

AJUSTE DA OPERAÇÃO DE REATORES ELETRÔNICOS, CONSIDERANDO OS ELETRODOS DE LÂMPADAS FLUORESCENTES DE CÁTODO QUENTE

Fabio T. Wakabayashi¹ Moacyr A. G. de Brito Castellane S. Ferreira Carlos A. Canesin²

UNESP – Campus de Ilha Solteira
Av. Brasil centro, 56, Cx. Postal 31,
CEP 15385-000, Ilha Solteira – SP, Brasil
e-mail¹: toshiaki@dee.feis.unesp.br
e-mail²: canesin@dee.feis.unesp.br

Resumo – Este artigo apresenta uma nova metodologia para o projeto e ajuste de reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes de cátodo quente. O clássico inversor *Half-Bridge* série-ressonante com carga em paralelo compõe o estágio de potência analisado neste artigo. De acordo com a metodologia proposta neste artigo, é possível estabelecer pontos de operação apropriados para a manutenção em níveis recomendados da temperatura dos eletrodos das lâmpadas, durante o pré-aquecimento e a operação em regime permanente.

Palavras-Chave – Modelo de Lâmpada Fluorescente, Reatores Eletrônicos, Elevada Frequência de Operação, Pré-Aquecimento, Operação em Regime-Permanente, Temperatura dos Eletrodos da Lâmpada.

SETTING THE OPERATION OF ELECTRONIC BALLASTS, CONSIDERING THE ELECTRODES OF HOT CATHODE FLUORESCENT LAMPS

Abstract – This paper presents a new methodology for the design and adjustment of electronic ballasts intended for hot cathode fluorescent lamps. The classical series-resonant parallel-loaded Half-Bridge inverter is the power stage analyzed in this paper. According to the methodology proposed in this paper, it is possible to set suitable operating points for sustaining the temperature of lamps electrodes within recommended levels, during the preheating and steady-state operation.

Keywords – Fluorescent Lamp Model, Electronic Ballasts, High Operating Frequency, Preheating, Steady-State Operation, Temperature of the Lamp Electrodes.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes têm sido extensivamente usados em sistemas de iluminação. O clássico inversor *Half-Bridge* série-ressonante com carga em paralelo, mostrado na Figura 1, é a topologia mais comumente empregada nos estágios de potência dos

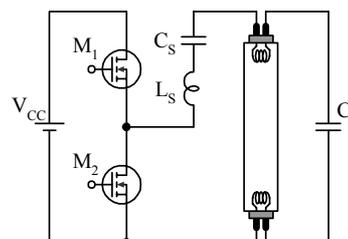


Fig. 1. Clássico inversor *Half-Bridge* série-ressonante com carga em paralelo.

reatores eletrônicos [1-3]. Esta topologia é simples e de baixo custo, o que a torna apropriada para este tipo de aplicação.

Apesar da ampla utilização desta estrutura, as metodologias de projeto existentes na literatura normalmente apresentam lacunas na apresentação de análises detalhadas sobre as condições de operação dos eletrodos das lâmpadas fluorescentes [2-8]. Esta análise é importante porque indica se as lâmpadas estão sendo operadas de forma adequada. De acordo com a literatura, durante a operação, a temperatura dos eletrodos deve estar entre 700°C e 1.000°C para evitar desgastes prematuros em suas coberturas emissivas e a conseqüente redução da vida média das lâmpadas [9-11].

Tendo em vista que é relativamente difícil medir diretamente a temperatura dos eletrodos, foram estabelecidas recomendações e normas associadas a parâmetros correlatos, como a tensão sobre os eletrodos durante o pré-aquecimento e a operação em regime permanente [12 e 13].

Contudo, para o pré-aquecimento, estudos recentes têm indicado que é melhor avaliar a razão entre a “resistência à quente” (R_h , medida durante o pré-aquecimento) e a “resistência à frio” (R_c , medida com a lâmpada desligada durante um intervalo de tempo de ao menos cinco minutos) dos eletrodos [9-11]. De acordo com a literatura, a razão R_h/R_c (daqui por diante denominada R_{hc}) deve estar entre 4,25 (equivalendo a 700°C) e 6,25 (equivalendo a 1.000°C) no instante da ignição da lâmpada. Neste caso, as lâmpadas sobreviverão por um maior número de ignições, aumentando o intervalo de tempo que caracteriza suas vidas médias.

Considerando o inversor mostrado na Figura 1, é possível estabelecer um pré-aquecimento baseado na imposição de corrente com valor eficaz constante ($i_{ph(ef)}$) através dos eletrodos. Durante um dado intervalo de tempo (t_{ph}), o valor de R_{hc} deverá aumentar até atingir valores entre 4,25 e 6,25. Portanto, a frequência de comutação do inversor ($f_{HB(ph)}$) tem de ser ajustada para prover o valor requerido de $i_{ph(ef)}$.

Após o término de t_{ph} , a frequência de comutação deve ser modificada, na direção da frequência de ressonância do cir-

Artigo submetido em 6 de março de 2006. Primeira revisão em 25 de março de 2006. Segunda revisão em 19 de outubro de 2006. Aceito por recomendação do Editor Richard M. Stephan.

cuído (f_{res}), resultando em elevados valores de tensão sobre a lâmpada e possibilitando sua ignição.

Após a ignição, a frequência de comutação deve ser novamente ajustada, assumindo o valor nominal para a operação em regime permanente ($f_{HB(ss)}$). Durante o regime permanente, é necessário impor que o valor da tensão sobre os eletrodos esteja em concordância com as normas ANSI [13].

A Figura 2 mostra as principais formas de onda ideais relacionadas com o pré-aquecimento e com a operação em regime permanente, conforme descrição anterior, considerando as recomendações sobre as condições de operação dos eletrodos, aplicadas a uma lâmpada F32T8.

Neste ponto, é importante enfatizar que, na literatura, não existem metodologias de projeto capazes de prever os valores de $i_{ph(ef)}$ e de $f_{HB(ph)}$ que devem ser impostos pelo reator, de tal forma que o pré-aquecimento ocorra conforme valores especificados de R_{hc} e t_{ph} . Além disso, considerando a operação em regime permanente, também não há metodologias documentadas que realizem a previsão da tensão sobre os eletrodos, levando-se em conta o circuito mostrado na Figura 1.

Em função disto, este artigo tem o objetivo de apresentar análises do pré-aquecimento e da operação em regime permanente, com ênfase na proposição de um procedimento sistematizado de projeto.

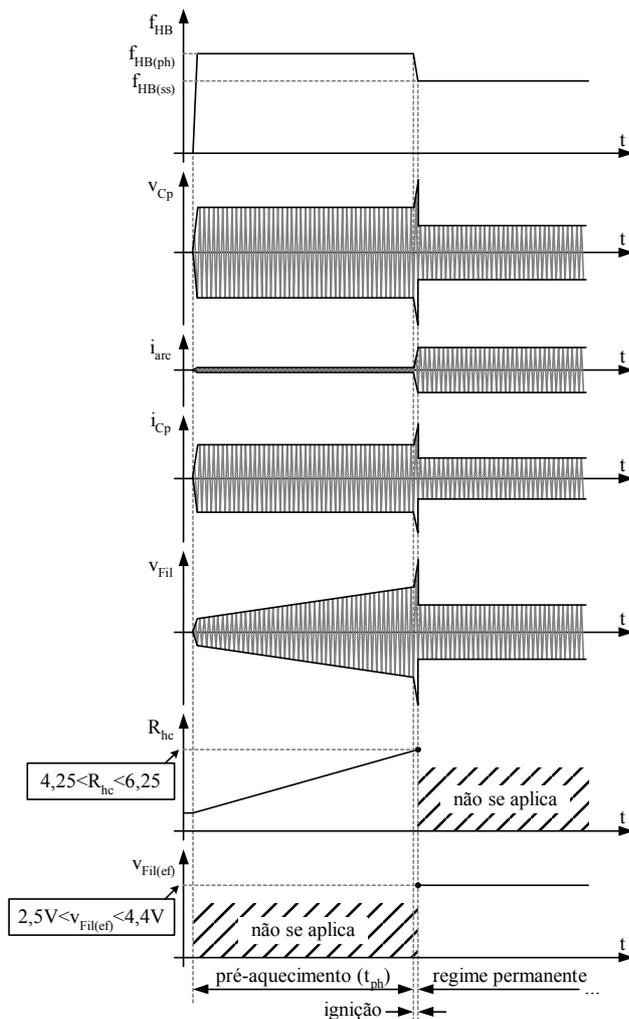


Fig. 2. Principais formas de onda idealizadas relacionadas ao processo de pré-aquecimento e à operação em regime permanente.

