

# NOVO MODELO ESTÁTICO PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES OPERADAS EM ELEVADAS FREQUÊNCIAS E COM CONTROLE DE LUMINOSIDADE

Fabio Toshiaki Wakabayashi

Universidade Estadual Paulista – UNESP  
Campus de Ilha Solteira  
CEP 15385-000, C.P. 31, Ilha Solteira – SP  
Brasil  
e-mail: canesin@dee.feis.unesp.br

Carlos Alberto Canesin

**Resumo** – Este artigo apresenta um novo modelo estático para lâmpadas fluorescentes tubulares (bulbo T12) operadas em frequências elevadas. A principal contribuição deste trabalho consiste na investigação dos efeitos da temperatura ambiente e da frequência de operação nominal sobre as características estáticas das lâmpadas fluorescentes tubulares. A metodologia para a obtenção do modelo é baseada em diversas regressões matemáticas bidimensionais, empregadas para se obter o comportamento da lâmpada fluorescente de acordo com diferentes variáveis independentes, a saber: potência processada através da lâmpada e temperatura ambiente. Adicionalmente, o modelo proposto pode ser facilmente convertido em um modelo de resistência equivalente da lâmpada, o qual pode ser muito útil para o projeto de reatores eletrônicos e aplicações com controle de luminosidade. Finalmente, as curvas obtidas a partir do novo modelo são comparadas com resultados experimentais correspondentes, com o intuito de se comprovar a precisão da metodologia proposta.

**Palavras-Chave** – Modelo Estático de Lâmpada Fluorescente, Elevada Frequência de Operação, Controle de Luminosidade.

## A NEW STATIC MODEL FOR FLUORESCENT LAMPS OPERATED IN HIGH FREQUENCIES WITH DIMMING CONTROL

**Abstract** – This paper presents a new static model for tubular fluorescent lamps (T12 bulb) operated at high frequencies. The main goal of this paper is to investigate the effects of ambient temperature and nominal switching frequency of operation in the static characteristics of tubular fluorescent lamps. The methodology for obtaining the model is based on several two-dimensional mathematical regressions, used to provide the behavior of the fluorescent lamp according to different independent variables, namely: power processed through the lamp

and ambient temperature. In addition, the proposed model can be easily converted to a lamp equivalent resistance model, which can be useful for designing electronic ballasts and dimming applications. Finally, the curves obtained using the new model are compared to the correspondent experimental data, in order to verify the accuracy of the proposed methodology.

**Keywords** – Fluorescent Lamp Static Model, High Operating Frequency, Dimming Control.

## I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o uso de reatores eletrônicos operando com frequências de chaveamento elevadas tem aumentado em função das diversas vantagens propiciadas por estes dispositivos, tais como: peso e volume reduzidos, supressão do efeito estroboscópico e do ruído audível, capacidade de controle de luminosidade e eficiência elevada.

Adicionalmente, lâmpadas fluorescentes operadas por reatores eletrônicos com frequências de chaveamento elevadas (superiores a 20kHz) apresentam maior eficiência luminosa (lumens/watt) em relação a lâmpadas operadas por reatores magnéticos convencionais (50Hz – 60Hz) [1].

O projeto dos reatores eletrônicos depende do modelo adotado para a lâmpada fluorescente. Durante os últimos anos, diversos modelos dinâmicos e estáticos têm sido propostos para estas lâmpadas [2-7].

De forma geral, modelos dinâmicos fornecem condições para a investigação de interações entre a lâmpada fluorescente e o reator eletrônico, permitindo a análise de instabilidades e até mesmo de fenômenos como o estriamento, quando a lâmpada é submetida a condições de luminosidade muito reduzida [8].

Modelos estáticos representam as lâmpadas fluorescentes como resistências equivalentes, devido às suas características  $V-I$  (valor eficaz da tensão e valor eficaz da corrente através das lâmpadas) [2]. Esta abordagem é muito mais simples do que aquela realizada em modelos dinâmicos e pode ser bastante útil para o projeto de reatores eletrônicos em pontos de operação específicos. Contudo, a característica  $V-I$  das lâmpadas apresenta alterações para diferentes condições de luminosidade, o que significa que o modelo deve ser admitido como sendo uma resistência variável, em função do valor eficaz de potência processada através da lâmpada ( $P$ ) [2]. A curva desta resistência equivalente variável, no decorrer da operação com controle de luminosidade, pode ser

---

Artigo Submetido em 11/07/2003. Primeira Revisão em 17/09/2003. Aceito sob recomendação do Editor Especial Prof. Walter Kaiser.

obtida a partir do uso dos valores eficazes de tensão ( $V$ ) e de corrente ( $I$ ) através da lâmpada [3 e 6]. Empregando-se métodos de regressão matemática, é possível determinar um refinado modelo matemático para a lâmpada fluorescente, relacionado com os valores eficazes das grandezas processadas. Assim, o projeto dos reatores eletrônicos torna-se mais preciso, uma vez que este tipo de modelo fornece condições para a previsão do comportamento de algumas importantes variáveis, tais como: faixa de variação da frequência de chaveamento durante o controle de luminosidade e defasagem da corrente drenada pelo conjunto formado pelo filtro ressonante e pela lâmpada fluorescente.

Quando da proposição de um modelo para lâmpadas fluorescentes, é necessário levar em conta que suas curvas características  $V-I$  apresentam mudanças significativas de acordo com a temperatura ambiente ( $T$ ) [9-10] e, em uma menor escala, de acordo com a frequência nominal de chaveamento ( $f_{nom}$ ). Um bom modelo que incorpora a influência da temperatura ambiente é apresentado em [10]. Entretanto, não é comum encontrar análises referentes aos efeitos de diferentes valores nominais de frequências de chaveamento sobre as características  $V-I$ , da mesma forma que não são desenvolvidas análises sobre a iluminância em função da potência processada através das lâmpadas.

