

MODELAGEM DE LÂMPADA FLUORESCENTE UV EM UMA APLICAÇÃO PARA FINS DE PURIFICAÇÃO DE ÁGUA

Bruno P. Matheus, Moacyr A. G. de Brito, Carlos A. Canesin¹

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Laboratório de Eletrônica de Potência – Departamento de Engenharia Elétrica
Ilha Solteira, São Paulo, Brasil
e-mail: canesin@dee.feis.unesp.br¹

Resumo - A partir de ensaios realizados com uma lâmpada fluorescente UV comercial, caracteriza-se o comportamento da resistência dos filamentos e desenvolve-se um modelo estático capaz de representar a característica resistiva da coluna de gás em regime permanente. O modelo desenvolvido está baseado numa equação polinomial de quinta ordem, sendo aplicável tanto para simulação quanto para projeto dos reatores. Ainda, uma importante contribuição é a determinação da característica R_{HC} dos filamentos da lâmpada, a qual é utilizada para o dimensionamento do circuito de controle capaz de realizar um adequado pré-aquecimento da lâmpada, considerando a aplicação de purificação de água.

Palavras-Chave – Lâmpadas fluorescentes UV, Modelação de lâmpadas fluorescentes UV, Reatores para lâmpadas UV, Purificação de Água com UV.

MODELING OF UV FLUORESCENT LAMP IN AN APPLICATION FOR WATER PURIFICATION

Abstract – This paper is based on experimental data from a UV fluorescent lamp, in order to characterize the filament resistance behavior and to develop a static model able to represent the resistive gas column characteristic in steady-state. The model is based on a fifth-order polynomial equation and it is applicable both for simulation model and in ballast design. The main important derived R_{HC} characteristic of the lamp filaments was used as a parameter in the design of the control circuit, capable of performing the appropriate preheating of the lamp, considering its application for water purification.

Keywords - UV Fluorescent Lamps, Modeling of UV Fluorescent Lamp, Ballast for UV Lamps, Water Purification using UV.

I. INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, com a maior conscientização sobre as questões de saúde e qualidade de vida, a desinfecção de águas através da radiação ultravioleta

(RUV) tornou-se amplamente reconhecida e aceita pelas agências reguladoras como um processo de purificação seguro e econômico [1].

A faixa C da RUV, compreendida entre os comprimentos de onda de 200nm e 280nm, apresenta propriedades germicidas. Ao ser absorvida pelo DNA e RNA dos micro-organismos, a radiação penetra na parede das células causando a quebra de seu material genético tornando-as incapazes de se reproduzirem [2]. No que tange a purificação de águas por ultravioleta, torna-se imprescindível a produção de RUV que esteja nesta faixa germicida. Neste contexto, várias fontes artificiais foram e têm sido desenvolvidas, destacando-se dentre elas as lâmpadas fluorescentes UV (LF-UVs).

Segundo a agência de proteção ambiental americana, EPA (*Environmental Protection Agency*), as LF-UVs funcionam praticamente da mesma forma que as lâmpadas fluorescentes convencionais, com a sutil diferença de não conter revestimento fosfórico [3]. Não obstante a isto, sua caracterização/modelação também é semelhante à da lâmpada fluorescente convencional. As LF-UVs têm sido estudadas e aprimoradas ao longo dos últimos anos, sendo que atualmente existem modelos matemáticos e computacionais capazes de representar seu comportamento. Desta forma é interessante desenvolver metodologias de projeto capazes de verificar a funcionalidade destes modelos, considerando-se as aplicações em purificadores de água com ação de desinfecção via UV.

II. OBTENÇÃO DOS MODELOS DA LÂMPADA FLUORESCENTE UV

A lâmpada fluorescente UV é uma carga não linear que apresenta dois estados distintos de operação denominados de pré-aquecimento e regime permanente. Desta forma, os modelos desenvolvidos são específicos para cada estado de funcionamento e podem ser representados na forma estática ou dinâmica. Os modelos estáticos representam o comportamento V-I da lâmpada e têm como propósito o projeto de reatores eletrônicos e também aplicação em simulações computacionais para pontos fixos de interesse. Já os modelos dinâmicos levam em consideração a resposta da lâmpada a variações na excitação como, por exemplo, degraus de potência. Desta forma, neste trabalho atenta-se aos modelos estáticos para o estado de regime permanente e também para o modelo de pré-aquecimento, composto pelas resistências dos eletrodos da LF-UV [4]. Ainda, este modelo estático é inserido na plataforma Pspice, obtendo-se instantaneamente os principais parâmetros do conjunto reator mais lâmpada.

Artigo submetido em 25/09/2012. Primeira revisão em 08/01/2013 e segunda revisão em 27/02/2013. Aceito para publicação em 28/02/2013 por Recomendação dos Editores Ricardo Nederson do Prado e Pedro F. Donoso-Garcia.

A. Pré-Aquecimento

Durante a etapa de pré-aquecimento, a coluna de gás apresenta alta impedância e a lâmpada pode ser modelada apenas pela resistência dos filamentos, conforme apresentado na Figura 1.

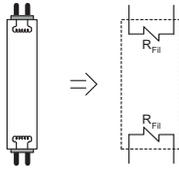


Fig. 1. Modelo da lâmpada fluorescente UV durante a etapa de pré-aquecimento.