Quatro seções adicionais compõem este trabalho.

A seção II é dedicada à apresentação da análise teórica do circuito equivalente do reator eletrônico + lâmpada, durante o processo de pré-aquecimento.

Na seção III, é apresentada a análise do circuito equivalente do reator eletrônico + lâmpada no decorrer da operação em regime permanente.

Na seção IV são apresentados exemplos de aplicação das análises desenvolvidas nas seções II e III, bem como resultados experimentais para comprovar a validade das mesmas.

Algumas considerações finais são apresentadas na seção V, esclarecendo algumas questões relacionadas à metodologia proposta e à sua aplicação em linhas de produção de reatores de grande escala.

Para finalizar, as conclusões oriundas da comparação entre resultados experimentais e análises teóricas são apresentadas na seção VI.

II. PROCESSO DE PRÉ-AQUECIMENTO

A primeira parte desta seção apresenta um modelo matemático da lâmpada fluorescente. Na segunda parte, o reator eletrônico é analisado, levando à obtenção de equações que permitem a avaliação do pré-aquecimento.

A. O Modelo da Lâmpada Fluorescente, durante o Processo de Pré-Aquecimento

Recentemente, um novo modelo matemático foi desenvolvido para representar R_{hc} em função do tempo, considerando a injeção de uma corrente com valor eficaz constante através dos eletrodos [14]. A Figura 3 mostra a representação gráfica do modelo, durante o pré-aquecimento.

Este modelo, proposto em [14], é baseado em uma lâmpada fluorescente F32T8 e é representado pela expressão:

$$R_{hc}(i_{ph(ef)}, t) = 1 + r_1 \cdot \left[\exp\left(\frac{i_{ph(ef)}}{r_2}\right) - 1 \right] \cdot t \quad (1)$$

sendo: r_1 expresso em $[s^{-1}]$, e r_2 expresso em $[A]$.

É interessante observar que, em função da estratégia de pré-aquecimento, uma vez fixado o valor de $i_{ph(ef)}$, a equação passa a representar uma reta, com origem em $[t=0; R_{hc}=1]$ e com declividade definida pelo fator $r_1 \cdot [\exp(i_{ph(ef)}/r_2) - 1]$.

Os coeficientes r_1 e r_2 são dependentes das características dos filamentos que compõem os eletrodos. Tendo em vista que lâmpadas de diferentes fabricantes ou de diferentes modelos (por exemplo, branca fria, super luz do dia, etc.) podem apresentar variação considerável destas características, os coeficientes precisam ser determinados para cada diferente modelo de lâmpada fluorescente (mesmo que a especificação básica seja a mesma, tal como F32T8). Apesar disto, a meto-

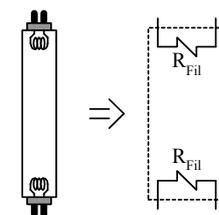


Fig. 3. Modelo da lâmpada fluorescente, antes da ignição (durante o processo de pré-aquecimento).

dologia de determinação dos coeficientes é única e segue as recomendações apresentadas em [14].

Para demonstrar as diferenças entre os coeficientes de diferentes lâmpadas, a equação de R_{hc} foi obtida para dois tipos de lâmpadas F32T8: Branca Fria da GE e Branca Confort da Sylvania. Os coeficientes r_1 e r_2 são mostrados na Tabela I.

A Figura 4 mostra uma comparação entre resultados experimentais (pontos) e resultados teóricos (linhas) obtidos a partir de (1). Os valores de R_c foram medidos com um ohmímetro de precisão. De acordo com as medições, R_c vale aproximadamente 2,489 Ω para a lâmpada da GE e 2,460 Ω para a da Sylvania. Na Figura 4, nota-se que a equação de R_{hc} é bastante precisa, permitindo realizar o projeto e/ou ajuste do pré-aquecimento a partir de investigações teóricas.

As normas ANSI estabelecem um intervalo de tempo mínimo (t_{ph}) de 500ms para o pré-aquecimento [13]. Além disso, apesar da ausência de um limite máximo, recomenda-se que o mesmo seja ajustado em torno de 1,5 segundos, para evitar demora “excessiva” na ignição da lâmpada, o que causaria a falsa impressão de mau funcionamento do sistema.

A partir das recomendações para R_{hc} e t_{ph} , é possível identificar uma área de operação para o pré-aquecimento, a qual é representada nas Figuras 5.a e 5.b.

Usando (1), é possível determinar limites para os valores de $i_{ph(ef)}$ injetados nos eletrodos das lâmpadas F32T8 em questão, com o objetivo de obter um pré-aquecimento adequado. Portanto, a Figura 5 mostra também os valores mínimos e máximos que cruzam a área de operação. Assim, o reator eletrônico deverá ser projetado para injetar corrente nos eletrodos, obedecendo aos limites estipulados.

B. Análise Teórica do Processo de Pré-Aquecimento

As análises teóricas desenvolvidas neste artigo são baseadas na técnica de aproximação fundamental [1 e 3].

Durante o pré-aquecimento, a coluna de gás da lâmpada é considerada como um circuito aberto, em concordância com o modelo da lâmpada apresentado na seção anterior. Além

TABELA I
Coeficientes do Modelo da Lâmpada Fluorescente, Considerando Dois Tipos Diferentes de Lâmpada

Coeficiente	Fabricante e Modelo	GE F32T8/BF Branca Fria	Sylvania F32W/T8 Branca Confort
	r_1 [s^{-1}]		0,112
r_2 [A]		0,155	0,168

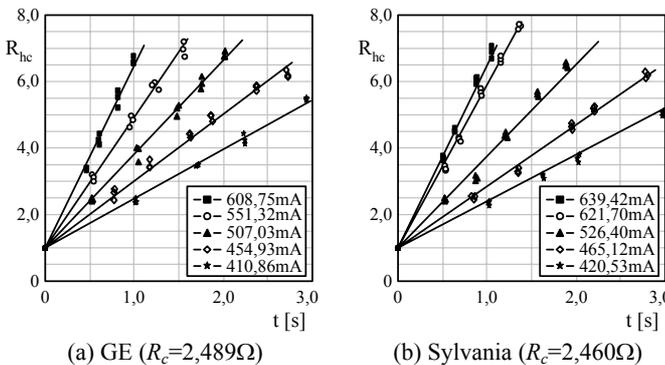


Fig. 4. Comparação entre dados experimentais (pontos) e resultados teóricos (linhas) para R_{hc} .

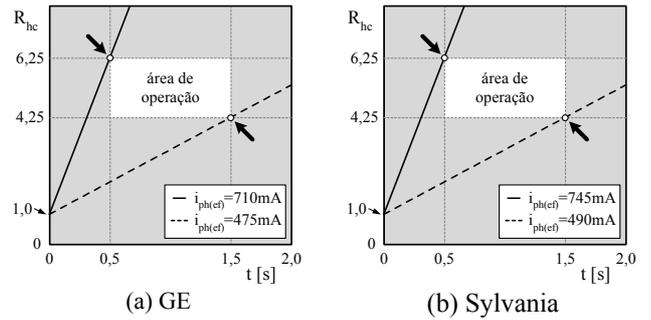


Fig. 5. Variação aceitável de $i_{ph(ef)}$, considerando a área de operação definida para o processo de pré-aquecimento.

disso, as resistências equivalentes dos filamentos são relativamente baixas quando comparadas à impedância total do circuito. Por isso, é possível desprezar seus valores na análise do circuito mostrado na Figura 6.a, fato que traz grande simplificação na análise do circuito equivalente do reator eletrônico + lâmpada fluorescente, representado pela Figura 6.b.

