

PROJETO DO REATOR ELETRÔNICO AUTO-OSCILANTE

Álysson R. Seidel

Fábio E. Bisogno

Rafael K. Pavão

Ricardo N. do Prado

NUPEDEE - PPGEE - GEDRE - UFSM
97105-900 Santa Maria – RS
Brasil

Resumo - Neste artigo é apresentada a análise e o projeto do circuito de comando auto-oscilante empregado em reatores eletrônicos. O reator eletrônico auto-oscilante é representado por um sistema de controle do tipo relé. Para análise e projeto, são utilizados o método da função descritiva e o critério estendido de estabilidade de Nyquist, dos quais obtêm-se as equações de projeto do mesmo. Resultados de simulação e experimentais para um reator eletrônico de 40 W são apresentados para demonstrar sua performance e validar a análise feita.

Palavras-Chave – Reator Eletrônico com Comando Auto-oscilante, Análise e Projeto.

DESIGN OF SELF-OSCILLATING ELECTRONIC BALLAST

Abstract – This paper presents a design methodology and analysis of the self-oscillating driver circuit for electronic ballasts. The self-oscillating electronic ballast is represented as relay control system. Through this representation the describing function method and extended Nyquist stability criterion can be used to determine the gate drive circuit parameters. Through these techniques design equations are derived. Experimental and simulation results from one 40 W electronic ballast are presented to demonstrate the performance and validate the analysis carried out.

Keywords - Self-oscillating Electronic Ballast, Analysis and Design.

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, parcela considerável da energia elétrica produzida mundialmente é consumida na forma de iluminação artificial e qualquer aumento na eficiência dos sistemas de iluminação é desejável. Um meio de reduzir o consumo de energia elétrica é a utilização de reatores eletrônicos em alta frequência para lâmpadas fluorescentes. Além da significativa redução da energia consumida, os reatores eletrônicos apresentam vantagens sobre os reatores eletromagnéticos tradicionais, como: maior eficiência, menor peso, menor volume, ausência de cintilação e de ruído audível [1] e [2].

Aliado a isso, os reatores eletrônicos com circuito de comando auto-oscilante têm outras vantagens, como: simplicidade, confiabilidade e baixo custo.

A estrutura do reator eletrônico auto-oscilante é bastante simples; no entanto, seu projeto pode se tornar um tanto quanto complexo. Para a solucionar esse problema, existem métodos que podem ser adequadamente utilizados. Entre eles, cita-se: métodos no domínio da frequência, como Tsytkin e função descritiva [3]-[5] e um método no domínio do tempo, como Hammel [6].

Neste trabalho, será utilizado o método da função descritiva, devido ao filtro ressonante apresentar características de filtro passa baixa. Essa característica possibilita considerar somente a componente fundamental, tornando a análise mais simples sem comprometer os resultados. Além disso, a estabilidade deve ser avaliada para verificar a existência de uma oscilação auto-sustentada. Para isso será adotado o critério de estabilidade estendido de Nyquist [4].

Com essa análise torna-se possível esclarecer o funcionamento do reator eletrônico auto-oscilante (REAO) e encontrar equações de projeto que definam os parâmetros do circuito de comando do mesmo.

Este artigo é organizado da seguinte forma: na seção II será apresentada uma análise qualitativa do REAO; na seção III será apresentado o equacionamento para determinação do projeto do REAO; na seção IV será mostrado o procedimento de projeto para o mesmo; e nas seções V e VI serão apresentados os resultados de simulação e experimentais, respectivamente. Na seção VII discussões finais a respeito do projeto realizado serão apresentadas.

II. ANÁLISE DO REATOR ELETRÔNICO AUTO-OSCILANTE

Nesta seção é apresentada uma breve análise do princípio de funcionamento do reator eletrônico auto-oscilante (REAO). A partir dessa análise, o REAO é representado por um sistema de controle do tipo relé. Assim, um procedimento de projeto pode ser desenvolvido envolvendo a representação do REAO por diagrama de blocos e sua análise utilizando ferramentas de controle.

A. Funcionamento do Reator Eletrônico Auto-Oscilante

O diagrama esquemático do REAO é mostrado na Fig. 1, sendo formado por: uma ponte retificadora (diodos D_1 - D_4), capacitor de barramento C_B ; circuito de partida formado por R_Q , C_Q , R_M , D_5 e diac; filtro ressonante LCC ; lâmpada fluorescente; transformador de corrente TC conectado em série com o filtro LCC e seu secundário conectado com polaridade complementar nos terminais *gate-source* dos mosfets S_1 , S_2 e em paralelo com os diodos zener D_{Z1} - D_{Z4} .

Artigo Submetido em 27/08/2001. Primeira Revisão em 25/03/2002. Segunda Revisão em 05/11/2002. Aceito sob recomendação do Editor Prof. Domingos Sávio Lyrio Simonetti.

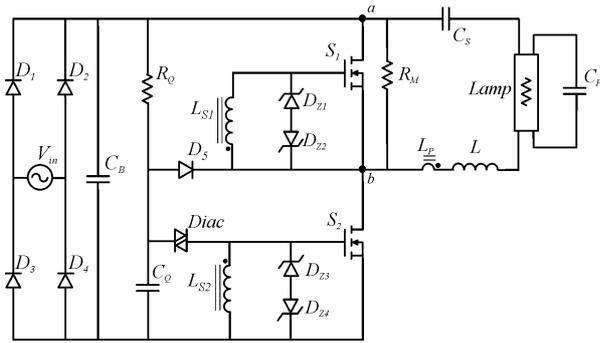


Fig. 1. Reator eletrônico *half-bridge* com circuito de comando auto-oscilante

Assumindo que as condições necessárias para auto-oscilação (Seção III.B) são satisfeitas, o princípio de operação do REAO pode ser descrito a partir do circuito da Fig.1. Quando o circuito é energizado, o capacitor C_Q é carregado através de R_Q . Quando C_Q atinge a tensão de avalanche do diac, esse conduz, aplicando uma tensão positiva no *gate* de S_2 . Com a condução de S_2 , haverá a realimentação da corrente do filtro ressonante *LCC* por meio do transformador de corrente *TC* que comandará os Mosfets S_1 , S_2 , conforme será descrito detalhadamente em II.B. Iniciada a operação, toda carga de C_Q é descarregada por D_5 evitando que o *Diac* entre em condução novamente, mantendo-se assim a operação estável.

