

MODELO ELÉTRICO EQUIVALENTE PARA LÂMPADAS FLUORESCENTES SEM ELETRODOS DE INDUÇÃO

Marcelo F. da Silva, Natalia B. Chagas, Marson E. Schlittler, Jeferson Fraytag, Tiago B. Marchesan, Fabio Ecke Bisogno, José Marcos Alonso Álvarez* e Ricardo Nederson do Prado

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM - GEDRE - BRASIL

*Universidad de Oviedo, DIEECS - Tecnología Electrónica - ESPANHA
Santa Maria - RS

e-mail: ricardo@gedre.ufsm.br

Resumo – Este artigo apresenta uma metodologia do modelo elétrico equivalente para lâmpadas fluorescentes sem eletrodos de indução baseado nas suas características resistivas e reativas. O modelo apresentado, assim como sua metodologia, constitui uma ferramenta importante para projetistas de reatores eletrônicos. A metodologia apresentada considera as perdas dos núcleos existentes na bobina de indução e a característica reativa do plasma, sendo uma das principais contribuições deste trabalho. Um conversor meia ponte série paralelo ressonante foi empregado como reator para a lâmpada. O plasma e as bobinas da lâmpada são modelados por resistências e reatâncias dependentes da potência. Simulações, usando o modelo equivalente da lâmpada, estão em concordância com resultados experimentais. Os dados comparativos entre o modelo proposto e obtidos experimentalmente, validam o circuito equivalente apresentado.

Palavras-Chave – Lâmpada Fluorescente sem Eletrodos, Modelagem de Lâmpadas, Reator Eletrônico.

INDUCTION ELECTRODELESS FLUORESCENT LAMP ELECTRIC EQUIVALENT MODEL

Abstract – This paper presents an electric equivalent model for induction electrodeless fluorescent lamps based on resistances and reactances related to the output active and reactive power. The presented lamp model with the proposed methodology will be an important tool for ballast designers. One of the important features of the methodology is the concern with the cores losses and plasma reactive characteristic consideration. A series-parallel resonant half-bridge inverter is used as the ballast power stage. Plasma and windings are modeled as a power dependent resistance and reactance. Simulation results using the equivalent lamp model are in agreement with experimental results, showing a good accuracy and validating the proposed model.

Keywords – Electrodeless Fluorescent Lamps, Electronic Ballast, Lamp Modeling.

Artigo submetido em 07/12/2011. Primeira revisão em 23/02/2012, segunda revisão em 29/02/2012. Aceito para publicação em 29/02/2012 por recomendação do editor João Onofre P. Pinto.

I. INTRODUÇÃO

A modelagem de lâmpadas de descarga é uma ferramenta importante para o projeto de reatores eletrônicos, sendo objeto de diversas pesquisas. A descarga elétrica sem eletrodos foi descoberta por Johann Wilhelm Hittorf em 1884 e a primeira lâmpada sem eletrodos foi mostrada por Nikolas Tesla em Nova York em 1891 [1]. Os princípios da lâmpada de indução foram patenteados por PC Hewitt em 1907 [1]. A lâmpada fluorescente sem eletrodos (LFSE) é diferente das lâmpadas fluorescentes tradicionais (LF) principalmente pela ausência de eletrodos. A frequência de operação empregada nas LFSE varia desde centenas de kHz a dezenas de MHz [2]. Em consequência, estas lâmpadas devem ser alimentadas por um reator eletrônico de alta frequência. Existem diferentes formas de excitação da descarga nestas lâmpadas, dentre as quais sobressaem as excitações capacitiva e indutiva. Neste artigo, a LFSE modelada opera com descarga do tipo indutiva em regime permanente.

O fenômeno da transferência de energia, a partir de uma bobina ao plasma, tem sido objeto de estudo de muitas publicações [3]-[8]. Quando a corrente de alta frequência percorre as bobinas envoltas nos núcleos, um campo magnético é produzido, o que sustenta a descarga do plasma da lâmpada. O interior da LFSE contém certa quantidade de mercúrio, além de um gás inerte (argônio, criptônio ou neônio), ou, ainda, uma mistura de dois ou mais destes gases.

