

PROJETO DE REATOR MULTIRESSONANTE PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES MODELO T5 DE 28 W

Mikhail Polonskii, Victor Hugo Schulz, Marcos Visoto
Universidade de Passo Fundo, CEP 99001-970, C.P. 611, Passo Fundo – RS
Brasil
e-mail: polonski@upf.br

Resumo - O artigo apresenta o projeto e os resultados de testes do protótipo de reator multirressonante para alimentação de lâmpadas fluorescentes (LF) modelo T5 de 28 W. A particularidade desta LF exige que, no preaquecimento dos seus filamentos, a tensão sobre a mesma não seja maior que 240 Vrms e que após a partida os filamentos não recebam energia adicional. A idéia principal da proposta de reator multirressonante é o emprego de um segundo circuito rressonante para alimentação dos filamentos da LF em tensão. Embora esta proposta tenha sido apresentada há alguns anos, o método de projeto ainda não foi descrito na literatura da área de forma satisfatória. Assim, a principal contribuição deste artigo é o desenvolvimento de um método prático de projeto de reatores multirressonantes que não utilizam um interruptor adicional para o circuito de aquecimento dos filamentos da LF T5.

Palavras-Chave – Circuito Multirressonante, Iluminação Fluorescente, Preaquecimento dos Filamentos, Reator Eletrônico.

MULTIRESONANT BALLAST DESIGN FOR A T5 28W MODEL FLUORESCENT LAMP

Abstract – The article presents a design method and the tests results of the multiresonant ballast prototype developed for feeding one T5 28W model fluorescent lamp (LF). The particularity of the LF requires that during the preheating phase the lamp rms voltage does not exceed 240 V and that after the ignition the filaments do not receive any additional energy. The main idea of the proposed multiresonant ballast is the employment of a second resonant circuit to power the LF filaments in the voltage mode. Although this proposal was made some years ago, the design method has not been satisfactorily described in the literature. The main contribution of this paper is the description of a practical method for multiresonant ballasts design that do not use an additional power switch for the LF filaments heating circuit.

Keywords – Fluorescent Lighting, Electronic Ballast, Filaments Preheating, Multiresonant Circuit.

Artigo submetido em 01/07/2010. Primeira revisão em 12/11/2010; segunda revisão em Revisado em 13/02/2011. Aceito para publicação em 25/04/2011 por recomendação do editor João Onofre P. Pinto.

I. INTRODUÇÃO

Iluminação fluorescente chegou a sua idade de maturidade e, apesar dos avanços na área de LEDs, promete dominar o mercado ainda por alguns anos. Dentre as lâmpadas fluorescentes (LF) tubulares se destacam as do tamanho T5 [1]. Estas proporcionam uma excelente relação lumens/watt, somente podem ser alimentadas por reatores eletrônicos em alta frequência e são destinadas à substituição das LF tubulares do tamanho T8.

Para aumentar a vida útil da LF tamanho T5, sua partida deve ser programada, ou seja, durante o preaquecimento dos filamentos a tensão sobre a lâmpada deve ser inferior a uma tensão estabelecida pelo fabricante e em regime, quando a potência da lâmpada é nominal, os filamentos somente devem ser aquecidos pelo arco elétrico de descarga sem receber nenhuma energia adicional [1]. Outro aspecto importante, é que no instante de ignição a temperatura dos filamentos desta lâmpada deve ser entre 700 e 1000° C o que é necessário para prolongar sua vida útil.

Para os reatores não dimerizáveis, que é o caso deste trabalho, há duas abordagens à solução do problema de partida da lâmpada. Na primeira, um conversor específico é empregado para fornecer a energia aos filamentos durante o preaquecimento [1], [2], [3]. Este conversor pára de funcionar após a partida da lâmpada. Na segunda abordagem, um circuito rressonante adicional é empregado, sendo que a frequência rressonante deste último difere da do circuito rressonante principal [4], [5]. A primeira abordagem, embora eficiente, encarece o projeto do reator eletrônico, enquanto que a segunda ainda não foi descrita na literatura de forma adequada para aplicação prática. Em [4] um circuito LC é conectado em paralelo com a LF, sendo que o aquecimento dos filamentos é feito em corrente e a corrente de aquecimento adicional, em regime nominal, é de 0,25 A. A LF utilizada foi uma de modelo T8. Cabe enfatizar que os filamentos da LF T5 não devem receber nenhuma corrente adicional em regime nominal.

Em [5], um esquema multirressonante de aquecimento dos filamentos em tensão foi apresentado, porém o procedimento de projeto não foi bem detalhado. O emprego das equações apresentadas em [5] para o projeto de reator para alimentar uma LF T5 de 28 W resultou em um reator com, pelo menos, duas deficiências sérias. A primeira é a incapacidade, se utilizar apenas duas frequências de comutação, de iniciar a descarga elétrica na LF, pois a tensão gerada pelo reator após o preaquecimento é insuficiente. A segunda deficiência surge se utilizar uma terceira frequência para a ignição, pois o esforço de tensão sobre o capacitor do segundo circuito rressonante ultrapassa 3000 V.

A Seção II apresenta o método de projeto proposto e traz mais detalhes sobre a metodologia de projeto apresentada em [5]. A Seção III apresenta os resultados práticos obtidos com o protótipo construído com base no método de projeto proposto.

II. PROJETO DO REATOR MULTIRESSONANTE

O método de projeto desenvolvido neste artigo é aplicado ao reator eletrônico mostrado na Figura 1.