B. Análise do REAO como um Sistema de Controle

A Fig. 2 mostra um diagrama representativo do REAO com cada seção do reator representada separadamente para facilitar sua análise. O filtro ressonante é representado pelo bloco (a), considerando todos elementos lineares, inclusive a lâmpada fluorescente, representada por R.

O circuito de comando é representado pelo circuito mostrado no bloco (b) formado por três elementos principais. Primeiramente, representa-se a corrente ressonante refletida para o secundário do TC (lado do comando) por uma fonte de corrente senoidal, i_s e a indutância magnetizante do TC, L_m . Por último, considera-se que a tensão sobre os diodos zener é constante e muda de polaridade a cada ciclo.

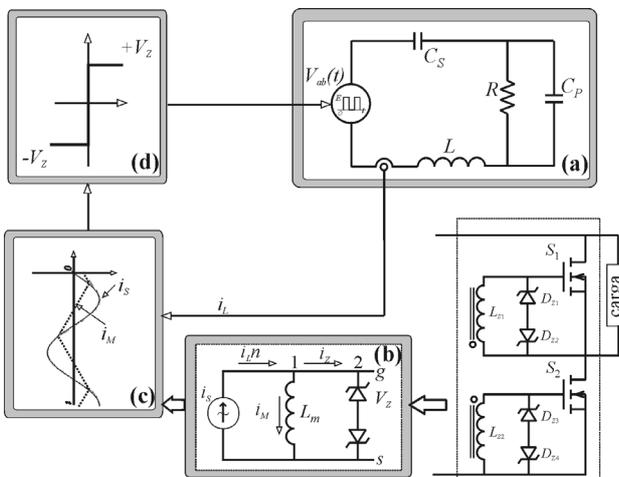


Fig. 2. Diagrama representativo do reator eletrônico auto-oscilante

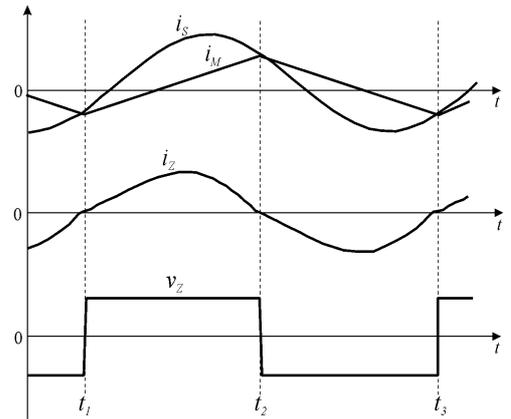


Fig. 3. Principais formas de onda do circuito de comando auto-oscilante

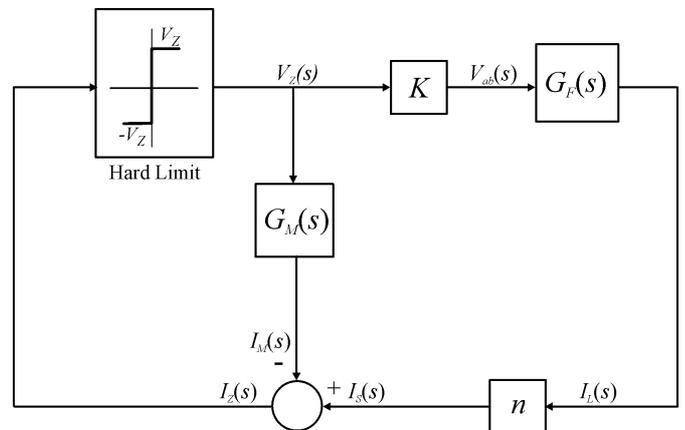


Fig. 4. Diagrama de blocos do reator eletrônico auto-oscilante

As relações de corrente desse circuito definem a troca de polaridade da tensão dos diodos zener, e conseqüentemente, dos interruptores (S_1 e S_2) mostrado em (c). As formas de onda que definem isso são representadas na Fig. 3. Pelo somatório das correntes no nó 1 do circuito mostrado na Fig. 2 (bloco (b)) e através da representação destas formas de onda na Fig. 3, visualiza-se a troca de polaridade da tensão zener que ocorre nos tempos t_1 , t_2 e t_3 , nos instantes em que a corrente i_M iguala-se a corrente i_s e, assim, a corrente i_Z passa por zero mudando sua polaridade. Pela análise, conclui-se que L_m e V_Z possuem um impacto direto na frequência em que ocorrerá a auto-oscilação.

Como a tensão V_Z é escolhida em função da tensão *gate-source* necessária para comandar o Mosfet, um procedimento de projeto pode ser desenvolvido para se obter a indutância magnetizante L_m para a frequência especificada no projeto.

O conversor *half-bridge* e a fonte de tensão de entrada podem ser representados através do relé tipo liga-desliga, mostrado na Fig. 2 (bloco (d)), relacionando a corrente zener i_Z e a tensão *gate-source* (zener) de saída V_Z .

Na Fig. 4, é mostrado o diagrama de blocos do REAO como um sistema de controle a partir do esquema da Fig. 2.

Para obter esse diagrama de blocos, as capacitâncias intrínsecas dos Mosfets (S_1 ; S_2) e seus tempos de comutação são desprezados e a tensão de entrada é considerada constante.