Uma das principais dificuldades para a modelagem da LFSE é a determinação dos parâmetros elétricos equivalentes que representam o comportamento de descarga da mesma, como resistência e reatância, já que os parâmetros elétricos do plasma não podem ser obtidos diretamente. Contribuições sobre este tema foram feitas em [9] e [10], porém estes representam a descarga puramente resistiva e desconsideram as perdas nos núcleos.

Neste artigo, consideram-se os parâmetros do plasma e as perdas nos núcleos, na determinação do modelo da lâmpada. Se a LFSE for simulada por uma impedância equivalente, o projeto do reator será mais conveniente e as características elétricas de todo o sistema podem ser determinadas.

A simulação antes da implementação prática, fornece informações úteis para a otimização e, conseqüentemente, redução de custos do projeto do reator eletrônico. O modelo foi desenvolvido utilizando dados experimentais e verificado através de simulações.

Existem diversos modelos dentre as LFSE disponíveis comercialmente, sendo que cada um possui suas próprias características geométricas e/ou de eficiência luminosa.

Algumas LFSEs apresentam a bobina externa (em torno de si), como mostrado na Figura 1.a, outras são esféricas com a bobina dentro da lâmpada, como mostrado na Figura 1.b.

A LFSE utilizada neste artigo é de modelo ICETRON/ENDURA 100 W produzida pela OSRAM SYLVANIA e possui uma frequência de funcionamento de 250 kHz, conforme Figura 1.a. Em cada uma das extremidades menores opostas da lâmpada há uma bobina. Estas bobinas agem como o primário de um transformador [10] sendo o plasma criado dentro da lâmpada, modelado como um enrolamento secundário equivalente, representando o princípio de transferência de energia das bobinas para a descarga elétrica na lâmpada.



Fig. 1. Modelos de LFSEs. (a) ICETRON/ENDURA, da OSRAM SYLVANIA, 250 kHz. (b) GENURA da GE 2,5 MHz.

As principais características das LFSEs são: boa eficiência luminosa (110 lm/W), elevado índice de reprodução de cores (90), possibilidade de operação em potências mais elevadas do que as LF e, principalmente, elevada vida útil. A ausência de eletrodos na LFSE torna possível trabalhar com maiores correntes e, por consequência, maiores potências. Valores comerciais indicam vida útil de até 100.000 horas [12], muito superior as LF. Observa-se, também, que nas LFSEs a taxa de decaimento de lumens, em função do tempo, é baixa [12]. Esta lâmpada pode ser utilizada na iluminação pública, em locais de difícil acesso, onde a substituição de lâmpadas constitui elevado custo de manutenção. A variação do fluxo luminoso das LFSEs também é possível e recomendada para diversas aplicações [13]-[14]. Dessa forma, pode-se economizar energia utilizando sistemas de iluminação com controle do fluxo luminoso, onde se reduz a energia consumida em eventos para os quais não há necessidade da potência nominal da lâmpada.

As LFSEs são alimentadas através de um reator para limitar a sua corrente devido a característica de impedância negativa. A Figura 2 apresenta a curva de tensão (V_1) versus corrente da lâmpada (I_1) em estudo, para potência nominal (100 W) e para uma menor potência (30 W).

Estudos mostram que o tempo de inércia da descarga da LFSE ENDURA é cerca de 400 μ s [15]. O modelo desenvolvido neste trabalho considera que o reator eletrônico deve operar com período suficientemente inferior a 400 μ s, dessa forma a LFSE pode ser considerada uma carga quase-linear (característica V-I da LFSE em regime permanente), tendo assim impedância constante ao longo do período [15]. Porém, quando é necessário realizar a variação do fluxo luminoso, necessita-se de um modelo que seja capaz de emular o comportamento da LFSE durante este processo, visto que a impedância desta varia com relação à potência da mesma. Quando a potência ativa (P) da LFSE é alta, a resistência da coluna de descarga da lâmpada é baixa, visto

que o gás está altamente ionizado. Quando a potência da LFSE é baixa, a resistência da coluna de descarga está elevada e, conseqüentemente, o gás está menos ionizado.

