

NOVA METODOLOGIA DE PROJETO DO FILTRO RESSONANTE LCC DE REATORES ELETRÔNICOS PARA LÂMPADAS DE DESCARGA DE BAIXA PRESSÃO

Juliano de P. Lopes¹, Maikel F. Menke², William G. da Rosa², Fábio E. Bisogno², Álysson R. Seidel²

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Pato Branco – PR, Brasil

²Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, Brasil

e-mail: julianolopes@utfpr.edu.br

Resumo - Neste trabalho é apresentada uma nova metodologia de projeto do filtro ressonante LCC empregado em reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes. Esta metodologia pode ser aplicada no projeto de reatores que operam apenas com a potência nominal da lâmpada, ou em reatores que permitem variação de intensidade luminosa. A metodologia desenvolvida atende todos os requisitos necessários para alimentar uma lâmpada fluorescente. Além disso, respeita as condições de aquecimento dos eletrodos da lâmpada em regime permanente, garantindo a manutenção da sua vida útil. Resultados experimentais para uma lâmpada T5 HO de 39 W são apresentados para validar a metodologia proposta.

Palavras-Chave - Filtro Ressonante LCC, Lâmpada Fluorescente, Reator Eletrônico.

NEW DESIGN METHODOLOGY OF THE LCC RESONANT FILTER FOR LOW PRESSURE DISCHARGE LAMPS ELECTRONIC BALLASTS

Abstract - This work presents a new LCC resonant filter design methodology for fluorescent lamps electronic ballasts. This methodology can be employed for both electronic ballasts with dimming capability and electronic ballasts that do not allow this feature. The design methodology complies with all the requirements to supply a fluorescent lamp. Besides, it meets the lamp electrodes heating in steady state and maintains its lifespan. Experimental results for a 39 W T5 HO fluorescent lamp are presented to validate the proposed methodology.

Keywords - Electronic Ballast, Fluorescent Lamp, LCC Resonant Filter.

I. INTRODUÇÃO

As lâmpadas fluorescentes (LFs) ainda devem representar a maior parcela do mercado de iluminação de interiores por alguns anos, apesar do rápido desenvolvimento das lâmpadas de diodos emissores de luz (LEDs). Estima-se que as LFs, tubulares e compactas, correspondem a um percentual de

64% do mercado mundial de lâmpadas [1]. Com o desenvolvimento das LFs T5 de alto fluxo luminoso de saída (HO) e as lâmpadas T5 de alta eficiência (HE), a vida útil das LFs pode atingir até 36000 horas, com eficiência luminosa máxima de 104 lm/W. Estas lâmpadas possuem baixa quantidade de mercúrio e são fabricadas para operarem apenas com reatores eletrônicos (REs) [2], [3].

O funcionamento adequado de um RE depende do projeto do filtro ressonante, para que a lâmpada fluorescente tenha elevada eficiência e vida útil. Um filtro bem projetado deve garantir a ignição da lâmpada, proporcionar comutação suave aos interruptores do inversor, não permitir circulação de corrente com componente contínua (CC) na LF e proporcionar preaquecimento dos seus eletrodos. Existem diferentes configurações de filtros ressonantes utilizados para alimentar LFs: LC série, L série C paralelo, C série LC paralelo, LC série C paralelo, LC série L paralelo, L série LC paralelo e LC série LC paralelo. A configuração que atende todos os requisitos citados é o filtro LC série C paralelo [4], representado por L, C_S e C_P no inversor meia-ponte da Figura 1, o qual é amplamente empregado em REs para LFs [5]-[14]. Na literatura existem diferentes metodologias de projeto do filtro ressonante LCC para alimentação de LFs. A maioria dos trabalhos utiliza a aproximação pela componente fundamental e o modelo de resistência equivalente da lâmpada [15]-[19]. Em outro trabalho [20], é apresentada uma metodologia de projeto para o filtro LCC de REs com controle de luminosidade pela variação da frequência de operação do inversor meia-ponte.

Uma determinada configuração de filtro ressonante pode atender diferentes requisitos de operação, dependendo do

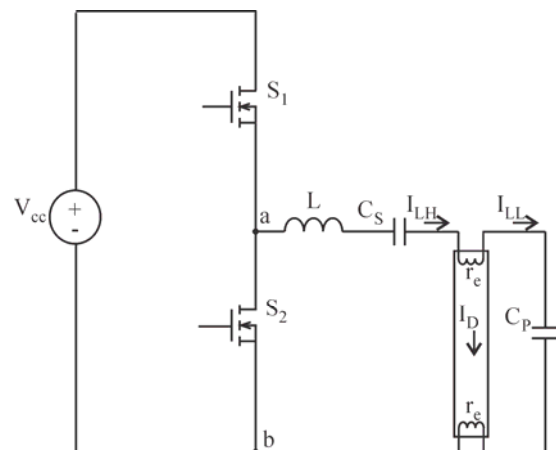


Fig. 1. Esquema simplificado de um inversor meia-ponte com filtro LCC e lâmpada fluorescente.

Artigo submetido em 28/05/2015. Primeira revisão em 17/11/2015. Aceito para publicação em 11/12/2015, por recomendação do Editor Henrique A. C. Braga.

seu fator de qualidade (Q_0) e da aplicação na qual é empregado. Esta afirmação é mais bem explicada com o auxílio da Figura 2, que mostra o ganho de potência por frequência de cinco filtros LCC projetados para um mesmo ponto de operação (frequência e potência), mas com diferentes Q_0 . No ponto nominal de projeto (P_n) os cinco filtros têm o mesmo ganho de potência, com relação à frequência de operação (f_s). Entretanto, cada filtro possui ganho distinto para qualquer frequência que não seja a nominal de projeto. Esta característica possibilita que filtros com diferentes Q_0 possam atender diferentes faixas de operação, dependendo da aplicação e dos requisitos de projeto. Quanto maior o valor de Q_0 , maior a sensibilidade do filtro à variação de parâmetros (componentes do filtro, tensão de entrada e f_s). Desta maneira, elevados valores de Q_0 não são indicados, por exemplo, em circuitos com comando auto-oscilante, nos quais a f_s é sensível à carga e aos parâmetros do filtro [21]-[24], podendo levar a um erro significativo na potência demandada pela lâmpada.

Uma importante consideração a ser feita no projeto de um RE é avaliar as condições de operação dos eletrodos da LF. Entretanto, poucos trabalhos na literatura consideram estas condições [25]-[27], fundamentais para que a lâmpada tenha a manutenção da sua vida útil. Em [11] é apresentada uma metodologia de projeto do filtro LCC que garante condições de operação adequadas aos eletrodos da LF. Todavia, o projeto não leva em consideração as condições necessárias para a ignição da lâmpada. Desta forma, este trabalho apresenta uma nova metodologia de projeto do filtro ressonante LCC empregado em REs para LFs. A metodologia proposta atende todos os requisitos necessários de um RE para alimentar uma LF. Além disso, garante que os eletrodos da lâmpada operem com correntes aceitáveis conforme os limites estabelecidos pelos fabricantes das LFs, evitando que os mesmos tenham temperatura acima ou abaixo de determinado limite. A metodologia desenvolvida é aplicada para o projeto de um filtro para uma LF que opera com a sua potência nominal. Contudo, pode ser empregada para REs que operam com variação de intensidade luminosa. O filtro projetado será utilizado para alimentar uma LF T5 HO de 39 W.

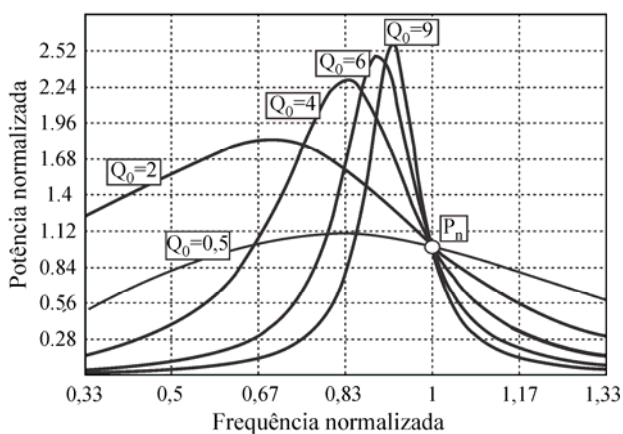


Fig. 2. Curvas características de um filtro ressonante LCC para diferentes fatores de qualidade.

II. CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO APROPRIADAS PARA OS ELETRODOS DE UMA LF

A vida útil de uma LF é determinada pela condição de seus eletrodos. Para que estes tenham longa durabilidade, sua temperatura deve ser mantida entre 700 e 1000 °C. Acima de 1000 °C, os eletrodos estarão superaquecidos, provocando evaporação do seu material emissivo e escurecendo-os. Abaixo de 700 °C, estarão com aquecimento insuficiente, diminuindo, ou até mesmo evitando a crepitação do seu material emissivo [28]. Ambos os fenômenos provocam redução da vida útil dos eletrodos e, conseqüentemente, da lâmpada [2], [25]. A temperatura dos eletrodos de uma LF é influenciada por três correntes, mostradas no inversor meia-ponte da Figura 1. A corrente I_{LH} (*lead-high current*) é a que entra no eletrodo, I_D (*discharge current*) é a corrente de descarga da LF e I_{LL} (*lead-low current*) é a corrente que sai pelo eletrodo da lâmpada. A avaliação da soma dos quadrados de I_{LH} e I_{LL} , chamada SoS (*sum of squares of the lead-in wire currents*), é um método eficaz para verificar o aquecimento dos eletrodos de uma LF [2], [25], [26].

Os eletrodos das LFs T5 são projetados para permitirem variação de I_D , dentro de determinado limite, sem que seja necessária uma fonte externa de aquecimento para mantê-los em temperatura adequada de funcionamento. Entretanto, se o RE fornecer aquecimento adicional, por exemplo, através de C_p no circuito da Figura 1, I_{LH} e I_{LL} devem ser mantidas abaixo do limite determinado pelo fabricante da lâmpada, para que não haja superaquecimento dos eletrodos. De acordo com [2], a mínima soma dos quadrados de I_{LH} e I_{LL} (SoS_{min}) necessária para manter os eletrodos em temperatura adequada possui uma relação de dependência linear com a corrente de descarga da LF e é dada por:

$$SoS_{min} = I_{LH}^2 + I_{LL}^2 = X_1 - Y_1 I_D. \quad (1)$$

Os valores dos coeficientes X_1 e Y_1 são fornecidos pelo fabricante da lâmpada. Da mesma maneira, o superaquecimento dos eletrodos pode ser prevenido pela máxima soma dos quadrados de I_{LH} e I_{LL} (SoS_{max}), de acordo com:

$$SoS_{max} = I_{LH}^2 + I_{LL}^2 = X_2 - Y_2 I_D. \quad (2)$$

Como em (1), os valores de X_2 e Y_2 são disponibilizados pelo fabricante da LF. Em algumas aplicações os limites definidos por (1) e (2) podem ser críticos para a operação da lâmpada. Desta forma, uma região de operação segura (SoS_{target}) para os eletrodos pode ser definida por [2]:

$$SoS_{target} = I_{LH}^2 + I_{LL}^2 = X_1 - z Y_1 I_D. \quad (3)$$

A inclinação da linha SoS_{target} difere da linha SoS_{min} pelo coeficiente z , dado pelo fabricante da lâmpada. Como exemplo, na Figura 3 são mostradas as linhas SoS da LF T5 HO de 39 W [2].

Na seção III é apresentada a metodologia de projeto proposta para o filtro ressonante LCC, que é baseada em

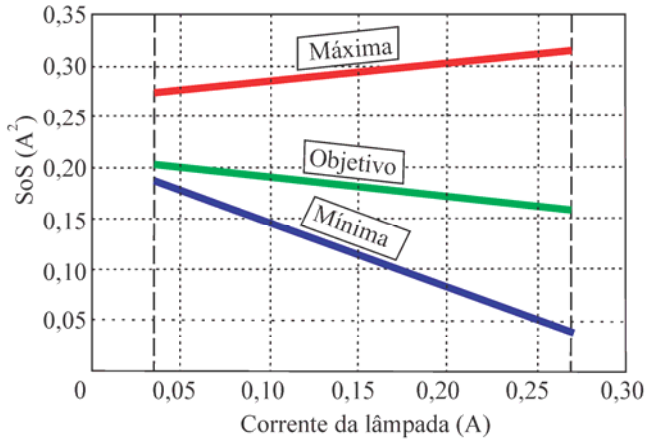


Fig. 3. Representação das linhas SoS da lâmpada T5 HO de 39 W.

[26], [29], [30]. O sistema será normalizado, tornando-o dependente apenas do Q_0 e do ponto de operação desejado. No projeto é considerado o aquecimento dos eletrodos e a ignição da LF, características essenciais para o bom funcionamento do conjunto reator/lâmpada.

III. PROJETO DOS COMPONENTES DO FILTRO LCC

Para o projeto do filtro ressonante LCC algumas hipóteses são consideradas: os interruptores MOSFET do circuito inversor da Figura 1 são considerados ideais, os componentes L , C_s e C_p são ideais e sem elementos parasitas. As definições e relações mostradas em (4)-(8) são a base para determinar as equações de projeto dos componentes do filtro:

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{LC_s}} \quad (4)$$

$$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{LC_p}} \quad (5)$$

$$A_1 = \frac{\omega_1}{\omega_s} \quad (6)$$

$$A_2 = \frac{\omega_2}{\omega_s} \quad (7)$$

$$Q_0 = \frac{\omega_1 L}{R} = \frac{1}{\omega_1 C_s R} \quad (8)$$

onde:

- R - Resistência equivalente da LF;
- ω_1 - Frequência angular de ressonância entre L e C_s ;
- ω_2 - Frequência angular de ressonância entre L e C_p ;
- ω_s - Frequência angular de comutação.

Os coeficientes A_1 e A_2 são definidos para normalizar ω_1 e ω_2 com relação à ω_s . A impedância total do filtro ressonante é dada por:

$$Z_{LCC} = j\omega_s L \left(1 - \frac{1}{\omega_s^2 LC_s} + \frac{R}{j\omega_s L (1 + j\omega_s C_p R)} \right) \quad (9)$$

Utilizando (4)-(8) em (9) obtém-se (10), apresentada no final desta página. A potência ativa demandada pela LF é dada por:

$$P_{LF} = \text{Re} \left(\frac{V_{ef}^2}{Z_{LCC}} \right) \quad (11)$$

onde:

- P_{LF} - Potência ativa demandada pela lâmpada;
- V_{ef} - Valor eficaz da componente fundamental da forma de onda de tensão aplicada ao filtro ressonante.

A aproximação pela componente fundamental é válida devido à característica passa-baixa do filtro LCC. Desta forma, o valor de V_{ef} é calculado por:

$$V_{ef} = \frac{\sqrt{2}V_{cc}}{\pi} \quad (12)$$

onde V_{cc} é tensão de entrada do inversor meia-ponte. Aplicando (10) em (11) obtém-se:

$$\frac{1}{Z_{LCC}} = \frac{\omega_s L \left(\frac{\frac{Q_0}{A_1}}{\frac{1}{A_2^4} + \frac{Q_0^2}{A_1^2}} \right) - j\omega_s L \left(1 - A_1^2 - \frac{\frac{1}{A_2^2}}{\frac{1}{A_2^4} + \frac{Q_0^2}{A_1^2}} \right)}{\left[\omega_s L \left(\frac{\frac{Q_0}{A_1}}{\frac{1}{A_2^4} + \frac{Q_0^2}{A_1^2}} \right) \right]^2 + \left[\omega_s L \left(1 - A_1^2 - \frac{\frac{1}{A_2^2}}{\frac{1}{A_2^4} + \frac{Q_0^2}{A_1^2}} \right) \right]^2} \quad (10)$$

$$\frac{P_{LF}}{V_{ef}^2} = \frac{\left(\frac{Q_0}{A_1} \right) \left(\frac{1}{A_2^4 + A_1^2} + \frac{Q_0^2}{A_1^2} \right)}{\omega_s L \left[\left(\frac{Q_0}{A_1} \right)^2 + \left(1 - A_1^2 - \frac{1}{A_2^2} \right)^2 \right]} \quad (13)$$