Dentro deste contexto, este artigo apresenta uma metodologia simples para a determinação de um novo modelo para lâmpadas fluorescentes operadas em frequências elevadas [11]. Para tanto, são analisados os efeitos de diferentes valores de temperaturas ambientes e de frequências nominais de chaveamento sobre as características  $V-I$  e sobre os níveis de iluminância emitidos pelas lâmpadas. Além disso, com o intuito de tornar o modelo mais útil para projetistas de reatores eletrônicos, as curvas  $V-I$  são substituídas por curvas  $V-P$ , conforme apresentado em [3], sendo  $P$  o valor eficaz da potência processada através da lâmpada.

## II. MODELO PROPOSTO PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES TUBULARES

O modelo proposto é baseado em diferentes conjuntos de dados experimentais, obtidos a partir de reatores eletrônicos implementados, projetados para operação em diferentes frequências nominais de chaveamento ( $f_{nom}$ ) e submetidos a diferentes temperaturas ambientes ( $T$ ). Informa-se que os resultados experimentais foram obtidos em um ambiente blindado e com temperatura controlada. Adicionalmente, sobrecargas foram impostas às lâmpadas ensaiadas, para que fosse obtida uma descrição mais apurada do ponto de operação nominal ( $P_{nom}=40W$ ).

A Figura 1 mostra as curvas  $V-P$  derivadas de conjuntos de dados experimentais para uma lâmpada fluorescente do tipo GE – F40T12 – Super Luz do Dia.

Para a realização destas medidas elétricas, levou-se em consideração a estabilização térmica do ambiente e do conjunto reator / lâmpada, sendo este tempo sempre superior a duas horas para o equilíbrio da temperatura ambiente e de no mínimo quinze minutos para cada diferente ponto de operação. Os diferentes pontos de operação que caracterizam o controle de luminosidade são obtidos a partir da variação da frequência de chaveamento do reator eletrônico. Observa-se ainda que todos os resultados obtidos consideraram a

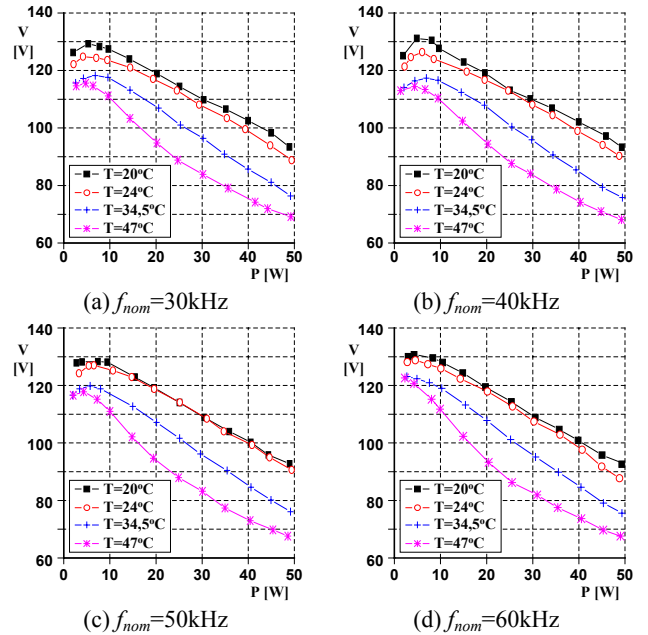


Fig. 1. Valores eficazes de tensão sobre a lâmpada fluorescente ( $V$ ) em função de  $P$ , para diferentes valores de  $T$  e  $f_{nom}$ .

utilização de lâmpadas fluorescentes sem desgastes aparentes nos filamentos e a manutenção das condições de aquecimento dos filamentos, de acordo com recomendações da ANSI (*American National Standards Institute*), conforme apresentadas em [12].

A Figura 2 mostra as curvas de iluminância relativa. É importante informar que os níveis de iluminância foram medidos com um luxímetro digital (MLM1332 – Minipa) e que tais dados foram normalizados ( $E_{rel}$ , em [p.u.]) de acordo com um valor adotado como base (para este caso, admitindo-se um reator eletrônico processando 40W, a 40kHz e 24°C).

A opção de medir valores relativos de iluminância foi realizada em função da indisponibilidade de equipamentos e ambiente adequados para a realização de medidas absolutas,

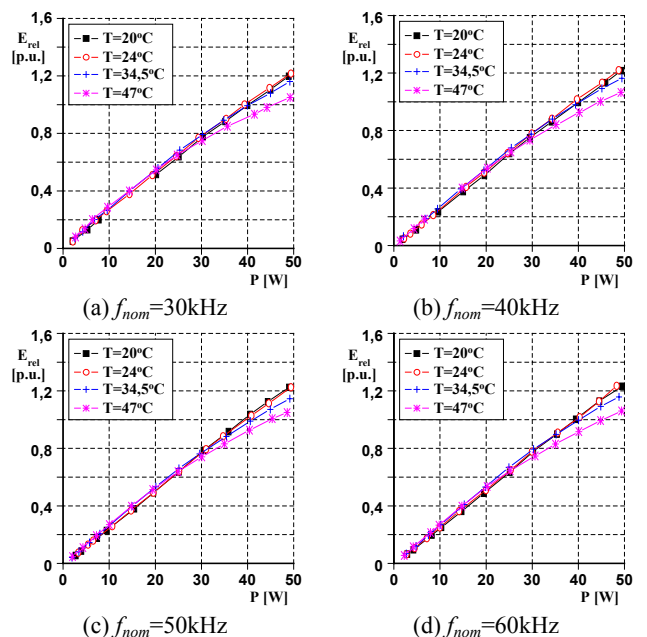


Fig. 2. Níveis de iluminância relativa da lâmpada ( $E_{rel}$ ) em função de  $P$ , para diferentes valores de  $T$  e  $f_{nom}$ .

como por exemplo uma esfera integradora de Ulbricht, a qual permitiria a medição do fluxo luminoso emitido pela lâmpada, expresso em lumens, [lm]. Desta forma, uma câmara com interior não-reflexivo foi construída, de forma a abrigar adequadamente a lâmpada fluorescente e o sensor do luxímetro. Assim, a posição do sensor em relação à lâmpada e à câmara de medição foi mantida durante todos os ensaios realizados, garantindo a repetibilidade das condições de medição.