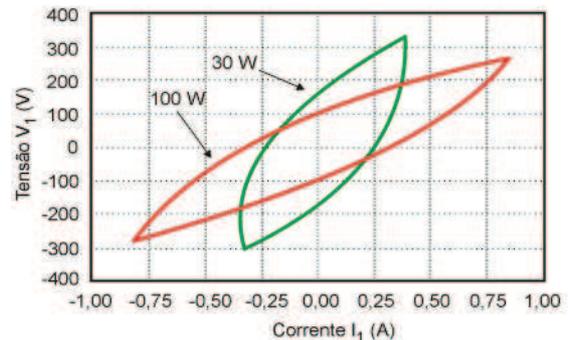


Fig. 2. Curva V-I de uma LFSE ENDURA/OSRAM - 100 W.

A LFSE quando em regime permanente (condição de equilíbrio térmico), tende a operar com tensão rms constante. A impedância característica da LFSE, em um dado momento, não depende apenas da corrente que flui através dela, mas, também, do estado de ionização do gás presente no interior da lâmpada. Alguns fatores influenciam especialmente a característica elétrica equivalente da LFSE, tais como: a condutividade do plasma, a resistência equivalente do núcleo, a indutância mútua, a temperatura da lâmpada e o coeficiente de acoplamento entre as bobinas e o plasma. Como os parâmetros da LFSE variam com a potência, é necessário que os parâmetros do modelo também sejam variáveis. A literatura apresenta modelos para LF que representam a variação de parâmetro em função da potência. Dentre estes, os que mais se destacam são: o modelo tangencial [16], o modelo Mader-Horn [17] e o modelo polinomial [18]. Porém, estes modelos representam apenas resistências variáveis, o que não é suficiente para a modelagem completa da LFSE. O modelo aqui apresentado utiliza resistência e também reatância variável do plasma. Este artigo utiliza regressões polinomiais para emular o comportamento dos parâmetros variáveis da lâmpada.

Foram avaliados três parâmetros no modelo apresentado; a resistência equivalente do núcleo, a reatância e a resistência do plasma. Todos foram aproximados por funções polinomiais, variando em função da potência ativa total da LFSE para cada ponto de operação.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção II os circuitos equivalentes da LFSE são apresentados; Seção III mostra o desenvolvimento do modelo elétrico da LFSE e a obtenção de dados experimentais; Na seção IV o circuito completo de simulação é apresentado; Seção V traz uma análise comparativa entre a simulação do modelo e os resultados experimentais; A seção VI descreve as conclusões.

II. CIRCUITO EQUIVALENTE DA LÂMPADA FLUORESCENTE SEM ELETRODOS DE INDUÇÃO

O modelo detalhado com os parâmetros elétricos da LFSE é apresentado na Figura 3. Para determinar o circuito equivalente da lâmpada com variação do fluxo luminoso, é necessário analisar o funcionamento da mesma. O conjunto lâmpada e bobinas externas podem ser analisados como um

transformador. O sistema eletrônico fornece potência ao primário do transformador, com (N) espiras, e o secundário do transformador é formado pelo plasma da lâmpada, portanto, pode ser representado por apenas uma espira [15].

Na Figura 3.a o plasma é representado por uma resistência (R_{lamp2}) e uma reatância em paralelo (X_{lamp2}). Na Figura 3.b os valores da impedância do plasma estão representados no primário, considerando-se um coeficiente de acoplamento unitário [19]. A Figura 3.c mostra a reatância do plasma representada com uma característica capacitiva, devido a este comportamento ter sido observado experimentalmente. Entretanto, a reatância da lâmpada como um todo, considerando também a indutância de magnetização do primário, apresenta característica indutiva (L_{cq}) como mostrado na Figura 3.d.