A temperatura ideal para que seja realizado o pré-aquecimento está entre 700 °C e 1000 °C, a fim de se evitar desgastes excessivos nos filamentos e a consequente redução da vida útil média das lâmpadas [4-5]. A determinação da temperatura dos filamentos de forma direta não é simples e desta forma, tem-se desenvolvido estudos acerca da determinação indireta de sua temperatura [6]. Durante este processo, os filamentos são submetidos à injeção de corrente com valor eficaz praticamente constante, que por efeito *joule* ocasionam o seu aquecimento e conseqüentemente a alteração de sua resistência. Também existem reatores capazes de realizar este pré-aquecimento com tensão constante, mas devido à topologia adotada para o reator eletrônico, a estratégia de injeção de corrente com valor constante é mais adequada. Baseado nesta propriedade, estudos demonstram a relação existente entre a temperatura dos filamentos e sua resistência elétrica equivalente. Tal relação é dada pela equação (1), onde T_H e R_H são respectivamente a temperatura e a resistência do filamento durante o pré-aquecimento (a quente - *hot*), dados em Kelvin [K] e ohm [Ω]. T_C e R_C são os mesmos parâmetros medidos antes do pré-aquecimento (a frio - *cold*) [7].

$$T_H = T_C \cdot \left(\frac{R_H}{R_C} \right)^{0,814} \quad (1)$$

Da equação (1), considerando T_C à temperatura ambiente, i.e., $T_C=25$ °C (298 K), tem-se que para uma temperatura T_H de 700 °C (973 K), a razão R_H/R_C , ou simplesmente R_{HC} , é aproximadamente 4,28 e para uma temperatura de 1.000 °C (1.273 K), R_{HC} está em torno de 5,95. Na literatura, estes valores são estabelecidos e aproximados para 4,25 e 6,25 [6-8].

Os valores de R_H podem ser obtidos dividindo-se os valores instantâneos da tensão sobre o filamento (V_{Fil}) pela corrente que passa pelo mesmo (I_{Fil}). Na seqüência, o parâmetro R_{HC} pode ser obtido fazendo-se simplesmente a divisão de R_H por R_C . Assim, de acordo com a equação (2), determina-se R_{HC} .

$$R_{HC} = \frac{\left(\frac{V_{FIL}}{I_{FIL}} \right)}{R_C} \quad (2)$$

Deste modo, uma vez determinado o parâmetro R_{HC} , pode-se obter indiretamente a temperatura dos filamentos da

lâmpada, permitindo-se assim determinar o melhor momento para realizar a ignição da lâmpada [4, 9].

B. Regime Permanente

Durante a etapa de regime permanente a coluna de gás da LF-UV comporta-se como uma resistência negativa (característica dos tubos de descarga), conforme Figura 2.

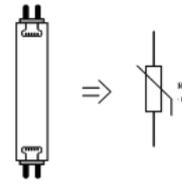


Fig. 2. Modelo da lâmpada fluorescente UV durante a etapa de regime permanente.

Dentre os modelos existentes para o regime permanente, podem-se destacar os seguintes: Modelo Cúbico de Mader-Horn [10], Modelo Exponencial [11], Modelo de Variação da Resistência Equivalente [12] e o Modelo de Quarto Grau [13].

Em relação a cada modelo citado, opta-se pelo modelo de Quarto Grau uma vez que apresenta maior precisão e menores erros de convergência. Este modelo é capaz de fornecer o comportamento da tensão sobre a lâmpada em função de duas variáveis independentes: potência processada e temperatura ambiente [13].

A obtenção do Modelo de Quarto Grau se dá através de duas regressões matemáticas bidimensionais aplicadas em uma série de dados experimentais de tensão e corrente, obtidos para uma lâmpada conectada a um reator operando em diferentes frequências de chaveamento (f) e para diferentes temperaturas do ambiente (T). Acima de alguns kilohertz a influência da frequência de chaveamento no modelo não é significativa [14], e ainda de acordo com [15] a substituição da lâmpada operada em alta frequência por uma simples resistência constitui uma aproximação razoável para a descrição de seu comportamento elétrico. Assim, desconsidera-se o efeito desta no modelo, e por meio de regressões lineares, define-se o modelo através de uma equação de 4ª ordem, conforme equação (3).

$$V_L(P_L) = v_0(T) + v_1(T) \cdot P_L + v_2(T) \cdot P_L^2 + v_3(T) \cdot P_L^3 + v_4(T) \cdot P_L^4 \quad (3)$$

Através de (3) ainda é possível definir a resistência equivalente da lâmpada de acordo com (4).

$$R_{eq}(T, P_L) = \frac{V_L(P_L)}{P_L} \quad (4)$$

Esta equação é muito útil durante a etapa de desenvolvimento de reatores eletrônicos, pois também permite simular e analisar a característica estática da lâmpada para sua potência nominal. No entanto, também é possível obter instantaneamente os principais parâmetros da lâmpada durante as simulações computacionais.

III. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para verificação e validação dos modelos de pré-aquecimento e regime permanente da lâmpada UV, utilizou-

se uma lâmpada G6T5 (6 W) da Light Source Inc., encontrada em um purificador comercial de água. Os ensaios foram realizados conectando a lâmpada UV a um inversor meia-ponte com filtro série-ressonante com carga em paralelo - SPRL (*Series resonant parallel load*), conforme Figura 3.

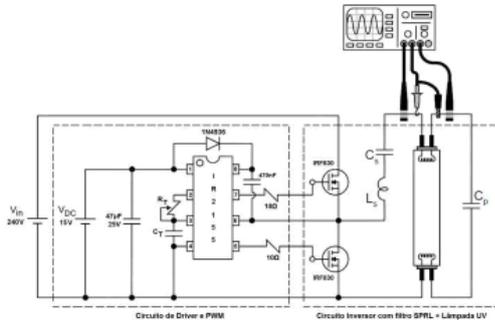


Fig. 3. Diagrama simplificado do reator eletrônico.

O estágio inversor é alimentado por uma fonte de CC. Os transistores do estágio inversor, IRF830, são acionados pelo circuito de driver e PWM IR2155.

A. Pré-Aquecimento

Para o levantamento do modelo de pré-aquecimento, ajustou-se a frequência de operação do circuito inversor, verificando-se o sinal de corrente (I_{Fil}) nos filamentos e de tensão (V_{Fil}) sobre os mesmos e observando a operação da lâmpada através do nível da corrente na coluna de gás. Os sinais foram verificados utilizando-se o osciloscópio Infiniium MSO8064A. Para cada frequência ajustada, observou-se o comportamento de I_{Fil} e de V_{Fil} . A Figura 4 mostra este comportamento para a frequência de operação de 56 kHz e corrente eficaz de aproximadamente 216 mA.