É importante destacar que, uma vez que a iluminância em um dado ponto é inversamente proporcional à sua distância em relação à fonte luminosa, a apresentação de valores expressos em lux, [lx], teria significado apenas para a configuração adotada para a câmara de medição; em outras palavras, diferentes configurações da câmara resultarão em diferentes valores de iluminância. No entanto, com a adoção da normalização, torna-se possível avaliar a variação da iluminância em termos relativos, minimizando a necessidade de descrição exata dos detalhes construtivos da câmara de medição.

A partir das Figuras 1 e 2, é possível observar que a influência da temperatura ambiente sobre as características das lâmpadas fluorescentes é bastante pronunciada, implicando na necessidade da inserção de seus efeitos no modelo da lâmpada, visando a obtenção de condições para o desenvolvimento de um projeto preciso de reatores eletrônicos. É também possível concluir que as curvas  $V$ - $P$ , apresentam tendências similares, o que significa que as mesmas podem ser descritas por um mesmo tipo de expressão matemática. Tal fato é também verificado nas curvas de iluminância relativa.

A Figura 3 mostra comparações entre conjuntos de dados obtidos para diferentes valores nominais de frequência de chaveamento, para uma mesma temperatura ambiente. É possível notar, com base nesta figura, que a influência da frequência nominal de chaveamento não é suficientemente forte para justificar sua inclusão no modelo matemático da lâmpada fluorescente, levando-se em conta a faixa de variação analisada para  $f_{nom}$ .

A Figura 4.a mostra a frequência de chaveamento ( $f$ ) em função de  $P$ , para diferentes valores de  $T$ . A partir desta figura, é possível notar que, se a frequência de chaveamento do reator eletrônico é mantida constante (por exemplo, admitindo-se um controle em malha aberta), a potência processada através da lâmpada e, conseqüentemente, seu nível de iluminância irão apresentar variações significativas de acordo com a temperatura ambiente.

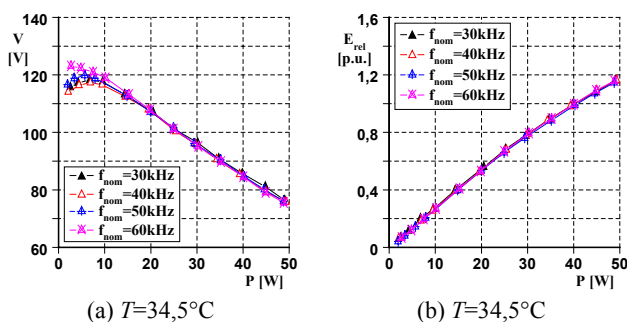


Fig. 3. (a)  $V$  versus  $P$  e (b)  $E_{rel}$  versus  $P$ , para um valor fixo de  $T$  e diferentes valores de  $f_{nom}$ .

A Figura 4.b mostra o valor eficaz da corrente através da lâmpada ( $I$ ) em função de  $P$ , para diferentes valores de  $T$ . De acordo com esta figura, pode-se verificar que, para temperaturas ambientes mais elevadas, a lâmpada fluorescente requer mais corrente para sustentar a potência e, conseqüentemente, seu nível de iluminância, fato que pode acarretar o decréscimo de sua vida útil.

#### A. Curvas Características de $V$ - $P$

Alguns modelos de lâmpadas representam a característica  $V$ - $P$  (ou  $V$ - $I$ ) como sendo uma equação linear de primeira ordem [3]. No entanto, é possível verificar na Figura 1 que esta característica apresenta um comportamento diferente quando a lâmpada é submetida a uma condição de baixa luminosidade ( $P < 10$ ). Desta forma, em [6], uma equação polinomial de quinto grau é empregada para a composição de um modelo mais preciso. Entretanto, com o emprego de programas computacionais específicos, tais como o *Origin Evaluation/Demo Version*, torna-se possível obter uma equação polinomial do quarto grau capaz de representar cada um dos conjuntos de dados experimentais, preservando a precisão requerida pelo modelo.

A forma geral da equação de quarto grau proposta é denotada em (1).

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

Onde:

$v_0(T)$  até  $v_4(T)$  = coeficientes de primeiro nível de  $V(T, P)$ , cada um deles dependentes da temperatura ambiente.

Após a determinação dos valores apropriados para os coeficientes  $v_0(T)$  até  $v_4(T)$ , os quais são denominados de coeficiente de primeiro nível, torna-se possível obter equações capazes de descrever cada um dos diferentes conjuntos de dados experimentais apresentados na Figura 1. As variações nos valores destes coeficientes representam as mudanças nas curvas  $V$ - $P$  da Figura 1. Portanto, o modelo

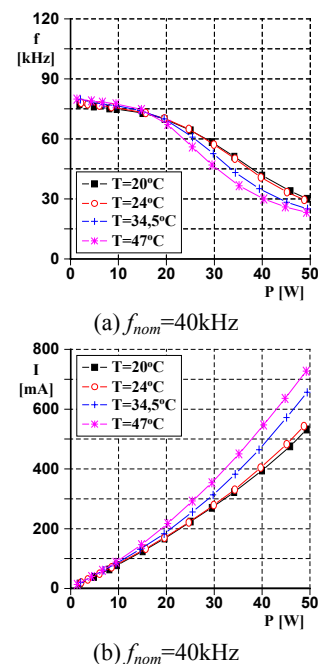


Figura 4. (a)  $f$  versus  $P$  e (b)  $I$  versus  $P$ , para diferentes valores de  $T$  e um valor fixo de  $f_{nom}$ .