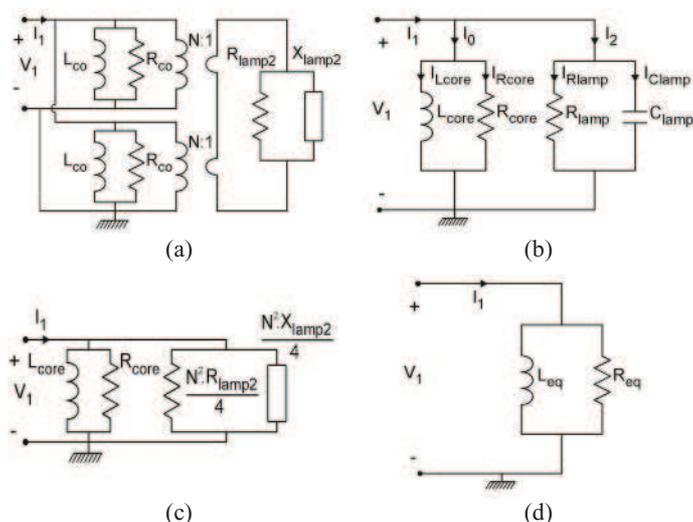


Fig. 3. (a) Modelo elétrico equivalente da LFSE. (b) Modelo com os parâmetros do plasma referidos ao primário. (c) Modelo simplificado da LFSE considerando o plasma e os parâmetros do núcleo. (d) Modelo simplificado da LFSE.

Na partida da LFSE há uma descarga capacitiva, cuja tensão necessária depende de aspectos construtivos da lâmpada [20]. A ignição ocorre quando o campo elétrico azimutal, induzido pela bobina no bulbo, é suficiente para manter a descarga indutiva. O estudo entre as transições de descarga dentro da LFSE não faz parte desse artigo, podendo ser analisada em [21] e [22].

Conforme resultados obtidos, observa-se um comportamento capacitivo do plasma. Comportamento semelhante também foi observado por [20] com uma LFSE sem núcleo de ferrite, projetada para 80 W, operando em frequência mais elevada. Em [15], onde uma LFSE semelhante é utilizada, o plasma também apresentou característica capacitiva na mesma faixa de potência. O efeito capacitivo é causado pela ressonância entre o plasma condutivo (pouco indutivo) e o efeito capacitivo criado entre o plasma e as paredes da LFSE [15], [22], [23] e [24].

Este artigo propõe a representação da LFSE considerando sua característica reativa e resistiva, referenciada ao primário de um transformador equivalente. Uma resistência variável (R_{lamp}) representa o consumo de potência ativa do plasma, outra resistência variável representa as perdas no ferro (R_{core}) e uma capacitância variável (C_{lamp}) representa a reatância do

plasma (X_{lamp}). A indutância de magnetização (L_{core}) é considerada constante. Durante o processo de ignição, a impedância do plasma é considerada inicialmente infinita e decai até atingir seu valor nominal [10]. A indutância de dispersão pode ser desprezada, visto que o coeficiente de acoplamento da LFSE utilizada é aproximadamente unitário [19]. As perdas ôhmicas dos enrolamentos também podem ser desprezadas em relação ao valor das perdas nos núcleos (P_{core}) [15]. A Figura 3.c representa o circuito equivalente da LFSE com todos os parâmetros referidos ao primário. Observa-se que, devido ao coeficiente de acoplamento unitário, a tensão do secundário referida ao primário é igual à tensão do primário.

A Figura 4 apresenta o diagrama fasorial da tensão e das correntes sobre a LFSE referenciadas ao primário. Onde I_0 representa a corrente magnetizante, I_{Lcore} a corrente indutiva magnetizante, I_{Rcore} a corrente ativa magnetizante, I_2 a corrente do plasma, I_{Clamp} a corrente capacitiva do plasma, I_{Rlamp} a corrente ativa do plasma. O ângulo ϕ_1 representa a defasagem entre a tensão e a corrente da lâmpada e bobinas.

