada para a realização dos ensaios de ciclo rápido. Este método consiste em medir a variação da resistência do eletrodo após a interrupção da alimentação da lâmpada para a determinação do tempo necessário ao seu resfriamento.

Procedeu-se à realização de ensaios considerando-se os reatores eletrônicos descritos anteriormente para o acionamento de lâmpadas fluorescentes T5 de 28 W (produzidas por três dos maiores fabricantes mundiais de lâmpadas), as quais foram aleatoriamente selecionadas e testadas. Os resultados obtidos para o universo de lâmpadas consideradas foram praticamente idênticos e, deste modo, somente serão apresentadas as fronteiras obtidas para um dos fabricantes. A Figura 12 sintetiza os resultados obtidos neste ensaio evidenciando o caráter exponencial (decrecente) da variação da resistência da lâmpada após o seu desligamento. Nesta figura, a resistência foi normalizada em relação ao seu valor nominal a frio.

Esses resultados são similares aos obtidos para lâmpadas T8 e demonstram que, para um dado ciclo de teste rápido, se o tempo em que a lâmpada permanece desligada é menor que 5 minutos, o eletrodo não se resfria completamente, de forma a reduzir o nível de degradação do filamento durante a partida da lâmpada. Esta característica provavelmente resultará em um número maior de ciclos antes do fim da vida útil da mesma [2]. A escolha apropriada do intervalo de tempo no qual a lâmpada deve permanecer ligada é de grande importância, porquanto a lâmpada fluorescente é afetada não somente pela sua partida como também por sua operação. Alguns fabricantes sugerem que, durante o teste de ciclo rápido, a lâmpada deveria permanecer ligada por um

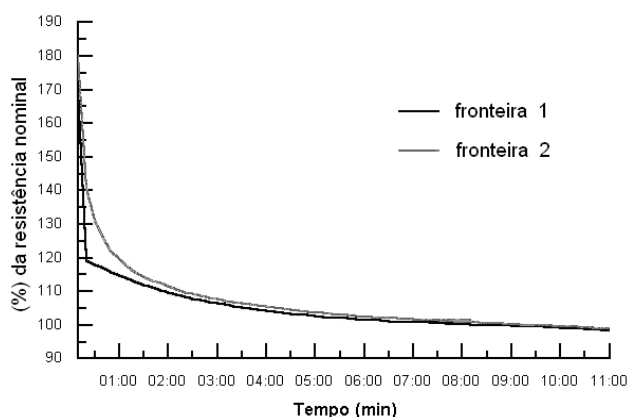


Fig. 12. Resistência da lâmpada (fabricante A) (%) versus tempo.

intervalo de tempo de 5 a 7 minutos visando ao restabelecimento dos eletrodos, de forma que a perda de material emissivo durante a próxima partida possa ser minimizada [5].

VI. TESTES DE CICLO RÁPIDO ADOTADOS

Uma análise comparativa envolvendo os tipos de reatores discutidos neste trabalho e empregando dois testes de ciclo rápido foi realizada buscando investigar a influência do reator de partida programada na vida útil das lâmpadas fluorescentes T5. Estes ensaios foram levados a efeito nos laboratórios da empresa. O primeiro teste emprega o ciclo 30s/30s aplicado pelos fabricantes brasileiros de reatores. De acordo com este teste, a lâmpada é ligada por 30 segundos e desligada pelo mesmo período de tempo. Para o segundo ensaio, foi considerado um ciclo 30s/5min no qual a lâmpada permanece ligada por 30s e desligada por 5 minutos (de maneira a permitir o resfriamento dos filamentos). Estes ciclos foram realizados empregando um significativo número de conjuntos reator-lâmpada e repetidos até que ocorresse a falha de 50% do total das amostras consideradas. Os resultados obtidos estão sintetizados na Tabela V.

Os reatores eletrônicos ensaiados foram os seguintes: um reator eletrônico com partida rápida programada, tal como proposto e o reator eletrônico comercial, sem pré-aquecimento.