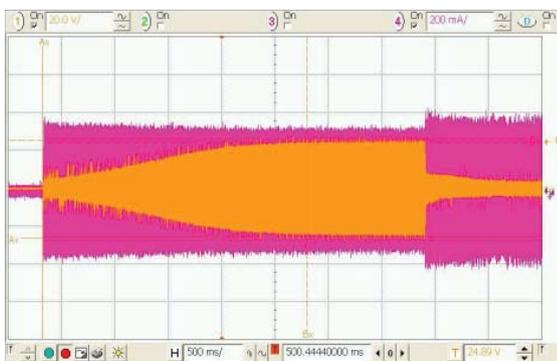


Fig. 4. Corrente (magenta) e tensão (alaranjado) durante o pré-aquecimento ($f_s=56$ kHz e $I=216$ mA). Escalas: Tensão: 20 V/div; Corrente: 200 mA/div; Tempo: 500 ms/div.

Nesta etapa, tomou-se o cuidado de esperar no mínimo 5 minutos entre ensaios consecutivos para que o filamento da lâmpada entrasse em equilíbrio térmico, a fim de se obter resultados confiáveis. Além do mais, o ambiente foi mantido a uma temperatura constante e igual a 24°C, por meio de condicionadores de ar. Para a condição de equilíbrio térmico, verificou-se que a resistência a frio R_C do filamento do eletrodo é igual a 12 Ω .

Para as mesmas condições de operação apresentadas na Figura 4, na Figura 5 observa-se a característica puramente resistiva do eletrodo em um período de 2s de pré-aquecimento, onde se determina a resistência a quente R_H .

Com o objetivo de diminuir a margem de erro embutida no cálculo do valor eficaz realizado pelo osciloscópio, optou-se por utilizar os valores de pico-a-pico dos sinais I_{Fil} e V_{Fil} para calcular R_{HC} . Logo, sendo a amplitude de I_{Fil} e de V_{Fil} respectivamente 580 mA_{pp} e 42 V_{pp}, e uma vez conhecido R_C , de (2) determina-se a relação $R_{HC}=6,03$.

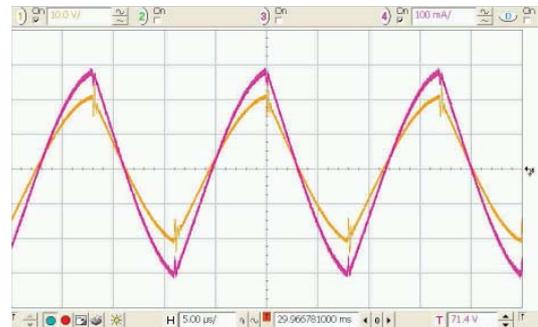


Fig. 5. Detalhes das formas de onda de tensão (amarelo) e da corrente (magenta) em um dos eletrodos, utilizadas para a obtenção dos valores instantâneos de R_{HC} . $I_{FIL}=580$ mA_{pp}; $V_{FIL}=42$ V_{pp} e $R_H=72,41$ Ω . Escalas: Tensão: 10 V/div; Corrente: 100 mA/div; Tempo: 5 μ s/div.

Experimentalmente, observou-se que para valores de frequências inferiores a 54 kHz o processo de ignição da lâmpada UV ocorre instantaneamente. Conforme apresentado na Figura 4, para a frequência de 56 kHz, a ignição também ocorre naturalmente por volta do intervalo de 3,8s. Para valores superiores a 58 kHz, constatou-se que o pré-aquecimento pode ser realizado sem ocasionar a ignição natural.

Considerando o limiar de 58 kHz como frequência limite para o pré-aquecimento, realizou-se um ensaio com 6 frequências distintas de operação, determinando para cada uma delas a resistência a quente R_H para tempos fixos de pré-aquecimento. Sendo R_C constante e uma vez conhecido R_H , para cada um dos ensaios determina-se a relação R_{HC} , a fim de se verificar a correspondência da relação R_{HC} com a frequência e o tempo da corrente injetada durante o estágio de pré-aquecimento. Os dados obtidos para a frequência de 62,4 kHz e corrente eficaz de 181,2 mA são apresentados na Tabela I.

Observa-se da Tabela I que o valor de corrente nos filamentos é praticamente constante. Isto se deve à característica da impedância de saída do filtro utilizado que é maior do que a resistência do filamento dos eletrodos.

TABELA I
Comportamento do filamento para o ensaio de pré-aquecimento a 62,4 kHz e 181,2 mA

Tempo de pré-aquecimento [ms]	$V_{Fil\ pp}$ [V]	$I_{Fil\ pp}$ [mA]	R_H/R_C
500	11,87	603	1,64
800	14,53	599	2,02
1.200	17,82	593	2,50
1.700	23,95	594	3,36
2.100	27,98	584	4,00
2.500	32,34	584	4,61
3.400	35,36	581	5,07
3.700	35,81	575	5,19

Através dos dados da Tabela I e inserindo-se pontos unitários fictícios no tempo 0s, em que $R_H=R_C$, com auxílio do software Matlab® apresenta-se o comportamento de R_{HC} em função do tempo de pré-aquecimento, conforme Figura 6, para alguns valores de frequências estabelecidas.

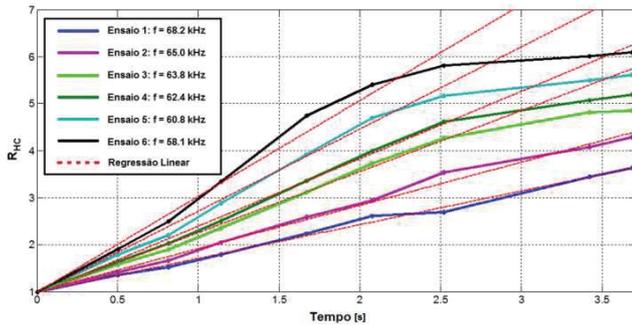


Fig. 6. Comportamento de R_{HC} durante o pré-aquecimento para diferentes frequências de ensaio.