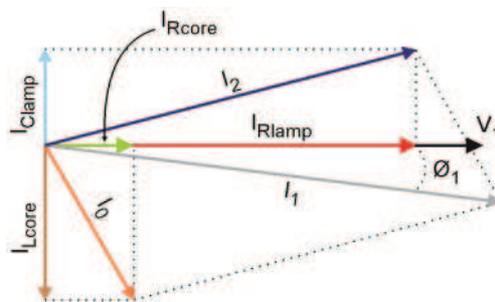


Fig. 4. Diagrama fasorial da LFSE. (Sem escala).

III. MODELO ELÉTRICO DA LFSE

A. Medições e Equacionamento do Modelo

A idéia principal deste modelo é considerar o circuito equivalente elétrico da LFSE e calcular os valores do plasma baseados nos parâmetros de medições elétricas possíveis. Dessa forma, torna-se necessário, para o desenvolvimento do modelo, a obtenção de dados experimentais.

Os dados experimentais para a modelagem da LFSE foram obtidos através do uso de um inversor meia ponte assimétrico, juntamente com um filtro ressonante série paralelo (LCC), alimentados por uma fonte de tensão contínua (V_{BUS}). Os componentes do filtro LCC foram calculados com base em [25].

O modelo proposto é baseado em um conjunto de dados experimentais obtidos para diferentes potências ativas na lâmpada. Antes da obtenção dos dados experimentais do modelo é importante manter a lâmpada em operação por um período, até que a descarga da mesma atinja o equilíbrio térmico, visto que as características do plasma são fortemente dependentes da temperatura do amálgama de mercúrio [15]. Entretanto, a temperatura ambiente pouco influencia no comportamento da LFSE em regime [20]. A LFSE foi mantida na potência nominal até que houvesse equilíbrio da descarga. Com isso, a tensão contínua aplicada ao inversor meia ponte foi reduzida em passos de 10 V. Um

intervalo de 15 minutos foi respeitado entre cada aquisição de dados, permitindo que a descarga estabelecesse o seu equilíbrio. Este procedimento foi repetido até a LFSE não manter sua descarga e desligar.

A Figura 5 apresenta o esquemático do protótipo com o qual os dados experimentais foram adquiridos. A frequência de operação (f) foi mantida na nominal da LFSE em 250 kHz. A tensão aplicada à lâmpada (V_1) foi adquirida utilizando uma ponteira diferencial de tensão da TEKTRONIX modelo P5200. A corrente da LFSE (I_1) foi medida utilizando-se uma ponteira de corrente da TEKTRONIX modelo TPCA300. O osciloscópio utilizado foi da TEKTRONIX modelo DPO2014. A tensão V_{BUS} foi fornecida por uma fonte de tensão DC da SUPPLIER modelo FCC 400-50i. Através desse experimento, foram obtidos: tensão (V_1) e corrente (I_1) na LFSE; potência ativa (P); potência aparente (S); potência reativa (Q) e defasagem (θ_1).

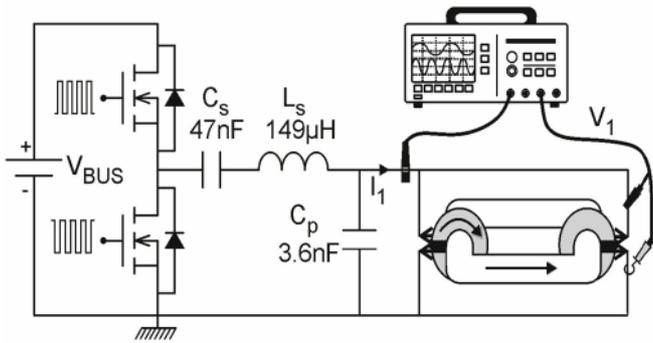


Fig. 5. Protótipo para a obtenção dos dados experimentais.