Tendo em vista os resultados apresentados na Tabela V fica evidente de forma inequívoca que os reatores eletrônicos sem pré-aquecimento reduzem a vida útil das lâmpadas T5. Do ponto de vista absoluto, o ensaio de ciclo rápido 30s/5min é o mais significativo, pois permite o resfriamento parcial dos filamentos da lâmpada. Sendo assim, este ensaio melhor representa as condições reais de trabalho do conjunto composto pelo reator eletrônico e pela lâmpada T5.

VII. CONCLUSÕES

A topologia do reator eletrônico estudado proporciona um pré-aquecimento altamente controlado. Os filamentos são alimentados por uma fonte de tensão praticamente constante. Da mesma forma, a tensão aplicada à lâmpada durante o período de pré-aquecimento é reduzida, minimizando a corrente de descarga luminescente. Após o tempo de pré-aquecimento, a entrega de energia aos filamentos é interrompida, aumentando a eficiência do sistema.

Os ensaios de ciclo rápido realizados pelos autores permitiram a obtenção de resultados conclusivos que demonstram a superioridade do reator com partida rápida programada em relação ao reator com partida rápida convencional na otimização da vida útil da lâmpada.

O reator foi projetado para cumprir com os requisitos de pré-aquecimento e de funcionamento em regime permanente

TABELA V
Resultados da Análise Comparativa

Tipo de Reator Eletrônico	Teste de Ciclo Rápido	
	30s lig. e 30s desl.	30s lig. e 5min desl.
Reator eletrônico proposto (com pré-aquecimento controlado)	57600 ciclos	20160 ciclos
Reator eletrônico comercial (sem pré-aquecimento)	1440 ciclos	2880 ciclos

da lâmpada, conforme as especificações do fabricante e da norma internacional de lâmpadas IEC60081. Dentro destas condições de operação, a vida útil da lâmpada, estimada em 20.000 horas pelos fabricantes, não será comprometida, tendo em vista a superioridade do modelo de reator proposto.

Ressalta-se ainda que somente o reator eletrônico proposto elimina a dissipação de potência no filamento após a ignição, aumentando a eficiência do sistema.

Tendo em vista as características já citadas bem como o acervo de dados experimentais, o modelo proposto foi analisado e implementado e os resultados obtidos estimulam a sua produção em larga escala.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte proporcionado a este trabalho pela empresa INTRAL S.A. (Indústria de Material Elétrico) e pelo LEPUC (Laboratório de Eletrônica de Potência da Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRS).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. K. Cheong, K. W. E. Cheng and H. L. Chan, "Examination of T8-T5 Electronic Ballast Adaptor", in *Proc. of ICPEA*, pp. 170-172, 2006.
- [2] R. Davis, J. Yufen and C. Weihong, "Rapid-cycle testing for fluorescent lamps: What do the results mean?", in *Proc. of Annual IESNA Conf.*, paper 30, 1996.
- [3] C. S. Moo, T. F. Lin, H. L. Cheng and M. J. Soong, "Electronic Ballast for Programmed Rapid-Start Fluorescent Lamps", in *Proc. of PEDS*, vol. 02, pp. 538-542, 2001.
- [4] S. Ben-Yaakov, M. Shvartsas and G. Ivensky, "HF Multiresonant Electronic Ballast for Fluorescent Lamps with Constant Filament Preheat Voltage", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 44, no. 1, pp. 61-67, January/February, 2008.
- [5] T. F. Wu, C. C. Chen and J. N. Wu, "An Electronic Ballast with Inductively Coupled Preheating Circuits", in *Proc. of IAS*, vol. 01, pp. 517-523, 2001.
- [6] Philips, *Ultra-Slim Design With Extraordinary Light Output, SILHOUETTE T5*, Philips Lighting Company Catalog, July/2004.
- [7] R. N. Prado, A. R. Seidel, F. E. Bisogno and M. A. D Costa, "A design approach of the self-oscillating electronic ballast", in *Proc. of IPEMC*, vol. 03, pp. 1127-1131, 2000.
- [8] R. L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol. 03, no. 2, pp. 174-182, April 1988.
- [9] S. Ben-Yaakov, M. Shvartsas and S. Glozman, "Statics an Dynamics of Fluorescent Lamps Operation at High Frequency: Modeling an Simulation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 38, no. 6, pp. 1486-1492, November/December 2002.
- [10] ABNT, *NBR 14418: Reatores Eletrônicos Alimentados em Corrente Alternada para Lâmpadas Fluorescentes Tubulares - Prescrições de Desempenho*, Normas ABNT, Rio de Janeiro, 1999.
- [11] F. T. Wakabayashi, F. D. Dantas, F. A. S. Gonçalves, J. O. P. Pinto and C. A. Canesin, "Measuring the