Multiplicando ambos os membros de (13) por R obtém-se:

$$K_t = \frac{1}{Q_0} \frac{\left(\frac{A_1}{Q_0 A_2^4 + A_1} \right)}{\left[\left(\frac{Q_0}{A_1} \right)^2 + \left(1 - A_1^2 - \frac{1}{A_2^2} \right)^2 \right]} \quad (14)$$

onde K_t é o coeficiente de transferência de potência. O valor de K_t define a quantidade de potência que o sistema pode fornecer, relacionando a carga com a tensão ou corrente de entrada do filtro [29]. Assumindo condições ideais de operação, K_t é dado por:

$$K_t = \frac{P_{LF} R}{V_{ef}^2} \quad (15)$$

O filtro deve operar na sua frequência de ressonância antes da ignição da LF, pois, caso opere em outra frequência, o ganho de tensão pode não ser suficiente para formar o arco de descarga e a ignição da lâmpada pode não ocorrer. Desta maneira, define-se o coeficiente A_{2ig} :

$$A_{2ig} = \sqrt{A_1^2 + A_2^2} = \frac{\omega_r}{\omega_s} \quad (16)$$

onde ω_r é a frequência angular de ressonância do filtro antes da ignição. Em (17) é definido ω_r , quando a lâmpada pode ser considerada como um circuito aberto, tal que:

$$\omega_r = \frac{1}{\sqrt{L \frac{C_S C_P}{C_S + C_P}}} \quad (17)$$

O coeficiente A_{2ig} normaliza ω_r com relação à ω_s , com o objetivo de garantir a ignição da LF através da inserção de (16) nas equações de projeto dos componentes do filtro LCC. Inserindo A_{2ig} em (14) obtém-se (18), apresentada no final desta página. Para projetar o filtro, deve-se calcular A_1 em função da quantidade de potência transferida e do Q_0 desejado. O valor de A_1 indica a disparidade de ω_1 com relação a ω_s . Quanto mais próximo de 1, mais próximo da ressonância o filtro estará operando. A solução de (18) fornece dois valores positivos de A_1 , um maior e outro menor que 1. Ambos os valores satisfazem o ponto de operação desejado e poderiam ser utilizados para o cálculo de L e C_S . O valor de A_1 maior que 1 indica que ω_s é menor que ω_1 . Operação abaixo da frequência de ressonância pode comprometer a aproximação pela componente fundamental empregada no projeto, devido à presença de uma maior quantidade de harmônicas na corrente do filtro. Além disso, um dos requisitos que deve ser atendido é a comutação suave, garantida pela operação do inversor acima da frequência de ressonância do filtro. Para satisfazer esta condição deve ser escolhido o valor de A_1 menor que 1. Após definido o valor de A_1 , L e C_S devem ser calculados respectivamente por:

$$L = \frac{Q_0 R}{A_1 \omega_s} \quad (19)$$

$$C_S = \frac{1}{Q_0 A_1 \omega_s R} \quad (20)$$

Para projetar C_P utilizam-se (5), (7) e (16), obtendo-se:

$$C_P = \frac{1}{\omega_s^2 L (A_{2ig}^2 - A_1^2)} \quad (21)$$

$$K_t = \frac{1}{Q_0} \frac{\left(\frac{1}{Q_0 (A_{2ig}^2 - A_1^2)^2} + \frac{Q_0}{A_1^2} \right)}{\left[\left(\frac{Q_0}{A_1} \right)^2 + \left(1 - A_1^2 - \frac{1}{\frac{1}{(A_{2ig}^2 - A_1^2)} + \frac{Q_0^2 (A_{2ig}^2 - A_1^2)}{A_1^2}} \right)^2 \right]} \quad (18)$$

Diferentemente de L e C_S , o valor de C_P não depende de Q_0 . As equações (19)-(21) são utilizadas para calcular os componentes do filtro ressonante utilizando um critério que garante a ignição da LF. Contudo, para uma metodologia de projeto completa e eficaz devem-se, também, utilizar critérios que satisfaçam as condições de operação adequadas para os eletrodos da lâmpada.

A. Restrição de Projeto para C_P

O capacitor paralelo do filtro ressonante LCC é responsável pelo alto ganho de tensão para ignição da lâmpada. Todavia, do ponto de vista de aquecimento dos eletrodos, este capacitor não é necessário, caso a lâmpada empregada opere apenas com sua potência nominal. Desta forma, não é necessário determinar um valor mínimo de C_P para manter o aquecimento dos eletrodos dentro dos limites estabelecidos pelas linhas SoS. Pelo fato de atuar como fonte externa de aquecimento, dependendo da sua capacitância, C_P pode provocar aquecimento excessivo dos eletrodos, acelerando o fim da vida útil da lâmpada. Por este motivo, deve-se avaliar se o valor de C_P projetado não excede o limite máximo de capacitor que garante operação dos eletrodos da lâmpada dentro da região adequada, de acordo com o método SoS.

A impedância de C_P é normalmente muito maior que a resistência dos eletrodos da LF. Por este motivo, pode-se considerar que a tensão sobre C_P é a mesma tensão da lâmpada no inversor da Figura 1. O valor máximo de C_P que garante a operação dos eletrodos da LF dentro de uma região segura é determinado em função da máxima corrente I_{LL} e da máxima tensão na LF utilizados no projeto, sendo calculado por [31]:

$$C_{P_{\max}} = \frac{|I_{LL_{\max}}|}{|V_{LF_{\max}}|\omega_s} \quad (22)$$

onde:

$C_{P_{\max}}$ - Valor máximo de C_P ;

$I_{LL_{\max}}$ - Valor máximo da corrente que sai pelo eletrodo da LF, de acordo com o método SoS;

$V_{LF_{\max}}$ - Valor máximo da tensão na LF.

Os valores de $I_{LL_{\max}}$ e $V_{LF_{\max}}$ são fornecidos pelo fabricante da lâmpada. Se o valor de C_P calculado em (21) for menor do que $C_{P_{\max}}$, não há restrição na metodologia de projeto do filtro LCC. Caso contrário, se o C_P projetado exceder o valor de $C_{P_{\max}}$, este não poderá ser empregado no filtro para não comprometer a vida útil da LF. A solução adotada neste trabalho foi apresentada em [26]. Quando o valor de C_P calculado for maior que $C_{P_{\max}}$, pode-se optar por dividir a capacitância de C_P em dois capacitores (C_{P1} e C_{P2}), posicionando-os conforme mostra a Figura 4. O capacitor que determina o aquecimento dos eletrodos é C_{P1} . Logo, o valor comercial deste capacitor deve ser menor que $C_{P_{\max}}$. O valor de C_{P2} deve ser tal que a associação entre C_{P1} e C_{P2} resulte no valor de C_P calculado em (21). Mesmo que seja necessária a divisão de C_P em C_{P1} e C_{P2} , a potência demandada pela lâmpada não sofre alteração significativa, o que ocorre porque a impedância dos eletrodos é insignificante, quando comparada com a impedância dos componentes do filtro LCC.

A metodologia de projeto proposta para o filtro ressonante LCC é resumida no fluxograma da Figura 5. Destaca-se que, se houver variação de intensidade luminosa da LF, deve-se avaliar a resposta do filtro para toda a faixa de operação para verificar se atende os requisitos de projeto. Caso não atenda, deve-se alterar Q_0 para que seja respeitado o projeto. Após, devem-se avaliar as linhas SoS da LF para toda região de operação do RE, para verificar as condições de operação dos eletrodos da lâmpada.