A aproximação fundamental é representada em (2):

$$v_{AB1}(t) = \frac{2}{\pi} V_{CC} \cdot \text{sen}(\omega_{HB(ph)} \cdot t) \quad (2)$$

sendo: $v_{AB1}(t)$ a componente harmônica fundamental da tensão aplicada sobre os pontos A e B ,

$$\omega_{HB(ph)} = 2 \cdot \pi \cdot f_{HB(ph)},$$

$f_{HB(ph)}$ a frequência de comutação de M_1 e M_2 , durante o processo de pré-aquecimento,

Com esta aproximação e com o circuito da Figura 6.b, partindo de uma notação fasorial, é possível escrever:

$$\dot{V}_{AB1} = Z_{ph} \cdot \dot{I}_{ph} \quad (3)$$

sendo: $\dot{V}_{AB1} = v_{AB1(ef)} \angle 0^\circ$ (4)

$$Z_{ph} = j \cdot \omega_{HB(ph)} \cdot L_s + \frac{1}{j \cdot \omega_{HB(ph)} \cdot C_s} + \frac{1}{j \cdot \omega_{HB(ph)} \cdot C_p} \quad (5)$$

De (3), tem-se:

$$\left| \frac{\dot{I}_{ph}}{\dot{V}_{AB1}} \right| = \frac{1}{|Z_{ph}|} \quad (6)$$

Com (4), (5) e (6), admitindo valores eficazes, obtém-se:

$$i_{ph(ef)} = \left| \frac{\omega_{HB(ph)} \cdot C_{eq}}{\omega_{HB(ph)}^2 \cdot L_s \cdot C_{eq} - 1} \right| \cdot v_{AB1(ef)} \quad (7)$$

sendo: $C_{eq} = \frac{C_s \cdot C_p}{C_s + C_p}$ (8)

e: $v_{AB1(ef)} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} V_{CC}$ (9)

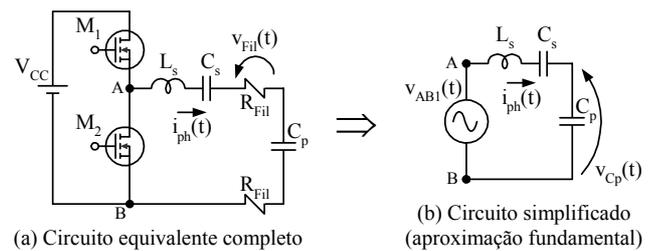


Fig. 6. Circuito equivalente do reator eletrônico + lâmpada fluorescente, durante o processo de pré-aquecimento.

O valor obtido com (7) representa a corrente especificada para o pré-aquecimento. Com esta equação, pode-se calcular a frequência de comutação ($f_{HB(ph)}$) que deve ser imposta ao inversor *Half-Bridge*, com o objetivo de garantir a injeção de um valor eficaz constante de corrente através dos eletrodos.

Uma outra equação que pode ser obtida a partir da Figura 6.b é a seguinte:

$$\dot{V}_{Cp} = \frac{1}{j \cdot \omega_{HB(ph)} \cdot C_p} \cdot \dot{I}_{ph} \quad (10)$$

A partir de (3), (4), (6) e (10), o valor de pico-a-pico da tensão sobre C_p pode ser expresso por (11).

$$v_{Cp(pp)} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \left| \frac{C_{eq}}{C_p \cdot (\omega_{HB(ph)}^2 \cdot L_s \cdot C_{eq} - 1)} \right| \cdot v_{AB1(ef)} \quad (11)$$

A tensão $v_{Cp}(t)$ pode ser considerada como sendo, aproximadamente, a tensão aplicada sobre a lâmpada durante o pré-aquecimento. Assim, com (11), é possível verificar que frequência de comutação é necessária para a ignição da lâmpada, ou seja, para a imposição de valores de tensão suficientes para o estabelecimento do primeiro arco elétrico através da coluna de gás. Para prover a ignição da lâmpada, a frequência de comutação terá de ser alterada de $f_{HB(ph)}$ para um novo valor, mais próximo da frequência de ressonância (f_{res}) do circuito representado pela Figura 6.b. Esta frequência de ressonância é definida de acordo com (12).

$$f_{res} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_s \cdot C_{eq}}} \quad (12)$$

Portanto, usando (1), (7) e (11), é possível investigar o pré-aquecimento antes de implementar o reator, reduzindo a necessidade de excessivos ajustes empíricos no protótipo.

III. OPERAÇÃO EM REGIME PERMANENTE

O objetivo desta análise é a determinação teórica da tensão aplicada sobre os eletrodos da lâmpada durante a operação em regime permanente. Para tanto, é necessário um modelo matemático capaz de representar os eletrodos com boa precisão. Neste Contexto, o modelo apresentado em [15] é considerado apropriado, já que sua determinação é baseada na reconstrução da forma de onda da tensão sobre os eletrodos, permitindo a obtenção de bons resultados. Este modelo é resumidamente apresentado na primeira parte desta seção.

Na seqüência, a análise teórica do circuito equivalente é apresentada. A partir das equações determinadas, é possível prever o valor da tensão sobre os eletrodos, o que possibilita a análise teórica da operação em regime permanente, de acordo com as recomendações das normas ANSI [13].

A. O Modelo da Lâmpada Fluorescente, durante a Operação em Regime Permanente

O modelo apresentado em [15] é baseado no conjunto de resistências mostrado na Figura 7. Neste modelo, os valores de R_{Ls} e R_{Cp} são dependentes das correntes processadas em cada ramo da resistência equivalente dos eletrodos (R_{Fil}).

As expressões usadas para calcular R_{Ls} e R_{Cp} são apresentadas abaixo:

$$R_{Cp} = c_0 + c_1 \cdot i_{Cp(ef)} \quad (13)$$

sendo: c_0 expresso em $[\Omega]$, e c_1 , em $[\Omega/A]$.

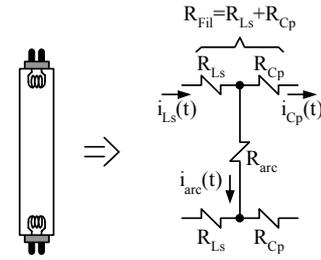


Fig. 7. Modelo da lâmpada fluorescente, após a ignição (durante a operação em regime permanente).

$$R_{Ls} = \frac{p_0 + p_1 \cdot c_0 \cdot i_{Cp(ef)}^2 + p_1 \cdot c_1 \cdot i_{Cp(ef)}^3}{i_{Ls(ef)}^2} \quad (14)$$

sendo: p_0 expresso [W], e p_1 um coeficiente adimensional.

$$R_{Fil} = R_{Ls} + R_{Cp} \quad (15)$$

A coluna de gás pode ser representada por outra resistência equivalente (R_{arc} , na Figura 7). De acordo com [15], o valor de R_{arc} é calculado a partir de (16).

$$R_{arc} = \frac{(v_0 - v_1 \cdot P_{arc})^2}{P_{arc}} \quad (16)$$

sendo: P_{arc} o valor eficaz da potência processada na coluna de gás, v_0 expresso [V], e v_1 , em [V/W].

Os valores dos coeficientes c_0 , c_1 , p_0 , p_1 , v_0 e v_1 são dependentes das características dos filamentos que compõem os eletrodos (espessura do filamento, tipo de enrolamento, cobertura emissiva, etc.) e também das características da coluna de descarga da lâmpada (tipo de gás, pressão interna, quantidade de mercúrio, etc.). Sendo assim, os valores dos coeficientes devem ser determinados para cada diferente tipo de lâmpada fluorescente e não apenas para cada diferente fabricante. Destaca-se que, apesar das diferenças nos valores, os coeficientes são determinados através de uma única metodologia, a qual é detalhadamente apresentada em [15].

A Tabela II mostra os coeficientes obtidos para duas lâmpadas F32T8 de fabricantes diferentes, evidenciando que as lâmpadas realmente apresentam diferentes características.