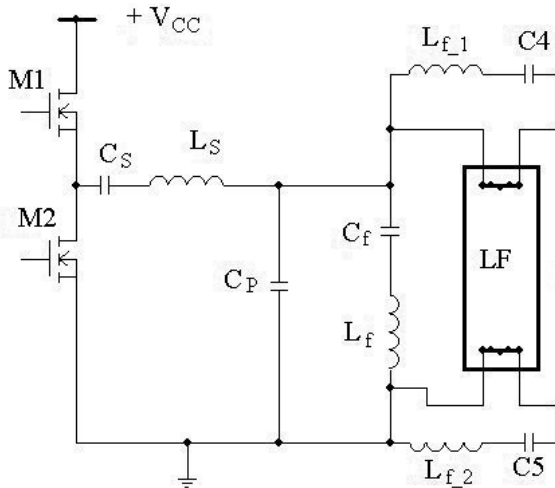


Fig. 1. Esquemático simplificado do reator multiresonante.

O reator tem duas frequências ressonantes, sendo a mais baixa do circuito $L_S - C_S - C_P$ e a mais alta do circuito $C_f - L_f$. O reator começa a funcionar na frequência de preaquecimento, f_{PH} , quando a LF não acende, porém os seus filamentos são aquecidos até aproximadamente 1000°C . O preaquecimento dos filamentos é feito através dos indutores acoplados $L_f - L_{f-1} - L_{f-2}$ e capacitores C4 e C5. Após o preaquecimento, a frequência do reator diminui até um valor próximo da frequência ressonante do circuito $L_S - C_S - C_P$ e a LF acende. Em regime nominal, o circuito de aquecimento dos filamentos praticamente não deve funcionar no sentido de que a energia entregue por este circuito aos filamentos da LF T5 deve ser a menor possível (no caso ideal seria zero).

Inicialmente, empregando o método baseado na impedância de entrada [6], foi projetado o filtro ressonante $L_S - C_S - C_P$ que também é denominado primeiro circuito ressonante. Em seguida, o segundo circuito ressonante, isto é, o circuito de aquecimento dos filamentos, foi projetado. Finalmente, uma comparação entre o método de projeto proposto e o descrito em [5] é apresentada.

A. Projeto do Primeiro Circuito Ressonante

A Figura 2 mostra o esquemático do filtro ressonante. A Tabela I contém os requisitos do projeto.

Seja φ a defasagem entre a tensão retangular de amplitude V_E aplicada à entrada do filtro (Figura 2) e a corrente no capacitor C_P . Pode-se deduzir (1) [6]:

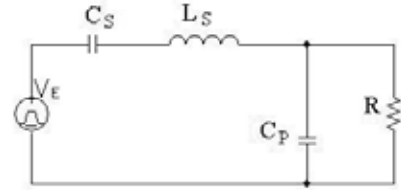


Fig. 2. Circuito do filtro ressonante LCC básico.

$$C_P = \sqrt{PR(I + X^2) - V_E^2} / \omega V_I R \quad (1)$$

Onde:

$$X = \tan(\varphi \cdot \pi / 180);$$

$$\omega = 2\pi f_S = 314160 \text{ rad/s};$$

V_I é o harmônico fundamental de V_E .

TABELA I
Requisitos do Projeto

Parâmetro	Valor
Tensão do barramento CC, V_{CC}	300 V
Frequência em regime, f_S	50 kHz
Tensão máxima sobre a LF no preaquecimento	240 V eficaz
Potência nominal da LF, P	28 W
Resistência da LF em regime, R	1000 Ohms
Resistência da LF no preaquecimento	20000 Ohms
Tensão mínima de ignição	600 V de pico
Tensão da LF em regime, V_{nom}	167 V eficaz
Corrente eficaz da LF em regime, I_{nom}	0,167 A

Adotando um valor para C_S , obtém-se (2) para o cálculo de L_S :

$$L_S = \frac{(RX + R^2 \omega C_P)}{\omega(I + \omega^2 R^2 C_P^2)} + \frac{1}{\omega^2 C_S} \quad (2)$$

Seja:

$$\omega_o = 1 / \sqrt{L_S C_S} \quad (3)$$

$$Q_S = \omega_o L_S / R \quad (4)$$

$$U = \omega / \omega_o \quad (5)$$

Logo:

$$V_{LAMP} = \frac{2 \cdot V_{CC}}{\pi \sqrt{\left(1 + C_P \left(\frac{1 - U^2}{C_S}\right)^2 + Q_S^2 \left(U - \frac{1}{U}\right)^2\right)}} \quad (6)$$

Onde:

V_{LAMP} é a tensão sobre o resistor R (Figura 2) que modela a LF.

Adotando $C_S = 100 \text{ nF}$ e $R = 20 \text{ kOhms}$, que seria a resistência da LF antes de ignição, foi desenhado o gráfico mostrado na Figura 3. Neste gráfico, foi escolhido o ponto X: 31.36; Y: 1000 que corresponde ao valor do parâmetro ϕ (φ) igual a $31,21^\circ$ e à tensão de ignição da LF, V_{L_IGN} , igual a 1000 V de pico. A partir de $\varphi = 31,21^\circ$ os valores de $C_P = 3,35 \text{ nF}$, $L_S = 2,6 \text{ mH}$ e $U = 5,075$ são calculados por (1), (2) e (5). Além disso, são calculados os valores da corrente de pico do indutor L_S no instante de ignição, I_{L_IGN} , e da corrente eficaz do indutor L_S em regime nominal, I_{L_RMS} , pelas equações (7) e (8):

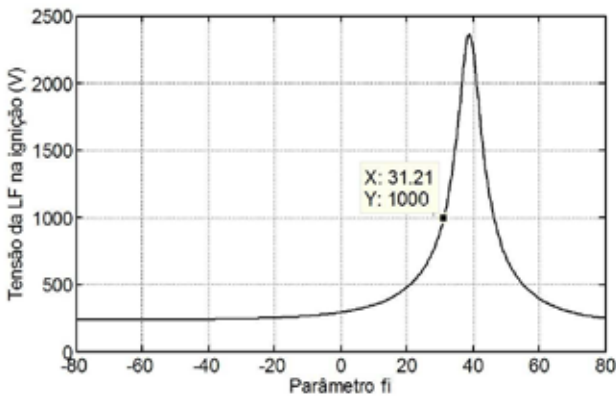


Fig. 3. Tensão da LF em função do parâmetro φ (ϕ).

$$I_{L_IGN} = V_{L_IGN} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot C_P \quad (7)$$

$$I_{C_P_RMS} = V_{nom} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_S \cdot C_P$$

$$I_{L_RMS} = \sqrt{I_{C_P_RMS}^2 + I_{nom}^2} \quad (8)$$

Onde:

$I_{C_P_RMS}$ é a corrente eficaz no capacitor C_P .

