

REATOR ELETRÔNICO PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES T5 APLICADO EM SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO FERROVIÁRIOS

Bruno Scortegagna Dupczak e Arnaldo José Perin

Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Elétrica

Campus Universitário Trindade, 88040-970, Florianópolis, SC, Brasil

bruno@inep.ufsc.br; perin@inep.ufsc.br

Resumo – Neste trabalho apresenta-se uma metodologia de projeto de um reator eletrônico alimentado em corrente contínua. Este reator é utilizado em sistemas de iluminação fluorescente para veículos ferroviários, onde é necessário atender as normas técnicas vigentes para esta aplicação. O equipamento é projetado para controlar e alimentar lâmpadas do tipo T5 de diferentes potências. São consideradas as informações normativas relevantes para realizar o correto pré-aquecimento dos filamentos da lâmpada. Ao final, são mostrados os resultados experimentais obtidos.

Palavras-Chave – Reator Eletrônico, Pré-aquecimento dos Filamentos, Sistema de Iluminação Ferroviária, Lâmpada Fluorescente T5.

A T5 FLUORESCENT LAMP ELECTRONIC BALLAST APPLIED TO RAILWAY ILLUMINATION SYSTEMS

Abstract – This work presents a direct current electronic ballast design methodology. This ballast is applied to fluorescent illumination systems in railway vehicles, where is necessary to meet the technical requirements for this application. The equipment is designed to drive T5 lamps of different powers. The relevant technical norms about lamp filaments preheating are considered. In the end, experimental results are presented.

Keywords – Electronic Ballast, Filaments Preheating, Railway Illumination System, T5 Fluorescent Lamp.

I. INTRODUÇÃO

Normalmente os sistemas de iluminação estão associados à aplicações industriais ou domésticas, sendo um dos principais destinos da energia elétrica gerada no mundo. Contudo, é impossível imaginar o interior dos sistemas de transporte sem luzes, para o conforto e bem estar de seus usuários.

Apesar da enorme promoção e alguns benefícios oferecidos pela iluminação de estado sólido baseada em LEDs, a iluminação fluorescente representa na atualidade uma tecnologia consolidada nos sistemas ferroviários, proporcionando menores custos na implementação de novos equipamentos [1]. Além disso, um estudo comparativo

mostrou que as lâmpadas fluorescentes dissipam em torno de 73%-77% da sua potência total em calor, enquanto que os LEDs dissipam valores da ordem de 87%-90%. Esta limitação no processo de conversão energética, aliada à degradação da eficiência luminosa com o aumento da temperatura de junção, provavelmente representam as principais barreiras a serem vencidas para aumentar a participação da tecnologia LED nos sistemas de iluminação [2].

Por outro lado, as lâmpadas fluorescentes T5 são no momento a melhor opção para a iluminação interna de ambientes coletivos. Comercialmente disponíveis desde de 1995, as lâmpadas T5 foram especialmente desenvolvidas para operarem com reatores eletrônicos, apresentando maior rendimento e vida útil que as lâmpadas T8. No entanto, para se obter uma reduzida taxa de falhas, é necessária uma etapa de aquecimento dos filamentos antes da etapa de ignição, além de evitar o sobreaquecimento dos eletrodos durante a operação em regime permanente. Tais cuidados quanto a temperatura dos filamentos implicam em agregar funcionalidades adicionais ao projeto dos reatores eletrônicos para lâmpadas T5 [3,4].

Em trens e metrô, os reatores eletrônicos para iluminação fluorescente são alimentados com tensão contínua. Em um primeiro momento, tais dispositivos poderiam ser consideradas estruturas mais simples de serem projetadas, pelo fato de não necessitarem de um estágio de correção de fator de potência. Contudo, as restrições impostas pelas normas internacionais representam um desafio para o projeto destes reatores eletrônicos, devido ao tamanho, rendimento e faixa de variação da tensão de alimentação exigidos para a operação em ambiente ferroviário [5]. Para atender ao amplo conjunto de requisitos técnicos, sobretudo se o reator eletrônico for destinado para a operação de lâmpadas T5, o uso de microcontroladores representa uma solução adequada, permitindo obter as funcionalidades desejadas para o reator através da programação de um circuito integrado [6].

Neste contexto, apresenta-se neste trabalho uma proposta de reator eletrônico que permita unir a eficiência e a vida útil das lâmpadas fluorescentes T5 com a flexibilidade de implementação proporcionada pelos microcontroladores, visando obter uma solução de iluminação que permita o acionamento de lâmpadas de diferentes potências em veículos ferroviários. Na seção II, as normas técnicas relevantes são apresentadas e utilizadas para definir as especificações do projeto. Estas especificações serão utilizadas na seção III para dimensionar o circuito de pré-aquecimento dos filamentos e o filtro ressonante do reator eletrônico, o qual deverá ser capaz de suprir o valor nominal de corrente na lâmpada dentro

Artigo submetido em 03/09/2012. Revisado em 15/01/2013. Aceito para publicação em 15/01/2013 para a Sessão Especial por recomendação do editor Ricardo Nederson do Prado e Pedro Francisco Donoso-García.

de uma ampla faixa de variação da tensão de alimentação e para diferentes valores da potência de saída. Posteriormente, os resultados experimentais e as considerações finais são apresentadas nas seções IV e V respectivamente.

II. REQUISITOS NORMATIVOS

A possibilidade de comercialização de equipamentos eletroeletrônicos, principalmente em países de primeiro mundo, está fortemente atrelada ao cumprimento de normas técnicas, visando garantir a qualidade dos produtos e a segurança de seus usuários. Dessa forma, se os critérios normativos são observados desde a etapa de projeto, reduz-se o custo para a certificação e o tempo necessário para o início da comercialização dos dispositivos.

A. Normas técnicas para sistemas ferroviários

Os requisitos técnicos gerais, para o funcionamento de equipamentos eletrônicos em sistemas ferroviários de transporte, são apresentados pela norma EN50155 [7]. Nesta norma, define-se que os dispositivos eletrônicos são alimentados com tensão contínua, cujos valores nominais (U_n) são de 24, 48, 72, 96 ou 110 V. Além disso, devem operar normalmente entre os valores mínimo e máximo de $0,7U_n$ e $1,25U_n$ respectivamente. No caso dos reatores eletrônicos, a norma EN50311 [8] apresenta requisitos específicos, tais como: *i*) apresentar dimensões máximas de 260x50x47 mm (comprimento, largura e altura respectivamente) para alimentação de lâmpadas com até 40 W; *ii*) possuir mecanismos de proteção contra: a inversão da polaridade da tensão de alimentação, desconexão da lâmpada com circuito ativo e ignição com lâmpada danificada ou ausente; *iii*) garantir um rendimento superior a 75% na operação com tensão de operação nominal e temperatura de 22°C; *iv*) assegurar uma tensão de isolamento entre entrada e saída de 2,0 kV; *v*) a ondulação em alta frequência da corrente de entrada deve ser inferior a 10%, entre outras exigências [5].