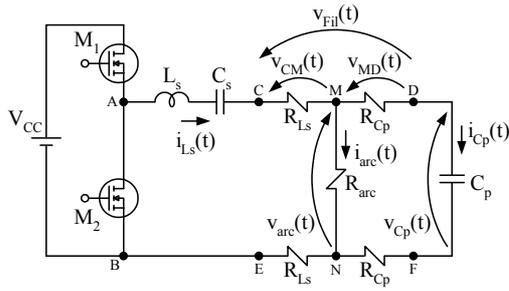
B. Análise Teórica da Operação em Regime Permanente

De acordo com (13) e (14), é necessário calcular os valores eficazes de $i_{Ls}(t)$ e $i_{Cp}(t)$ para que se possa obter os valores de R_{Ls} e R_{Cp} . Entretanto, analisando a Figura 8.a, a determinação de $i_{Ls(ef)}$ e $i_{Cp(ef)}$ depende dos valores de R_{Ls} e R_{Cp} . Desta forma, é possível verificar que um procedimento iterativo é necessário para a determinação de R_{Ls} , R_{Cp} , $i_{Ls(ef)}$ e $i_{Cp(ef)}$.

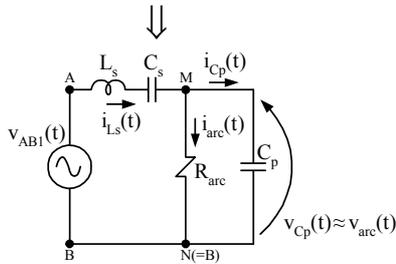
Contudo, é fato que os valores de R_{Ls} e R_{Cp} são muito me-

TABELA II
Coeficientes do Modelo da Lâmpada Fluorescente, Considerando Dois Tipos Diferentes de Lâmpada

Fabricante e Modelo	GE	Sylvania
	F32T8/BF Branca Fria	F32W/T8 Branca Confort
c_0 [Ω]	4,52252	-0,21071
c_1 [Ω/A]	15,07774	20,59755
p_0 [W]	0,01690	0,38155
p_1 [adimensional]	0,35265	0,84179
v_0 [V]	174,07329	173,04403
v_1 [V/W]	1,38320	1,22715



(a) Circuito equivalente completo



(b) Circuito simplificado (aproximação fundamental)

Fig. 8. Circuito equivalente do reator eletrônico + lâmpada fluorescente, durante a operação em regime permanente.

nores do que os valores das demais resistências/reatâncias do circuito da Figura 8.a. Portanto, em uma primeira abordagem, uma grande simplificação pode ser obtida se R_{Ls} e R_{Cp} forem ignorados no cálculo de $i_{Ls(ef)}$ e $i_{Cp(ef)}$. A Figura 8.b ilustra o circuito equivalente onde apenas a coluna de descarga é usada para representar a lâmpada fluorescente. Desta figura, tem-se:

$$Z_s = j\omega_{HB(ss)}L_s + \frac{1}{j\omega_{HB(ss)}C_s} \quad (17)$$

$$Z_p = \frac{R_{arc}}{1 + j\omega_{HB(ss)}R_{arc}C_p} \quad (18)$$

sendo: $\omega_{HB(ss)} = 2\pi f_{HB(ss)}$, e $f_{HB(ss)}$ a frequência de comutação de M_1 e M_2 , durante a operação em regime permanente.

Da Figura 8.b, pode-se obter também:

$$\dot{I}_{Ls} = \frac{\dot{V}_{AB1}}{Z_s + Z_p} \quad (19)$$

$$\dot{V}_{arc} = \dot{V}_{AB1} - Z_s \cdot \dot{I}_{Ls} \quad (20)$$

$$\dot{I}_{Cp} = \frac{\dot{V}_{arc}}{j\omega_{HB(ss)}C_p} \quad (21)$$

De (19) e (21), os valores eficazes $i_{Ls(ef)}$ e $i_{Cp(ef)}$ podem ser calculados usando as seguintes expressões:

$$i_{Ls(ef)} = \left| \dot{I}_{Ls} \right| \quad (22)$$

$$i_{Cp(ef)} = \left| \dot{I}_{Cp} \right| \quad (23)$$

Finalmente, da Figura 8.b, é possível obter as expressões:

$$\dot{V}_{Fil} = R_{Ls} \cdot \dot{I}_{Ls} + R_{Cp} \cdot \dot{I}_{Cp} \quad (24)$$

e:
$$v_{Fil(ef)} = \left| \dot{V}_{Fil} \right| \quad (25)$$

Atualmente, há programas computacionais poderosos, dedicados a análises matemáticas, tais como o MathCAD e/ou o MATLAB. Estes programas são capazes de lidar com as equações definidas neste artigo, na exata forma com que elas foram apresentadas. Assim, os autores decidiram não expandir/simplificar as equações, porque o foco deste artigo concentra-se na validação das análises.

IV. EXEMPLO DE PROJETO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os passos iniciais do projeto de reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes de cátodo quente devem ser baseados na operação em regime permanente, com potência de saída nominal (P_{arc}). Nesta parte do projeto, é necessário calcular os valores de L_s , C_s e C_p capazes de prover a potência nominal de saída em conjunto com uma tensão adequada aplicada sobre os eletrodos, de acordo com as normas ANSI [13].

Seguindo as recomendações apresentadas em [16], obtêm-se valores de L_s , C_s e C_p que garantem a operação com potência nominal, mas não é possível avaliar a tensão sobre os eletrodos. Para tanto, torna-se necessário empregar a expressão (25). Se o valor obtido estiver em concordância com as normas ANSI [13], então é possível avançar no projeto, rumo ao pré-aquecimento. Em caso contrário, é necessário calcular novos valores para L_s , C_s e C_p , de acordo com [16], até que o valor obtido com (25) seja considerado satisfatório.

É importante notar que C_p está conectado em paralelo com a lâmpada, mas em série com os eletrodos. Assim, uma diminuição em sua reatância (ou seja, um aumento em sua capacitância) resultará em um aumento de $i_{Cp}(t)$ e $i_{Ls}(t)$, com conseqüente aumento de R_{Fil} – conforme (13), (14) e (15) – e da tensão sobre os eletrodos – de acordo com (24) e (25). Assim, é possível ajustar $v_{Fil(ef)}$ através da mudança de C_p (e do cálculo de um novo valor de L_s , de acordo com [16]).

O projeto do pré-aquecimento tem um grau de flexibilidade adicional, porque é possível ajustar a frequência de comutação de acordo com resultados obtidos a partir de (7). Esta maior flexibilidade é a razão pela qual o pré-aquecimento é projetado após a análise da operação em regime permanente.

O exemplo de projeto apresentado nos subtópicos seguintes é baseado nos dados de entrada e saída mostrados na Tabela III.

A. Ajuste da Operação em Regime Permanente

Com base em [16], é possível obter diversos conjuntos diferentes de valores para L_s , C_s e C_p . A Tabela IV mostra quatro diferentes conjuntos capazes de garantir a operação nominal para cada lâmpada, calculados com as recomendações de [16] e com o modelo representado por (16).

TABELA III
Dados de Entrada e Saída usados no Exemplo de Projeto

Parâmetro	Valor
V_{CC}	250 V
$f_{HB(ss)}$	50 kHz
P_{arc}	32 W
Lâmpada	F32T8
	(Branca Fria da GE e Branca Confort da Sylvania)
$v_{Fil(ef)}$	2,5 V até 4,4 V (de acordo com [13])
R_{hc}	4,25 até 6,25 (de acordo com [9-11])
t_{ph}	500 ms (de acordo com [13]) até 1,5 s

TABELA IV
Filtros Ressonantes Obtidos com a Metodologia apresentada em [23]

Lâmpada	Filtro	C_s [nF]	C_p [nF]	L_s [mH]
GE F32T8/BF Branca Fria	1	180	5,6	1,46
	2	180	6,8	1,51
	3	180	8,2	1,49
	4	180	10	1,40
Sylvania F32W/T8 Branca Confort	5	180	4,7	1,39
	6	180	5,6	1,51
	7	180	6,8	1,55
	8	180	8,2	1,52

No entanto, é necessário avaliar a tensão sobre os eletrodos para se verificar quais filtros estão em concordância com as normas ANSI [13]. Empregando-se as equações (17) até (25), é possível obter uma boa estimativa do valor de $v_{Fil(ef)}$, sem que haja a necessidade de implementação de protótipos.