equivalent resistance of electrode filaments of tubular fluorescent lamps, during dimming operation", *WSEAS Transactions on Circuits and Systems*, vol. 03, no. 03, pp. 437-443, May, 2004.

- [12] F. T. Wakabayashi, C. S. Ferreira, M. A. G. de Brito and Canesin, "Model for Electrodes' Filaments of Hot Cathode Fluorescent Lamps, During Preheating With Constant rms Current", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 03, pp. 719-726, May 2007.

DADOS BIOGRÁFICOS

Anderson Soares dos Santos, nascido em 21/08/1977 em Passo Fundo, graduado em engenharia elétrica com ênfase em eletrônica (1999) pela Universidade de Passo Fundo e mestre em engenharia elétrica (2004) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Atualmente, possui o cargo de Engenheiro de Produto da empresa Intral S.A. sediada em Caxias do Sul, Rio Grande do Sul e professor do curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade de Caxias do Sul.

Marcelo Toss, nascido em 06/04/1976 em Caxias do Sul é engenheiro eletricista (1999) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul e mestre em engenharia elétrica (2004) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, e, atualmente possui o cargo de Supervisor da Engenharia de Produto da empresa Intral S.A Indústria de Materiais Elétricos sediada em Caxias do Sul e professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Caxias do Sul.

Reinaldo Tonkoski Jr., nascido em 21/06/1980, recebeu o diploma de Engenheiro de Controle e Automação (2004) e Mestre em Engenharia Elétrica (2006) pela Pontifícia Universidade Católica do RS. Atualmente cursa o Ph.D. em Engenharia Elétrica na Concordia University, Canadá. É membro do IEEE e IEEE GOLD Montreal Chair. Tem especial interesse em Reatores Eletrônicos, Qualidade de Energia, Geração Distribuída e Sistemas de Energia Renováveis.

Raphael Ronald Noal Souza, nascido em 03/11/1973 em Porto Alegre-RS, Brasil, graduado em Engenharia Elétrica (2003) pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS e mestre em Engenharia Elétrica (2008) pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul PUCRS. Atualmente, desenvolve atividade de pesquisa junto à PUCRS através do LEPUC (Laboratório de Eletrônica de Potência da PUCRS), bem como atividade docente de nível técnico junto ao SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial).

Fernando Soares dos Reis, nascido a 13/11/1963 em Pelotas-RS, Brasil graduado em Engenharia Elétrica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, PUCRS, em 1987, Mestre em Engenharia pela Universidade Federal Santa Catarina em 1990 e Doutor em Eletrônica Industrial pela Universidad Politécnica de Madrid na Espanha em 1995. Iniciou suas atividades na PUCRS em 1990 como professor assistente e atualmente é professor titular do departamento Engenharia Elétrica da Faculdade de Engenharia. Publicou mais de 70 artigos técnicos. Tendo especial interesse em PFCs, Reatores Eletrônicos, Qualidade de Energia e na aplicação da eletrônica de potência em Sistemas de Energias Renováveis. Foi conselheiro da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (SOBRAEP) e membro do IEEE.