IV. EXEMPLO DE PROJETO DO FILTRO LCC

Nesta seção é apresentado um exemplo para demonstrar a metodologia de projeto desenvolvida para o filtro ressonante LCC. São apresentados três projetos com diferentes Q_0 para a LF T5 HO de 39 W. Os dados de projeto dos filtros são mostrados na Tabela I. Os valores de Q_0 foram escolhidos aleatoriamente, para exemplificar a metodologia. O valor eficaz da componente fundamental da tensão aplicada ao filtro é 135 V e K_t é 0,77. Estes dados são obtidos de (12) e (15), respectivamente. O coeficiente A_1 pode ser determinado por (18) ou graficamente em função da potência da lâmpada, substituindo (15) em (18) e isolando o termo P_{LF} . Na Figura 6 é mostrada a potência demandada pela LF em função de A_1 , para os três filtros a serem projetados. Para que seja obtida a potência nominal da LF, para cada filtro, deve-se escolher um valor de A_1 que corresponda à potência de 39 W na Figura 6. Na Tabela II são mostrados os valores de A_1 obtidos para cada fator de qualidade. Devem-se escolher os valores de A_1 menores que 1, para que o filtro tenha característica indutiva, conforme citado na seção III. Desta forma, os valores de A_1 adotados são 0,58, 0,69 e 0,75, para os fatores de qualidade Q_{01} , Q_{02} e Q_{03} , respectivamente. Após definido o valor de A_1 para cada filtro, podem-se calcular L , C_S e C_P por (19), (20) e (21), respectivamente. Entretanto, a frequência de operação não foi definida, logo, podem-se determinar os elementos do filtro através da Figura 7, Figura 8 e Figura 9, em que é realizada uma varredura nos valores de L , C_S e C_P em função de f_s em (19), (20) e (21), respectivamente. Como o filtro ressonante será empregado em um RE para uma LF, recomenda-se a escolha de f_s entre 35 e 50 kHz. Todavia, se o filtro for utilizado para outra aplicação, pode-se definir outro critério específico para a escolha de f_s . Neste trabalho, foi escolhida a frequência de 35 kHz. Na Figura 9, além do valor de C_P em função da frequência, é mostrado $C_{P_{\max}}$ em função de f_s . Pode-se observar pela figura que, independente de f_s , o valor de C_P é menor que $C_{P_{\max}}$. Caso em algum valor específico, ou conjunto de valores de f_s , C_P fosse maior que $C_{P_{\max}}$, este poderia ser um critério de restrição adotado na escolha de f_s .

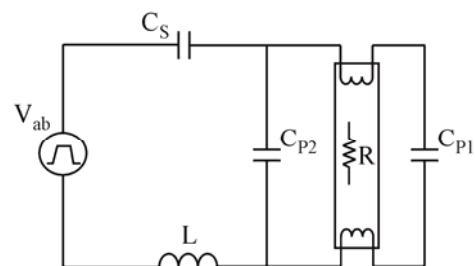


Fig. 4. Filtro LCC com dois capacitores paralelos.

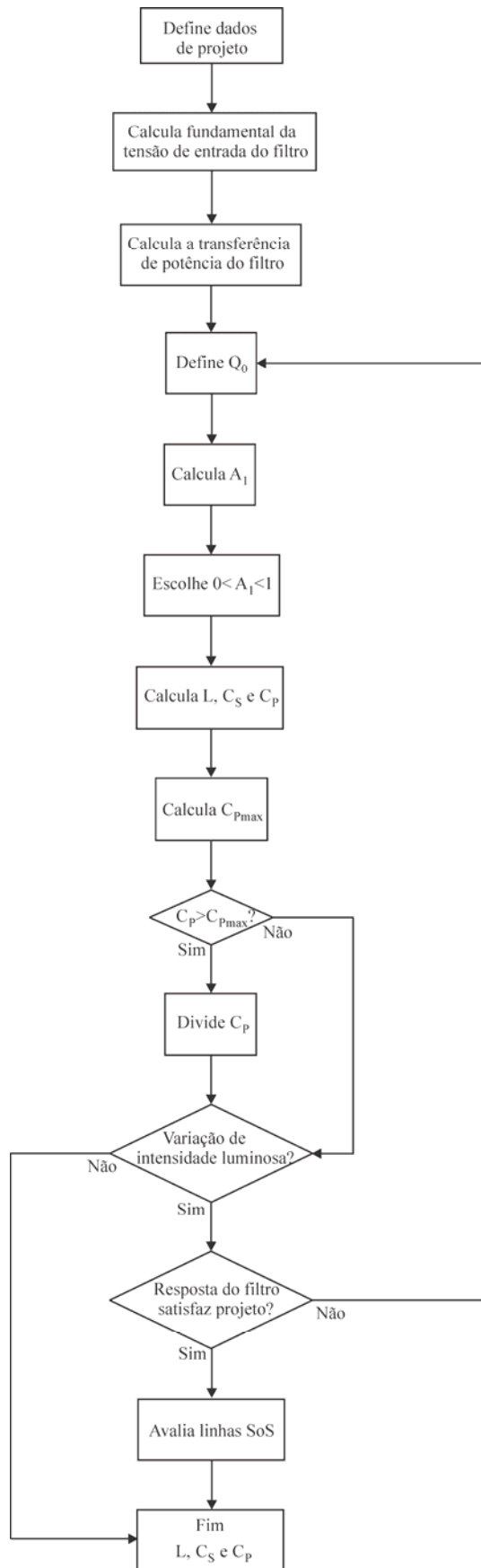


Fig. 5. Fluxograma do projeto do filtro LCC.

TABELA I
Parâmetros de Projeto dos Filtros LCC

Tensão de entrada do inversor	$V_{cc}=300$ V
Potência da LF	$P_{LF}=39$ W
Resistência equivalente da LF	$R_{lamp}=363$ Ω
Máxima tensão da LF	$V_{LFmax}=129$ V
Máxima corrente I_{LL}	$I_{LLmax}=0,370$ A
Corrente nominal de descarga	$I_D=0,330$ A
Máxima corrente I_{LH}	$I_{LHmax}=0,475$ A
Fator de qualidade do Filtro 1	$Q_{01}=1,0$
Fator de qualidade do Filtro 2	$Q_{02}=1,5$
Fator de qualidade do Filtro 3	$Q_{03}=2,0$

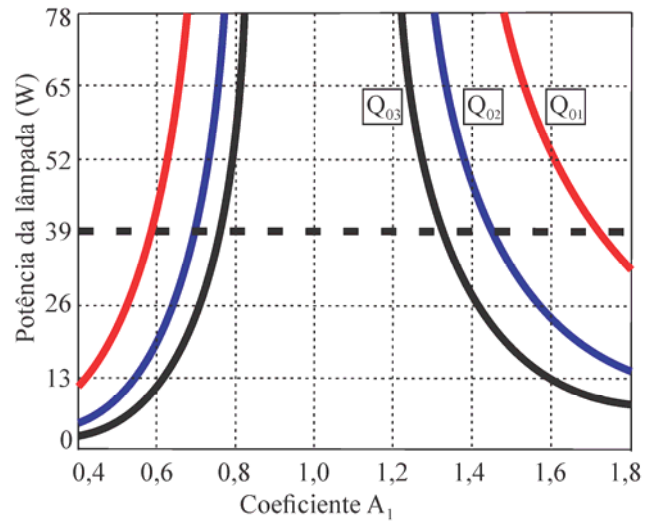


Fig. 6. Potência da lâmpada em função de A_1 .

TABELA II
Valores de A_1 Para Cada Filtro Projetado

	$A_1 < 1$	$A_1 > 1$
Q_{01}	0,58	1,71
Q_{02}	0,69	1,44
Q_{03}	0,75	1,32

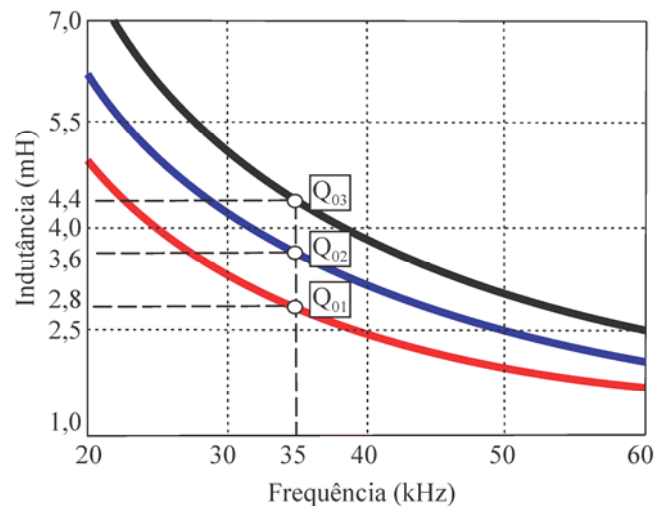


Fig. 7. Indutor ressonante em função da frequência de operação do filtro.