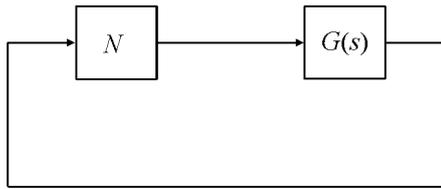


Fig. 5. Diagrama de blocos reduzido

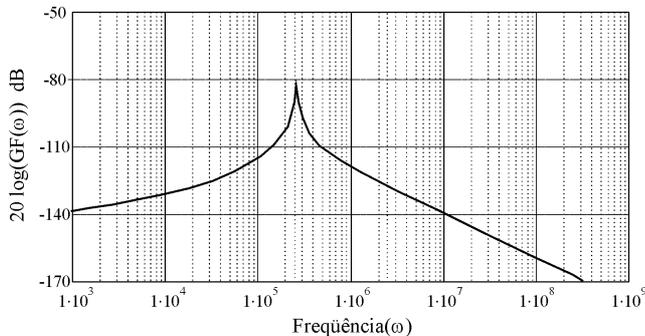


Fig. 6. Resposta em freqüência da corrente do indutor ressonante em relação à tensão de entrada V_{ab}

Definem-se, a seguir, os elementos que constituem o diagrama de blocos da Fig. 4. O filtro ressonante pode ser representado por uma função de transferência $G_F(s)$ que relaciona a corrente ressonante I_L e a tensão aplicada ao filtro V_{ab} ,

$$G_F(s) = \frac{1}{L} \frac{s^2 + a s}{s^3 + a s^2 + b s + c} \quad (1)$$

sendo

$$a = \frac{I}{R \cdot C_P}, \quad b = \left(\frac{1}{C_S L} + \frac{1}{C_P L} \right), \quad c = \frac{I}{R C_P C_S L} \text{ e a indutância}$$

magnetizante é representada pela função de transferência da corrente magnetizante I_M pela tensão *gate-source* V_Z por

$$G_M(s) = \frac{1}{L_m s}. \quad (2)$$

Assim, pode-se reduzir o diagrama de blocos da Fig.4 na forma da Fig. 5, resultando em

$$G(s) = (G_M(s) - K G_F(s) \cdot n), \quad (3)$$

em que: $K = \frac{E}{2V_Z}$ e $n = n_p/n_s$, onde n_p e n_s são o número

de espiras do primário e secundário do *TC*.

O elemento não linear (relé liga-desliga), mostrado no diagrama de blocos da Fig.4, é parte determinante no projeto, desde que as harmônicas de ordem superiores geradas por este sejam atenuadas, sendo assim a aproximação fundamental válida.

O REAO é composto de um filtro ressonante, cuja resposta em freqüência é de um filtro passa baixa, como é mostrado na Fig.6.

Assim, a freqüência de comutação em que o REAO irá oscilar pode ser investigada usando o método da função descritiva e o critério estendido de estabilidade de Nyquist. Se uma freqüência de auto-oscilação existe, sua freqüência pode ser determinada utilizando a equação característica do sistema da Fig.5.

$$1 + N G(s) = 0 \quad (4)$$

re arranjando (4), tem-se

$$G(s) = -\frac{1}{N} \quad (5)$$

Se (5) for satisfeita, então a interseção de $G(s)$ e $-1/N$ pode fornecer informações de um ponto de equilíbrio com freqüência de oscilação auto-sustentada.

Para isso, torna-se necessário definir a função descritiva do relé liga-desliga mostrado na Fig. 7(a), utilizando as formas de onda do circuito de comando auto-oscilante mostradas na Fig. 7(b), que são: 1) corrente zener que é a entrada e 2) a tensão *gate-source* (zener) que é a saída do relé.

A corrente zener é representada por

$$I_Z(t) = I_Z \cdot \text{sen}(\omega t) \quad (6)$$

sendo I_Z a amplitude da corrente.

Para determinar a componente fundamental da forma de onda quadrada da tensão *gate-source* (zener) mostrada na Fig. 7(b), pode se representar a mesma por série de Fourier

$$v(t) = A_0 + \sum_{m=1}^{\infty} (A_m \cdot \cos(m\omega t) + B_m \cdot \text{sen}(m\omega t)), \quad (7)$$

em que: A_m e B_m são os coeficientes da série de Fourier, para $m=0,1,\dots$

Como essa forma de onda é uma função ímpar e simétrica, os coeficientes A_m e A_0 são nulos. Assim (7) torna-se

$$v(t) = \sum_{m=1}^{\infty} B_m \cdot \text{sen}(m\omega t) \quad (8)$$

e a componente fundamental da tensão de saída passa a ser

$$v_1(t) = B_1 \text{sen}(\omega t) = V_1 \text{sen}(\omega t), \quad (9)$$

sendo

$$V_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} v(t) \text{sen}(\omega t) d(\omega t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} v(t) \text{sen}(\omega t) d(\omega t). \quad (10)$$

Substituindo $v(t)=V_Z$ em (10) tem-se

$$V_1 = \frac{4V_Z}{\pi} \int_0^{\pi} \text{sen}(\omega t) d(\omega t) = \frac{4V_Z}{\pi}. \quad (11)$$

Substituindo (11) em (9) obtém-se

$$v_1(t) = \frac{4V_Z}{\pi} \text{sen}(\omega t). \quad (12)$$

A função descritiva do relé tipo liga-desliga é definida pela relação da entrada (6) com a de saída (12) por

$$N = \frac{4V_Z}{\pi I_Z}. \quad (13)$$

Na próxima seção serão utilizadas ferramentas de controle, tais como: o método da função descritiva e o critério de estabilidade estendido de Nyquist com o objetivo de encontrar equações de projeto e verificar a estabilidade, relacionadas aos parâmetros do circuito [4].

III. PROJETO DO REATOR ELETRÔNICO AUTO-OSCILANTE

O projeto do REAO será dividido em duas etapas. Na primeira etapa, serão determinadas as equações de projeto dos elementos do filtro ressonante.

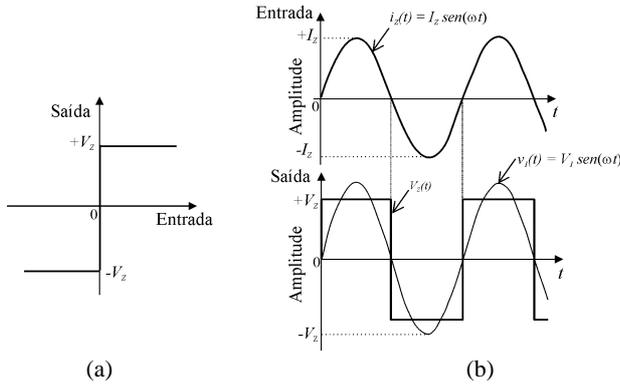


Fig. 7. (a) Relé tipo liga-desliga (b) Forma de ondas de entrada e saída

Na segunda etapa, será analisado o REAO como um sistema de controle SISO, utilizando os elementos do filtro previamente definidos.