completo da lâmpada fluorescente pode ser estabelecido através da descrição dos coeficientes de primeiro nível como sendo funções da temperatura ambiente. Para realizar esta regressão tridimensional ( $V$  versus  $P$  versus  $T$ ), é possível empregar duas regressões bidimensionais. Desta forma, a primeira regressão bidimensional é usada para determinar as equações de  $V$  como funções de  $P$ , resultando em um conjunto de coeficientes para cada diferente valor de  $T$ . Em seguida, utilizando-se o mesmo programa computacional de regressão empregado anteriormente, é possível determinar novas equações capazes de descrever o comportamento dos coeficientes de primeiro nível como sendo funções de  $T$ , resultando em um novo conjunto de coeficientes, os quais são denominados de coeficientes de segundo nível. Estes coeficientes de segundo nível são os últimos requeridos para o modelo proposto.

Com base nos dados experimentais mostrados na Figura 1, os coeficientes de primeiro nível são determinados através de regressões bidimensionais, utilizando-se o programa computacional *Origin Evaluation/Demo Version*. A Tabela I mostra os valores destes coeficientes, de acordo com as temperaturas correspondentes ( $T$ ).

Como comentado anteriormente, novas regressões bidimensionais são aplicadas nos valores dos coeficientes de primeiro nível, levando-se em conta suas variações de acordo com  $T$ . A Figura 5 mostra os coeficientes de primeiro nível de  $V(T,P)$  como funções de  $T$ . As linhas que conectam os pontos são derivadas de curvas de regressão obtidas com o uso do programa computacional.

A forma geral das equações usadas para descrever os coeficientes de primeiro nível de  $V(T,P)$  como funções de  $T$  é representada como segue:

$$v_i(T) = vs_{i,0} + vs_{i,1}.T + vs_{i,2}.T^2 \quad (2)$$

Onde:

$i$  = índice dos coeficientes de primeiro nível de  $V(T,P)$ ;

$v_i(T)$  = coeficiente de primeiro nível de  $V(T,P)$ ; e

$vs_{i,0}$  até  $vs_{i,2}$  = coeficientes de segundo nível de  $V(T,P)$ .

Os valores dos coeficientes de segundo nível de  $V(T,P)$  ( $vs_{0,0}$  até  $vs_{4,2}$ ), determinados através do programa computacional, são apresentados na Tabela II.

Usando-se os valores apresentados na Tabela II e o conjunto de equações descritas em (1) e (2), torna-se possível a obtenção de um novo modelo estático para a lâmpada fluorescente. Os dados apresentados na Tabela I não são utilizados neste modelo. Estes dados estão implícitos nos valores dos coeficientes de segundo nível da Tabela II.

### B. Curvas Características de Iluminância Relativa

A mesma metodologia descrita para a definição da equação de  $V(T,P)$  é empregada para a obtenção da equação de iluminância relativa  $E_{rel}(T,P)$ . Uma equação polinomial de segunda ordem pode ser usada para representar a iluminância relativa como uma função de  $P$  e  $T$ , de acordo com (3).

$$E_{rel}(T, P) = e_0(T) + e_1(T).P + e_2(T).P^2 \quad (3)$$

Onde:

$e_0(T)$  até  $e_2(T)$  = coeficientes de primeiro nível da iluminância relativa, dependentes da temperatura ambiente.

Utilizando o programa computacional *Origin Evaluation/Demo Version*, pode-se determinar os valores

destes coeficientes de primeiro nível, os quais são mostrados na Tabela III.

Estes valores são mostrados graficamente na Figura 6. Nesta figura, é possível notar que estes coeficientes podem ser escritos como funções lineares de  $T$ , de acordo com (4).

**TABELA I**  
**Coefficientes de Primeiro Nível de  $V(T,P)$**

Coeficiente	T [°C]			
	20	24	34,5	47
$v_0(T)$	125,5598	122,3859	115,1590	117,2896
$v_1(T)$	1,2997	1,1413	1,3317	0,3252
$v_2(T)$	-0,1373	-0,1117	-0,1385	-0,1358
$v_3(T)$	0,0034	0,0026	0,0032	0,0039
$v_4(T)$	-2,8841.E-5	-2,1203.E-5	-2,4940.E-5	-3,4421.E-5

**TABELA II**  
**Coefficientes de Segundo Nível de  $V(T,P)$**

Coeficiente	Valor
$vs_{0,0}$	162,37633
$vs_{0,1}$	-2,4576
$vs_{0,2}$	0,03184
$vs_{1,0}$	-0,7991
$vs_{1,1}$	0,1550
$vs_{1,2}$	-0,00278
$vs_{2,0}$	-0,11871
$vs_{2,1}$	-3,8550.E-4
$vs_{2,2}$	0
$vs_{3,0}$	0,0058
$vs_{3,1}$	-2,0092.E-4
$vs_{3,2}$	3,43775.E-6
$vs_{4,0}$	-6,14784.E-5
$vs_{4,1}$	2,58124.E-6
$vs_{4,2}$	-4,28405.E-8