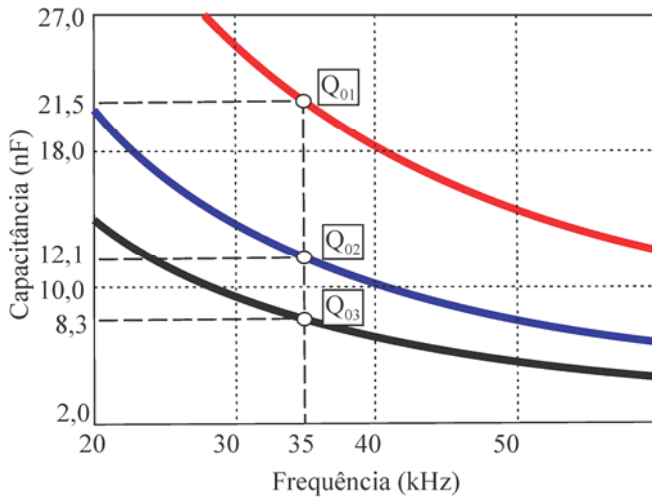


Fig. 8. Capacitor série ressonante em função da frequência de operação do filtro.

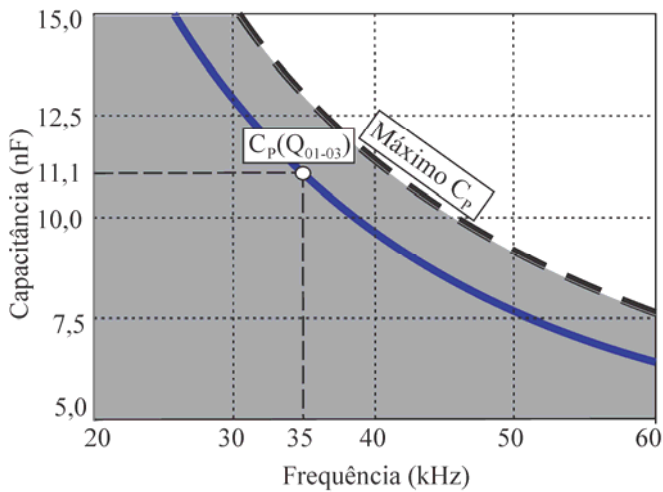


Fig. 9. Capacitor paralelo ressonante em função da frequência de operação do filtro.

Na Tabela III são mostrados os valores de L , C_s e C_p obtidos para $f_s=35$ kHz, através da Figura 7, Figura 8 e Figura 9, respectivamente. Pode ser observado que, como citado na seção III, o valor de C_p é independente de Q_0 , sendo igual para os três filtros.

A metodologia de projeto desenvolvida pode ser aplicada para REs com variação de intensidade luminosa da lâmpada. Desta forma, para finalizar o exemplo de projeto foram avaliadas experimentalmente as linhas SoS da LF T5 HO de 39 W, para os três filtros operando sob variação da tensão de entrada do inversor meia-ponte. Na Figura 10 são apresentadas as linhas SoS da LF para o inversor operando com uma variação de até 50% no valor da tensão de entrada, com relação ao nominal, 300 V. Esta faixa de variação da tensão de entrada corresponde a uma variação de aproximadamente 40% na potência demandada pela LF, cujos extremos são indicados na Figura 10 por P_{max} (39 W) e P_{min} (24 W). Pode-se observar pela figura que os três filtros atendem a condição de aquecimento dos eletrodos da LF, para a faixa de variação de intensidade luminosa avaliada. As linhas SoS para os três filtros são similares, o que ocorre pois, idealmente, todos os filtros têm a mesma variação de

TABELA III
Elementos do Filtro Ressonante

Filtro 1	
Indutor ressonante	$L_1=2,84$ mH
Capacitor série ressonante	$C_{S1}=22$ nF
Capacitor paralelo ressonante	$C_{P1}=11$ nF
Filtro 2	
Indutor ressonante	$L_2=3,57$ mH
Capacitor série ressonante	$C_{S2}=12$ nF
Capacitor paralelo ressonante	$C_{P2}=11$ nF
Filtro 3	
Indutor ressonante	$L_3=4,37$ mH
Capacitor série ressonante	$C_{S3}=8,2$ nF
Capacitor paralelo ressonante	$C_{P3}=11$ nF

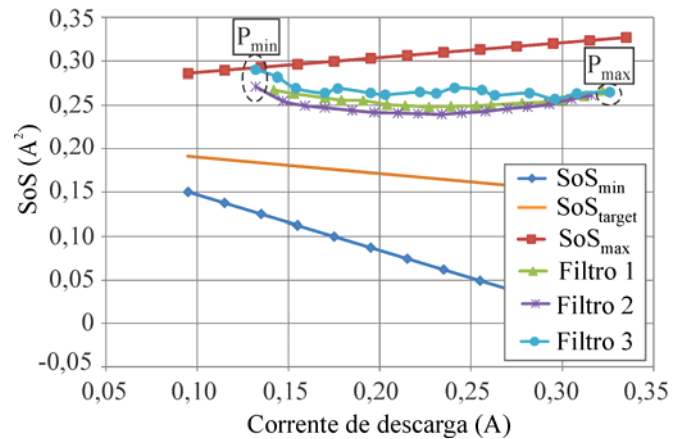


Fig. 10. Representação das linhas SoS para os filtros projetados.

ganho, proporcionada pelas variações da tensão de entrada do inversor e da resistência equivalente da LF. Se a faixa de variação da tensão de entrada for superior a 50%, a tendência, de acordo com o comportamento das linhas SoS da Figura 10, é que os filtros não atendam à exigência de aquecimento dos eletrodos da LF para níveis extremos de variação da intensidade luminosa. Este fato é propiciado pelo aumento significativo da resistência equivalente da LF para níveis de baixa potência. Este incremento da resistência da lâmpada faz com que a corrente do filtro LCC seja aumentada, apesar do decremento da corrente de descarga da LF e, conseqüentemente, da potência demandada pela lâmpada. Se fosse escolhido o método da variação da frequência de operação do inversor meia-ponte, seria possível aumentar a faixa de variação da intensidade luminosa da lâmpada para diferentes fatores de qualidade do filtro. Isto ocorreria, pois, para cada valor de frequência (diferente da nominal de projeto) o filtro teria ganho diferente para fatores de qualidade distintos, resultando em valores diferentes das correntes I_{LL} e I_{LH} . Contudo, na prática, o método de variação da intensidade luminosa da LF pelo controle da frequência de operação tem como característica baixa eficiência, além de uma queda abrupta na potência demandada pela lâmpada em determinada frequência de operação do inversor, o que dificulta o controle de luminosidade [31].

V. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados experimentais dos filtros projetados na seção IV. O inversor meia-ponte da Figura 1 foi implementado com os três filtros e a LF T5 HO de 39 W. Foram obtidas as principais formas de onda do circuito, para que a metodologia de projeto proposta para o filtro LCC pudesse ser avaliada. Na Figura 11 são apresentadas as formas de onda de tensão, corrente e potência demandada pela LF, para o inversor meia-ponte operando com os parâmetros nominais de projeto e com o Filtro 1 (Tabela III). A potência medida foi de 38,8 W, próxima a nominal da lâmpada, 39 W. Os valores de tensão na LF e corrente de descarga medidos foram 118,6 V e 327 mA, respectivamente, também próximos aos seus valores nominais, 119 V e 330 mA. Na Figura 12 são mostradas as formas de onda de tensão, corrente e potência na LF para o Filtro 2. A potência medida foi de 39,3 W, enquanto os valores medidos de tensão e corrente foram 119,5 V e 329 mA, respectivamente. Assim como no caso do Filtro 1, todos os valores mensurados foram próximos aos nominais da lâmpada. Na Figura 13 são mostradas as formas de onda de tensão, corrente e potência na LF, para o Filtro 3. Os valores medidos foram 38,8 W, 118,7 V e 327 mA, próximos aos nominais da lâmpada empregada. Na Figura 14, Figura 15 e Figura 16 são apresentadas as formas de onda de tensão e corrente na LF durante o estágio de ignição para o Filtro 1, Filtro 2 e Filtro 3, respectivamente, para a condição de mínima potência demandada pela lâmpada. Pode-se observar o alto ganho de tensão proporcionado pelos filtros ressonantes durante a partida da lâmpada para a condição mais crítica avaliada neste trabalho. Logo, a ignição para os parâmetros nominais de projeto é garantida. Na Figura 17, Figura 18 e Figura 19 são mostradas as formas de onda de tensão e corrente no interruptor S_1 do inversor operando com o Filtro 1, Filtro 2 e Filtro 3, respectivamente. Pode ser observada pelas três formas de onda a comutação sob zero de tensão (ZVS) do inversor meia-ponte.