Os valores de I_{L_IGN} e I_{L_RMS} foram posteriormente utilizados no projeto físico do indutor L_S .

B. Projeto do Segundo Circuito Ressonante

Para o projeto do segundo circuito ressonante, o qual é utilizado para o preaquecimento dos filamentos da LF em tensão, foi empregado o circuito equivalente simplificado da Figura 4. No preaquecimento, a tensão eficaz sobre os filamentos, V_{f_PA} , deve ser igual a 7 V o que corresponde ao tempo de preaquecimento de 1 s [1], enquanto que em regime nominal a tensão eficaz sobre os filamentos, V_{f_RN} , foi definida como dez vezes menor, isso é, 0,7 V.

Inicialmente, de acordo com a argumentação apresentada em [5], o efeito dos enrolamentos secundários não foi levado em consideração e a frequência ressonante deste circuito, f_2 , foi definida como sendo duas vezes maior do que f_S . Assim, $f_2 = 100 \text{ kHz}$. Após a conclusão do projeto do

segundo circuito ressonante, a verificação da influência dos secundários foi feita por meio de simulação.

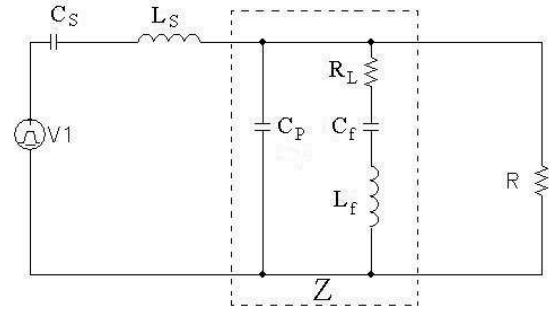


Fig. 4. Esquemático simplificado do filtro multirressonante.

A impedância complexa $Z(s)$ (Figura 4) do circuito $C_P \parallel (R_f - C_f - L_f)$ é calculada por (9):

$$Z(s) = \frac{(L_f C_f s^2 + R_f C_f s + 1)}{s [L_f C_f C_P s^2 + R_f C_f C_P s + (C_f + C_P)]} \quad (9)$$

É preciso escolher os valores de C_f e L_f para que a impedância complexa $Z(s)$ não seja muito diferente, na frequência f_S , da impedância complexa do capacitor C_P , Z_{C_P} . Desta forma, o segundo circuito ressonante não irá influenciar o filtro ressonante $L_S - C_S - C_P$ (Figura 4). O gráfico da Figura 5 foi desenhado com base na equação (9) quando a capacitância C_f foi variada de 0,5 até 5 nF com um incremento de 0,5 nF e a indutância L_f calculada por (10):

$$\frac{1}{2\pi\sqrt{L_f C_f}} = 10^5 \quad (10)$$

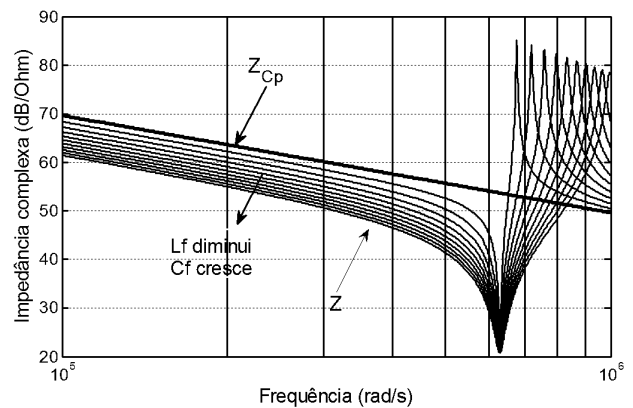


Fig. 5. Impedâncias complexas Z e Z_{C_P} .

O gráfico da Figura 5 mostra que a melhor aproximação da reta Z_{C_P} corresponde ao menor valor de C_f . Assim, para o projeto foram escolhidos os seguintes valores: $C_f = 1 \text{ nF}$ e $L_f = 2,5 \text{ mH}$. Para projetar os secundários L_{f_1} e L_{f_2} e

definir os valores dos capacitores C_4 e C_5 (Figura 1), foi simulada a resposta, no preaquecimento, da tensão sobre L_f em frequência (Figura 6).

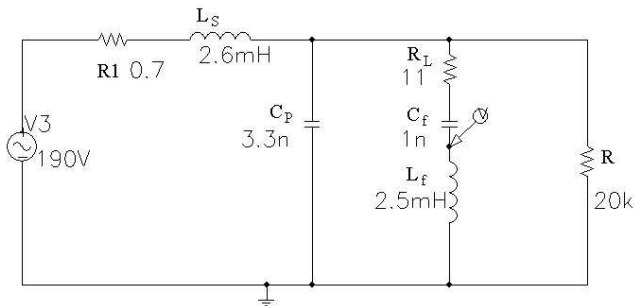


Fig. 6. Esquema simplificado do filtro multirressonante.