Analisando a Figura 6, nota-se que quanto menor a frequência, menor será o tempo de pré-aquecimento necessário para satisfazer a condição de partida, i.e., $4,25 < R_{HC} < 6,25$. Também se observa que, pelo fato da corrente ser praticamente constante, a evolução temporal de R_H e consequentemente de R_{HC} será praticamente igual à envoltória superior da forma de onda de tensão observada na Figura 4. Para cada frequência é possível aproximar a curva de R_{HC} em função do tempo para uma reta do tipo $R_{HC}(t) = a.t + b$. Utilizando a função *polyfit* do software Matlab®, pode-se obter facilmente a regressão linear da curva $R_{HC}(t)$. Na Tabela II, verificam-se os coeficientes “a” e “b” da regressão linear realizada. As regressões $R_{HC}(t)$ apresentadas na Tabela II podem ser visualizadas no gráfico da Figura 6 como retas tracejadas.

TABELA II
Coeficientes da regressão $R_{HC}(t)$

Frequência [kHz]	Coeficientes de $R_{HC}(t) = a.t + b$	
	a [s^{-1}]	b
58,1	2,039	0,992
60,8	1,748	0,969
62,4	1,434	0,963
63,8	1,297	0,963
65,0	0,918	1,002
68,2	0,717	0,994

B. Regime Permanente

Para o desenvolvimento do modelo em regime permanente da lâmpada UV em questão, aproveitou-se do mesmo princípio do modelo de quarto grau e utilizando uma regressão de quinta ordem realizaram-se três ensaios com a lâmpada. Observando-se para cada frequência de operação o valor eficaz da tensão V_L e o valor eficaz da corrente I_L , obtêm-se a potência processada (P_L) na lâmpada e a resistência (R_L) equivalente da mesma. Os dados para um dos ensaios encontram-se na Tabela III.

Através dos dados obtidos nos ensaios e utilizando a função *polyfit* do software Matlab®, obteve-se regressões de quinta ordem para representar a relação entre a tensão V_L , a frequência f e a resistência R_L da lâmpada em função da

potência P_L processada na mesma, definindo-se $V_L(P)$, $f(P)$ e $R_L(P)$. As regressões obtidas apresentam o formato expresso em (5).

$$X(P_L) = X_0 + X_1.P_L + X_2.P_L^2 + X_3.P_L^3 + X_4.P_L^4 + X_5.P_L^5 \quad (5)$$

TABELA III
Dados de tensão, corrente e potência na lâmpada UV, operando em regime permanente.

$V_L(\text{rms})$ [V]	$I_L(\text{rms})$ [mA]	$P_L(\text{rms})$ [W]	R_L [Ω]	f [kHz]
23,48	303,4	7,12	77,40	27,2
24,71	264,8	6,54	93,32	31,1
25,97	228,8	5,94	113,51	35,1
27,33	195,8	5,35	139,58	39,5
28,54	169,2	4,83	168,70	43,5
29,71	143,3	4,26	207,33	47,7
31,20	118,6	3,70	263,07	51,7
33,34	91,2	3,03	366,37	55,7
36,5	53,8	1,96	678,44	59,8

Na tabela IV apresentam-se os coeficientes X_0 a X_5 obtidos para as regressões em questão.

TABELA IV
Coeficientes das regressões de $V_L(P)$, $f(P)$ e $R_L(P)$.

Coeficientes	$V_L(P)$	$f(P)$	$R_L(P)$
X_0	36,7429240	64,8037x10-3	3,47858x10-3
X_1	6,33979493	-4,30145x10-3	-2,92037x10-3
X_2	-5,56157712	2,47615x10-3	1,12423x10-3
X_3	1,47595944	-1,03522x10-3	-225,951486
X_4	-176,602x10-3	136,264938	22,8536577
X_5	7,90590x10-3	-5,94246244	-917,050x10-3

Nas Figuras 7 até 9 observam-se, respectivamente, o comportamento de $V_L(P)$, $R_L(P)$ e $f(P)$ em função da potência processada. Verifica-se, facilmente, sua característica de resistência negativa, sendo possível constatar a grande precisão do modelo matemático, visto que a curva das funções obtidas (preto) abrange quase a totalidade dos pontos ensaiados.

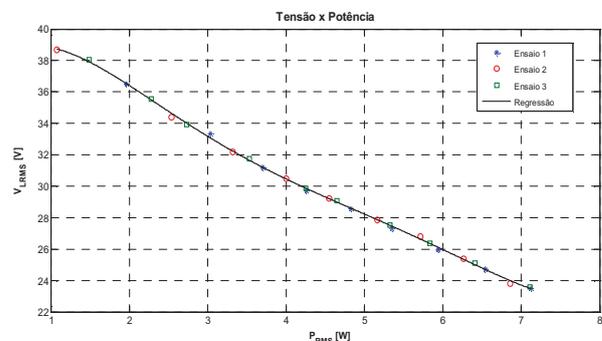


Fig. 7. Comportamento da tensão $V_L(P)$ em função da potência.

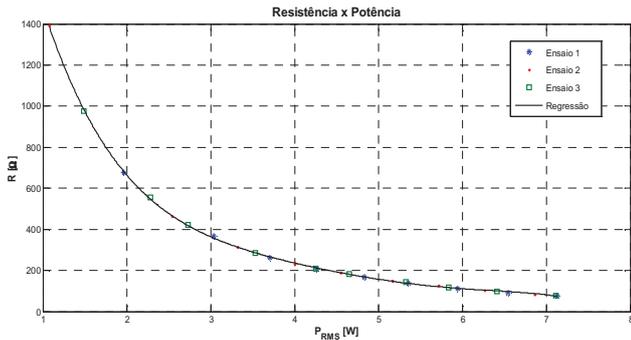


Fig. 8. Comportamento da resistência $R_L(P)$ em função da potência.

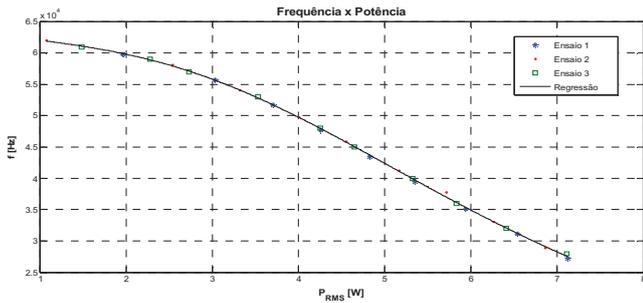


Fig. 9. Comportamento da potência na lâmpada em função da frequência de acionamento.