B. Normas Técnicas para Lâmpadas T5

As características físicas e de operação das lâmpadas fluorescentes tubulares são definidas pela norma IEC60081 [9]. Neste trabalho, serão utilizadas lâmpadas T5 de alta eficiência (T5-HE), cujas características elétricas são apresentadas na Tabela I. As T5-HE possuem a peculiaridade de apresentarem os mesmos valores de resistência dos filamentos (R_f) aquecidos ou a frio, e de corrente eficaz em regime (I_L), independente da potência nominal (P_L) [9]. Dessa forma, este tipo de lâmpada favorece o desenvolvimento de um reator eletrônico único para lâmpadas de diferentes potências, pois as especificações de pré-aquecimento e de controle da corrente de saída sempre serão as mesmas. No entanto, os valores de tensão entre os terminais das lâmpadas em regime (V_L), durante o pré-aquecimento ($V_{L,pa}$ com $t < t_{pa}$) e durante a ignição ($V_{L,pa}$ com $t > t_{pa}$), não são os mesmos, e devem ser considerados no projeto do circuito.

Para a realização do processo de pré-aquecimento dos filamentos, a norma IEC60081 em conjunto com a IEC60929 [10], apresentam informações referentes ao tempo e valores de corrente para a implementação de um pré-aquecimento por corrente controlada. Contudo, devido as desvantagens deste

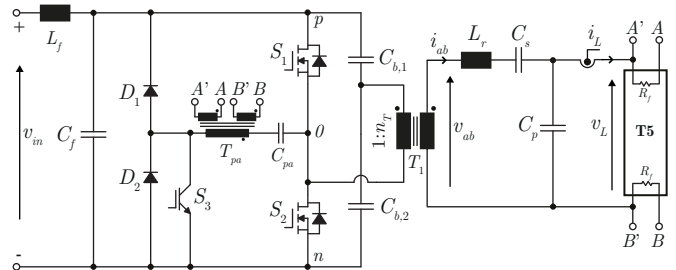


Fig. 1. Estágio de potência do reator eletrônico, composto por um inversor meia ponte isolado com filtro ressonante do tipo LCC, circuito LC para o pré-aquecimento dos filamentos e filtro da corrente de entrada formado por L_f e C_f .

método [3], referentes ao desgaste dos filamentos e a excessiva tensão aplicada entre os terminais da lâmpada, optou-se pelo método de pré-aquecimento por tensão controlada. Na Tabela I, apresentam-se o valor eficaz de tensão (V_{Rf}) e de energia (E_{Rf}) nos filamentos, recomendados pelos fabricantes de lâmpadas T5-HE [11, 12], considerando um tempo de pré-aquecimento por tensão controlada de um segundo ($t_{pa} = 1$ s). Neste caso, o filamento é representado por um resistor substituto (R_{sub}) de 30 Ω .

III. PROJETO DO REATOR ELETRÔNICO

O reator eletrônico visto na Figura 1 consiste basicamente em dois circuitos ressonantes, sendo um responsável pela alimentação da lâmpada (LCC) e outro pelo pré-aquecimento dos filamentos (LC). Estes circuitos comportam-se como impedâncias variáveis com a frequência de comutação (f_s), sendo que na medida que o valor de f_s se aproxima da frequência natural de ressonância, obtém-se a elevação da tensão nos filamentos e entre os terminais da lâmpada (v_L).

Por sua vez, a variação da frequência de comutação é realizada por um microcontrolador (μC), o qual irá ajustar o valor de f_s de acordo com a etapa de operação do reator. Durante o processo de pré-aquecimento, o valor de f_s será elevado e distante do valor da frequência de ressonância do circuito LCC, a fim de minimizar a tensão v_L . Contudo, o valor de f_s deverá ser suficiente para que o circuito LC transfira a energia necessária para o aquecimento dos filamentos. Posteriormente, inicia-se a etapa de ignição da lâmpada, onde a frequência de comutação é reduzida para um valor próximo da frequência de ressonância. Com isso, obtém-se a elevação da tensão v_L , até que ocorra a abertura do arco elétrico e a lâmpada passe a conduzir corrente. A partir deste momento, o microcontrolador passa a medir a corrente na lâmpada (i_L), atuando através da variação da frequência de comutação para controlar o valor de i_L em regime permanente.

Baseadas nas normas técnicas e nas recomendações dos fabricantes apresentadas na Seção II, estão reunidas na Tabela II as especificações que serão consideradas no projeto do reator eletrônico. É importante destacar que neste trabalho não será abordado o uso do μC para a implementação de circuitos de proteção, bem como o dimensionamento do filtro da corrente de entrada. Contudo, tais informações podem ser encontradas em [5].

TABELA I
Características elétricas das lâmpadas T5-HE.

| P_L [W] | $V_{L,pa}$ [V] | | V_L [V] | | | I_L [mA] | Pré-aquecimento ($t_{pa} = 1$ s) | | | | | | |
|--------------|-------------------|--------------|--------------|------|------|---------------|-----------------------------------|--------|-------|--------------|------|--------------|------|
| | $t < t_{pa}$ | $t > t_{pa}$ | Mín. | Nom. | Máx. | Nom. | R_f [Ω] | | | V_{Rf} [V] | | E_{Rf} [J] | |
| | | | | | | | Frio | Aquec. | Subs. | Mín. | Máx. | Mín. | Máx. |
| 14 | 130 | 230-275 | 72 | 82 | 92 | 170 | 9 | 40 | 30 | 7,0 | 9,3 | 1,7 | 2,9 |
| 21 | 200 | 340-390 | 113 | 123 | 133 | 170 | | | | | | | |
| 28 | 240 | 425-530 | 150 | 167 | 184 | 170 | | | | | | | |
| 35 | 275 | 530-700 | 189 | 209 | 229 | 170 | | | | | | | |

TABELA II
Especificações do reator eletrônico.