1) *Equacionamento da Impedância Equivalente Total da LFSE*: Com os dados obtidos é possível calcular os valores da impedância total da LFSE. A resistência equivalente da lâmpada referida ao primário (R_{eq}) é calculada por (1). A reatância equivalente da LFSE (X_{Leq}) é dado por (2).

$$R_{eq} = \frac{V_1^2}{P} \quad (1)$$

$$X_{Leq} = \frac{V_1^2}{Q} \quad (2)$$

A indutância equivalente da lâmpada é calculada por (3).

$$L_{eq} = \frac{X_{Leq}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (3)$$

2) *Equacionamento dos Parâmetros dos Núcleos da LFSE*: Os valores de potência ativa consumida pelos núcleos (P_{core}), também foram obtidos experimentalmente. Para a obtenção de R_{core} , foi efetuado um experimento adicional, onde foram obtidas as perdas ôhmicas em apenas um núcleo em função da tensão rms aplicada a este. O experimento consiste na montagem de um inversor meia ponte com filtro LCC, conforme apresentado na Figura 5, porém através do ensaio da bobina L_{co} , em paralelo com uma resistência equivalente externa como carga. A resistência externa apresenta o mesmo valor que a resistência da LFSE no ponto nominal de operação, isto é, aproximadamente 410 Ω .

Através da variação da tensão contínua V_{BUS} aplicada ao inversor, varia-se a tensão rms sobre a bobina, medindo-se a corrente e a tensão sobre a mesma para calcular a potência ativa consumida. Atribuiu-se esse consumo as perdas no ferro, visto que a resistência do fio pode ser desprezada. Com isto, pode-se determinar a resistência de ambos os núcleos para cada ponto através de (4).

$$R_{core} = \frac{V_1^2}{2 \cdot P_{core}} \quad (4)$$

A determinação da equivalência paralela das indutâncias magnetizantes (L_{core}) é realizada por medição, sendo a indutância medida para cada núcleo de 1.000 μH . O aparelho utilizado para a medição desta indutância foi um LCR Meter modelo MXB-821 da MINIPA.

3) *Equacionamento dos Parâmetros do Plasma Referidos ao Primário da LFSE*: Com os valores obtidos em (1) e (4) se obtém a resistência do plasma (R_{lamp}) através de (5).

$$R_{lamp} = \frac{R_{core} \cdot R_{eq}}{R_{core} - R_{eq}} \quad (5)$$

Com o valor medido de L_{core} e da reatância equivalente da LFSE se obtém a reatância do plasma através de (6).

$$X_{Clamp} = \frac{X_{Lcore} \cdot X_{Leq}}{X_{Lcore} - X_{Leq}} \quad (6)$$

Os resultados experimentais mostraram a característica capacitiva do plasma, sendo que a mesma, referenciada ao primário, pode ser calculada por (7).

$$C_{lamp} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{Clamp}} \quad (7)$$

B. Dados Experimentais

Os resultados experimentais obtidos são apresentados na Tabela I. A Figura 6 representa os valores experimentais de potência ativa e reativa obtidos em função da variação da tensão de barramento.

TABELA I
Dados experimentais

V_{BUS}	V_{1rms}	I_{1rms}	P	S	Q	$\theta_1(^{\circ})$	P_{core}
300	187,220	0,596	104,912	111,531	37,852	19,839	2,611
290	190,312	0,587	103,318	109,000	34,733	18,581	2,723
280	198,677	0,544	101,907	108,039	35,879	19,396	3,039
270	202,288	0,523	99,685	105,855	35,613	19,659	3,182
260	206,408	0,498	96,596	102,780	35,113	19,976	3,349
250	210,205	0,480	94,351	100,826	35,549	20,645	3,508
240	213,093	0,461	91,717	98,338	35,474	21,145	3,632
230	215,160	0,434	86,768	93,457	34,722	21,810	3,722
220	217,865	0,418	84,185	91,154	34,954	22,548	3,841
210	217,456	0,394	78,663	85,679	33,956	23,348	3,823
200	216,460	0,373	73,627	80,731	33,114	24,216	3,779
190	218,275	0,354	69,717	77,194	33,144	25,427	3,860
180	216,203	0,334	64,629	72,243	32,283	26,542	3,768
170	216,612	0,315	60,336	68,269	31,940	27,895	3,786
160	222,363	0,295	56,655	65,583	33,035	30,246	4,044
150	219,645	0,275	51,446	60,454	31,749	31,680	3,921

A Figura 7 representa a tensão e corrente rms na LFSE em relação à variação da tensão de barramento. A Figura 8 apresenta a impedância e a defasagem total (θ_1) da LFSE como função da variação da tensão de barramento. A Figura 9 apresenta a resistência e a capacitância do plasma referido ao primário da lâmpada em função da variação de V_{BUS} .