Na Figura 9 pode-se observar que em regime permanente a potência processada na lâmpada é inversamente proporcional à frequência imposta pelo circuito inversor e, de acordo com estes dados, a potência nominal de 6 W ocorre na frequência de 34,92 kHz. Nesta condição de operação, a resistência R_L e tensão V_L na condição nominal de operação da lâmpada UV são respectivamente de 111,554 Ω e 25,972 V.

É necessário salientar que as funções de quinto grau utilizadas para representar o comportamento das variáveis do modelo tiveram como objetivo a obtenção de resultados com maior exatidão (contemplando todos os pontos dos ensaios). No entanto, funções de quarta ordem poderiam ter sido utilizadas sem prejuízo de análise, conforme realizado em [6] e [13]. Uma comparação entre estas duas regressões pode ser verificada na Figura 10.

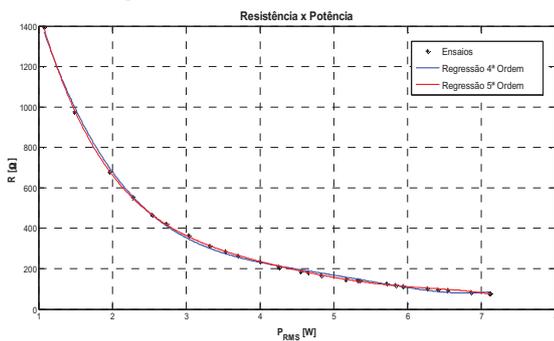


Fig. 10. Comparação entre as regressões de quarta e quinta ordens.

IV. ANÁLISE DO MODELO PROPOSTO

Neste tópico apresenta-se uma breve análise e uma possível aplicação do modelo desenvolvido no projeto de reatores eletrônicos capazes de fornecer condições adequadas para a operação da lâmpada UV numa aplicação de purificação de água.

A. Pré-Aquecimento

As normas ANSI C82.1-1985 [16] e ANSI C82.11-1993 [17] definem o tempo mínimo para a partida de reatores como sendo 500 ms. Entretanto, não relacionam o tempo máximo. Levando em consideração a aplicação de purificação em questão, não é viável que a lâmpada leve muito tempo para entrar em regime e iniciar sua ação germicida. Assim, quanto menor o tempo de pré-aquecimento melhor para a aplicação. Seguindo tais recomendações e de acordo com o gráfico da Figura 6, juntamente com as regressões apresentadas na Tabela II, para uma razão R_{HC} mediana de aproximadamente 5,25, o tempo mínimo ocorre para a mínima frequência, sendo respectivamente 2,1 s e 58,1 kHz.

B. Regime Permanente

Através da equação $R_L(P)$, cujos coeficientes são apresentados na Tabela IV, considerando os sinais de tensão e corrente na lâmpada é possível simular computacionalmente o modelo da mesma, de forma instantânea. Utilizando-se o software de simulação *PSpice*, implementa-se o modelo através dos blocos computacionais apresentados nas Figuras 11 até 13.

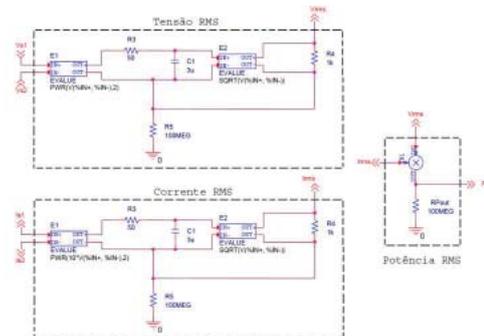


Fig. 11. Blocos computacionais implementados em ambiente *PSpice* para determinação da potência sobre a lâmpada.

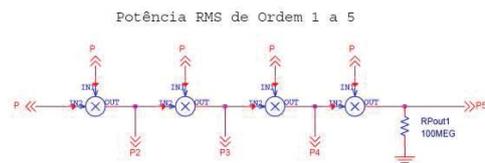


Fig. 12. Obtenção das potências de ordem 2, 3, 4 e 5 para aplicação direta no modelo de quinta ordem.

Através da Figura 11 e considerando disponíveis os sinais de tensão e de corrente na lâmpada UV, determinam-se seus valores eficazes por meio de estruturas integradoras, de potenciação e radiação. Assim, através de uma simples multiplicação obtém-se a potência processada na lâmpada (P).

O sinal de tensão sobre a lâmpada é aplicado nas entradas V_{s1} e V_{s2} do modelo e pode ser obtido, por exemplo, da tensão sobre o capacitor paralelo C_p da etapa de filtro SPRL. Já o sinal de corrente, aplicado nas entradas I_{s1} e I_{s2} , pode ser obtido através da tensão sobre uma pequena resistência shunt conectada em série com o capacitor série C_s . Para reduzir os efeitos da resistência shunt, o modelo apresentado na Figura 11 está ajustado para realizar os cálculos dos valores eficazes de corrente considerando uma resistência shunt de 0,1 Ω . As potências de 2ª, 3ª, 4ª e 5ª ordens são obtidas com a estrutura

apresentada na Figura 12, que utiliza a potência de 1ª ordem como entrada. Através das potências de 1ª a 5ª ordens, e utilizando-se dos coeficientes de $R_L(P)$, obtém-se um sinal de tensão, V_r , numericamente igual à resistência $R_L(P)$ da lâmpada UV, conforme Figura 13.

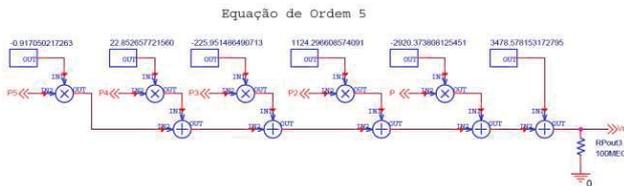


Fig. 13. Obtenção do sinal de tensão V_r , numericamente igual à resistência equivalente da lâmpada.