| Parâmetros - etapa de pré-aquecimento | Mín. | Non. | Máx. |
|---|------|------|------|
| Frequência de comutação ($f_{s,pa}$) [kHz] | 105 | - | 270 |
| Frequência de ressonância do circuito LC ($f_{o,pa}$) [kHz] | - | 90 | - |
| Tempo (t_{pa}) [s] | - | 1 | - |
| Valor eficaz da tensão nos filamentos (V_{Rf}) [V] | 5,0 | - | 9,3 |
| Energia nos filamentos (E_{Rf}) [J] | 1,7 | - | 2,9 |
| Parâmetros - operação em regime permanente | Mín. | Non. | Máx. |
| Valor médio da tensão de alimentação (v_{in}) [V] | 77 | 110 | 150 |
| Frequência de comutação (f_s) [kHz] | 45 | - | 65 |
| Frequência de ressonância do circuito LCC (f_o) [kHz] | - | 47 | - |
| Valor eficaz da tensão na lâmpada de 14 W ($V_{L,14W}$) [V] | - | 82 | - |
| Valor eficaz da tensão na lâmpada de 35 W ($V_{L,35W}$) [V] | - | 209 | - |
| Valor eficaz da corrente na lâmpada (I_L) [mA] | - | 170 | - |
| Valor eficaz da corrente do filtro ressonante (I_{AB}) [mA] | 200 | - | - |

A. Dimensionamento do circuito ressonante LCC

Na Figura 1 está representado o inversor meia-ponte isolado com filtro ressonante do tipo LCC, sendo composto por um indutor ressonante (L_r), um capacitor série (C_s) e um capacitor paralelo (C_p). O uso desta estrutura deve-se ao fato que é a mais difundida no meio industrial, proporcionando uma tensão aplicada na lâmpada com baixo fator de crista além de permitir que os interruptores apresentem comutação suave com tensão nula [13–15]. O transformador T_1 está presente visando utilizar a relação de transformação para elevar a tensão de entrada a níveis compatíveis com a tensão de operação da lâmpada. Além disso, conforme a norma EN50311, é necessário que o reator apresente um isolamento elétrico de 2,0 kV entre a entrada e o circuito ressonante, para que possa ser aprovado nos testes de segurança elétrica. Posteriormente, para o projeto do filtro LCC, a lâmpada fluorescente T5 será modelada como uma resistência constante (R_L), tendo em vista que neste trabalho as lâmpadas irão operar apenas no ponto de potência nominal (P_L), e com frequência da corrente i_L superior a 5 kHz [13].

Considerando que as componentes de alta frequência são atenuadas pela característica passa baixa do filtro LCC, a tensão v_L e a corrente i_{ab} apresentarão formatos praticamente senoidais. Dessa forma, é válido analisar o comportamento do circuito ressonante baseado somente na componente fundamental da tensão v_{ab} [13]. Assim, o estágio de alimentação da lâmpada será simplificado conforme visto na Figura 2, dando origem ao conjunto de equações apresentadas em (1)-(5) [13]. Interpretando o modelo como um divisor de tensão, obtém-se a equação parametrizada (1), que determina o valor eficaz da tensão fundamental aplicada na lâmpada em

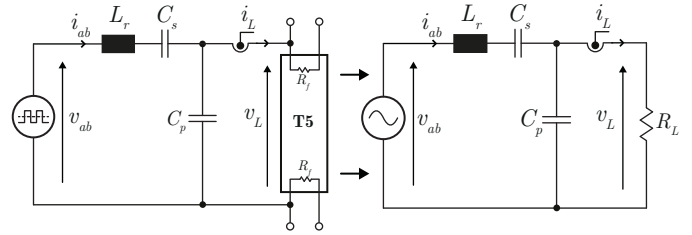


Fig. 2. Modelo para o estudo em regime permanente do circuito ressonante, considerando a componente fundamental da tensão v_{ab} e a característica resistiva da lâmpada.

regime permanente (V_L). A partir da impedância equivalente do circuito na frequência fundamental, obtém-se em (2) o valor eficaz da corrente de entrada do filtro ressonante (I_{ab}). O valor eficaz de V_{ab} é calculado conforme (3), baseando-se na primeira harmônica da série de Fourier de uma onda quadrada simétrica, na relação de transformação n_T do transformado T_1 e desprezando a queda de tensão em L_f . O parâmetro Ω corresponde à frequência de comutação (ω_s) normalizada em relação a frequência natural de ressonância do filtro LCC (ω_o). O fator de qualidade Q relaciona a resistência da lâmpada com a impedância característica do circuito ressonante (Z_b). A relação entre os capacitores do filtro LCC é definida por α .

$$V_L = V_{ab} \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Q^2} \left(\Omega - \frac{(1-\alpha)}{\Omega} \right)^2 + \frac{1}{\alpha^2} (\Omega^2 - 1)^2}} \quad (1)$$

$$I_{ab} = \frac{V_{ab}}{Z_b} \sqrt{\frac{\left(\frac{Q\Omega}{\alpha} \right)^2 + 1}{\left(\Omega - \frac{(1-\alpha)}{\Omega} \right)^2 + \frac{Q^2}{\alpha^2} (\Omega^2 - 1)^2}} \quad (2)$$

$$V_{ab} = n_T \frac{\sqrt{2} V_{in}}{\pi} \quad \Omega = \frac{\omega_s}{\omega_o} \quad Q = \frac{R_L}{Z_b} \quad R_L = \frac{P_L}{I_L^2} \quad (3)$$

$$\alpha = \frac{C_{eq}}{C_p} = 1 - \frac{C_{eq}}{C_s} \quad C_{eq} = \frac{C_p C_s}{C_p + C_s} \quad (4)$$

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad \omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_r C_{eq}}} \quad Z_b = \sqrt{\frac{L_r}{C_{eq}}} \quad (5)$$

Para que o estágio ressonante possa trabalhar em vários pontos de operação e permita a alimentação de lâmpadas de diferentes potências e com ampla variação de tensão de entrada, é necessário que n_T e os componentes L_r , C_s e C_p sejam calculados para atender às seguintes restrições:

1. Assegurar que a frequência natural de ressonância seja igual ao valor especificado (conforme (6)). Este valor é superior e próximo da frequência mínima de comutação, para aproveitar a característica de máximo ganho de tensão proporcionada pelo filtro LCC.

$$f_o = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_{eq}}} = 47 \text{ kHz} \quad (6)$$

2. Garantir que a maior tensão nominal de saída do reator, neste caso para alimentar a lâmpada de 35 W, possa ser obtida a partir da tensão de entrada mínima, ajustando-se a frequência de comutação ao valor mínimo para aumentar o ganho de tensão do estágio ressonante. Esta restrição é matematicamente representada por (1), substituindo os termos de interesse pelas variáveis apresentadas em (7) e (8).