A. Projeto do Filtro Ressonante

O filtro série-paralelo ressonante LCC mostrado na Fig. 1 é composto pelos capacitores série C_s , paralelo C_p e indutor L . O filtro é alimentado por uma forma de onda quadrada gerada pelo inversor *half-bridge* assimétrico mostrado na Fig. 1 e Fig. 2. A lâmpada fluorescente, em regime permanente, pode ser representada por um resistor equivalente R . Considerando ideais os componentes do filtro, pode-se encontrar a potência na lâmpada através da potência real entregue ao filtro por

$$P = \text{Re} \left(\frac{V_{ef}^2}{Z} \right). \quad (14)$$

Usando a aproximação fundamental, o valor eficaz da tensão que alimenta o filtro ressonante V_{ef} é

$$V_{ef} = \frac{E \cdot \sqrt{2}}{\pi}, \quad (15)$$

sendo

$E = \sqrt{2} \cdot V_{in}$: tensão contínua do barramento;

V_{in} : valor eficaz da tensão da rede de alimentação.

Com essas aproximações, torna-se possível projetar o filtro ressonante utilizando a parte real de sua admitância, $1/Z$, e o ângulo ϕ , que é o ângulo da impedância de entrada do filtro ressonante.

A impedância Z do filtro ressonante é definida por

$$Z = \frac{R}{(1+C_p^2 R^2 \omega^2)} + j \left[\left(L\omega - \frac{1}{C_s \omega} \right) \frac{R^2 C_p \omega}{(1+C_p^2 R^2 \omega^2)} \right], \quad (16)$$

sendo ω : frequência angular de comutação.

Fazendo $1/Z$, tem-se

$$\frac{1}{Z} = \frac{(1+C_p^2 R^2 \omega^2)}{R + j \left[\left(L\omega - \frac{1}{C_s \omega} \right) (1+C_p^2 R^2 \omega^2) - R^2 C_p \omega \right]}. \quad (17)$$

Racionalizando (17), obtém-se a parte real de $1/Z$ por

$$\text{Re} \left(\frac{1}{Z} \right) = \frac{(1+C_p^2 R^2 \omega^2) R}{R^2 + \left[\left(L\omega - \frac{1}{C_s \omega} \right) (1+C_p^2 R^2 \omega^2) - R^2 C_p \omega \right]^2}. \quad (18)$$

O ângulo ϕ pode ser determinado por

$$\phi = \arg(Z) = \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)}, \quad (19)$$

substituindo $\text{Im}(Z)$ e $\text{Re}(Z)$ de (16) em (19), obtém-se

$$\phi = \arctan \left(\left[\left(L\omega - \frac{1}{C_s \omega} \right) \frac{R^2 C_p \omega}{(1+C_p^2 R^2 \omega^2)} \right] \cdot \frac{1+C_p^2 R^2 \omega^2}{R} \right). \quad (20)$$

A partir de (14) a (20) pode-se determinar as principais equações de projeto que serão utilizadas para o filtro ressonante, como segue:

1) *Potência em função do ângulo (ϕ):* Substituindo (18) em (14), obtém-se a expressão da potência na lâmpada por

$$P(\phi) = \frac{E^2 \cdot 2}{\pi^2} \cdot \frac{(1+C_p^2 R^2 \omega^2) R}{R^2 + \left[\left(L\omega - \frac{1}{C_s \omega} \right) (1+C_p^2 R^2 \omega^2) - R^2 C_p \omega \right]^2}. \quad (21)$$

Para o projeto do capacitor C_p em função do ângulo ϕ , define-se um termo similar entre ϕ e P através de (20), fazendo

$$\tan(\phi) = \left[\left(L\omega - \frac{1}{C_s \omega} \right) \frac{R^2 C_p \omega}{(1+C_p^2 R^2 \omega^2)} \right] \cdot \frac{1+C_p^2 R^2 \omega^2}{R}. \quad (22)$$

Por similaridade entre (21) e (22), tem-se

$$\tan(\phi) \cdot R = \left[\left(L\omega - \frac{1}{C_s \omega} \right) (1+C_p^2 R^2 \omega^2) - R^2 C_p \omega \right]. \quad (23)$$

Substituindo (23) em (21), obtém-se

$$P(\phi) = \frac{E^2 \cdot 2}{\pi^2} \cdot \frac{(1+C_p^2 R^2 \omega^2) R}{R^2 + (R \cdot \tan(\phi))^2}. \quad (24)$$

Assim, pode-se isolar C_p em função das variáveis conhecidas, resultando em

$$C_p(\phi) = \frac{1}{\omega R} \sqrt{\frac{P(\phi)}{R} \left(\frac{\pi^2 (R^2 + (R \cdot \tan(\phi))^2)}{E^2 \cdot 2} \right)} - 1. \quad (25)$$

A partir da expressão de C_p , obtém-se L isolando-o em (23), obtendo

$$L(\phi, C_s) = \frac{R \tan(\phi) \omega^{-1} + C_p(\phi) R^2}{1 + \omega^2 C_p^2(\phi) R^2} + \frac{1}{C_s \omega^2}. \quad (16)$$

Através das equações (26), (25) e (21), respectivamente, determina-se os elementos do filtro ressonante utilizando um capacitor C_s de valor elevado, pois o mesmo tem a função de retirar o nível contínuo da forma de onda que alimenta a lâmpada fluorescente atuando como fonte de tensão.

Posteriormente, determina-se graficamente o ângulo ϕ adequado à ignição da lâmpada fluorescente mostrado na Fig. 8, representada por um elevado valor de resistência equivalente (100R) na ignição da lâmpada e para sua potência nominal em regime permanente $R=270 \Omega$, valor obtido através do modelo da lâmpada fluorescente [7].