A Figura 10 apresenta a potência ativa dos núcleos em função da tensão sobre os mesmos. Os valores de resistência do núcleo foram calculados por (4), os de resistência do plasma por (5) e os da capacitância do plasma por (7). Com os dados experimentais obtidos e os valores calculados, utilizou-se uma ferramenta estatística de regressão polinomial para determinar as equações que representam os parâmetros variáveis da LFSE em função da potência ativa da mesma, considerando-se a bobina como parte integrante da LFSE. A equação (8) expressa $R_{lamp}(P)$, sendo os valores de seus coeficientes apresentados na Tabela II.

$$R_{lamp}(P) = A_4 \cdot P^4 + A_3 \cdot P^3 + A_2 \cdot P^2 + A_1 \cdot P + A_0 \quad (8)$$

A Figura 11 apresenta a variação da resistência do plasma referenciada ao primário em função da potência ativa. Observa-se na Figura 11, que ao diminuir a potência ativa na LFSE, ocorre um aumento não linear de $R_{lamp}(P)$. Neste caso, o comportamento de $R_{lamp}(P)$ pode ser aproximado por um polinômio de quarta ordem. A equação (9) expressa $R_{core}(P)$, com os coeficientes apresentados na Tabela II.

$$R_{core}(P) = B_4 \cdot P^4 + B_3 \cdot P^3 + B_2 \cdot P^2 + B_1 \cdot P + B_0 \quad (9)$$

A Figura 12 apresenta a variação da resistência equivalente do núcleo em função da potência ativa.

Com a diminuição da potência da LFSE há um aumento da tensão rms sobre a mesma. Desta forma, as perdas das bobinas também aumentam o que é representado por uma diminuição de R_{core} , conforme mostrado na Figura 12. A equação (10) expressa $C_{lamp}(P)$ tendo os valores de seus parâmetros apresentados na Tabela III.

$$C_{lamp}(P) = C_4 \cdot P^4 + C_3 \cdot P^3 + C_2 \cdot P^2 + C_1 \cdot P + C_0 \quad (10)$$

A Figura 13 apresenta a variação da capacitância da lâmpada referida ao primário em função da potência ativa total. Nesta figura, observa-se um aumento de C_{lamp} com a diminuição da potência da LFSE. Este resultado era esperado, pois com a diminuição da potência na LFSE o plasma torna-se menos denso de forma a diminuir a distância entre o plasma e as paredes da lâmpada, dessa forma aumentando a capacitância [24].

A variação dos parâmetros equivalentes da lâmpada em função da frequência também foi analisada através de ensaios nas frequências de 200 kHz e 300 kHz. Portanto, 50 kHz acima e abaixo da frequência nominal da LFSE. A variação da resistência equivalente da LFSE, em função da potência ativa, é mostrada na Figura 14, para diferentes frequências. Observa-se que seu valor permanece praticamente constante.

A variação da capacitância equivalente do plasma, referida ao primário, é apresentada na Figura 15, podendo-se concluir que o efeito capacitivo do plasma aumenta com o aumento da frequência. A variação da indutância equivalente da LFSE é mostrada na Figura 16.

TABELA II
Dados calculados para $R_{lamp}(P)$ e $R_{core}(P)$

Coefficiente	Valor	Coefficiente	Valor
A_0	9009,94405148 Ω	B_0	12478,78870000 Ω
A_1	-381,45511250 Ω/W^1	B_1	-140,62827000 Ω/W^1
A_2	6,66953900 Ω/W^2	B_2	5,74590450 Ω/W^2
A_3	-0,05219411 Ω/W^3	B_3	-0,07860825 Ω/W^3
A_4	0,00015038 Ω/W^4	B_4	0,00000356 Ω/W^4