$$V_L \geq V_{L,35W} \quad V_{ab} = n_T \frac{\sqrt{2}V_{in,min}}{\pi} \quad (7)$$

$$Q = R_{L,35W} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_r}} \quad \Omega = \frac{\omega_{s,min}}{\omega_o} \quad (8)$$

3. Garantir que a menor tensão nominal de saída do reator, neste caso para alimentar a lâmpada de 14 W, possa ser obtida a partir da tensão de entrada máxima, ajustando-se a frequência de comutação ao valor máximo para reduzir o ganho de tensão do estágio ressonante. Esta restrição é matematicamente representada por (1), substituindo os termos de interesse pelas variáveis em (9) e (10).

$$V_L \geq V_{L,14W} \quad V_{ab} = n_T \frac{\sqrt{2}V_{in,max}}{\pi} \quad (9)$$

$$Q = R_{L,14W} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_r}} \quad \Omega = \frac{\omega_{s,max}}{\omega_o} \quad (10)$$

4. Assegurar que o valor mínimo da corrente no filtro ressonante seja superior, porém próximo do valor da corrente nominal fornecida à lâmpada. Supondo que, utilizando a lâmpada de 14 W com o mínimo valor da tensão de entrada, os interruptores terão que operar na frequência de comutação mínima, propiciando o valor de corrente definido em (2). Nesta equação os termos de interesse são substituídos pelas variáveis em (11) e (12).

$$I_{ab} \geq I_{ab,min} \quad V_{ab} = n_T \frac{\sqrt{2}V_{in,min}}{\pi} \quad (11)$$

$$Q = R_{L,14W} \sqrt{\frac{C_{eq}}{L_r}} \quad \Omega = \frac{\omega_{s,min}}{\omega_o} \quad (12)$$

A partir das restrições apresentadas obtém-se um conjunto de quatro equações não lineares, que serão utilizadas para determinar os quatro parâmetros do estágio ressonante (n_T , L_r , C_s e C_p). Devido à complexidade do sistema de equações, optou-se por um método numérico de solução. Para isso, é necessário uma condição inicial de valores, que proporcione a convergência dos cálculos para um resultado válido. Estas condições iniciais serão determinadas baseando-se na necessidade de minimizar a corrente de entrada do

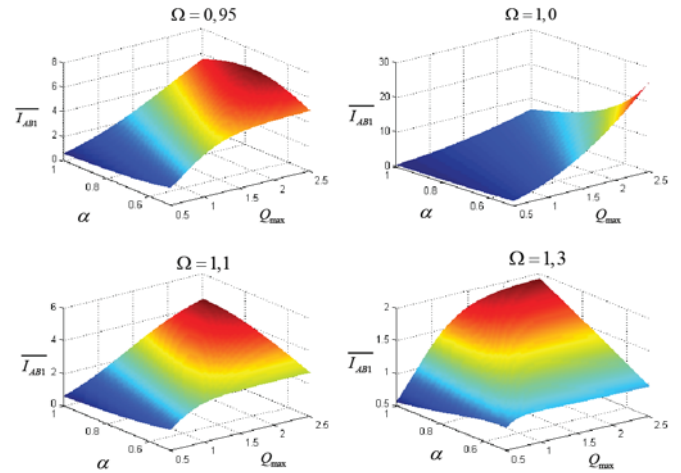


Fig. 3. Comportamento da corrente parametrizada ($\overline{I_{AB1}}$) para diferentes valores de frequência de comutação normalizada (Ω), do valor máximo do fator de qualidade (Q_{max}) e da relação entre os capacitores do filtro LCC (α).

filtro ressonante, visando diminuir as perdas por condução no circuito. Dessa forma, considerando que a maior corrente circulante no estágio ressonante irá ocorrer com a utilização da lâmpada de maior potência (35 W), obtém-se a partir de (2) a expressão da corrente parametrizada $\overline{I_{AB1}}$ em (13).

$$\overline{I_{AB1}} = \frac{I_{ab} R_{L,35W}}{n_T V_{ab}} = Q_{max} \sqrt{\frac{\left(\frac{Q_{max}\Omega}{\alpha}\right)^2 + 1}{\left(\Omega - \frac{(1-\alpha)}{\Omega}\right)^2 + \frac{Q_{max}^2}{\alpha^2}(\Omega^2 - 1)^2}} \quad (13)$$

Como não é conhecido o valor de Ω (pois depende da tensão V_{ab}), a expressão de $\overline{I_{AB1}}$ definida em (13) será analisada arbitrando-se quatro diferentes valores de Ω , variando Q_{max} e α dentro de uma faixa de valores pré-determinada. Obtém-se então a Figura 3, onde se observa que as variações de Q_{max} e de α terão maior influência quando a frequência de comutação é igual à frequência de ressonância ($\Omega=1$), ocasionando maiores variações de $\overline{I_{AB1}}$. Analisando somente para a situação de $\Omega=1$, verifica-se que o valor de $\overline{I_{AB1}}$ diminui na medida em que se diminui Q_{max} e se aumenta α . Então, visando minimizar a corrente $\overline{I_{AB1}}$, conclui-se que é necessário utilizar um valor elevado de α , porém inferior a 1, para que o valor de C_s não seja infinito (cf. visto em (4)). Além disso, o valor de Q_{max} deve ser o menor possível, porém superior ao valor numérico de α , permitindo que o circuito ressonante apresente ganho de tensão positivo. O valor de Q_{max} influencia na sensibilidade do controle de potência na lâmpada, sendo que na ocorrência de pequenas variações de f_s , um valor elevado de Q_{max} implicaria em um erro significativo na potência de saída [16]. Assim, definindo $\alpha=0,9$, $Q_{max}=1,5$ e utilizando as equações (3), (4) e (5), obtém-se os valores das condições iniciais apresentadas em (14) e (15). No caso de n_{T1} , este valor foi obtido utilizando os valores de α e de Q_{max} na equação proveniente da restrição 2.

$$L_{r1} = \frac{R_{L,35W}}{\omega_o Q_{max}} = 2,82 \text{ mH} \quad C_{p1} = \frac{C_{eq}}{\alpha} = 4,5 \text{ nF} \quad (14)$$

$$C_{s1} = \frac{C_{eq}}{1-\alpha} = 40,7 \text{ nF} \quad n_{T1} = 3,47 \quad (15)$$