Na Figura 6, R_L representa a estimativa da resistência do indutor L_f , enquanto que R_1 representa a de L_S . A Figura 7 mostra a variação, no preaquecimento, da tensão sobre L_f em frequência. Cabe ressaltar que o valor da frequência de preaquecimento, f_{PH} , foi definido como igual a 110 kHz, ou seja, maior do que f_2 . Isto foi feito para obter a relação V_{f_PA}/V_{f_RN} de aproximadamente 5. O aumento desta relação até 10 foi feito através da definição adequada dos capacitores C_4 e C_5 (Figura 1).

As indutâncias dos secundários, L_{f_1} e L_{f_2} , e os valores dos capacitores C_4 e C_5 foram calculados com base na função de transferência definida por (11):

$$\frac{V_f(s)}{V_1(s)} = \frac{As^3}{Bs^5 + Cs^4 + Ds^3 + Es^2 + Fs + R} \quad (11)$$

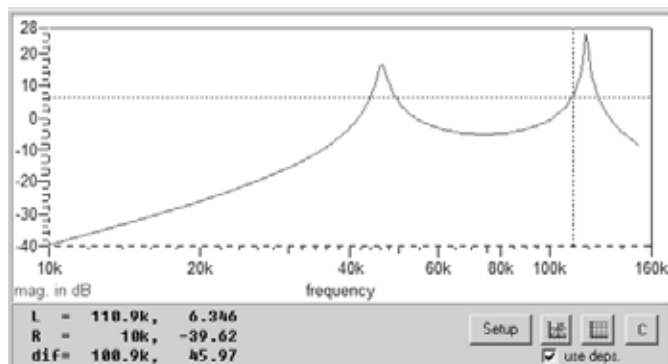


Fig. 7. Resposta em frequência do filtro multirressonante sem os secundários.

Onde:

$V_f(s)$ é a imagem da tensão sobre o filamento; $V_1(s)$ é a imagem do harmônico fundamental da tensão na saída do inversor meia-ponte; s é a variável da transformada de Laplace;

$$A = R_f \cdot C_f \cdot C_{45} \cdot R \cdot M ;$$

$$\begin{aligned} M &= k\sqrt{L_f L_{f_1}} = \sqrt{L_f L_{f_1}} \text{ supondo } k=1; \\ B &= L_S C_{45} (C_P R_f C_f R L_f + L_f L_{f_1} (C_f - C_P)); \\ C &= L_S C_f (C_P R L_f + R_f C_{45} L_f + C_{45} R L_{f_1}); \\ &\quad + C_{45} R L_S C_P L_{f_1} \\ D &= L_S C_{45} (C_P R_f R + L_{f_1} + R_f C_f R); \\ &\quad + C_f L_f (R_f C_{45} R + L_S); \\ E &= C_{45} (R L_{f_1} + R_f L_S) + L_S R (C_P + C_f) + C_f R L_f; \\ F &= R_f C_{45} R + L_S; \end{aligned}$$

Supõe-se, que:

$$L_{f_1} = L_{f_2} \quad (12)$$

Para calcular os valores de L_{f_1} , L_{f_2} , C_4 e C_5 foram deduzidas as equações para o funcionamento do reator no preaquecimento e em regime nominal. No preaquecimento foram utilizados os seguintes valores dos componentes definidos anteriormente:

$$\begin{aligned} L_S &= 2,6 \text{ mH}; \quad C_P = 3,3 \text{ nF}; \quad C_f = 1 \text{ nF}; \quad R_f = 20 \text{ } \Omega; \\ R &= 20 \text{ k}\Omega; \quad f_S = 110 \text{ kHz} \end{aligned}$$

No preaquecimento, deseja-se obter sobre o filamento uma tensão de 10 V de pico, sendo que $V_1 = 191$ V de pico. Neste caso, o ganho de tensão, G_{PA} , é $10/191 = 0,0526$. Partindo de (11) e após algumas transformações algébricas, obteve-se a equação definida por (13):

$$NUM_{PA} - G_{PA} \cdot DEN_{PA} = 0 \quad (13)$$

Onde:

$$\begin{aligned} NUM_{PA} &= C_{45} \{ L_{f_1} [(a_1 + b_1 C_{45} + c_1 C_{45} L_{f_1})^2 \\ &\quad + (d_1 + e_1 C_{45} L_{f_1} + f_1 C_{45})^2] \}; \\ C_{45} &= C_4 + C_5; \quad C_4 = C_5; \\ DEN_{PA} &= (a_2 + b_2 C_{45} L_{f_1} + c_2 C_{45})^2 \\ &\quad + (d_2 + e_2 C_{45} + f_2 C_{45} L_{f_1})^2; \end{aligned}$$

Onde:

$$\begin{aligned} a_1 &= 0,23045825 \cdot 10^{16}; \quad b_1 = 0,11686443 \cdot 10^{25}; \\ c_1 &= 0,56681151 \cdot 10^{28}; \quad d_1 = 0,84543418 \cdot 10^{17}; \\ e_1 &= -0,2738222 \cdot 10^{30}; \quad f_1 = -0,31856262 \cdot 10^{23}; \\ a_2 &= -12803,6015; \quad b_2 = 0,41468755 \cdot 10^{17}; \\ c_2 &= 0,48244428 \cdot 10^{10}; \quad d_2 = -349,01542; \\ e_2 &= -0,17698428 \cdot 10^{12}; \quad f_2 = -0,85840256 \cdot 10^{15}; \end{aligned}$$

Para o funcionamento em regime nominal, foram utilizados os mesmos valores numéricos, com exceção de R e f_S , que foram definidos como segue:

$R=1\text{ k}\Omega$; $f_S = 50\text{ kHz}$;