Para a simulação do modelo juntamente com o inversor mais filtro SPRL, conforme Figura 14, considera-se a fonte de entrada como uma onda quadrada assimétrica (0-240 V_{pico}) e frequência nominal em 34,92 kHz.

Para a configuração observada na Figura 14, simula-se o funcionamento da estrutura, verificando-se os sinais da tensão e corrente na lâmpada, a fim de se validar o modelo obtido. Os sinais verificados são apresentados na Figura 15.

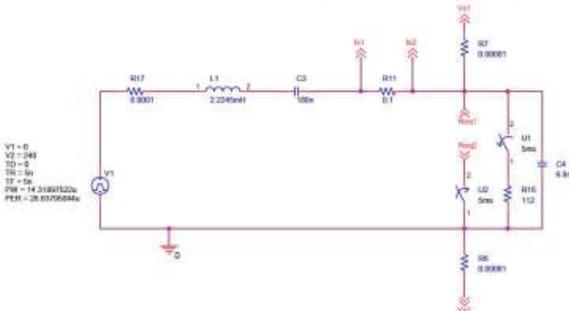


Fig. 14. Inversor meia ponte com filtro SPRL operando com o modelo da lâmpada UV desenvolvido.

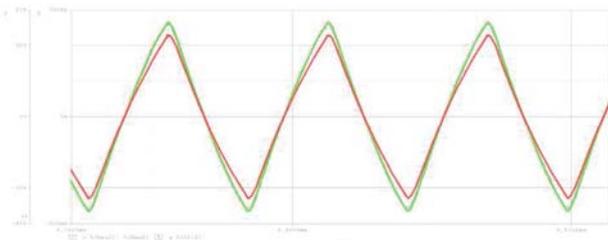


Fig. 15. Corrente (verde) e Tensão (vermelho) sobre a lâmpada UV.

Na Figura 15, observa-se que a tensão e a corrente na lâmpada são sinais triangulares, com defasagem praticamente nula entre si, o que evidencia a característica resistiva da coluna de gás da lâmpada UV durante o regime permanente. Da análise realizada pelo *software* tem-se $V_L = 24,72 V_{rms}$ e $R_L = 106,1 \Omega$, resultando numa potência $P = 5,82 W$. Comparando estes dados com os valores nominais calculados para o regime permanente na potência nominal, encontram-se erros de 4,8%, 4,9% e 3%, respectivamente para $V_L(P)$, $R_L(P)$ e P . A fim de se verificar o erro associado à frequência $f(P)$ calculada, ajusta-se a frequência da fonte V_1 até se observar a potência nominal da lâmpada. A frequência observada foi de 33,39 kHz, que apresenta um erro relativo de 4,4% em relação à frequência nominal de 34,92 kHz.

Os erros obtidos ao se comparar os resultados da simulação em *PSpice* com os resultados calculados através das regressões de $V_L(P)$, $R_L(P)$ e $f(P)$, para a potência nominal, podem ser justificados pela ausência dos filamentos no circuito equivalente do modelo em regime permanente, Figura 14, que influenciam na impedância equivalente do circuito.

Uma vez modelado e simulado o conjunto lâmpada UV e inversor meia-ponte com filtro SPRL, implementou-se fisicamente a estrutura de um reator eletrônico, utilizando como estágio inicial um pré-regulador retificador Flyback operando com correção ativa do fator de potência. O reator implementado opera com tensão de entrada na faixa universal (85 a 265 V (eficazes)), garantindo o pré-aquecimento e a operação em regime permanente adequados à lâmpada UV. Este reator apresentou um fator de potência (FP) em torno de 0,99 e rendimento em torno de 70%, valor adequado ao nível de potência processada e à constituição em dois estágios de potência. A etapa de pré-aquecimento é realizada à 58 kHz durante aproximadamente 2s. Instantes antes da ignição observam-se os sinais de tensão e de corrente na lâmpada, conforme Figura 16.

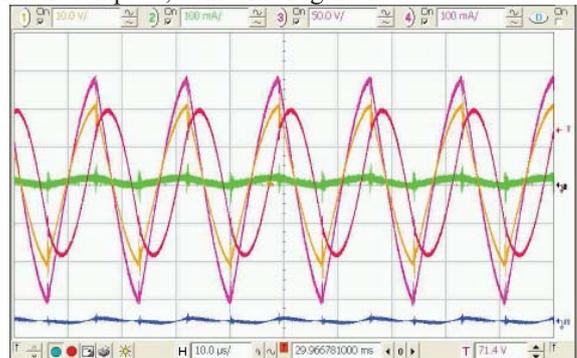


Fig. 16. Sinais de tensão e corrente na coluna de gás e nos filamentos durante a etapa de pré-aquecimento a 58 kHz. Escalas: Tensão (1): 10 V/div; Corrente (2): 100 mA/div; Tensão (3): 50 V/div; Corrente (4): 100 mA/div; Tempo: 10 μs /div.

Verifica-se que a tensão (alaranjada) e a corrente (magenta) no filamento da lâmpada estão em fase, indicando a característica resistiva do filamento. Observando os valores de pico a pico destes sinais, tem-se aproximadamente 40 V_{pp} e 560 mA_{pp} , que revelam uma resistência de 71,4 Ω e um R_{HC} de 5,9, uma vez que a resistência a frio é igual a 12 Ω . A corrente (verde) na coluna de gás é a corrente de *glow*, sendo desprezível quando comparada à corrente total, permitindo verificar que a lâmpada encontra-se na etapa de pré-aquecimento.

Na Figura 17, observam-se os sinais da tensão (vermelho) e da corrente (verde) na lâmpada durante a operação em regime permanente em sua potência nominal. Nesta condição, a tensão sobre a coluna de gás apresenta um valor de 27,19 V e frequência de 31,73 kHz que, em relação aos valores nominais determinados pelo modelo, implicam em erros de 4,6% e 9,1%.

Com os valores eficazes de tensão e corrente determina-se uma resistência equivalente de 121,5 Ω , que representa um erro de 8,9% em relação ao seu valor nominal, 111,554 Ω , determinado pelo modelo.