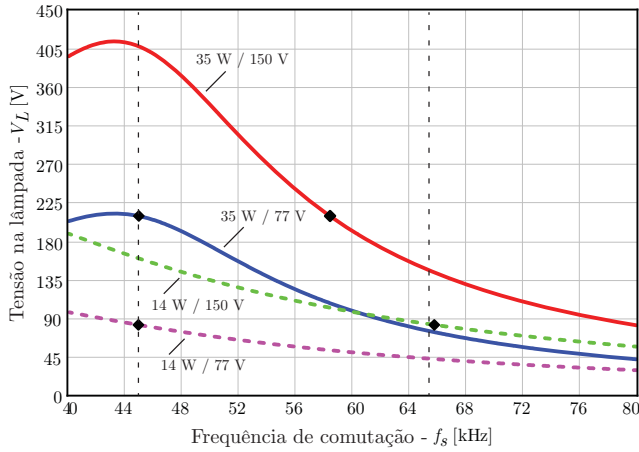


Fig. 4. Valor eficaz da tensão na lâmpada em função da frequência de comutação, considerando os limites de tensão de entrada (77-150 V) e de potência de saída (14-35 W).

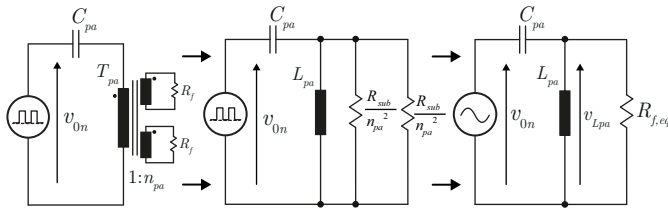


Fig. 5. Modelo para o estudo em regime permanente do circuito de pré-aquecimento, usando a componente fundamental da tensão v_{0n} .

Utilizando as condições iniciais para resolver o sistema de equações, tem-se em (16) os parâmetros do filtro LCC calculados. Utilizando estes valores, obtém-se na Figura 4 o valor eficaz da tensão na lâmpada, proporcionado pelo estágio ressonante em regime permanente. Observa-se que, variando a frequência de comutação dentro da faixa especificada (45-65 kHz), é possível obter os valores nominais de tensão apresentados na Tabela I, considerando os limites de tensão de alimentação (77-150 V) e de potência de saída (14-35 W).

$$L_r = 3,2 \text{ mH} \quad C_p = 4,7 \text{ nF} \quad C_s = 15 \text{ nF} \quad n_T = 3,3 \quad (16)$$

B. Dimensionamento do circuito de pré-aquecimento

O pré-aquecimento dos filamentos será realizado pelo método de tensão controlada, empregando o circuito LC visto na Figura 1. Este circuito é formado pelo capacitor C_{pa} , pela indutância magnetizante (L_{pa}) do transformador T_{pa} e pelo interruptor adicional S_3 , que permite desconectar o circuito de pré-aquecimento após a ignição da lâmpada [3]. Isso possibilita diminuir o desgaste dos filamentos e aumentar a eficiência do projeto, pois não existirá uma corrente adicional circulando pelos eletrodos, como ocorre quando se utiliza um pré-aquecimento por corrente controlada.

Da mesma forma como foi analisado o circuito LCC, o estágio de pré-aquecimento é dimensionado a partir da componente alternada fundamental da tensão v_{0n} , conforme representado na Figura 5. Neste caso, C_{pa} fica submetido a componente contínua de v_{0n} e as resistências dos filamentos são refletidas ao primário de T_{pa} , sendo representadas pelo resistor equivalente ($R_{f,eq}$). Por sua vez, a relação entre os

valores eficazes da tensão no primário de T_{pa} (V_{Lpa}) e da tensão V_{0n} define o ganho de tensão parametrizado do circuito de pré-aquecimento (G_{pa}), calculado por (17) [3, 13].

$$G_{pa} = \frac{V_{Lpa}}{V_{0n}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{1}{\Omega_{pa} Q_{pa}}\right)^2 + \left(1 - \frac{1}{\Omega_{pa}^2}\right)^2}} \quad (17)$$

$$\Omega_{pa} = \frac{\omega_s}{\omega_{o,pa}} \quad \omega_{o,pa} = \frac{1}{\sqrt{L_{pa} C_{pa}}} \quad V_{0n} = \frac{\sqrt{2} V_{in}}{\pi} \quad (18)$$

$$Q_{pa} = \frac{R_{f,eq}}{Z_{b,pa}} \quad Z_{b,pa} = \sqrt{\frac{L_{pa}}{C_{pa}}} \quad R_{f,eq} = \frac{R_{sub}}{2n_{pa}^2} \quad (19)$$

Fixando valores para Q_{pa} e variando Ω_{pa} , conclui-se a partir da análise de (17) que para valores de $\Omega_{pa} > 3$ e $Q_{pa} > 1$ o ganho G_{pa} é praticamente unitário. Dessa forma, tem-se que $V_{Lpa} \approx V_{0n}$, dependendo apenas do valor da tensão de alimentação V_{in} conforme apresentado em (18). Considerando o valor máximo de V_{in} (150 V) e o mínimo valor da tensão nos filamentos (5 V), a fim de limitar a corrente em 550 mA no início do pré-aquecimento (quando $R_f = 9 \Omega$), calcula-se a relação de transformação n_{pa} conforme (20). Manipulando as equações (18) e (19), obtém-se as expressões em (21) que determinam os valores de C_{pa} e L_{pa} . Neste caso, utilizou-se $Q_{pa} = 8$, $\omega_{o,pa} = 2\pi \cdot 90 \text{ kHz}$ e $R_{sub} = 30 \Omega$.

$$n_{pa} = \frac{V_{Rf,min}}{V_{Lpa,max}} = \frac{5}{67,52} = 0,074 \quad (20)$$

$$C_{pa} = \frac{1}{\omega_{o,pa} Z_{b,pa}} = 5,1 \text{ nF} \quad L_{pa} = Z_{b,pa}^2 C_{pa} = 600 \mu\text{H} \quad (21)$$

Durante o período de pré-aquecimento a frequência de comutação irá variar de um valor máximo (270 kHz) até um valor mínimo, próximo à $f_{o,pa}$. Valores mínimos para f_s neste período foram obtidos experimentalmente e tabelados no μC , visando garantir que em toda a faixa de variação de V_{in} a energia de pré-aquecimento especificada seja entregue aos filamentos.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Resultados experimentais foram obtidos a partir de um protótipo de reator eletrônico, apresentado na Figura 6. Os interruptores S_1 e S_2 utilizados foram MOSFETs de 200 V (International Rectifier IRF640). O interruptor S_3 , responsável pela desativação do circuito de pré-aquecimento, foi implementado com um transistor bipolar (Fairchild BU406). Escolheu-se um transistor bipolar para minimizar a capacitância entre o coletor e o emissor do interruptor, evitando que a circulação de uma corrente parasita ocasionasse uma tensão significativa nos filamentos da lâmpada, durante a operação em regime permanente. Diodos ultra rápidos (ON Semiconductor MUR120) foram empregados como D_1 e D_2 . O transformador T_1 e o indutor ressonante L_r foram fabricados com núcleos de ferrite (Thornton IP12). Para proporcionar uma ampla vida útil ao reator eletrônico, evitou-se o uso de capacitores eletrolíticos. Como microcontrolador, utilizou-se o ATtiny45 da Atmel Corporation.