Em regime nominal, deseja-se obter uma tensão de 1 V de pico sobre o filamento, assim, o ganho de tensão, G_{RN} , será igual a $1/191 = 0,0052$. Em seguida, obteve-se a equação definida por (14):

$$NUM_R - G_{RN} \cdot DEN_R = 0 \quad (14)$$

Onde:

$$NUM_R = NUM_{PA}; DEN_R = DEN_{PA}$$

porém, os valores numéricos dos coeficientes foram os seguintes:

$$\begin{aligned} a_1 &= -0,19077333 \cdot 10^{14}; & b_1 &= 0,27512103 \cdot 10^{20}; \\ c_1 &= 0,24996119 \cdot 10^{25}; & d_1 &= 0,43786872 \cdot 10^{13}; \\ e_1 &= -0,31649098 \cdot 10^{24}; & f_1 &= 0,11986642 \cdot 10^{21}; \\ a_2 &= -141,21938; & b_2 &= 0,10207319 \cdot 10^{14}; \\ c_2 &= -0,38658761 \cdot 10^{10}; & d_2 &= 615,27329; \\ e_2 &= -0,88730754 \cdot 10^9; & f_2 &= -0,80616319 \cdot 10^{14}; \end{aligned}$$

As equações (13) e (14) foram resolvidas numericamente, gerando os resultados apresentados na Tabela II como valores calculados. Além disso, a Tabela II mostra os valores obtidos na simulação empregando o modelo da Figura 11.

TABELA II
Cálculo do Circuito de Preaquecimento

Preaquecimento:		Regime nominal:		
$f_S = 110\text{ kHz}; R_f = 20;$		$f_S = 50\text{ kHz}; R_f = 20;$		
$R = 20\text{ k}\Omega$		$R = 1\text{ k}\Omega$		
C_f	L_{f-1} calculado	L_{f-1} simulação	L_{f-1} calculado	L_{f-1} simulação
10 nF	18,78 μF	18,78 μF	89,65 μF	50 μF
20 nF	8,13 μF	8,3 μF	25,33 μF	12 μF
32 nF	4,77 μF	5,4 μF	10,62 μF	4,2 μF
40 nF	3,8 μF	3,9 μF	7,06 μF	3 μF
54 nF	2,94 μF	3,01 μF	4,13 μF	2 μF
66 nF	2,57 μF	2,65 μF	2,93 μF	1,3 μF

Como se pode ver, no preaquecimento, os valores de L_{f-1} calculados são muito próximos dos obtidos na simulação, enquanto que os valores calculados para o regime nominal diferem significativamente dos simulados. Esta discrepância pode ser justificada pelo uso, no cálculo, da aproximação fundamental da tensão retangular na saída do inversor meia-ponte. A Figura 8 mostra a resposta em frequência do circuito de aquecimento no preaquecimento. A frequência de comutação é de 110 kHz, por isso a influência dos harmônicos superiores é desprezível. A Figura 9 mostra a resposta em frequência do circuito de aquecimento funcionando em regime nominal. A frequência de comutação é de 50 kHz, sendo que a magnitude do terceiro harmônico, de 150 kHz, é maior do que a do fundamental, logo a

influência do terceiro harmônico é significativa. A Figura 10, que mostra a forma de onda da tensão sobre R_f em regime nominal, comprova esta afirmação.

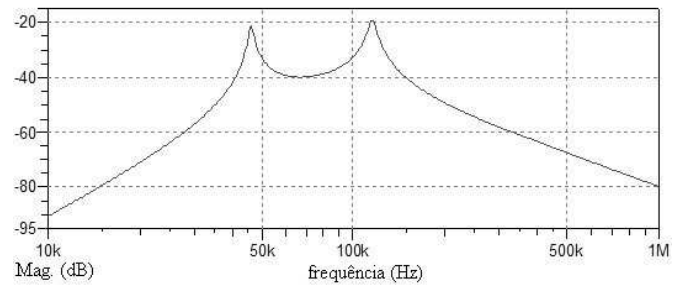


Fig. 8. Resposta em frequência do circuito de aquecimento no preaquecimento.

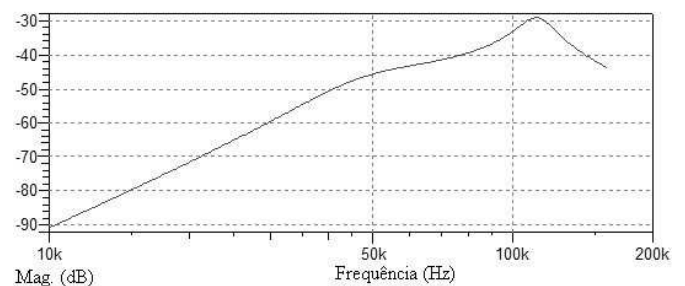


Fig. 9. Resposta em frequência do circuito de aquecimento em regime nominal.

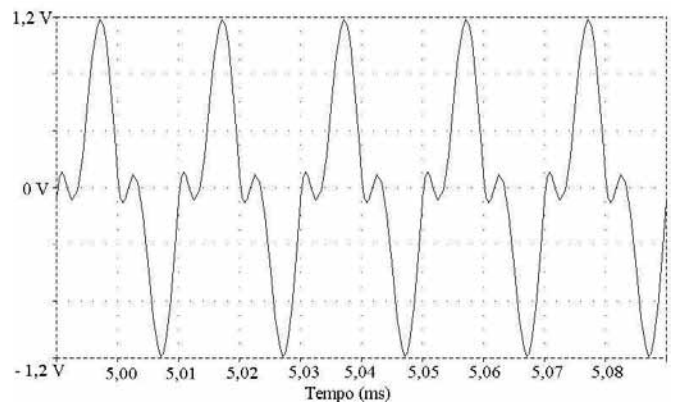


Fig. 10. Forma de onda da tensão sobre R_f obtida na simulação (regime nominal).

Os valores de L_{f-1} da última linha da Tabela II calculados para $C_f = 66\text{ nF}$ fornecem uma solução simultânea aproximada das equações (13) e (14). Os valores finais foram obtidos na simulação empregando o modelo da Figura 11. Os valores de L_{f-1} , L_{f-2} , C_4 e C_5 foram definidos como $L_{f-1} = L_{f-2} = 2\text{ }\mu\text{H}$ e $C_4 = C_5 = C_{45}/2 = 33\text{ nF}$. O valor de L_S foi aumentado de 2,6 para 2,7 mH para obter a potência nominal da LF em regime.