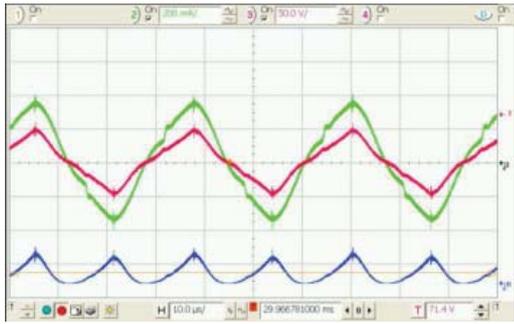


Fig. 17. Sinais de tensão e corrente na coluna de gás - regime permanente. Escalas: Tensão (2): 50 V/div; Corrente (3): 200 mA/div; Tempo: 10 μ s/div.

Para fins de validação, considerou-se um reator eletrônico convencional utilizado no acionamento de lâmpadas UV em um purificador de água comercial, realizando-se alguns ensaios com o mesmo, a fim de comparar seu desempenho com o reator implementado. O reator eletrônico comercial também utiliza um inversor meia ponte com filtro SPRL mas com etapa de controle auto-oscilante. Deste modo, não existe um protocolo adequado para o pré-aquecimento que leva à problemas de operação da lâmpada UV. Este reator apresentou FP em torno de 0,77 e rendimento em torno de 75%. Este FP é muito inferior ao do reator implementado, mas este apresenta uma eficiência ligeiramente superior, uma vez que não apresenta estágio com correção de FP. Em regime permanente, os sinais de tensão (vermelho) e corrente (magenta) na lâmpada, a tensão (alaranjada) no filamento e a corrente total (verde) do circuito são apresentados na Figura 18.

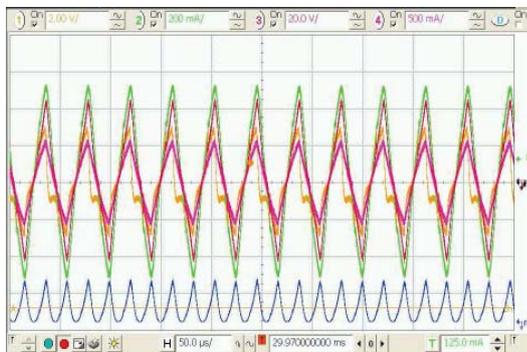


Fig. 18. Sinais de tensão (vermelho) e corrente (magenta) na coluna de gás, tensão nos filamentos (amarelo) e corrente total (verde) durante o regime permanente. Escalas: Tensão (1): 2 V/div; Corrente (2): 200 mA/div; Tensão (3): 20 V/div; Corrente (4): 500 mA/div; Tempo: 50 μ s/div.

A frequência de operação deste reator é de 24,10 kHz. Esse valor está abaixo da frequência nominal e, de acordo com a Figura 9, a potência processada é superior à nominal, sendo neste caso 7,84 W, aproximadamente 31% superior ao valor nominal de 6 W, o que danificará a lâmpada durante seu uso e possivelmente fará com que a lâmpada não maximize a energia no comprimento de onda adequado à ação germicida. Confrontando os resultados do reator comercial com o reator implementado, averigua-se que o reator implementado apresenta pontos de operação mais próximos dos valores nominais, demonstrando a validade e a viabilidade de uma modelagem adequada da carga (lâmpada UV) para o projeto de reatores eletrônicos.

Com o intuito de verificar o efeito da radiação UV no processo de desinfecção da água, utilizou-se um purificador comercial composto por filtros de polipropileno e carvão ativo e um estágio de desinfecção germicida constituído por uma lâmpada UV, sendo esta a mesma utilizada na obtenção do modelo proposto, conforme apresentado na Figura 19.



Fig. 19. À esquerda: Purificador Comercial, à direita: Lâmpada UV modelo G6T5 da Light Source Inc.

Para a confrontação, coletaram-se amostras de água não tratada em um ribeirão que percorre a cidade de Ilha Solteira-SP, aplicando-as ao purificador operando com ambos os reatores (comercial e proposto).

As amostras bruta e purificadas foram enviadas para análise bacteriológica no laboratório de Saneamento do curso de Engenharia Civil da FE/IS – UNESP. A análise bacteriológica, conforme tabela V, consistiu apenas na verificação do número de unidades formadoras de colônias, incluindo os coliformes totais e fecais.

TABELA V

Número de coliformes fecais nas amostras de água.

	Amostras de Água Analisadas		
	Bruta	Purificada (Reator Comercial)	Purificada (Reator Implementado)
Nº de Coliformes ($\times 10^5$)	900	37	18

Nota-se que a redução máxima é observada para a purificação realizada com o reator desenvolvido, sendo 50 vezes menor. Para o reator comercial, a redução é de aproximadamente 25 vezes, o que indica uma menor ação germicida. Apesar da redução no número de coliformes fecais, a concentração dos mesmos é ainda muito elevada. De acordo com a Portaria nº 2914 [18] indica a presença de patógenos na água e seu consequente impedimento de uso como água potável. Neste contexto, tendo em vista ainda a presença de patógenos, propõe-se as seguintes alternativas de melhoria para o sistema: o aumento do tempo de exposição da água à radiação ultravioleta e/ou o aumento da potência da radiação UV emitida. A primeira alternativa pode ser obtida alterando a estrutura física do purificador, com relação ao fluxo de água e sua exposição ao UV, enquanto a segunda requer a substituição da lâmpada UV ou a inserção de um número maior de unidades, considerando-se o projeto de um novo reator para operar adequadamente com as mesmas.