Para validar os resultados obtidos com (25), oito protótipos foram implementados com os parâmetros da Tabela IV.

A Figura 9 mostra o arranjo experimental usado para a medição dos parâmetros envolvidos no projeto. Os valores eficazes da tensão sobre os eletrodos foram medidos com um osciloscópio digital (TDS3054B – Tektronix) e uma ponteira de tensão (Tek P6139A – Tektronix).

As Figuras 10 e 11 mostram as formas de onda das tensões aplicadas sobre os eletrodos ($v_{Fil}(t)$), de acordo com alguns dos diferentes filtros e das duas diferentes lâmpadas fluorescentes F32T8. Nestas figuras, nota-se que os valores de L_s , C_s e C_p usados nos filtros possuem grande influência sobre $v_{Fil}(t)$.

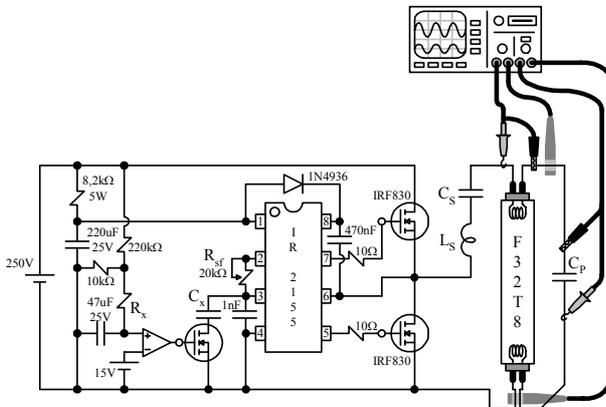


Fig. 9. Diagrama esquemático simplificado do arranjo experimental.

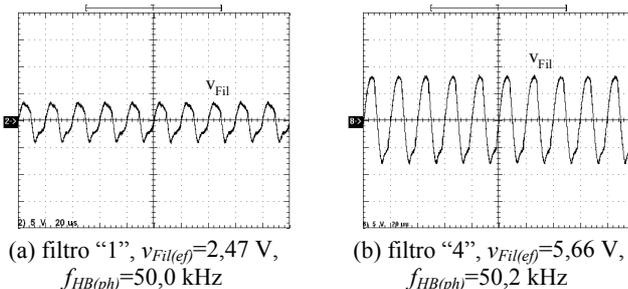


Fig. 10. Formas de onda de tensão aplicada sobre os eletrodos da lâmpada da GE, de acordo com dois diferentes filtros. Escalas horizontais: 5V/div. Escalas verticais: 20 μ s/div

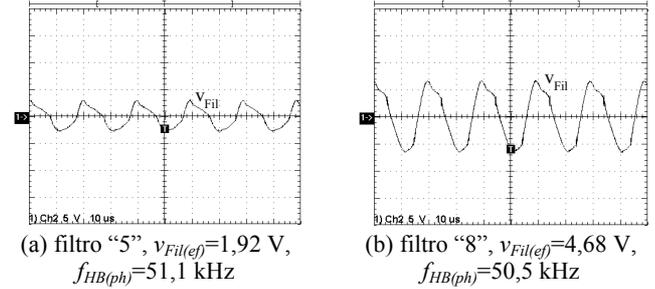


Fig. 11. Formas de onda de tensão aplicada sobre os eletrodos da lâmpada da Sylvania, de acordo com dois diferentes filtros. Escalas horizontais: 5V/div. Escalas verticais: 10 μ s/div

A Tabela V mostra uma comparação entre os resultados teóricos e experimentais obtidos para $v_{Fil(ef)}$. A última coluna mostra o erro entre os valores teóricos e experimentais, em porcentagem. De acordo com estas comparações, é possível assumir que os resultados obtidos com (25) podem ser utilizados para guiar a escolha de um filtro adequado à operação em regime permanente, de acordo com as normas ANSI [13].

Mesmo com os erros percentuais presentes em função das simplificações adotadas na análise teórica, os valores previstos para $v_{Fil(ef)}$ estão próximos dos valores medidos, indicando que pequenos ajustes empíricos nos protótipos serão suficientes para a obtenção de pontos de operação adequados.

Na Tabela V, verifica-se que apenas os filtros “2”, “3” e “7” podem fornecer valores adequados para $v_{Fil(ef)}$ durante a operação em regime permanente. Por conta disto, torna-se possível avançar no projeto do reator eletrônico, avaliando então o pré-aquecimento obtido com estes filtros.

B. Ajuste do Processo de Pré-Aquecimento

A estratégia escolhida para o pré-aquecimento é baseada na injeção de uma corrente com valor eficaz constante através dos eletrodos, com o objetivo de aumentar R_{hc} , até que se atinja um valor adequado (ou seja, $4,25 < R_{hc} < 6,25$).

De acordo com a Figura 5, nota-se que valores de $i_{ph(ef)}$ entre 475mA e 710mA são apropriados a lâmpada fabricada pela GE. Já no caso da lâmpada fabricada pela Sylvania, a corrente injetada deve ter um valor entre 490 mA e 745 mA.

Após a escolha de $i_{ph(ef)}$, é necessário calcular a frequência de comutação $f_{HB(ph)}$ que deve ser imposta ao inversor *Half-Bridge* durante o pré-aquecimento. Esta frequência de comutação pode ser calculada com a equação (7).

O último passo neste procedimento de projeto é dedicado à determinação do valor de pico-a-pico da tensão aplicada

TABELA V
Comparação entre Resultados Teóricos e Experimentais da Tensão aplicada sobre os Eletrodos, durante a Operação em Regime Permanente

Lâmpada	Filtro	$v_{Fil(ef)}$ [V] (teórico)	$v_{Fil(ef)}$ [V] (medição)	ε [%]
GE F32T8/BF Branca Fria	1	2,18	2,47	11,74
	2	2,96	3,31	10,57
	3	4,00	4,25	5,88
	4	5,55	5,66	1,94
Sylvania F32W/T8 Branca Confort	5	2,20	1,92	14,58
	6	2,66	2,37	12,24
	7	3,67	3,47	5,76
	8	4,70	4,68	0,43

sobre a lâmpada ($v_{Cp(pp)}$), no decorrer do processo de pré-aquecimento. Este valor é calculado a partir de (11) e do valor de $f_{HB(ph)}$ fornecido por (7).

Durante o pré-aquecimento, o valor de $v_{Cp(pp)}$ deve ser mantido abaixo de certo limite, evitando que a ignição da lâmpada ocorra em momento “inoportuno” (ou seja, quando $R_{hc} < 4,25$). De acordo com resultados experimentais das lâmpadas F32T8 empregadas nos protótipos, o valor de $v_{Cp(pp)}$ precisa ser menor do que 600 V para evitar a ignição. Portanto, será adotado um limite de 575 V para que se obtenha uma pequena folga, dando margem para que eventuais arredondamentos não interfiram fortemente no projeto.

Supondo uma situação em que o valor calculado de $v_{Cp(pp)}$ venha a ser maior do que 575 V, será necessário reiniciar o projeto do pré-aquecimento, escolhendo um outro valor de $i_{ph(ef)}$, na tentativa de se obter, conseqüentemente, novos valores de $f_{HB(ph)}$ e $v_{Cp(pp)}$. Informa-se que valores menores de $i_{ph(ef)}$ irão implicar na obtenção de valores menores de $v_{Cp(pp)}$.

O filtro “2” será utilizado para exemplificar o projeto do pré-aquecimento referente à lâmpada da GE. Quanto ao projeto do pré-aquecimento dos filtros “3” e “7”, basta repetir o procedimento apresentado a seguir.