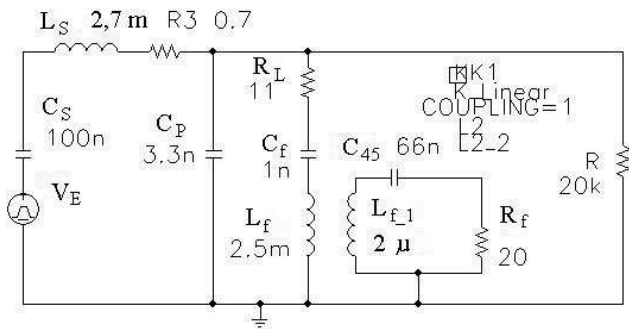


Fig. 11. Circuito completo simulado no MicroSim.

A Tabela III mostra outros resultados relevantes obtidos na simulação.

TABELA III
Resultados de Simulação

Frequência (kHz)	Modo	Tensão de pico sobre LF (V)	Tensão eficaz sobre o filamento (V)	Resistência da LF (Ohms)
110	PA	103	7	20000
50	RN	238,5	0,7	1000

onde: PA = preaquecimento; RN = regime nominal.

C. Comparação com o Método Apresentado em [5]

Como já foi mencionado, a tentativa de utilizar as equações apresentadas em [5] para projetar um reator eletrônico multiressonante para alimentar uma LF modelo T5 de 28 W resultou em um projeto insatisfatório. Essas equações são apresentadas aqui por (15) a (24):

$$f_1 = (1,1 \dots 1,2) f_S \quad (15)$$

$$f_2 = 2 f_1 \quad (16)$$

$$f_{02} = (f_1 + f_2) / 2 = 1,5 f_1 \quad (17)$$

$$f_{PH} = f_{02} \quad (18)$$

$$n = \frac{V_{nom}}{V_{f.S.RMS}} \frac{f_S^2}{|f_S^2 - f_{SW}^2|} \quad (19)$$

Onde:

n é a relação de espiras do segundo circuito ressonante;
 $V_{f.S.RMS}$ é a tensão eficaz sobre o filamento em regime nominal;

$$A_L \equiv \frac{L_S}{L_f} = \frac{0,9}{n} \frac{V_{CC} / 2}{V_{f.W.RMS}} \quad (20)$$

Onde:

$V_{f.W.RMS}$ é a tensão eficaz sobre o filamento no preaquecimento;

$$L_S = 0,159 \frac{V_{nom} / I_{nom}}{f_S} \times \sqrt{0,81 \left(\frac{V_{CC}}{2V_{nom}} \right)^2 - \left(1 - \frac{f_S^2 f_{SW}^2}{f_1^2 f_2^2} + \frac{A_L f_S^2}{f_S^2 - f_{SW}^2} \right)^2} \quad (21)$$

$$L_f = \frac{L_1}{A_L} \quad (22)$$

$$C_f = \frac{1}{(2\pi f_{SW})^2 L_f} \quad (23)$$

$$C_P = \frac{1}{(2\pi)^2} \frac{1}{L_S} \frac{1}{f_1^2 f_2^2} f_{SW}^2 \quad (24)$$

A nomenclatura utilizada em [5] foi modificada nas equações (15) a (24) de acordo com a adotada neste artigo. Utilizando estas equações e os mesmos requisitos empregados para o projeto mostrado na Figura 11, foi projetado um reator para uma LF modelo T5 de 28 W. Para facilitar a comparação do método proposto com o apresentado em [5], a Tabela IV mostra os componentes dos dois reatores.

TABELA IV
Comparação dos Projetos

Requisitos dos projetos: $V_{CC} = 300$ V, $f_S = 50$ kHz; $V_{nom} = 167$ V; $I_{nom} = 0,167$ A;		
Componentes e parâmetros	Método proposto	Método descrito em [5]
L_S	2,7 mH	2 mH
C_P	3,3 nF/1600 V	2,12 nF
C_f	1 μ F/1600 V	0,26 μ F
L_f	2,5 mH	12,9 mH
$L_{f1} = L_{f2}$	2 μ H	0,45 μ H
f_{PH}	110 kHz	86,25 kHz
n	35,4	169
$C4=C5$	33 nF	não utilizado

Empregando simulação, foram obtidos os esforços de tensão sobre os componentes dos dois reatores. A Tabela V mostra os valores obtidos mais relevantes. O parâmetro ϕ_I representa a defasagem entre a tensão e a corrente na entrada do filtro ressonante.

Como se pode ver, a tensão de ignição do reator projetado com base nas equações (15) a (24) [5] é de 404 V de pico, sendo esta tensão insuficiente para iniciar a descarga elétrica da LF T5 de 28 W, cuja tensão mínima de ignição é de 600 V de pico [1]. Para isso, é preciso usar uma frequência intermediária de aproximadamente 71 kHz. Neste caso, a tensão sobre a LF na ignição chega a 1000 V de pico, porém a tensão sobre C_f aumenta até 3167 V de pico.

Outra observação importante é que, em regime nominal, a LF alimentada pelo reator projetado com base em [5] não chega a sua potência nominal. Além disso, o ângulo ϕ_I é de apenas -16° neste regime. Este valor pode ser insuficiente, se levar em consideração as tolerâncias dos componentes, para garantir a comutação suave dos MOSFETs do inversor.

A vantagem do reator projetado com base em [5] é que no preaquecimento a tensão sobre a LF é menor em comparação com a tensão sobre a mesma se alimentada a partir do reator proposto. Como outra vantagem pode-se apontar a quase independência, no preaquecimento, da tensão sobre o filamento da variação da resistência do mesmo.