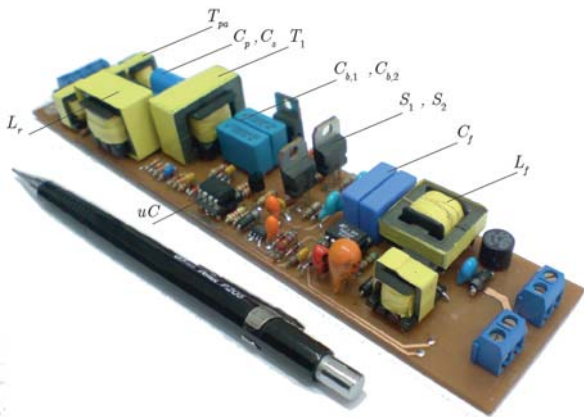


Fig. 6. Imagem do protótipo do reator eletrônico desenvolvido (77-150 V, 14-35 W).

As formas de onda adquiridas com um osciloscópio são apresentadas na Figura 7, utilizando tensão de alimentação de 110 V, lâmpadas de 14 W fabricadas pela Osram (modelo FH14W/830HE Lumilux Warm White) e lâmpadas de 35 W fabricadas pela Narva (modelo LT35WT5/840 Cool White).

Na Figura 7(a) mostram-se as forma de onda da corrente (i_{Rf}), tensão (v_{Rf}) e potência dissipada (p_{Rf}) nos filamentos da lâmpada durante a etapa de pré-aquecimento. Observa-se a rampa de elevação de v_{Rf} com duração de 200 ms, sendo que após este instante o valor da tensão mantém-se constante. Na medida em que o filamento é aquecido, a sua resistência aumenta, implicando na redução do valor de i_{Rf} . Detalhes de i_{Rf} e v_{Rf} ao final do período de pré-aquecimento são vistas na Figura 7(b). Os valores especificados e medidos das principais grandezas relacionadas à etapa de pré-aquecimento são informados na Tabela III. A partir do cálculo da área sob a curva p_{Rf} determinou-se a energia E_{Rf} fornecida aos filamentos, considerando diferentes valores da tensão de alimentação. Os valores de E_{Rf} são informados na Tabela IV.

Finalizado o período de pré-aquecimento é iniciada a etapa de ignição, sendo que as formas de onda da tensão (v_L) e da corrente (i_L) na lâmpada são exibidas na Figura 7(c). A partir do instante 1,02 s são aplicados degraus de tensão até o instante 1,097, quando ocorre a abertura do arco elétrico no interior do tubo de descarga e a lâmpada passa a conduzir corrente (cf. Figura 7(d)). Para a aquisição das formas de onda utilizou-se a lâmpada de 35 W, a qual necessita da maior tensão de ignição fornecida pelo reator. O máximo valor eficaz da tensão aplicada foi de 709 V. O tempo de transição entre o término do pré-aquecimento e a ignição da lâmpada foi de 77,2 ms, o qual está em conformidade com a norma [10] que estipula um tempo máximo de 100 ms.

Após a ignição, as formas de onda de v_L e i_L nas lâmpadas de 14 W e 35 W são apresentadas nas figuras 7(e) e 7(f) respectivamente. Observa-se que para ambas as potências, as formas de onda da corrente e da tensão são praticamente iguais e em fase, comprovando o modelo resistivo adotado para as lâmpadas, quando estas operam em alta frequência. Para as formas de onda exibidas, o fator de crista da corrente obtido para a lâmpada de 14 W foi

TABELA III
Resultados durante o pré-aquecimento.

| Parâmetro | Especificado | Medido |
|--|--------------|--------|
| Tempo de pré-aquecimento [s] | 1,0 | 1,0 |
| Valor de pico da corrente em R_f [mA] | - | 540,0 |
| Valor eficaz da tensão em R_f - aquecido [V] | < 9,3 | 8,3 |
| Valor eficaz da corrente em R_f - aquecido [mA] | - | 210,7 |
| Resistência de R_f frio (25°C) [Ω] | 9,0 | 8,8 |
| Resistência de R_f aquecido [Ω] | - | 39,39 |
| Valor eficaz da tensão na lâmpada durante a etapa de pré-aquecimento [V] | < 130 V | 24,2 V |
| Valor eficaz da tensão em R_f após a etapa de pré-aquecimento [V] | 0 V | 0,6 V |

de 1,4 e para a lâmpada de 35 W foi de 1,3, estando em conformidade com a norma [10] que especifica um fator de crista máximo de 1,7. Para verificar a efetividade do controle de potência, foram realizadas medições com diferentes valores da tensão de alimentação, cujos resultados estão reunidos na Tabela IV. São apresentados os valores médios da tensão (V_{in}), da corrente (I_{in}) e da potência (P_{in}) de entrada do reator, os valores eficazes de tensão (V_L), da corrente (I_L) e de potência (P_L) nas lâmpadas, o rendimento (η) e a frequência de comutação (f_s) ajustada pelo mecanismo de controle. As medições foram realizadas com um osciloscópio calibrado, na temperatura ambiente de 25°C, colocando a placa do reator dentro de uma caixa metálica fechada (sem temperatura controlada) e aguardado quinze minutos de operação antes da realização de cada medida. Observa-se que praticamente em todos os pontos foi possível ajustar o valor da potência nominal nas lâmpadas, com exceção do primeiro ponto de testes com a lâmpada de 35 W, cuja potência fornecida foi de 33,45 W. Considerando as medições realizadas, a Figura 8 descreve o comportamento do rendimento do reator eletrônico de acordo com a tensão de alimentação. O rendimento na tensão nominal e com a máxima potência (35 W) foi de aproximadamente 87%, estando acima do valor especificado inicialmente.