Na Figura 20 é mostrada a potência demandada pela LF em função da tensão de entrada do inversor meia-ponte. É apresentada uma comparação entre os valores projetados para os três filtros e os valores obtidos experimentalmente, por meio do analisador de potência Yokogawa WT1800. Pode-se observar pela Figura 20 que os valores de potência obtidos experimentalmente para os três filtros foram próximos aos valores projetados. A diferença entre os valores projetados e os medidos experimentalmente deve-se as não idealidades dos componentes do filtro e por uma possível variação percentual nos valores dos indutores ressonantes, com relação ao valor nominal.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi apresentada uma nova metodologia de projeto do filtro ressonante LCC utilizado em reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes. A metodologia apresentada atende os requisitos de ignição e alimentação da lâmpada em regime permanente. Além disso, garante a operação dos eletrodos da lâmpada dentro dos limites

estipulados pelas linhas SoS de cada LF, evitando o desgaste acelerado dos seus eletrodos e garantindo a manutenção da vida útil da lâmpada.

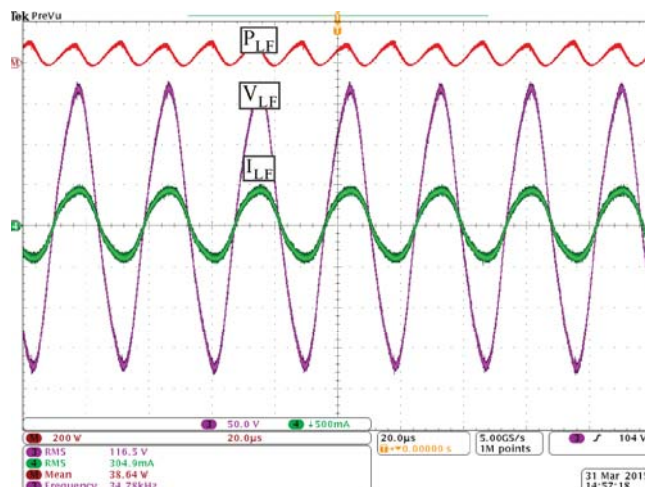


Fig. 11. Tensão, corrente e potência na LF para o Filtro 1 (50 V/div; 500 mA/div; 200 W/div; 20 µs /div).

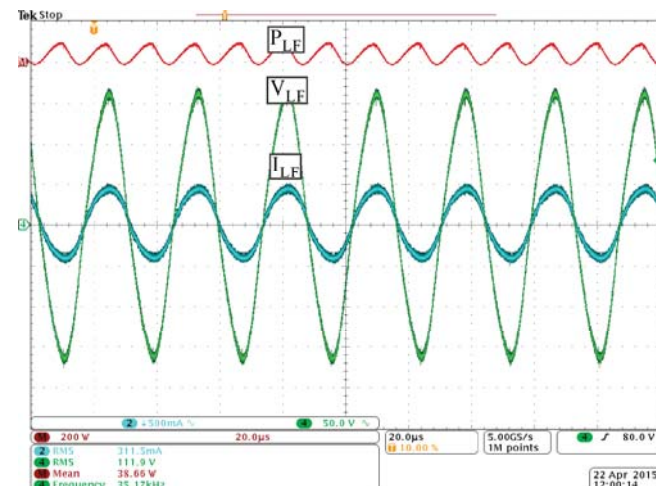


Fig. 12. Tensão, corrente e potência na LF para o Filtro 2 (50 V/div; 500 mA/div; 200 W/div; 20 µs /div).

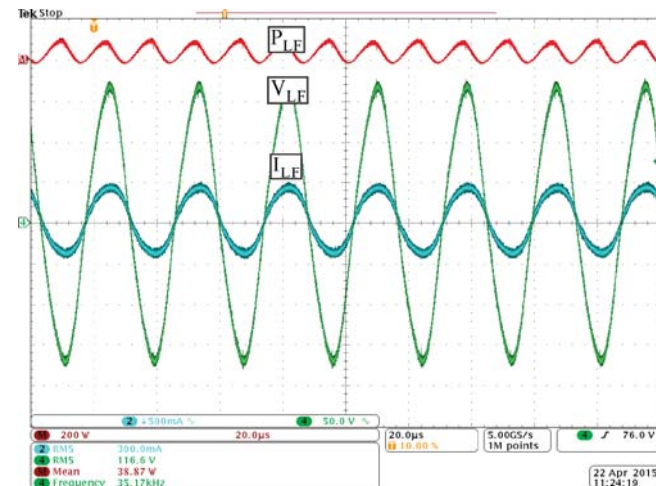


Fig. 13. Tensão, corrente e potência na LF para o Filtro 3 (50 V/div; 500 mA/div; 200 W/div; 20 µs /div).

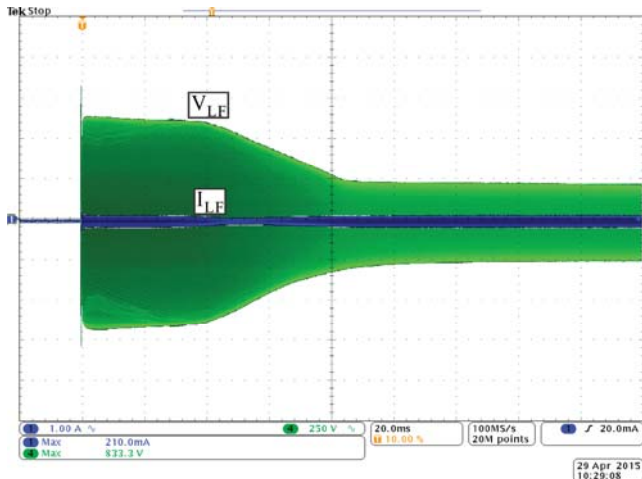


Fig. 14. Tensão e corrente na LF durante a ignição para o Filtro 1 (250 V/div; 1 A/div; 20 ms/div).

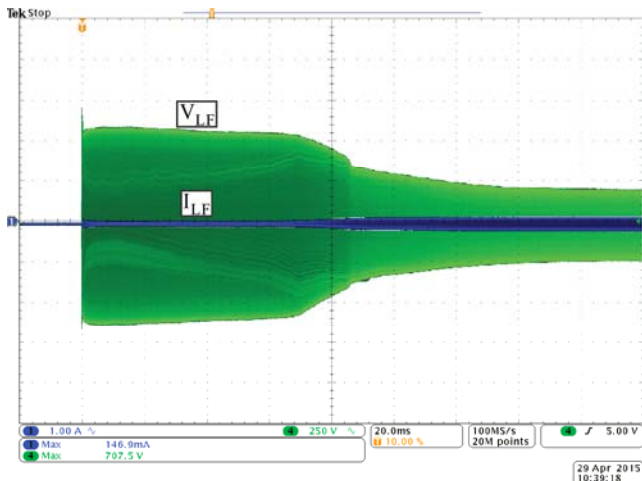


Fig. 15. Tensão e corrente na LF durante a ignição para o Filtro 2 (250 V/div; 1 A/div; 20 ms/div).

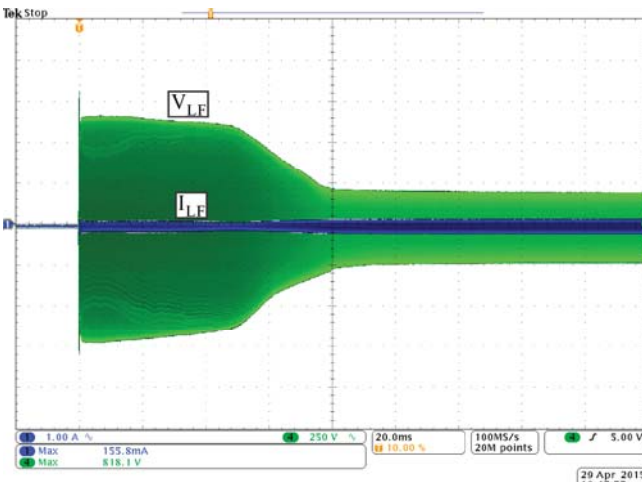


Fig. 16. Tensão e corrente na LF durante a ignição para o Filtro 3 (250 V/div; 1 A/div; 20 ms/div).