De início, adota-se $i_{ph(ef)} = 550$ mA, em conformidade com os limites apresentados na Figura 5.a. A Figura 12.a mostra a variação teórica de R_{hc} em função do tempo, traçada com a expressão (1), levando-se em consideração a lâmpada da GE e o valor eficaz especificado para a corrente. Com base nesta figura, nota-se que o pré-aquecimento deve ser sustentado por um intervalo de tempo compreendido entre 902 ms e 1,456 s, o que levará à obtenção de valores adequados de R_{hc} .

Considerando os valores dos parâmetros ressonantes do filtro “2” e utilizando as equações (7) e (11), obtém-se:

$$f_{HB(ph)} = 62,6 \text{ kHz, e } v_{Cp(pp)} = 582,1 \text{ V.}$$

Tendo em vista que o valor de $v_{Cp(pp)}$ é superior a 575 V, o processo de pré-aquecimento não pode ser completado porque a lâmpada poderá “naturalmente” entrar em ignição. Então, para o filtro “2”, é necessário escolher um valor menor de $i_{ph(ef)}$, com o objetivo de sustentar o processo de pré-aquecimento, evitando-se uma ignição “indevida” (ou seja, quando $R_{hc} < 4,25$).

A Figura 12.b mostra a variação teórica de R_{hc} , quando $i_{ph(ef)} = 500$ mA. De acordo com esta figura, o processo de pré-aquecimento deve ser sustentado durante um intervalo de tempo compreendido entre 1,266 s e 1,5 s (limite máximo estabelecido para o término do processo). Além disso, empregando-se o novo valor eficaz da corrente junto com os parâmetros do filtro “2” e as equações (7) e (11), é possível

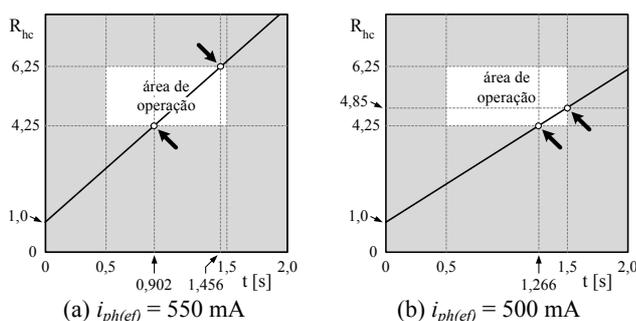


Fig. 12. Variação aceitável de t_{ph} para o término do processo de pré-aquecimento da lâmpada fabricada pela GE.

recalcular os valores de $f_{HB(ph)}$ e de $v_{Cp(pp)}$, resultando em:

$$f_{HB(ph)} = 63,9 \text{ kHz, e } v_{Cp(pp)} = 518,3 \text{ V.}$$

O novo valor de $v_{Cp(pp)}$ é suficientemente reduzido para que se evite a ignição da lâmpada, o que significa que o processo de pré-aquecimento pode ser sustentado pelo tempo que for necessário. Neste caso, $t_{ph} = 1,5$ s é especificado como sendo o intervalo de tempo destinado à execução do processo de pré-aquecimento com o filtro “2”.

Da equação (12), durante o processo de pré-aquecimento, a frequência de ressonância associada ao filtro “2” é:

$$f_{res} = 50,62 \text{ kHz.}$$

Aplicando-se o procedimento descrito até aqui nos filtros “3” e “7”, é possível configurar seus processos de pré-aquecimento, resultando nos seguintes dados:

- filtro “3”: $i_{ph(ef)} = 550$ mA,
 $v_{Cp(pp)} = 513,0$ V,
 $f_{HB(ph)} = 58,9$ kHz,
 $f_{res} = 46,63$ kHz e
 $902 \text{ ms} < t_{ph} < 1,456$ s.
- filtro “7”: $i_{ph(ef)} = 530$ mA,
 $v_{Cp(pp)} = 566,5$ V,
 $f_{HB(ph)} = 61,9$ kHz,
 $f_{res} = 49,94$ kHz e
 $1,161 \text{ s} < t_{ph} < 1,5$ s.

Para validar os pontos de operação especificados para os filtros “2”, “3” e “7”, três protótipos foram implementados de acordo com o circuito esquemático mostrado na Figura 9. Utilizando o circuito mostrado nesta figura, é possível ajustar o processo de pré-aquecimento de cada protótipo (ou seja, o intervalo de tempo t_{ph} e a frequência de comutação $f_{HB(ph)}$), de acordo com os valores calculados anteriormente. Este circuito é baseado na técnica do “capacitor comutado” [17], apropriada para aplicações com alguns circuitos integrados (CIs) da família IR215x, da International Rectifier. O valor de t_{ph} é ajustado a partir de R_x . Os valores de $f_{HB(ph)}$ e $f_{HB(ss)}$ são ajustados através de R_{sf} e C_x , de acordo com informações fornecidas pelo fabricante [18]. Como comentado anteriormente, a ignição é conseguida quando $v_{Cp(pp)} > 600$ V, considerando as lâmpadas empregadas.

As formas de onda de tensão e de corrente foram adquiridas com o mesmo osciloscópio usado no ajuste da operação em regime permanente. Adicionalmente, duas ponteiros de tensão (Tek P6139A – Tektronix) e duas ponteiros de corrente (TCP202A – Tektronix) foram usadas.

As Figuras 13, 14 e 15 mostram as formas de onda dos protótipos implementados. De acordo com estas figuras, a corrente de “glow” é bastante reduzida, confirmando que a coluna de gás pode ser considerada como um circuito aberto no modelo da lâmpada empregado no pré-aquecimento.

Para facilitar a análise dos resultados, a Tabela VI mostra uma comparação entre valores teóricos e experimentais para os parâmetros envolvidos no processo de pré-aquecimento, a saber, $f_{HB(ph)}$, $v_{Cp(pp)}$, $i_{ph(ef)}$, t_{ph} e R_{hc} .

Com base na Tabela VI, é possível verificar que os resultados são bastante satisfatórios, tendo em vista que diversas simplificações foram adotadas no decorrer da análise teórica. As maiores diferenças entre resultados teóricos e experimentais são verificadas no parâmetro R_{hc} . No entanto, é importante enfatizar que estas diferenças não são suficientemente elevadas para invalidar as análises apresentadas neste artigo.

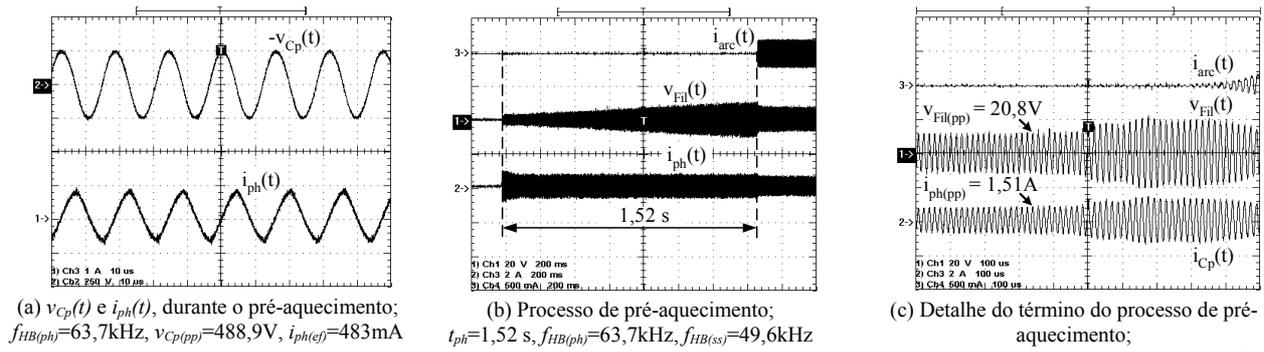


Fig. 13. Resultados experimentais para o protótipo implementado com os parâmetros do filtro "2", para lâmpada GE.