V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A metodologia proposta para o cálculo dos componentes do filtro ressonante mostrou-se satisfatória, sendo validada com sucesso pelos resultados experimentais. Com isso, um

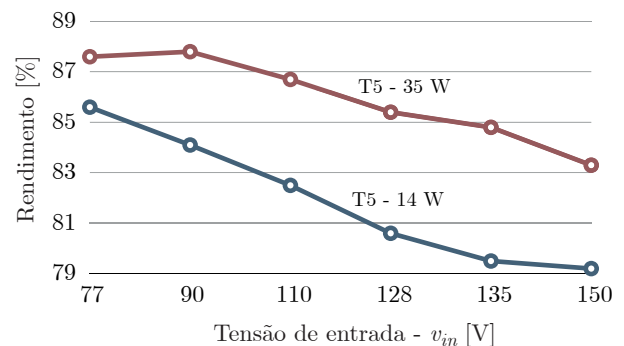


Fig. 8. Rendimento do reator eletrônico em função da tensão de alimentação, considerando as lâmpadas T5 de 14 e 35 W.

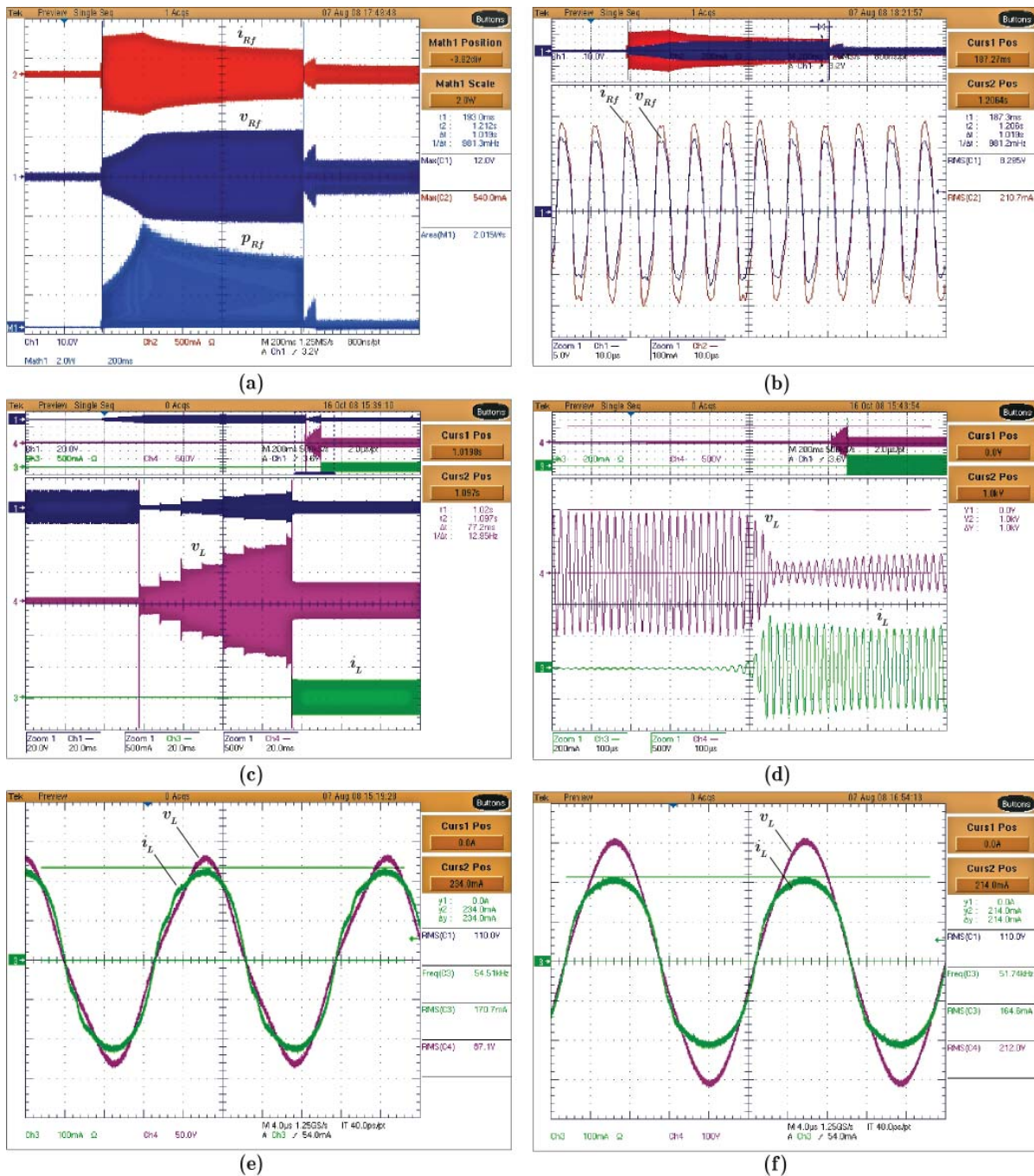


Fig. 7. Formas de ondas experimentais: (a), (b) Tensão (v_{Rf}), corrente (i_{Rf}) e energia (e_{Rf}) nos filamentos da lâmpada de 35 W durante a etapa de pré-aquecimento; (c), (d) Corrente (i_L) e tensão (v_L) na lâmpada de 35 W durante a etapa de ignição; (e) Corrente e tensão em regime permanente na lâmpada de 14 W; (f) Corrente e tensão em regime permanente na lâmpada de 35 W.

único reator eletrônico poderia ser utilizado para alimentar lâmpadas fluorescentes T5 de diferentes potências, ao mesmo tempo que é capaz de operar adequadamente dentro da faixa de variação da tensão de alimentação, disponível em veículos ferroviários. A versatilidade do projeto também foi resultado da utilização de um microcontrolador, permitindo que os diferentes modos de operação e o controle da potência de saída fossem realizados através da variação da frequência de comutação. Observou-se no entanto uma elevação excessiva da temperatura do indutor ressonante, atingindo a temperatura máxima de 100 °C quando operando com a máxima potência

e máxima tensão de alimentação. Isso evidencia uma perda magnética acentuada, oriunda do valor de frequência de comutação e do material magnético empregados na fabricação do componente. Dessa forma, acredita-se que o rendimento do reator eletrônico poderia ser melhorado se as perdas magnéticas no indutor fossem consideradas no processo de cálculo do filtro ressonante, visando encontrar uma faixa de frequência de comutação que otimizasse a relação entre rendimento e dimensões físicas do reator eletrônico. Além disso, novas tecnologias de interruptores poderiam ser avaliadas, com o intuito de reduzir as perdas por comutação.