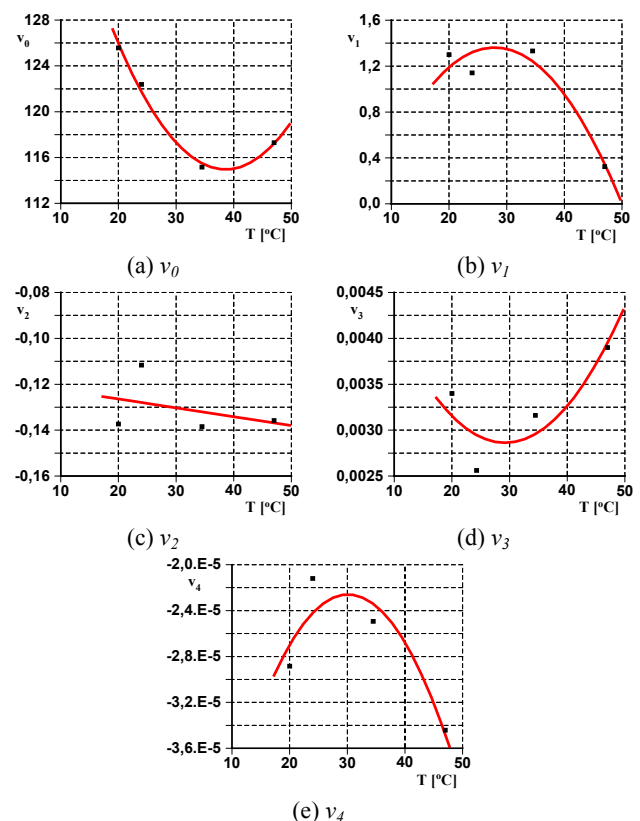


Fig. 5. Coeficientes de primeiro nível de  $V(T,P)$  em função de  $T$ .

**Tabela III**  
**Coefficientes de Primeiro Nível de  $E_{rel}(T,P)$**

Coeficiente	T [°C]			
	20	24	34,5	47
$e_0(T)$	-108,82234	-76,10645	-99,01401	-50,83447
$e_1(T)$	161,81644	164,30821	182,0283	181,97835
$e_2(T)$	0,22603	-0,27557	-0,7928	-1,07303

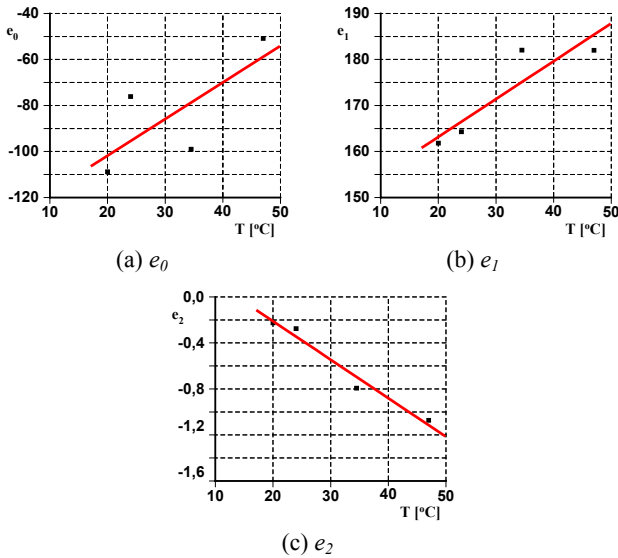


Fig. 6. Coeficientes de primeiro nível de  $E_{rel}(T,P)$ .

$$e_j(T) = es_{j,0} + es_{j,1}T \quad (4)$$

Onde:

$j$  = índice dos coeficientes de primeiro nível de  $E_{rel}(T,P)$ ;  
 $e_j(T)$  = coeficiente de primeiro nível de  $E_{rel}(T,P)$ ; e  
 $es_{j,0}$  até  $es_{j,1}$  = coeficientes de segundo nível de  $E_{rel}(T,P)$ .  
 Novos processos de regressão bidimensional são aplicados aos dados apresentados na Tabela III, com o intuito de se determinar os coeficientes de segundo nível de  $E_{rel}(T,P)$ , os quais são mostrados na Tabela IV.

Os dados apresentados na Tabela IV e o conjunto de equações descritas em (3) e (4) são suficientes para representar a iluminância relativa da lâmpada fluorescente ensaiada, em função de  $P$  e  $T$ .

### III. COMPARAÇÕES ENTRE O MODELO PROPOSTO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 7 mostra o conjunto de dados experimentais (pontos) e as curvas geradas com o modelo proposto (linhas), a partir de (1) até (4). De acordo com esta figura, é possível verificar que o modelo apresenta boa precisão, descrevendo adequadamente o comportamento da lâmpada fluorescente para uma faixa de variação de potência processada de 2,5W

**Tabela IV**  
**Coefficientes de Segundo Nível de  $E_{rel}(T,P)$**

Coeficiente	Valor
$es_{0,0}$	-133,54535
$es_{0,1}$	1,58888
$es_{1,0}$	146,74
$es_{1,1}$	0,82208
$es_{2,0}$	0,4576
$es_{2,1}$	0,03345