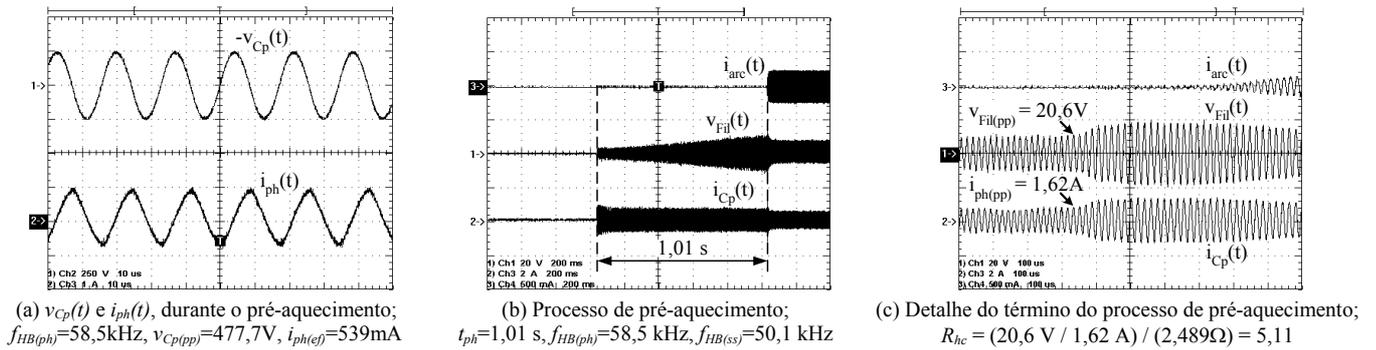


Fig. 14. Resultados experimentais para o protótipo implementado com os parâmetros do filtro "3", para lâmpada GE.

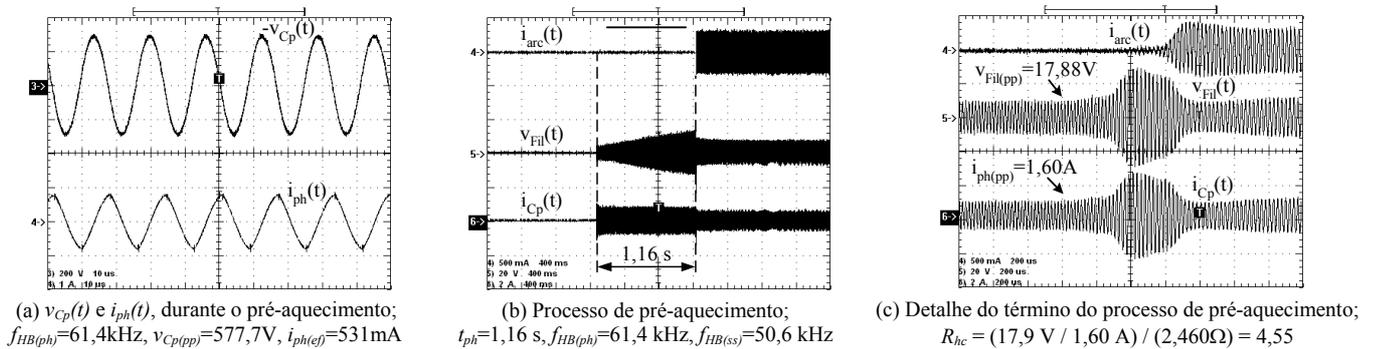


Fig. 15. Resultados experimentais para o protótipo implementado com os parâmetros do filtro "7", para lâmpada Sylvania.

TABELA VI

Comparação entre Resultados Teóricos e Experimentais, durante o Processo de Pré-Aquecimento

Filtro	Lâmpada	Parâmetro	Valor Teórico	Valor Medido	ϵ [%]
3	GE	$f_{HB(ph)}$	63,9 kHz	63,7 kHz	0,31
		$v_{Cp(pp)}$	518,3 V	488,9 V	6,01
		$i_{ph(ef)}$	500 mA	483 mA	3,52
		t_{ph}	1,5 s	1,52 s	1,32
		R_{nc}	4,85	5,53	12,30
4	GE	$f_{HB(ph)}$	58,9 kHz	58,5 kHz	0,68
		$v_{Cp(pp)}$	513,0 V	477,7 V	7,39
		$i_{ph(ef)}$	550 mA	539 mA	2,04
		t_{ph}	1,0 s	1,01 s	0,99
		R_{nc}	4,60	5,11	9,98
7	Sylvania	$f_{HB(ph)}$	61,9 kHz	61,4 kHz	0,81
		$v_{Cp(pp)}$	566,6 V	577,7 V	1,92
		$i_{ph(ef)}$	530 mA	531 mA	0,19
		t_{ph}	1,161 s	1,160 s	0,08
		R_{nc}	4,25	4,55	6,59

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Algumas considerações práticas devem ser levadas em conta antes da aplicação da metodologia de projeto proposta.

Em primeiro lugar, é fato que lâmpadas de mesmo tipo mas de diferentes fabricantes podem apresentar variações significantes nas características de seus eletrodos. Este fato pode ser facilmente constatado a partir dos resultados apresentados neste artigo, comparando-se a lâmpada da GE com a lâmpada da Sylvania. Além disso, mesmo lâmpadas de mesmo tipo e de mesmo fabricante apresentarão, individualmente, variações nas características dos eletrodos. Por conta disto, um reator que venha a ser ajustado para uma lâmpada, pode não prover operação adequada a uma outra, mesmo que seja de mesmo tipo e de mesmo fabricante. Assim, supondo uma linha de montagem de larga escala, onde ajustes individuais em reatores estão fora de cogitação, e tendo em vista

que a venda de forma casada de reatores e lâmpadas F32T8 não é usualmente realizada, então é preciso encontrar uma forma de fazer com que o ponto de operação escolhido para o reator atenda ao maior número possível de lâmpadas.

Portanto, a solução para este problema é recorrer a um estudo estatístico das características das lâmpadas, com o objetivo de se determinar os coeficientes dos modelos da lâmpada fluorescente. Assim, os modelos refletirão o comportamento do maior número possível de lâmpadas, e não de cada uma delas, individualmente. Logo, é importante que o maior número possível delas seja beneficiado com o ponto de operação escolhido para o projeto do reator.

Neste contexto, é importante lembrar que tanto o valor de R_{hc} quanto o de $v_{Fil(ef)}$ podem variar dentro de faixas relativamente largas. Assim sendo, recomenda-se que o projetista escolha um valor intermediário nas faixas de variação permitidas a cada parâmetro, como, por exemplo, $R_{hc} \approx 5,25$ e $v_{Fil(ef)} \approx 3,45$ V. Assim, mesmo com as variações nas características individuais das lâmpadas, a junção dos resultados do levantamento estatístico dos modelos e das faixas de variação dos parâmetros fará com que a maioria das lâmpadas seja operada de forma adequada.

Outra questão interessante está relacionada com a concepção de um novo reator eletrônico capaz de ajustar, automaticamente, o processo de pré-aquecimento às exigências individuais das lâmpadas fluorescentes. Desta forma, seria possível promover a otimização do processo de ignição, aumentando a vida útil de um número maior de lâmpadas, quando comparado ao número beneficiado pelo ajuste de um ponto de operação único, baseado apenas no levantamento estatístico das características das lâmpadas.

Para que isto seja possível, o circuito de comando do reator eletrônico deve ter capacidade de medir o valor de R_{hc} no instante da ignição, utilizando este dado para tomada de decisão posterior. Além disso, é preciso que o circuito de comando conte com capacidade de processamento de dados, por exemplo, como um dispositivo micro-controlador, para realizar cálculos que permitirão a determinação do novo ponto de operação a ser automaticamente programado. Caso estas exigências venham a ser atendidas, será possível utilizar as equações apresentadas na seção II deste artigo para determinar os valores de frequência de comutação e de intervalo de tempo que permitirão completar o pré-aquecimento de forma adequada. Assim, cada reator realizaria seu próprio ajuste do ponto de operação, minimizando então a influência da variação das características individuais dos eletrodos na vida média das lâmpadas fluorescentes.