IV. CONCLUSÕES

As lâmpadas fluorescentes UV são funcionalmente semelhantes às lâmpadas fluorescentes convencionais, o que torna possível a utilização e aplicação das modelagens desenvolvidas para estas, tanto na modelação estática e

posteriormente uso na simulação computacional das mesmas. Desta forma, pôde-se lançar mão do parâmetro R_{HC} para obter um modelo para a etapa de pré-aquecimento dos filamentos dos eletrodos a fim de maximizar a vida útil média destas lâmpadas e com o mesmo princípio, através da regressão de quinto grau, obter uma representação da lâmpada em regime permanente. Considerando-se o modelo proposto, aplicou-se a metodologia para o projeto de um reator eletrônico para a operação de uma lâmpada UV, utilizada em um produto comercial para a purificação de água. Os resultados obtidos demonstram o adequado ajuste de potência para a mesma, obtendo-se maior eficiência para a ação germicida em relação ao produto comercial.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FEPISA e ao CNPq pelo suporte financeiro e, em especial, ao Prof. Dr. Dig Gebara do DEC-FE/IS-Unesp, pelas análises das amostras de água.

REFERÊNCIAS

- [1] S. C. Wang and Y. H. LIU, "High-power-factor electronic ballast with intelligent energy-saving control for ultraviolet drinking-water treatment systems", *IEEE Trans. Ind. Electronics*, vol. 55, no. 1, pp. 142–153, 2008.
- [2] J. R. Bolton, "Light Compendium – Ultraviolet Principles and Applications", *Inter-American Photochemical Society Newsletter*, vol. 22, no. 2, pp. 19-45, 1999.
- [3] EPA - United States Environmental Protection Agency, "Ultraviolet disinfection guidance manual for the final long term 2 enhanced surface water treatment rule", EPA 815-R-06-007, Office of Water (4601), pp. 21-37, 2006.
- [4] F. T. Wakabayashi, M. A. G. de Brito e C. S. Ferreira, "Setting the preheating and steady-state operation of electronic ballasts, considering electrodes of hot-cathode fluorescent lamps", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol.22, no.3, pp. 899-911, 2007.
- [5] M. S. Rea, "The IESNA lighting handbook: reference and application", 9 ed., New York: Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
- [6] C. S. Ferreira, "Sistema de Gerenciamento Automático de Reatores Eletrônicos com Ajuste do Nível de Luminosidade para Múltiplas Lâmpadas Fluorescentes", Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – Ilha Solteira (SP), Dezembro, 2008.
- [7] N.G. Chondrakis e F.V. Topalis, "Evaluation of heat transfer coefficient of tungsten filaments at low pressures and high temperatures", *Applied Thermal Engineering*, vol. 31, no.2, pp. 258-257, 2011.
- [8] C. A. Canesin, F. T. Wakabayashi; M. A. G. de Brito e C. S. Ferreira, "Model for electrodes filaments of hot cathode fluorescent lamps, during preheating with constant rms current", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 3, pp. 719–726, May 2007.
- [9] Y. Ji, R. Davis, C. O'Rourke; E. W. M. Chui, "Compatibility testing of fluorescent lamp and ballast systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, New York, vol. 36, no.6, pp.1271-1276, 1999.
- [10] U. Mader e P. Horn, "A Dynamical Model for the Electrical Characteristics of Fluorescent Lamps", in *Proc. of IEEE IAS Annual Meeting*, vol. 2, pp. 1928-1934, 1992.
- [11] H. H. Cardoso, R. N. Marques, H. A. C. Braga, "Parameter Estimation for a New Pspice Fluorescent Lamp Model Based on the Exponential Function", in *Proc. of IEEE/IES International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, vol. 1, pp. 500-505, 2003.
- [12] M. Cervi et al., "Fluorescent Lamp Model Based on the Equivalent Resistance Variation", in *Proc. of IEEE 37th IAS Annual Meeting*, vol.1, pp. 680-684, 2002.
- [13] C. A. Canesin, F. T. Wakabayashi, "A New Model for Tubular Fluorescent Lamps operated at High Frequencies for Dimmable Applications", in *Proc. of IEEE-ISIE-International Symposium on Industrial Electronics*, vol.1, pp. 490-494, 2003.
- [14] P. S. Almeida, "Reatores eletrônicos baseados numa topologia de inversor não ressonante de chave única: aplicação em iluminação fluorescente tubular", Monografia apresentada à Universidade Federal de Juiz De Fora Faculdade de Engenharia para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Elétrica. Juiz de Fora, 2010.
- [15] W. Kaiser, "Conversor Eletrônico de elevada eficiência para alimentação de lâmpadas fluorescentes tubulares - uma metodologia de projeto", Tese de Doutorado, Escola Politécnica da USP, São Paulo (SP), 1998.
- [16] *American National Standard for Ballasts for Fluorescent Lamps: Specifications*, ANSI C82.1-1985.
- [17] *High-Frequency Fluorescent Lamp Ballasts*, ANSI C82.11-1993.
- [18] Ministério da Saúde, "Portaria n.º 2914 – BSB, de 12 de dezembro de 2011 - Normas e padrão da potabilidade de água destinada ao consumo humano", Brasília (DF), Editora do Ministério da Saúde, Dezembro, 2011.

DADOS BIOGRÁFICOS

Bruno Pereira Matheus, nascido em Bauru (SP), em 1989. É estudante de engenharia elétrica na Universidade Estadual Paulista – UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira. Suas áreas de interesse incluem conversores CC-CC e inversores, qualidade de energia e modelação de lâmpadas.

Moacyr Aureliano Gomes de Brito, nascido em Andradina (SP), em 1982. É engenheiro eletricista (2005) e mestre (2008) pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente está desenvolvendo projeto de pesquisa de Doutorado com Inversores Monofásicos e Trifásicos em conexão à rede pelo LEP-FE/IS-UNESP. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos, técnicas de correção ativa do fator de potência, controle digital e conversores CC-CC, uso de FPGAs, inversores em conexão com a rede de energia elétrica.

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavínia (SP), em 1961, é engenheiro eletricista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FE/IS), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC INEP, Florianópolis-SC. Atualmente é professor titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FE/IS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), ex-presidente da SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (gestão 11/2004 – 10/2006), é editor associado da *IEEE Transactions on Power Electronics*. Suas áreas de interesse incluem técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC-CC, técnicas de correção ativa do FP, retificadores e inversores, aplicações das energias fotovoltaica e eólica, reatores para iluminação e técnicas modernas para o ensino de eletrônica de potência.