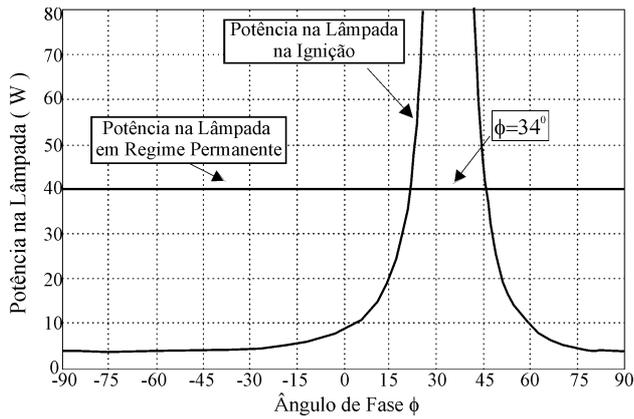


Fig. 8. Gráfico da potência na lâmpada em função do ângulo ϕ em regime permanente e na partida

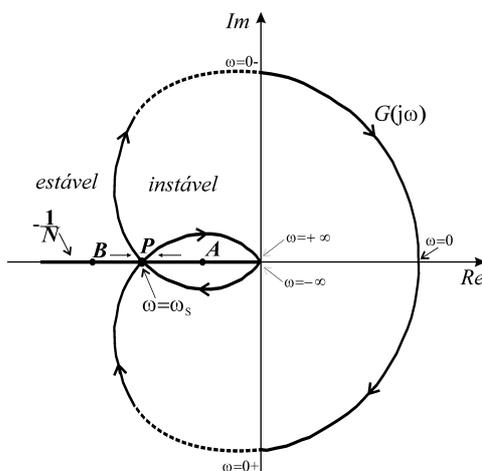


Fig. 9. Diagrama de Nyquist para o REAO

B. Projeto do Circuito de Comando

O procedimento para determinar os principais parâmetros do circuito de comando auto-oscilante será desenvolvido usando os parâmetros do filtro ressonante determinados na seção III.A. Existem dois parâmetros principais, os quais têm um grande impacto na frequência de oscilação do REAO que são a indutância magnetizante do transformador de corrente L_m e a tensão do diodo zener V_Z .

Sabendo-se que a tensão zener tem um valor típico especificado pela tensão *gate-source* dos Mosfets empregados, resta determinar L_m em função da frequência de auto-oscilação desejada.

1) *Projeto da Indutância Magnetizante L_m* : O projeto da indutância magnetizante L_m está relacionado à análise de estabilidade do REAO. Plotando o diagrama de Nyquist da relação $G(j\omega)$ e $-1/N$, pode-se prever se existe um ponto de equilíbrio em que uma frequência de oscilação exista.

Na Fig. 9 é mostrado o diagrama de Nyquist para verificar a estabilidade do ponto de equilíbrio P relacionado à indutância L_m . Assumindo que, inicialmente ocorra um pequeno distúrbio no sistema, com redução da amplitude I_Z da fundamental da corrente zener i_Z , o ponto de operação se move de P para A . Nota-se que A é envolvido pela curva $G(j\omega)$ e corta $-1/N$ duas vezes no sentido horário, como é indicado na Fig. 9. Pelo critério estendido de estabilidade de

Nyquist I_Z tende a crescer em direção a P , pois se trata de uma região instável. Por outro lado, se houver um distúrbio em I_Z , fazendo com que a amplitude aumente, por exemplo para o ponto B , este não é envolvido por $G(j\omega)$, resultando um comportamento estável, reduzindo a amplitude, tendendo novamente ao ponto P . Portanto, de acordo com o critério de estabilidade estendido de Nyquist, o ponto P , representa uma possível oscilação auto-sustentada e as condições para existência de um ponto de equilíbrio são satisfeitas [4]. Ainda, através da solução das equações do circuito relacionado a interseção do ponto P de $G(j\omega)$ e $-1/N$ é possível determinar os parâmetros adequados do funcionamento do REAO observando que a igualdade de $G(j\omega)$ e $-1/N$ se dá no eixo real com $\text{Im}(G(j\omega))=0$. Portanto, pela igualdade da parte imaginária de $G(j\omega)$ a zero e substituindo os respectivos elementos ressonantes determinados em III.A, pode ser determinada a indutância magnetizante em função da frequência, por

$$L_m(\omega) = \frac{L \left((c - a\omega^2)^2 + (b\omega - \omega^3)^2 \right)}{Kn(a\omega^2(a\omega^2 - c) + \omega^3(b\omega - \omega^3))}. \quad (27)$$

Determinado L_m , encontra-se a relação de espiras necessária do TC para o tipo de material magnético empregado, observando as relações entre a corrente zener necessária para polarização e a corrente no enrolamento primário do mesmo.

IV. PROCEDIMENTO DE PROJETO E EXEMPLO

Nesta seção, serão resumidas as etapas do projeto do REAO, observando os seguintes procedimentos:

a) Projeto do Filtro Ressonante

Com os dados da Tabela I, determinam-se os elementos do filtro ressonante pelos seguintes passos:

1) *Passo 1 – Escolha do ângulo ϕ* : Determina-se o ângulo ϕ através da Fig. 8, escolhendo o ângulo em que o pico de potência na lâmpada seja máximo $\phi=34^\circ$, considerando sua resistência equivalente (100R) garantindo as condições necessárias para ignição e funcionamento em regime permanente para a resistência R .

2) *Passo 2 – Projeto do Capacitor C_p* : A partir do ângulo ϕ determinado no passo anterior, determina-se C_p , por (25).

3) *Passo 3 – Projeto da indutância L* : Através de (16) e um valor típico de C_s , L é determinado.

TABELA I
Dados De Projeto

Especificações	
Tensão de Entrada	$V_{in}=110 \text{ V}_{\text{RMS}}, 60\text{Hz}$
Potência de Saída	$P=40 \text{ W}$
Frequência de Comutação	$f_s=40 \text{ kHz}$
Diodo zener	$D_{Z1-4}=12\text{V}$
Resistência da Lâmpada	$R=270\Omega$

Os principais parâmetros do REAO são resumidos na Tabela II.