TABELA V

Esforços de Tensão sobre os Componentes dos Reatores		
Componentes	Método proposto	Método descrito em [5]
Preaquecimento		
	$f_s = 110$ kHz	$f_s = 86,25$ kHz
	$\varphi_I = -43,5^\circ$	$\varphi_I = -80^\circ$
$R_f = 5 \Omega$	3,8 V eficaz	5,09 V eficaz
$R_f = 20 \Omega$	6,25 V eficaz	5,11 V eficaz
C_f	663 V pico @ $R_f = 5 \Omega$ 393 V pico @ $R_f = 20 \Omega$	1213 V pico @ $R_f = 5 \Omega$ 1220 V pico @ $R_f = 20 \Omega$
LF	155 V pico @ $R_f = 5 \Omega$ 103 V pico @ $R_f = 20 \Omega$	67 V pico @ $R_f = 5 \Omega$ 27 V pico @ $R_f = 20 \Omega$
Ignição		
C_f	1215 V de pico	561 V de pico
LF	922 V de pico	404 V de pico
Em regime nominal		
LF	168,8 V eficaz	156 V eficaz
R_f	0,65 V eficaz	0,5 V eficaz
C_f	296 V de pico	368 V de pico
φ_I	-45°	-16°

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para verificar os resultados obtidos no projeto, foi confeccionado e testado um protótipo do reator multirressonante. O esquemático do protótipo utiliza um CI IR2153 da International Rectifier para controle dos MOSFETS do inversor (Figura 1). O reator proposto é similar ao apresentado em [1], mas difere no circuito de aquecimento e não foi dotado do circuito de correção do fator de potência. As Figuras 12 a 15 apresentam as formas de onda observadas no protótipo.

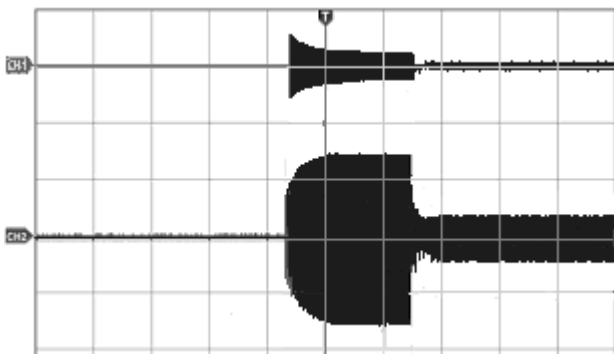


Fig. 12. Tensão (inferior - 8 V/div) e corrente (superior - 1 A/div) do filamento no preaquecimento. Escala de tempo - 0,5 s/div.

A Figura 12 mostra a envoltória da tensão do filamento da LF no preaquecimento, na ignição e em regime. A Figura 13, que mostra a parte final do intervalo de preaquecimento, possibilita calcular a resistência do filamento no instante de ignição, R_H , como sendo $10V/0,25A = 40$ Ohms. A resistência do filamento a frio, R_C , da LF T5 de 28 W é de 9,5 Ohms o que resulta em $R_H / R_C = 4,25$ que é o valor indicado como adequado para a emissão termo-iônica [7].

Analisando a Figura 14, pode-se concluir que no preaquecimento a tensão sobre a LF não ultrapassa 240 V (valor eficaz), que é o valor estabelecido pelo fabricante [1], enquanto que a tensão de ignição é de 720 V de pico.

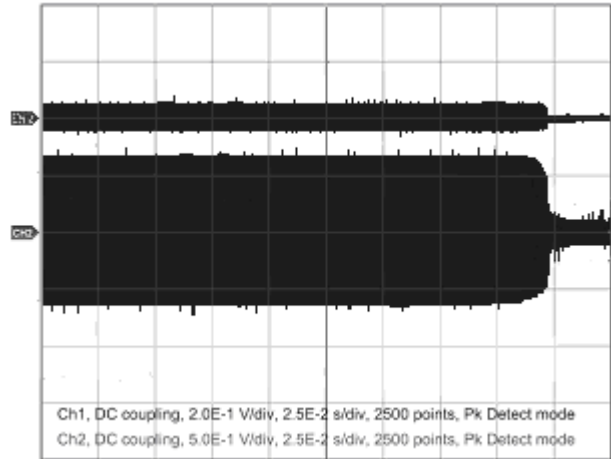


Fig. 13. Tensão (inferior - 8 V/div) e corrente (superior - 1 A/div) do filamento no preaquecimento. Escala de tempo - 0,025 s/div.

A Figura 15 possibilita verificar a comutação ZVS dos interruptores do inversor meia-ponte e avaliar a defasagem φ_I como aproximadamente $-36,7^\circ$. Esta defasagem é aceitável, pois, por um lado, é grande o suficiente para absorver o efeito negativo das tolerâncias dos componentes e, por outro lado, não é grande demais para aumentar demasiadamente a potência reativa que circula no reator.

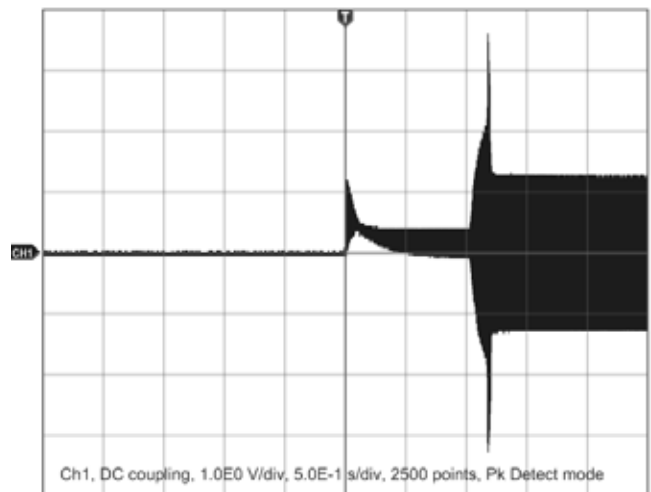


Fig. 14. Tensão da LF no preaquecimento e partida (200 V/div). Escala de tempo - 0,5 s/div.