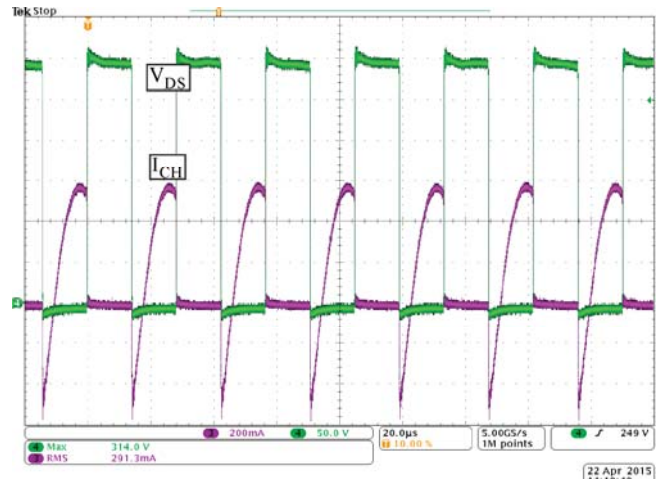


Fig. 17. Tensão e corrente no interruptor S_1 do inversor meia-ponte operando com Filtro 1 (50 V/div; 200 mA/div; 20 μ s/div).

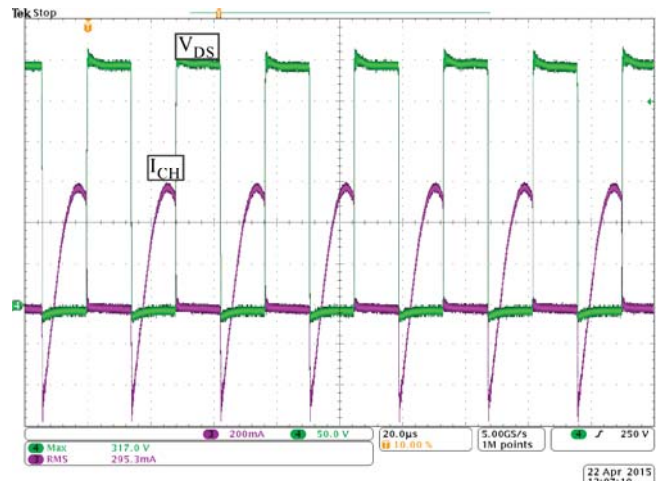


Fig. 18. Tensão e corrente no interruptor S_1 do inversor meia-ponte operando com Filtro 2 (50 V/div; 200 mA/div; 20 μ s/div).

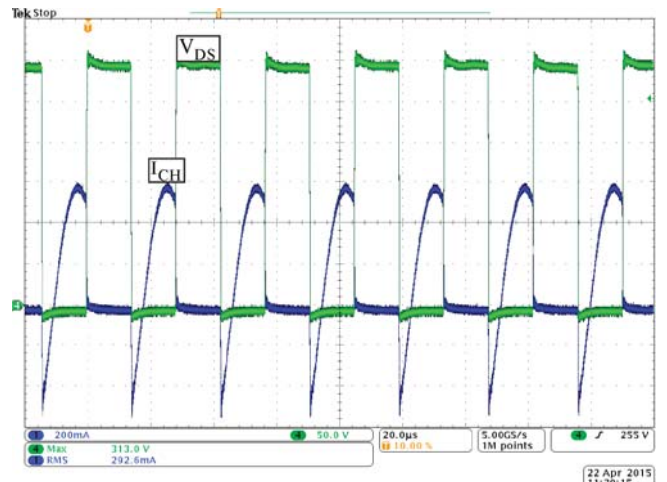


Fig. 19. Tensão e corrente no interruptor S_1 do inversor meia-ponte operando com Filtro 3 (50 V/div; 200 mA/div; 20 μ s/div).

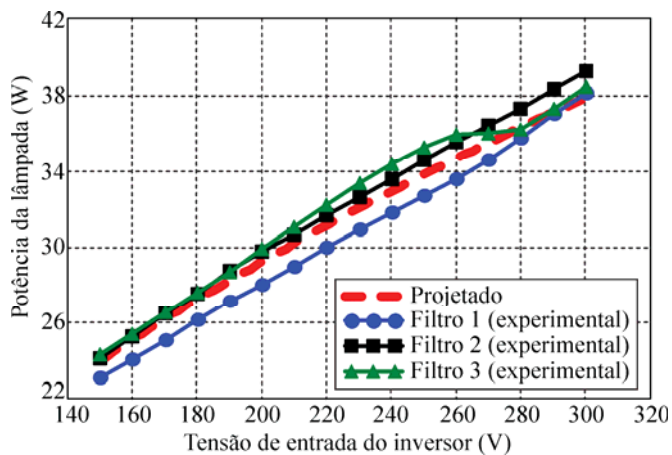


Fig. 20. Potência demandada pela LF em função da tensão de entrada do inversor meia-ponte.

A metodologia de projeto apresentada neste artigo é diferente dos projetos convencionais de filtros para reatores eletrônicos, à medida que normaliza o sistema, tornando-o dependente apenas do fator de qualidade e do ponto de operação desejado. A escolha do fator de qualidade do filtro antes do projeto é um critério importante, pois permite que, pela sua alteração, o filtro possa atender diferentes requisitos de projeto, como, por exemplo, resposta para variação da intensidade luminosa da lâmpada, caso seja prevista no projeto.

A escolha do fator de qualidade do filtro afeta diretamente o fator de crista da corrente da lâmpada, que tem influência no tempo de vida útil da mesma. O fator de crista não foi avaliado neste trabalho, contudo, através dos resultados experimentais é possível observar que o mesmo não compromete a metodologia apresentada. Caso o fator de crista apresentasse um valor elevado, uma alternativa seria aumentar o fator de qualidade do filtro ressonante, melhorando sua eficiência com relação ao conteúdo harmônico da corrente da lâmpada.

A metodologia de projeto foi avaliada utilizando uma fonte CC para alimentar o inversor meia-ponte e, conseqüentemente, o filtro LCC. Entretanto, o inversor poderia ser conectado diretamente à rede pública de alimentação por meio de um retificador de onda completa com filtro capacitivo ou através de um estágio de correção de fator de potência.

Os resultados experimentais obtidos mostraram-se adequados e confirmaram as relações estabelecidas no procedimento de projeto. Os erros obtidos foram bastante reduzidos e estão dentro de uma margem aceitável. Desta forma, pode-se afirmar que a metodologia de projeto proposta para o filtro ressonante LCC atende todos os requisitos para alimentar lâmpadas fluorescentes, tornando-se uma alternativa interessante no projeto de reatores eletrônicos para este tipo de lâmpada de descarga.

REFERÊNCIAS

[1] Joint Research Centre, “2014 Update on the Status of LED Market”, 2014. [Online]. Disponível: www.ec.europa.eu/jrc.

[2] Philips, “Philips Master TL5 Lamps”, 2006. [Online]. Disponível: www.lighting.philips.com.br.

[3] GE Lighting, “T5 Long Last”, 2013. [Online]. Disponível: www.gelighting.com.

[4] F. E. Bisogno, A. R. Seidel, R. Holsbach, R. N. do Prado, “Resonant Filter Applications in Electronic Ballast”, in *Proc. of IAS*, vol. 1, pp. 348-354, 2002.

[5] C. B. Nascimento, A. J. Perin, “Reatores Eletrônicos de Baixo Custo com Comando Auto-oscilante para Lâmpadas T5”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 18, nº 2, pp. 937-945, Março/Maio 2013.

[6] M. Polonskii, V. H. Schulz, M. Visoto, “Projeto de Reator Multiressonante para Lâmpadas Fluorescentes Modelo T5 de 28 W”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 16, nº 2, pp. 110-117, Março/Maio 2011.

[7] M. Polonskii, “Alimentação de Lâmpadas Fluorescentes Compactas Integrais a Partir de Conversor CA-CC com PFC e Tensão de Saída Variável”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 16, nº 2, pp. 130-137, Março/Maio 2011.