TABELA II
Resumo dos Parâmetros

Parâmetros do Filtro Ressonante	
C_S	Capacitor de Polipropileno, 147nF/250 Vac
C_P	Capacitor de Polipropileno, 22 nF/600 Vac
L	Indutor ressonante, 800 μ H, 150 espiras EE20 IP6-Thornton
Parâmetros do Circuito	
L_P, L_{S1}, L_{S2}	$L_m=688 \mu$ H.: 2/12/12 núcleo NT 15/9,5/8 IP6 – Thornton
$D_{Z1}, D_{Z2}, D_{Z3}, D_{Z4}$	Diodo Zener 12 V 1/2 W
Diac	DB3
R_Q	Resistor 220 k Ω /1/8W
C_Q	Capacitor cerâmico 100nF / 63 V
R_M	Resistor 470 k Ω /1/8W
D_5	Diodo UF4007
Outros	
S_1, S_2	Mosfet IRF740
D_1, D_2, D_3, D_4	Diodos 4x1N4004
R	Lâmpada Osram L40W/LS F40 Daylight
C_B	Capacitor Eletrolítico / 100 μ F 200Vdc

b) Projeto da Indutância Magnetizante L_m

A partir de (27) obtém-se a indutância magnetizante do transformador de corrente. Sendo $L_m=688 \mu$ H e utilizando $V_Z=12$ V e f_s de 40 kHz, é necessário ainda verificar as condições de existência de um ponto de equilíbrio de acordo com análise realizada na seção III.B, onde o ponto P, mostrado na Fig. 9 está relacionado a frequência de oscilação auto-sustentada do REAO. Através da análise, conclui-se que poderá existir uma oscilação auto-sustentada com frequência próxima a especificada no projeto.

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Para avaliar o projeto desenvolvido, o REAO foi simulado utilizando o programa Orcad 9.0, com o circuito da Fig. 10, empregando o modelo tangente da lâmpada fluorescente [7].

Na Fig. 11 são mostradas as principais formas de onda de simulação. Na Fig. 11(a) é mostrada a forma de onda de gate-source do Mosfet S_2 . Na Fig. 11(b) são mostradas as formas de onda da tensão e corrente da lâmpada fluorescente em alta frequência e na Fig. 11(c) são mostradas as formas de onda da tensão aplicada ao filtro ressonante e a corrente do mesmo.

O modelo matemático do REAO utilizando o simulador matemático simulink é mostrado na Fig. 12, com o intuito de comprovar o funcionamento do REAO como um sistema de controle. As formas de onda obtidas nessa simulação estão em conformidade com as formas de onda teóricas mostradas na Fig. 3. Na Fig. 13(a) são mostradas as formas de onda da tensão gate-source (zener) V_Z , da corrente ressonante i_s refletida ao lado do secundário do TC e da corrente magnetizante I_M . Na Fig. 13(b) são mostradas as formas de onda da tensão V_L e da corrente I_L no resistor R, que representa a lâmpada fluorescente. Na Fig. 13(c) são mostradas as formas de onda da tensão aplicada ao filtro ressonante e a corrente do mesmo.

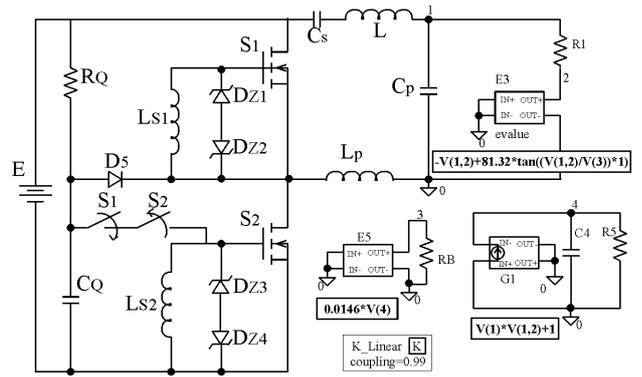
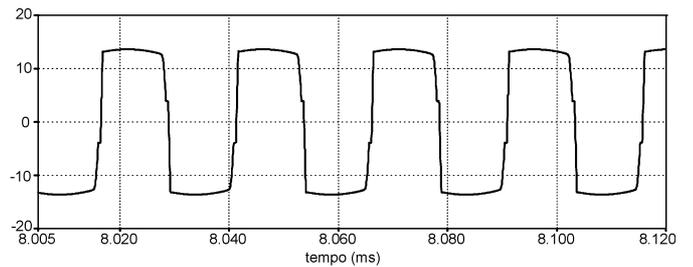
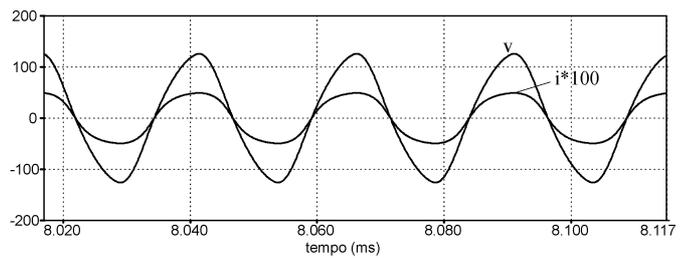


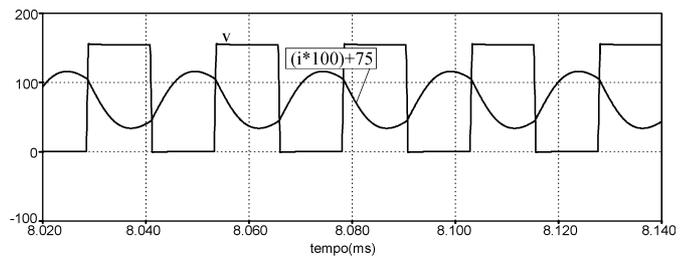
Fig. 10. Diagrama do circuito simulado



(a)



(b)



(c)

Fig. 11. Resultados de Simulação (a) tensão gate-source, (b) tensão e corrente na resistência equivalente da lâmpada e (c) tensão e corrente no filtro ressonante

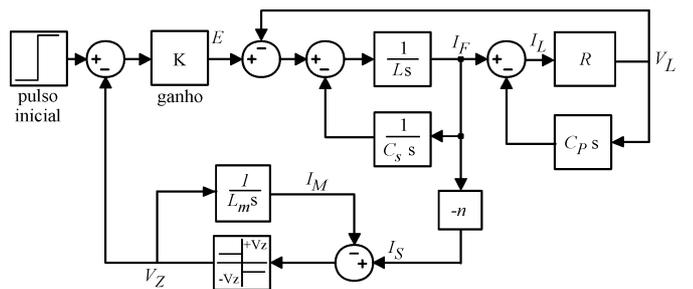


Fig. 12. Diagrama de blocos do REAO simulado no programa de simulação matemática Simulink