Para verificar a eficiência do circuito de aquecimento dos filamentos foram feitas, em regime nominal, as medições da potência ativa de entrada (P_{ATIVA}) e da potência da LF (P_{LAMP}), com e sem o circuito $L_f - C_f$. A Tabela VI mostra os resultados obtidos. Estes resultados mostram que, em regime nominal, a influência do circuito de aquecimento é desprezível.

A eficiência do circuito de aquecimento foi avaliada, também, aplicando o método de medição de temperatura. Inicialmente, a LF foi acesa e ficou funcionando durante 30 minutos. Depois disso, a temperatura foi medida nas duas extremidades da LF onde ficam os seus filamentos.

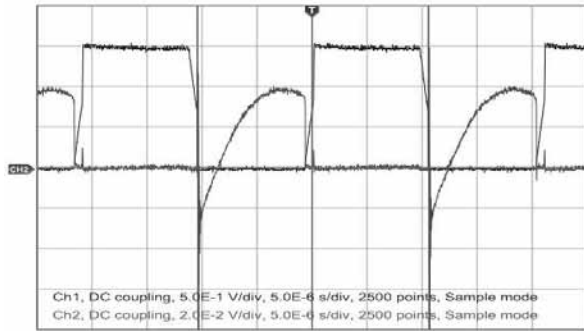


Fig. 15. Tensão (onda retangular - 100 V/div) e corrente (0,2 A/div) no MOSFET inferior do inversor meia-ponte. Escala de tempo - 5 μ s/div.

TABELA VI
Eficiência do Circuito de Aquecimento

Circuito	P _{ATIVA}	P _{LAMP}	Rendimento P _{LAMP} /P _{ATIVA}
Com $L_f - C_f$	32,98 W	27,7 W	0,84
Sem $L_f - C_f$	32,82 W	27,9 W	0,85

Na medição foi empregado um termômetro modelo Raytek MT. Numa extremidade foi verificada uma temperatura de 65° C, enquanto que na outra a temperatura foi de 63° C. Após a medição e sem desligar o protótipo, o primário L_f foi desconectado e a LF ficou funcionando por mais 30 minutos. Então, novamente foram medidas as temperaturas nas extremidades da LF, mostrando 63° C e 61° C, respectivamente. O pequeno valor da variação de temperatura na região dos filamentos permite concluir que o circuito de aquecimento praticamente não fornece energia aos filamentos em regime nominal.

IV. CONCLUSÕES

Foi proposto um método de projeto do reator multirressonante para LF T5 de 28 W com o aquecimento dos filamentos em tensão e sem o emprego de um interruptor eletrônico adicional. O método permite preencher todos os requisitos do projeto, levando em consideração as particularidades da LF T5. Os testes do protótipo verificaram seu funcionamento de acordo com as especificações e validaram a eficiência do método de projeto desenvolvido.

Com a entrada em vigor da norma IEC 60929, o projeto do circuito de preaquecimento começa a ser baseado nos quatro parâmetros que devem ser fornecidos pelo fabricante da LF. Infelizmente, a indisponibilidade destes parâmetros impossibilitou o uso da norma IEC 60929 no presente trabalho. Como continuidade do trabalho, além de uso desta norma, pode-se apontar o aperfeiçoamento do cálculo de

L_{f_1} e, também, a utilização do tempo de preaquecimento como um dos parâmetros do projeto.

REFERÊNCIAS

- [1] A. S. Santos, *et al.* "A influência do reator eletrônico com partida programada na vida útil da lâmpada fluorescente T5", *Eletrônica de Potência*, vol. 14, no. 3, pp. 157-164, Agosto 2009.
- [2] B.L. Hesterman, T.M. Poehlman, "A novel parallel-resonant programmed start electronic ballast", in *Proc. of IEEE Industrial Application Conference*, vol. 1, pp. 249-255, 1999.
- [3] D. Klien, "A new heating concept for fluorescent lamp ballasts", in *Proc. of IEEE Industrial Application Conference*, vol. 5, pp. 3428-3433, 2000.
- [4] C. S. Moo; W. M. Chen; H. C. Yen, "A Series-Resonant Electronic Ballast for Rapid-Start Fluorescent Lamps with Programmable Starting", in *Proc. of IEEE Power Conversion Conf.*, vol. 1, pp.95-99, 2002.
- [5] S. Bem-Yaakov, M. Shvartsas, M., 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, 2008.
- [6] F.E. Bisogno, Á.R. Seidel, R. Holsbach, R.N. do Prado, "Resonant filter applications in electronic ballast", in *Proc. of IEEE Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting. Conference Record*, vol. 1, pp. 348 - 354, 2002.
- [7] Rensselaer Polytechnic Institute. Lighting Research Center. *Reducing Barriers to the Use of High Efficiency Lighting Systems*. Final Report. 2002.

DADOS BIOGRÁFICOS

Mikhail Polonskii, nascido em 03/10/1956 em Stavropol (URSS) é engenheiro eletro-mecânico (1978) pela Escola Técnica Superior de Baumann (Moscou) e doutor em engenharia elétrica (1992) pela Universidade Tecnológica de Moscou (STANKIN). No Brasil, o doutorado foi revalidado pela UFSC, em 2004. Foi, de 1980 a 1986, pesquisador e projetista em instituições da indústria eletrônica em Moscou. Atualmente é professor titular da Universidade de Passo Fundo. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos, estabilidade de conversores eletrônicos, modelagem e simulação.

Victor Hugo Schulz é acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Passo Fundo, RS.

Marcos Visoto é acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade de Passo Fundo, RS.