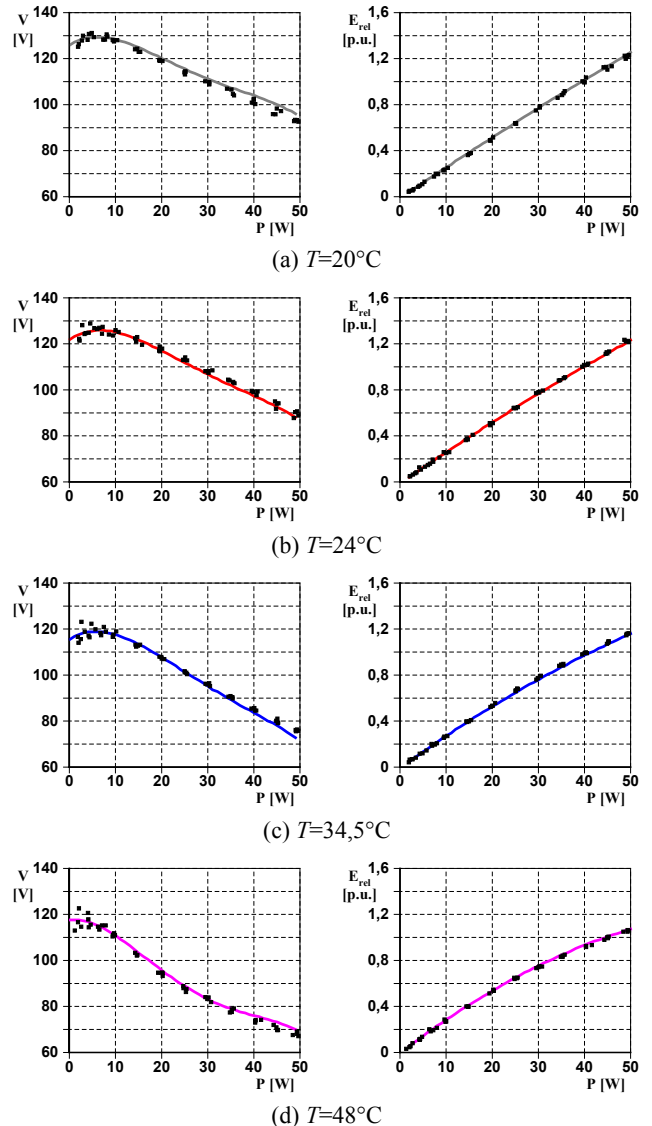


Figura 7 – Comparação entre dados experimentais (pontos) e o modelo proposto (linhas) para a lâmpada fluorescente.

até 40W. O modelo proposto não cobre níveis reduzidos de potência processada através da lâmpada ( $P < 2,5\text{W}$ ), pois, nesta condição particular, o fenômeno do estriamento é amplificado e torna-se detectável a olho nu.

Algumas pequenas imprecisões podem ser observadas neste modelo, especialmente no gráfico de  $V$  versus  $P$  em  $T=20^\circ\text{C}$ . Contudo, tais imprecisões são inferiores a 2% e podem ser consideradas desprezíveis. Ainda assim, caso seja necessário, alguns ajustes empíricos adicionais podem ser realizados nos coeficientes de segunda ordem, melhorando ainda mais o modelo proposto.

Para projetistas de reatores eletrônicos, é importante a obtenção do valor da resistência equivalente da lâmpada, o qual pode ser usado na metodologia de projeto com o objetivo de prever o comportamento de alguns importantes parâmetros, durante o controle de luminosidade, tais como: valor eficaz da corrente através da lâmpada, valor eficaz da corrente através do indutor ressonante e valor da defasagem angular da corrente drenada pelo conjunto filtro/lâmpada. A equação da resistência equivalente ( $R_{eq}(T,P)$ ) pode ser facilmente obtida a partir de (5).



$$R_{eq}(T, P) = \frac{V^2(T, P)}{P} \quad (5)$$

A Figura 8 mostra uma comparação entre quatro diferentes conjuntos de dados experimentais (pontos) e o modelo proposto em (5) (linhas). Com base nesta figura, pode-se observar que as curvas geradas a partir de (5) enquadram-se nos resultados experimentais, fato que significa que o modelo proposto é capaz de fornecer boa precisão para o processo de projeto de reatores eletrônicos com controle de luminosidade.

Adicionalmente, com o objetivo de propiciar uma avaliação mais aprofundada do emprego do modelo da lâmpada fluorescente em projetos de reatores eletrônicos, foram realizadas diversas simulações de um reator eletrônico operando com controle de luminosidade. Os resultados de simulação são comparados aos resultados experimentais obtidos através de um protótipo laboratorial implementado, possibilitando uma avaliação da eficácia do modelo desenvolvido neste trabalho.

O circuito simulado e o protótipo implementado foram concebidos de acordo com os dados apresentados na Tabela V. A lâmpada fluorescente empregada no protótipo é do tipo GE – F40T12 – Super Luz do Dia. A Figura 9 mostra os diagramas esquemáticos simplificados do circuito simulado e

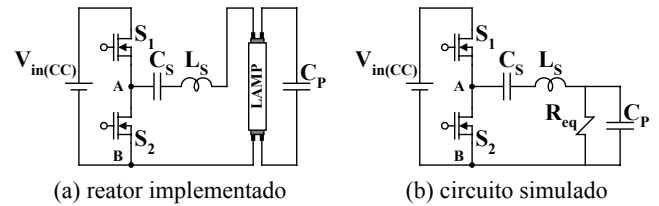


Figura 9 – Diagramas esquemáticos simplificados.

do reator eletrônico implementado, ambos baseados no clássico inversor ressonante Half-Bridge.

O circuito foi simulado no programa computacional PSpice 4.02. A Tabela VI mostra os parâmetros empregados para a simulação de diversos pontos de operação deste circuito. Os valores de potência processada ( $P$ ) e de frequência de chaveamento ( $f$ ) foram medidos no protótipo e então utilizados nas simulações, visando prover dados para a verificação da precisão do modelo da lâmpada. Os valores de resistência equivalente da lâmpada ( $R_{eq}$ ) são determinados de acordo com (5).

A Figura 10 mostra a comparação entre resultados de simulação (linhas) e resultados experimentais medidos no protótipo. De acordo com esta figura, é possível concluir que os resultados de simulação enquadram-se adequadamente nos resultados experimentais obtidos com o protótipo.