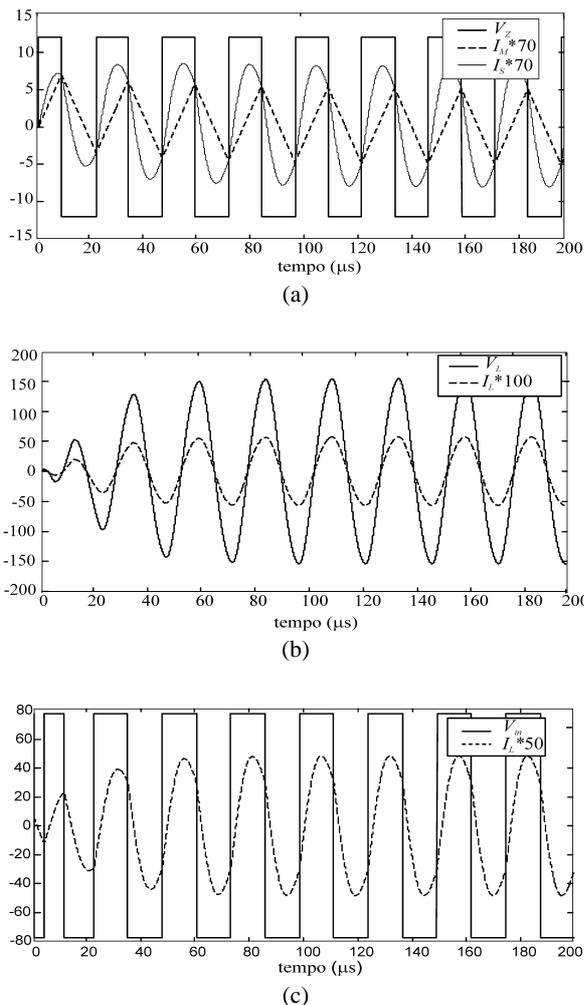


Fig. 13. Resultados de simulação obtidos no programa simulink para (a) tensão zener V_Z , corrente magnetizante I_M , e corrente ressonante no secundário do TC, (b) tensão V_L e corrente I_L na lâmpada R e (c) tensão e corrente no filtro ressonante

VI. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O reator eletrônico empregando o circuito de comando auto-oscilante foi implementado utilizando uma frequência de comutação de 40 kHz alimentando uma lâmpada fluorescente de 40 W, de acordo com o esquema mostrado na Fig. 1, com os dados do protótipo resumidos na Tabela II.

Na Fig. 14 (a) é mostrada a tensão nos terminais *gate-source* em um dos Mosfets do REAO. A frequência de comutação medida é de $f_s=39.35$ kHz. A Fig. 14 (b) mostra a corrente ressonante e a tensão aplicada ao filtro. A Fig. 14 (c) mostra a tensão e corrente no interruptor, e na Fig. 14 (d) são mostradas tensão e corrente na lâmpada fluorescente em alta frequência.

Na Fig. 14 (e) são mostradas a tensão e a corrente de ignição da lâmpada fluorescente.

Os resultados obtidos demonstraram uma boa relação entre o projeto do reator e sua implementação. O rendimento apresentado é de 92 %.

VII. DISCUSSÕES FINAIS

Os resultados apresentados demonstraram a viabilidade da metodologia de projeto apresentada, com as seguintes características:

1) *Simplicidade* - relacionada à característica passa baixa do filtro ressonante, o que possibilita utilizar a aproximação fundamental e o método da função descritiva, sem comprometer os resultados do projeto.

Neste caso, a utilização de métodos de projeto no domínio da frequência para o REAO, com maior número de harmônicas, apresenta maior complexidade, e resultados muito próximos ao método empregado.

2) *Ferramentas utilizadas* - A representação do REAO na forma de um sistema de controle é fundamental para que se determine seu comportamento, e que a partir dessa análise utilizando o método da função descritiva e critério estendido de Nyquist derive seu projeto.

3) *Erros* - Se o filtro ressonante não apresentar características de filtro passa baixa, e não atenuar as harmônicas geradas pelos elementos não lineares, o projeto pode levar a resultados errados.

VIII. CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma metodologia de projeto para o circuito de comando auto-oscilante utilizado em reatores eletrônicos. A partir de um método de projeto para o filtro ressonante, utilizando a aproximação fundamental, determinaram-se os elementos do filtro ressonante. Modelou-se o REAO como um sistema de controle e fizeram-se as simplificações necessárias para sua análise. A partir disso, determinou-se uma metodologia de projeto utilizando ferramentas de controle, como: função descritiva e critério de estabilidade estendido de Nyquist. As simulações apresentadas indicaram a viabilidade da metodologia de projeto proposta e os resultados experimentais obtidos confirmaram a eficiência desse método.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a THORNTON INPEC, pelo apoio com núcleos utilizado nas montagens, a CAPES e CNPq pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] E. E. Hammer, "High Frequency Characteristics of Fluorescent Lamps up to 500 kHz," Journal of the Illuminating Engineering Society, pp. 56-61, Winter 1987.
- [2] R. R. Verderber, O. C. Morce, and F. M. Rubinstein, "Performance of Electronic Ballast and Control with 34 and 40 watt F40 Fluorescent Lamps," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 25, no. 6, pp. 1049-1059, November/December 1989.