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma nova metodologia para o projeto de reatores eletrônicos destinados a lâmpadas fluorescentes de cátodo quente, com o objetivo de impor uma temperatura de operação adequada para os filamentos dos eletrodos, tanto no pré-aquecimento quanto na operação em regime permanente.

O clássico inversor *Half-Bridge* série ressonante com carga em paralelo foi analisado, adotando-se uma estratégia de pré-aquecimento baseada na injeção de uma corrente com valor eficaz constante através dos eletrodos. De acordo com o procedimento de projeto apresentado, as condições de

operação dos eletrodos são devidamente consideradas na análise teórica, a partir do uso de parâmetros correlatos e de recomendações consolidadas na literatura.

Informa-se que a análise teórica de reatores eletrônicos levando-se em conta questões relacionadas aos eletrodos das lâmpadas é uma característica inédita na literatura. Além disso, a metodologia proposta representa uma plataforma completa para o projeto de reatores eletrônicos destinados a lâmpadas fluorescentes de cátodo quente, com o objetivo de enquadrar o pré-aquecimento e a operação em regime permanente dentro de restrições e recomendações específicas.

Com base nas comparações entre resultados teóricos e experimentais apresentados neste artigo, é possível assumir que as análises teóricas são válidas. As diferenças verificadas entre valores teóricos e experimentais indicam que pequenos ajustes serão requeridos para que se atinjam os pontos de operação exatos especificados no projeto. No entanto, isto não deve ser considerado como um problema maior, uma vez que as discrepâncias entre resultados teóricos e experimentais foram relativamente baixas (menores do que 15%, segundo os resultados apresentados nas Tabelas V e VI). Isto significa que, apesar das discrepâncias oriundas das simplificações adotadas ao longo da análise teórica, a metodologia proposta é capaz de prover uma clara indicação dos pontos de operação que devem ser impostos ao reator.

Finalmente, é possível concluir que a abordagem sistemática apresentada neste artigo permite realizar o projeto a partir de um procedimento muito simples e direto, representando uma contribuição significativa para o projeto completo de reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes de cátodo quente. Adicionalmente, a boa estimativa dos pontos de operação fornecida pela metodologia proposta permite minimizar a necessidade de execução de exaustivos ajustes empíricos nos primeiros protótipos, reduzindo o tempo e os custos associados ao projeto de reatores.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP e ao CNPq pelo apoio a este trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 174-182, October, 1988.
- [2] M. K. Kazimierczuk e W. Szaraniec, "Electronic Ballast for Fluorescent Lamps", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 386-395, October, 1993.
- [3] M. C. Cosby Jr. e R. M. Nelms, "A Resonant Inverter for Electronic Ballast Applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, no. 4, pp. 418-425, August, 1994.
- [4] J. Ribas, J. M. Alonso, E. L. Corominas, A. J. Calleja e M. Rico-Secades, "Design Considerations for Optimum

- Ignition e Dimming of Fluorescent Lamps Using a Resonant Inverter Operating Open Loop”, in *Proc. of IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 2068-2075, 1998.
- [5] T. J. Ribarich e J. J. Ribarich, “A New Procedure for High-Frequency Electronic Ballast Design”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 262-267, January/February 2001.
- [6] R. N. Prado, A. R. Seidel, F. E. Bisogno e M. A. D. Costa, “A Design Method for Electronic Ballast for Fluorescent Lamps”, in *Proc. of IEEE IECON*, pp. 2279-2284, 2000.
- [7] M. Brumatti, C. Z. Resende, D. S. L. Simonetti e J. L. F. Vieira, “Reator Eletrônico Auto-Oscilante de Alto Fator de Potência com Indutores Acoplados”, anais do 13º CBA, pp. 1951-1956, 2000.
- [8] A. R. Seidel, F. E. Bisogno, H. Pinheiro e R. N. Prado, “Self-Oscillating Dimmable Electronic Ballast”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, no. 6, pp. 1267-1274, December 2003.
- [9] E. Hammer e D. Haas, “Photocell Enhanced Technique for Measuring Starting Electrode Temperatures of Fluorescent Lamps”, in *Proc. of IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 2313-2333, 1997.
- [10] Y. Ji, R. Davis, C. O’Rourke e E. W. M. Chui, “Compatibility Testing of Fluorescent Lamp and Ballast Systems”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 36, no. 6, pp. 1271-1276, November/December 1999.
- [11] “Electronic Ballasts”, *Specifier Reports*, National Lighting Product Information Program, vol. 8, no. 1, 32 pgs, May 2000, downloaded from <http://www.lrc.rpi.edu>.
- [12] *American National Standard for Ballasts for Fluorescent Lamps: Specifications*, ANSI C82.1-1985.
- [13] *High-Frequency Fluorescent Lamp Ballasts*, ANSI C82.11-1993.
- [14] F. T. Wakabayashi, C. S. Ferreira, M. A. G. de Brito e C. A. Canesin, “Determination of a Model for Electrodes’ Filaments of Fluorescent Lamps, during Preheating Process with Constant rms Current”, anais do VII *INDUSCON*, CD-ROM, 2006.
- [15] F. T. Wakabayashi, F. D. Dantas, J. O. P. Pinto e C. A. Canesin, “Fluorescent Lamp Model based on Equivalent Resistances, Considering the Effects of Dimming Operation”, in *Proc. of IEEE PESC*, pp. 1136-1141, 2005.
- [16] F. T. Wakabayashi e C. A. Canesin, “An Improved Design Procedure for LCC Resonant Filter of Dimmable Electronic Ballasts for Fluorescent Lamps, Based on Lamp Model”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no 5, pp. 1186-1196, September, 2005.
- [17] J. Parry, “Variable Frequency Drive using IR215x Self-Oscillating IC’s”, *Design Tip DT 98-1*, International Rectifier, download em <http://www.irf.com>.
- [18] “IR2155 Self-Oscillating Half-Bridge Driver”, *Data Sheet No. PD60029-I*, International Rectifier, download em <http://www.irf.com>.

Fabio Toshiaki Wakabayashi, nascido em Jales (SP) em 1974, é engenheiro eletricitista (1996), mestre (1998) e doutor (2003) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FEIS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente, trabalha como pesquisador associado ao Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP), na UNESP-FEIS, e é coordenador de uma pesquisa relacionada com reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes de cátodo quente, com financiamento da FAPESP sob a modalidade de Apoio a Jovens Pesquisadores em Centros Emergentes. Suas áreas de interesse incluem reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, controle de luminosidade, técnicas de correção do fator de potência, técnicas de comutação suave, conversores CC-CC e fontes de alimentação chaveadas.

Moacyr Aureliano Gomes de Brito, nascido em Andradina (SP), em 1982. É engenheiro eletricitista (2005) pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FEIS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente, é aluno do curso de mestrado em Engenharia Elétrica da UNESP-FEIS, desenvolvendo seu trabalho de pesquisa dentro das dependências do Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP) desta instituição. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, controle de luminosidade, técnicas de correção do fator de potência, controle digital e conversores CC-CC.

Castellane Silva Ferreira, nascido em Conceição das Alagoas (MG), em 1983. É engenheiro eletricitista (2005) pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FEIS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente, é aluno do curso de mestrado em Engenharia Elétrica da UNESP-FEIS, desenvolvendo seu trabalho de pesquisa dentro das dependências do Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP) desta instituição. Suas áreas de interesse são: reatores para lâmpadas fluorescentes, controle de luminosidade, controle digital, conversores CC-CC, fontes de alimentação chaveadas e técnicas de correção do fator de potência.

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavínia (SP), em 1961, é engenheiro eletricitista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FEIS, Ilha Solteira (SP)), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – Instituto de Eletrônica de Potência (UFSC-INEP, Florianópolis (SC)). Atualmente é professor adjunto efetivo do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FEIS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), é editor associado da *IEEE Transactions on Power Electronics* e ex-presidente da SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (gestão 11/2004 – 10/2006). Suas áreas de interesse incluem técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC-CC, retificadores e inversores, fontes de alimentação chaveadas, reatores para iluminação e técnicas de correção ativa do fator de potência.