[8] J. P. Lopes, M. F. Silva, M. A. Dalla Costa, F. E. Bisogno, R. N. do Prado, A. R. Seidel, “Feedforward Regulation Method for Self-Oscillating Electronic Ballast for Fluorescent Lamps”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 59, nº 4, pp. 1869-1878, April 2012.

[9] J-C. Hsieh, J. Lin, “Novel Single-Stage Self-Oscillating Dimmable Electronic Ballast with High Power Factor Correction”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 58, nº 1, pp. 250-262, January 2011.

[10] J. de P. Lopes, M. F. Menke, W. A. Venturini, F. E. Bisogno, A. R. Seidel, “Reator Eletrônico Auto-Oscilante com Tensão de Entrada Universal e Correção de Fator de Potência”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 18, nº 2, pp. 972-981, Março/Maio 2013.

[11] C. B. Nascimento, M. A. I. Martins, M. S. Kaster, A. J. Perin, “Structures of Single Stage and High Power Factor Electronic Ballasts Integrating the Boost and Ballast Inductors”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 18, nº 2, pp. 954-961, Março/Maio 2013.

[12] B. P. Matheus, M. A. G. Brito, C. A. Canesin, “Modelagem de Lâmpada Fluorescente UV em uma Aplicação para Fins de Purificação de Água”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 18, nº 2, pp. 946-953, Março/Maio 2013.

[13] M. S. Perdigão, A. R. Seidel, H. V. Marques, J. M. Alonso, E. S. Saraiva, “Resonant Circuit Design Procedure for Multi-Watt T5 Electronic Ballasts”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 18, nº 1, pp. 831-842, Dezembro/Fevereiro 2013.

[14] C. B. Nascimento, A. J. Perin, “Reatores Eletrônicos de Baixo Custo com Comando Auto-oscilante para Lâmpadas T5”, *Eletrônica de Potência – SOBRAEP*, vol. 18, nº 2, pp. 937-945, Março/Maio 2013.

[15] M. K. Kazimierczuk, W. Sazraniec, “Electronic Ballast

- for Fluorescent Lamps”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 8, nº 4, pp. 386-395, October 1993.
- [16] M. C. Cosby, R. M. Nelms, “A Resonant Inverter for Electronic Ballast Applications”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, nº 4, pp. 418-425, August 1994.
- [17] Z. Li, P. K. T. Mok, W. H. Ki, J. K. Sin, “A simple Method to Design Resonant Circuits of Electronic Ballast for Fluorescent Lamps”, in *Proc. of ISCAS*, pp. 1744-1747, 1997.
- [18] Y. K. E. Ho, S. T. S. Lee, H. S-H Chung, S. Y. Hui, “A Comparative Study on Dimming Control Methods for Electronic Ballasts”, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 19, nº 6, pp. 828-836, November 2001.
- [19] T. J. Ribarich, 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.
- [20] F. T. Wakabayashi, C. A. Canesin, “Metodologia de Projeto para o Filtro Ressonante LCC de Reatores Eletrônicos com Controle de Luminosidade para Lâmpadas Fluorescentes”, *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 9, nº 1, pp. 71-79, Junho 2004.
- [21] A. R. Seidel, F. E. Bisogno, H. Pinheiro, R. N. do Prado, “Self-Oscillating Dimmable Electronic Ballast”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 50, nº 6, pp. 1267-1274, December 2003.
- [22] A. R. Seidel, F. E. Bisogno, R. N. do Prado, “A design Methodology for a Self-Oscillating Electronic Ballast”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 43, nº 6, pp. 1524-1533, November/December 2007.
- [23] J. Chang, G. W. Bruning, “Self-Oscillating Electronic Ballast Analysis Via Relay Systems Approach”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 27, nº 1, pp. 255-261, January/February 2001.
- [24] A. R. Seidel, F. E. Bisogno, R. N. do Prado, “Projeto do Reator Eletrônico Auto-Oscilante”, *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 9, nº 1, pp. 53-61, Junho 2004.
- [25] L. H. Goud, J. W. F. Dorlejin, “Standardized Data for Dimming Fluorescent Lamps”, in *Proc. of IAS*, vol. 1, pp. 673-679, 2002.
- [26] A. R. Seidel, M. S. Perdigão, H. V. Marques, J. M. Alonso, E. S. Saraiva, “Safe Electrode Operation in Universal Electronic Ballasts”, in *Proc. of COBEP*, pp. 607-614, 2011.
- [27] G. Spiazzi, S. Buso, “Non Iterative Design Procedure of LCC-Based Electronic Ballasts for Fluorescent Lamps Including Dimming Operation”, in *Proc. of ECCE*, pp. 2065-2072, 2009.
- [28] E. E. Hammer, “Characteristics of Various Fluorescent Systems at 60 Hz and High Frequency”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 1a-21, nº 1, pp. 11-16, January 1985.
- [29] F. E. Bisogno, *Energy-Related System Normalization and Decomposition Targeting Sensitivity Consideration*. Tese de Doutorado, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Chemnitz-Zwickau, Chemnitz, Alemanha, 2006.
- [30] M. Kazimierzczuk, K. Puczek, “Exact Analysis of Class E Tuned Power Amplifier at Any Q and Switch Duty Cycle”, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 34, nº 2, pp. 149-159, February 1987.
- [31] M. Polonskii, A. R. Seidel, *Reatores Eletrônicos para Iluminação Fluorescente*, Unijuí, Ijuí, 2008.

DADOS BIOGRÁFICOS

Juliano de Pelegrini Lopes, nasceu em Cruz Alta-RS, Brasil, em 1983. Possui graduação em Engenharia Elétrica (2008) e em Formação Pedagógica de Docentes pela Universidade Federal de Santa Maria (2010), mestrado (2010) e doutorado (2014) em Engenharia Elétrica pela mesma universidade. Atualmente é professor da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Pato Branco – UTFPR-PB. Suas principais áreas de interesse incluem reatores eletrônicos, conversores CC/CC, correção de fator de potência, circuitos auto-oscilantes, sistemas de iluminação inteligentes, conversores ressonantes e lâmpadas fluorescentes. Dr. Juliano é membro da SOBRAEP.

Maikel Fernando Menke, nasceu em Três de Maio-RS, em 1989. Engenheiro eletricitista formado pela Universidade Federal de Santa Maria – UFSM (2015). Atualmente é mestrando junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da mesma instituição. Integrante do Grupo GEDRE Inteligência em Iluminação, e do Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos e Computacionais (GSEC-CTISM), desde 2009. Suas áreas de interesse incluem sistemas de iluminação inteligente, conversores CC/CC, correção de fator de potência, circuitos auto-oscilantes, reatores eletrônicos, lâmpadas fluorescentes, LEDs e conversores ressonantes. É membro estudante da SOBRAEP.

William Guidolin da Rosa, nascido em 12/05/1992 em Santa Maria-RS, é técnico em Eletrotécnica (2010) pelo Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM) e graduando em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Faz parte do Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento em Sistemas Elétricos e Computacionais (GSEC) do CTISM/UFSM desde 2011. Suas áreas de interesse são: Eletrônica de Potência e Sistemas Eletrônicos aplicados à iluminação artificial.

Fábio Ecke Bisogno, nascido em 07/04/1973 em Santa Maria-RS é engenheiro eletricitista (1999) e mestre (2001) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria e doutor em Engenharia Elétrica pela Technische Universität Chemnitz (2006). Paralelo com o Doutorado esteve empregado no instituto de pesquisa Fraunhofer - AIS e depois Fraunhofer IAIS e IZM. Atualmente é professor adjunto na Universidade Federal de Santa Maria. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos, sistemas auto-oscilantes, transformadores piezoelétricos, conversores ressonantes e fontes ininterruptas de energia UPS.

Álysson Raniere Seidel, nascido em 01/08/1975 em São Pedro do Sul-RS é engenheiro eletricista (1999), doutor em Engenharia Elétrica (2004) pela Universidade Federal de Santa Maria. Ele foi, de 2004 a 2008, professor do curso de Engenharia Elétrica na Universidade de Passo Fundo. Atualmente é professor da Universidade Federal de Santa Maria no Colégio Técnico Industrial de Santa Maria e na Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência e sistemas eletrônicos aplicados à iluminação. Dr. Seidel é membro da SOBRAEP e do IEEE.