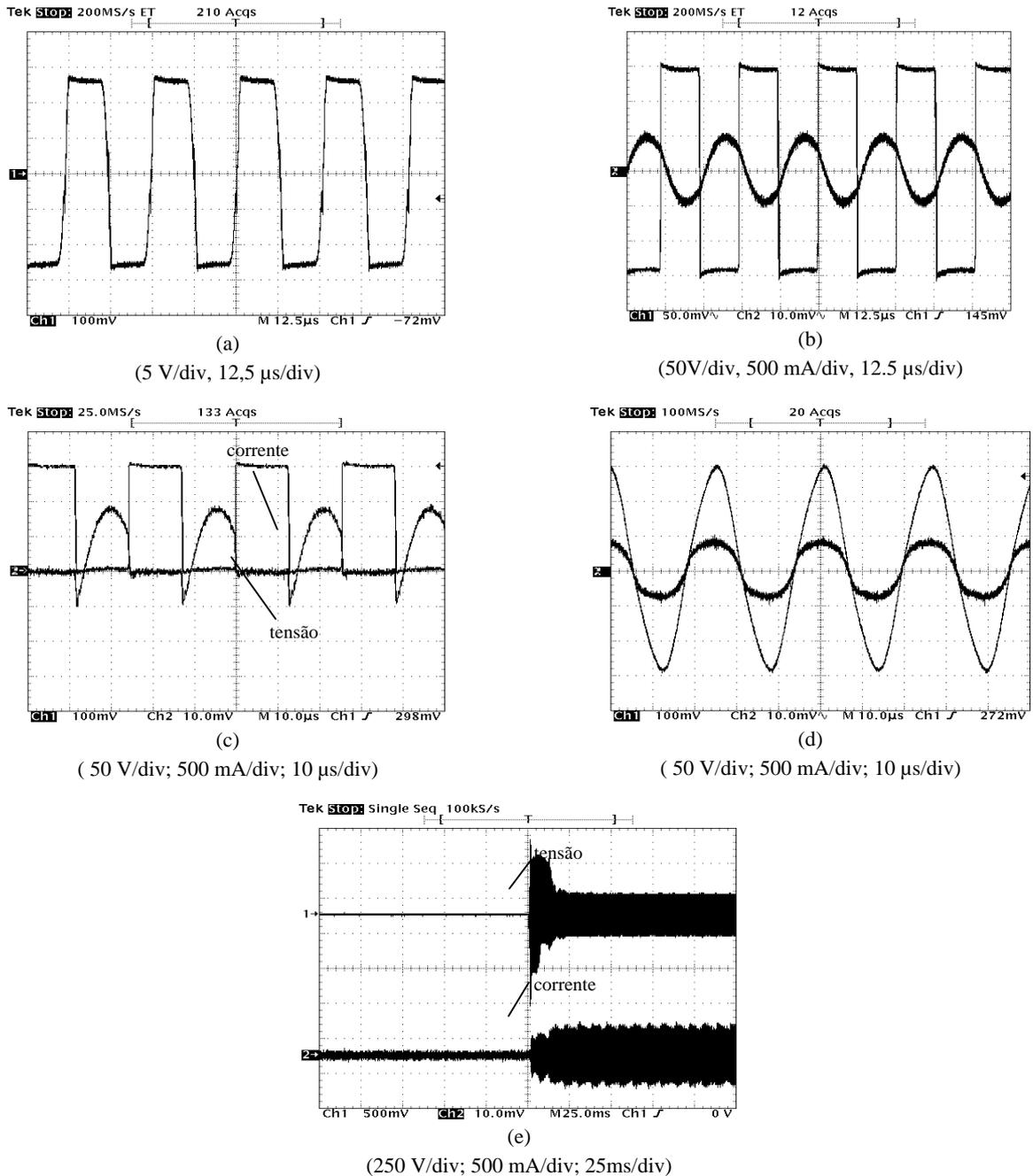


Fig. 14. Resultados experimentais (a) tensão gate-source, (b) tensão e corrente no filtro ressonante, (c) tensão e corrente no interruptor; (d) tensão e corrente na lâmpada e (e) tensão e corrente durante a ignição da lâmpada

- [3] C. Chang, J. Chang, and G. W. Bruning, "Analysis of the Self-Oscillating Series Resonant Inverter for Electronic Ballasts," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 3, pp. 533-540, May 1999.
- [4] H. Pinheiro, P. K. Jain, and G. Jóos, "Self-Sustained Oscillating Resonant Converters Operating Above the Resonant Frequency," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 14, no. 5, pp. 803-815, September 1999.
- [5] R. N. do Prado, A. R. Seidel, F. E. Bisogno, and M. A. D. Costa, "A Design Method for Electronic Ballast for Fluorescent Lamps," IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON 2000, pp. 2279-2284.
- [6] C. Chang and G. W. Bruning, "Self-Oscillating Electronic Ballast Analysis Via Relay Systems Approach," Fourteenth Annual Applied Power Electronics Conference, APEC 1999, pp. 753-759.
- [7] R. N do Prado, F. E. Bisogno, and E. C. Fortes, "Simple Mathematical Model for Fluorescent Lamps," IV Conferência de Aplicações Industriais, INDUSCON 2000, pp. 607-610.

DADOS BIOGRÁFICOS

Álysson Raniere Seidel, nascido em 01/08/1975 em São Pedro do Sul (RS) obteve o título de Engenheiro Eletricista em 1999 pela Universidade Federal de Santa Maria, onde é doutorando no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica. Atualmente é pesquisador no Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos nesta mesma universidade. Suas áreas de interesse são lâmpadas fluorescentes, reatores eletrônicos, sistemas dimerizáveis e eficiência luminosa.

Fábio Ecke Bisogno, nascido em 07/04/1973 em Santa Maria (RS) obteve o título de Engenheiro Eletricista e mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria, em 1999 e 2001, respectivamente. Atualmente é doutorando no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e pesquisador no Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos nesta mesma universidade. Suas áreas de interesse são lâmpadas fluorescentes, reatores eletrônicos, sistemas dimerizáveis e eficiência luminosa.

Rafael Kubiça Pavão, nascido em 21/11/1980 em Santiago (RS) estudante do curso de Engenharia Elétrica na

Universidade Federal de Santa Maria. Atualmente é pesquisador no Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos nesta mesma universidade. Suas áreas de interesse são lâmpadas fluorescentes, reatores eletrônicos, sistemas dimerizáveis e eficiência luminosa.

Ricardo Nederson do Prado, nascido em 22/04/1960 em Itapiranga (SC) obteve o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Santa Maria, em 1984, e os títulos de mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina em 1987 e 1993, respectivamente. Entre 1987 e 1992 foi professor assistente junto ao departamento de Eletrônica da Universidade Federal de Minas Gerais. A partir de 1993 é professor adjunto no Departamento de Eletrônica e Computação da Universidade Federal de Santa Maria. É membro do IEEE, da SBA e membro fundador da SOBRAEP. Atualmente é responsável pelo Grupo de Estudo e Desenvolvimento de Reatores Eletrônicos e Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFSM. Suas áreas de interesse são sistemas dimerizáveis e reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes e de alta pressão, qualidade de energia e eficiência luminosa.