Em uma análise mais detalhada, pode-se observar na Figura 10.b que, para valores de  $P$  inferiores a 30W, a corrente processada através de  $L_s$  é mantida em valores eficazes relativamente elevados e praticamente constantes. Assim sendo, pode-se admitir que as correntes processadas através dos MOSFETs são também mantidas com valores eficazes significativos, mesmo para a condição de mínima luminosidade emitida pela lâmpada. Assim, as perdas em condução verificadas no circuito de potência poderão ser consideradas proporcionalmente elevadas em relação à potência processada através da lâmpada. Adicionalmente, deve-se lembrar que o aumento da frequência da corrente que flui através de  $L_s$  acarreta a intensificação do efeito pelicular nos enrolamentos e das perdas no núcleo de ferrite, tornando ainda maiores as perdas na condição de processamento de reduzida luminosidade, quando comparadas à condição nominal. Portanto, é possível concluir que o processamento de reduzidos valores eficazes de potência através da lâmpada acarreta a diminuição da eficiência deste reator eletrônico convencional.

TABELA V  
Parâmetros do Reator Eletrônico

Dados de Entrada e Saída	
$V_{in(CC)}$	310V
$P_{nom}$	40W
$T$	24°C
$f_{nom}$	40kHz
Parâmetros do Reator Eletrônico	
$L_s$	1,43mH
$C_s$	180nF
$C_p$	6,8nF
$S_1, S_2$	IRF840

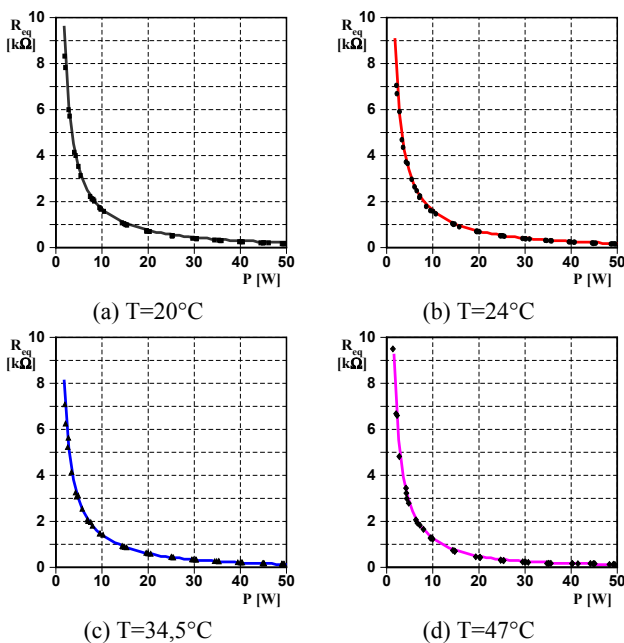


Figura 8 – Comparação entre dados experimentais da resistência equivalente da lâmpada (pontos) e o modelo proposto para  $R_{eq}(T, P)$ .

TABELA VI  
Parâmetros Usados para as Simulações

P [W] (*)	T=20°C		T=47°C	
	f [kHz] (*)	$R_{eq}$ [Ω]	f [kHz] (*)	$R_{eq}$ [Ω]
2,5	74,83	6573	76,60	5500
5	74,46	3335	76,49	2690
10	73,64	1641	75,85	1223
15	72,26	1036	73,51	709,5
20	69,70	721,3	68,17	455,1
25	65,32	533,2	57,03	312,9
30	58,70	412,3	45,17	229,0
35	50,25	330,5	36,56	177,6
40	41,70	271,3	31,00	143,8
45	34,80	224,2	27,12	118,4
50	29,65	181,5	23,97	94,5

(\*) dados medidos

#### IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um novo modelo estático para lâmpadas fluorescentes tubulares (bulbo T12), apropriado para projetos de reatores eletrônicos com controle de luminosidade. Este novo modelo incorpora os efeitos da temperatura ambiente em seus parâmetros, aumentando sua precisão e confiabilidade. O modelo é baseado em dados experimentais de uma lâmpada fluorescente (GE – F40T12 – Super Luz do Dia), cujas características V-P são determinadas para diferentes condições de temperatura ambiente e frequência nominal de chaveamento.

O modelo proposto é concebido a partir de dois tipos diferentes de equações: o primeiro tipo descreve as características V-P para valores específicos de temperatura ambiente, enquanto que o segundo tipo é responsável pela incorporação dos efeitos da temperatura ambiente ao modelo. Portanto, o valor eficaz da tensão sobre a lâmpada fluorescente pode ser descrito como uma função tridimensional, dependente dos valores de potência processada na lâmpada (P) e de temperatura ambiente (T).

Adicionalmente, o modelo estabelece uma relação entre a iluminância da lâmpada, a potência processada e a temperatura ambiente, permitindo assim uma avaliação com critérios mais adequados a um projeto de luminotécnica.

Com a finalidade de se obter um modelo que possa ser facilmente empregado em projetos de reatores eletrônicos com elevada frequência de chaveamento, é possível definir uma resistência equivalente, cuja expressão matemática é diretamente derivada da função  $V(T,P)$ . Resultados de simulação e experimentais apresentados neste artigo comprovam que o emprego do modelo proposto é útil para projetistas de reatores eletrônicos, especialmente na determinação dos valores eficazes das correntes processadas através da lâmpada fluorescente e através do indutor do filtro ressonante, além de possibilitar a verificação da fase da corrente drenada pelo conjunto filtro ressonante + lâmpada.

De acordo com as comparações apresentadas entre dados experimentais e o modelo da lâmpada, é possível concluir que a metodologia proposta é bem sucedida na incorporação dos efeitos da temperatura ambiente nas expressões de  $V(T,P)$  e de  $E_{rel}(T,P)$ .