TABELA IV
Resultados experimentais em regime permanente, obtidos com as lâmpadas T5 de 14 e 35 W.

| Lâmpada T5 de 14 W | | | | | | | | | | | |
|--------------------|---------------|--------------|-----------|------------|-----------------|-----------|-----|------------|----------------|--------------|--|
| V_{in} [V] | I_{in} [mA] | P_{in} [W] | V_L [V] | I_L [mA] | $I_{L,pk}$ [mA] | P_L [W] | FC | η [%] | f_{sw} [kHz] | E_{RF} [J] | |
| 77,3 | 219,7 | 17,0 | 88,1 | 165,1 | 220,0 | 14,5 | 1,3 | 85,6 | 45,5 | 1,8 | |
| 90,2 | 195,3 | 17,6 | 86,9 | 170,4 | 228,0 | 14,8 | 1,3 | 84,1 | 48,7 | 2,3 | |
| 110,0 | 163,8 | 18,0 | 87,1 | 170,7 | 234,0 | 14,9 | 1,4 | 82,5 | 54,5 | 2,0 | |
| 128,1 | 146,1 | 18,7 | 88,5 | 170,5 | 228,0 | 15,1 | 1,3 | 80,6 | 58,9 | 1,9 | |
| 135,0 | 137,7 | 18,6 | 87,9 | 168,0 | 224,0 | 14,8 | 1,3 | 79,5 | 62,5 | 2,0 | |
| 150,0 | 125,1 | 18,8 | 88,1 | 168,5 | 224,0 | 14,9 | 1,3 | 79,2 | 65,6 | 2,3 | |
| Lâmpada T5 de 35 W | | | | | | | | | | | |
| V_{in} [V] | I_{in} [mA] | P_{in} [W] | V_L [V] | I_L [mA] | $I_{L,pk}$ [mA] | P_L [W] | FC | η [%] | f_{sw} [kHz] | E_{RF} [J] | |
| 77,3 | 493,6 | 38,2 | 212,1 | 157,7 | 210,0 | 33,5 | 1,3 | 87,6 | 45,5 | 1,8 | |
| 90,0 | 442,7 | 39,9 | 210,4 | 166,4 | 220,0 | 35,0 | 1,3 | 87,8 | 48,0 | 2,3 | |
| 110,0 | 365,2 | 40,2 | 212,0 | 164,6 | 214,0 | 34,9 | 1,3 | 86,9 | 51,7 | 2,0 | |
| 128,0 | 323,9 | 41,5 | 210,0 | 168,5 | 220,0 | 35,4 | 1,3 | 85,4 | 54,1 | 1,9 | |
| 135,0 | 301,1 | 40,7 | 212,4 | 162,2 | 210,0 | 34,5 | 1,3 | 84,8 | 55,5 | 2,0 | |
| 150,0 | 279,1 | 41,9 | 211,3 | 165,0 | 214,0 | 34,9 | 1,3 | 83,3 | 56,9 | 2,3 | |

REFERÊNCIAS

- [1] A. Kluge, H. Gueldner, F. Reifegerste, S. Wendt, and C. May, "Power electronics in railway lighting systems," in *Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2010, pp. 793–799.
- [2] Y. Qin, D. Lin, and S. Hui, "A simple method for comparative study on the thermal performance of LEDs and fluorescent lamps," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 24, no. 7, pp. 1811–1818, July 2009.
- [3] A. Santos, M. Toss, R. Souza, R. Tonkoski, and F. Reis, "A influência do reator eletrônico com partida programada na vida útil da lâmpada fluorescente T5," *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 14, no. 3, pp. 157–164, Agosto 2009.
- [4] M. Polonskii, V. Schulz, and 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, Maio 2011.
- [5] B. S. Dupczak, "Reator eletrônico para lâmpadas fluorescentes alimentado em corrente contínua," Dissertação de Mestrado, Dept. de Eng. Elétrica, Univ. Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.
- [6] J. Alonso, J. Cardesin, A. Calleja, M. Rico-Secades, and J. Garcia, "A fluorescent lamp electronic ballast for railway applications based on low-cost microcontroller," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, no. 5, pp. 1391–1400, September 2005.
- [7] *Railway applications - electronic equipment used on rolling stock*, CENELEC EN50155, 2001.
- [8] *Railway applications - rolling stock - dc supplied electronic ballasts for lighting fluorescent lamps*, CENELEC EN50311, 2003.
- [9] *Double-capped fluorescent lamps - performance specifications*, IEC 60081, 2000.
- [10] *AC-supplied electronic ballasts for tubular fluorescent lamps - performance requirements*, IEC 60929, 2006.
- [11] *Silhouette T5 - Fluorescent lamp technology guide*, Philips, 2001.
- [12] *Startcoat T5 - Product information for original equipment manufactures*, GE, 2001.
- [13] M. Alonso, "Electronic ballasts," in *Power Electronics Handbook*, M. Rashid, Ed. Academic Press, 2001, pp. 507–531.
- [14] F. Bisogno, A. Seidel, R. Holsbach, and R. do Prado, "Resonant filter applications in electronic ballast," in *Proc. of IEEE Industry Applications Conference (IAS)*, 2002, pp. 348–354.
- [15] F. Wakabayashi and C. Canesin, "Metodologia de projeto para o filtro ressonante LCC de reatores eletrônicos com controle de luminosidade para lâmpadas fluorescentes," *Eletrônica de Potência - SOBRAEP*, vol. 09, no. 1, pp. 71–79, Junho 2004.
- [16] J. Lopes, M. da Silva, M. Dalla Costa, F. Bisogno, R. do Prado, and A. 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.

DADOS BIOGRÁFICOS

Bruno Scortegagna Dupczak possui graduação (2007) e mestrado (2008) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é doutorando no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP-UFSC). Apresenta interesse em reatores eletrônicos para iluminação, circuitos para correção ativa de fator de potência e inversores multiníveis para sistemas de propulsão elétrica. É membro estudante da SOBRAEP e da IEEE.

Arnaldo José Perin possui graduação em Engenharia Eletrônica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (1977), mestrado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (1980) e doutorado em Genie Electrique - Institut National Polytechnique de Toulouse (1984). Atualmente é professor titular aposentado, atuando como Professor Voluntário na Universidade Federal de Santa Catarina. Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica de Potência, atuando principalmente nos seguintes temas: correção do fator de potência, conversores multiníveis, inversores, modulação, comutação suave e sistemas de iluminação.