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP e ao CNPq pelo apoio concedido ao presente trabalho.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. E. Hammer e C. Ferreira, "F40 Fluorescent Lamp Considerations for Operating at High Frequency", in *Proc. of PCIM Europe '94*, pp. 72-75, Mar./Apr., 1994.
- [2] U. Mader e P. Horn, "A Dynamic Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps", in *Proc. of IEEE IAS'92 Annual Meeting*, pp. 1928-1934, 1992.
- [3] C. S. Moo, Y. C. Chuang, Y. H. Huang e H. N. Chen, "Modeling of Fluorescent Lamps for Dimmable

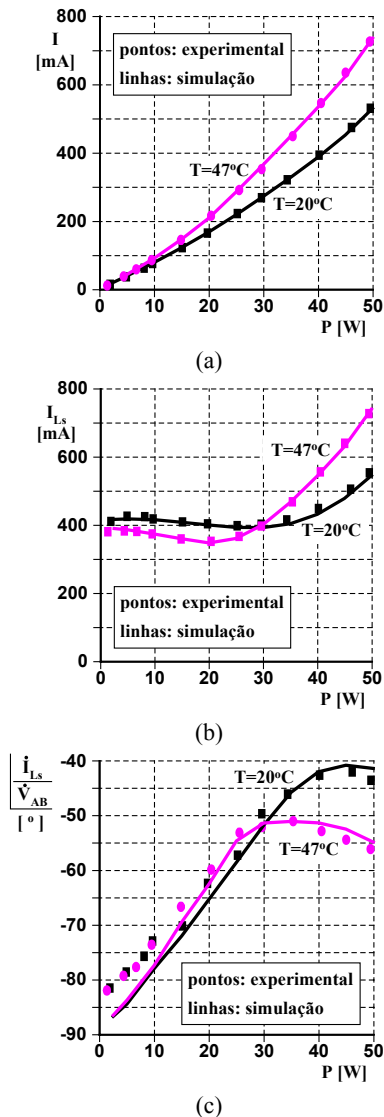


Figura 10 – (a) valor eficaz da corrente através da lâmpada ( $I$ ) versus  $P$ , (b) valor eficaz da corrente através de  $L_s$  versus  $P$  e (c) defasagem angular da corrente drenada pelo conjunto filtro ressonante + lâmpada versus  $P$ , para diferentes valores de  $T$ .

Por fim, com base na Figura 10.c, é possível constatar que a defasagem angular da corrente drenada pelo conjunto filtro ressonante + lâmpada, em relação à tensão aplicada sobre os pontos A e B da Figura 9, apresenta relação linear com a potência através da lâmpada, para valores de  $P$  inferiores a 30W. Para situações em que  $P$  é superior a 30W, nota-se que um único valor de defasagem pode corresponder a dois diferentes valores de  $P$ .

A observação de tal fato é importante uma vez que, atualmente, existem circuitos integrados dedicados a reatores eletrônicos com capacidade de controle de luminosidade, cuja técnica de controle em malha fechada baseia-se na imposição da fase da corrente drenada pelo conjunto filtro ressonante + lâmpada [13]. Assim sendo, no caso do emprego deste tipo de controlador, um projeto adequado deverá ser desenvolvido, procurando-se evitar a escolha de parâmetros que resultem em pontos de operação ambíguos (dois valores de  $P$  associados a um único valor de defasagem).

- Electronic Ballasts”, in *Proc. of IEEE IAS'96 Annual Meeting*, pp. 2231-2236, 1996.
- [4] M. Sun e B. L. Hesterman, “PSpice High-Frequency Dynamic Fluorescent Lamp Model”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 261-272, March, 1998.
- [5] T. J. Ribarich e J. J. Ribarich, “A New High-Frequency Fluorescent Lamp Model”, in *Proc. of IEEE IAS'98 Annual Meeting*, pp. 2094-2098, 1998.
- [6] N. Onishi, T. Shiomi, A. Okude e T. Yamauchi, “A Fluorescent Lamp Model for High Frequency Wide Range Dimming Electronic Ballast Simulation”, in *Proc. of IEEE APEC'99*, pp. 1001-1005, 1999.
- [7] M. Cervi, A. R. Seidel, F. E. Bisogno e R. N. Prado, “Fluorescent Lamp Model Employing Tangent Approximation”, in *Proc. of IEEE PESC'02*, pp. 187-191, 2002.
- [8] G. C. Hsieh e C. H. Lin, “Harmonized Strategy for Breaking the Striations in the Fluorescent Lamp”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 352-366, April, 2001.
- [9] E. E. Hammer, “Effects of Ambient Temperature on the Performance of Bent Tube Fluorescent Lamps”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 25, no. 2, pp. 216-223, March/April, 1989.
- [10] C. S. Moo, H. C. Yen, Y. C. Hsieh e C. R. Lee, “A Fluorescent Lamp Model for High-Frequency Electronic Ballasts”, in *Proc. of IEEE IAS'00 Annual Meeting*, pp. 3361-3366, 2000.
- [11] F. T. Wakabayashi e C. A. Canesin, “A New Model for Tubular Fluorescent Lamps Operated at High Frequencies for Dimmable Applications”, in *Proc. of IEEE ISIE'03*, CD-ROM, 2003.
- [12] 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. 35, no. 6, pp. 1271-1276, November / December, 1999.
- [13] J. Adams, T. J. Ribarich e J. J. Ribarich, “A New Control IC for Dimmable High-Frequency Electronic Ballasts”, in *Proc. of IEEE APEC'99*, pp. 713-719, 1999.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Fabio Toshiaki Wakabayashi**, nascido em Jales (SP), em Julho de 1974, é engenheiro eletricitista (1996) formado na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FEIS, Ilha Solteira (SP)). Obteve os títulos de mestre (1998) e doutor (2003) em Engenharia Elétrica nesta mesma instituição, tendo desenvolvido seus trabalhos no Laboratório de Eletrônica de Potência. Suas áreas de interesse abrangem técnicas de comutação não-dissipativa, fontes de alimentação chaveadas, qualidade de energia elétrica e reatores eletrônicos para iluminação.

**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. Suas áreas de interesse incluem técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC/CC, fontes de alimentação chaveadas, reatores para iluminação e técnicas de correção do fator de potência.