TABELA III
Dados calculados para $C_{lamp}(P)$

Coefficiente	Valor
C_0	534,35682982 pF
C_1	-68,08699700 pF/W ¹
C_2	1,76582300 pF/W ²
C_3	-0,01936910 pF/W ³
C_4	0,00007745 pF/W ⁴

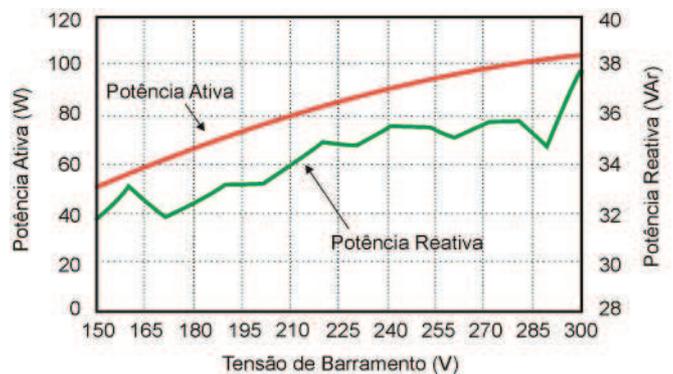


Fig. 6. Potência ativa e reativa da LFSE em função de V_{BUS} .

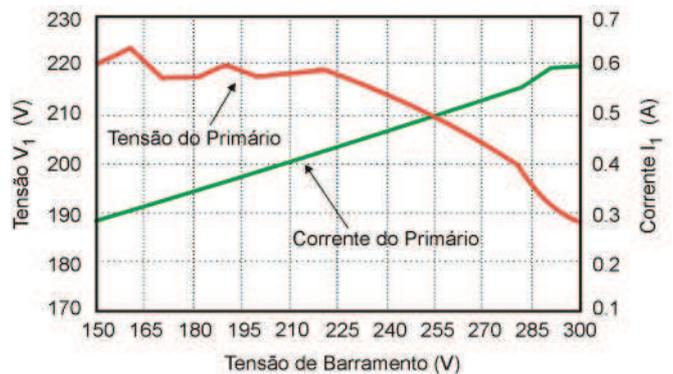


Fig. 7. Tensão e corrente rms da LFSE em função de V_{BUS} .

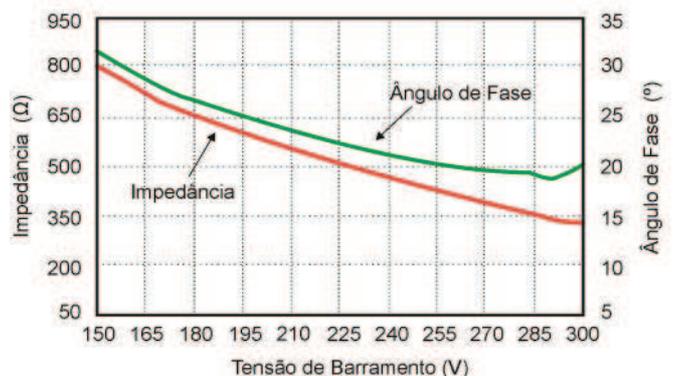


Fig. 8. Impedância da LFSE e θ_1 em função de V_{BUS} .

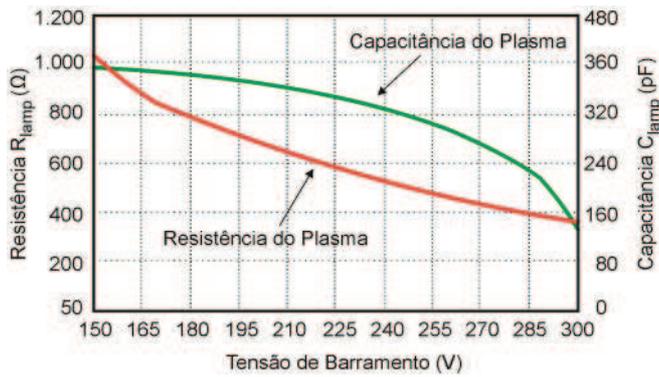


Fig. 9. R_{lamp} e C_{lamp} em função de V_{BUS} .

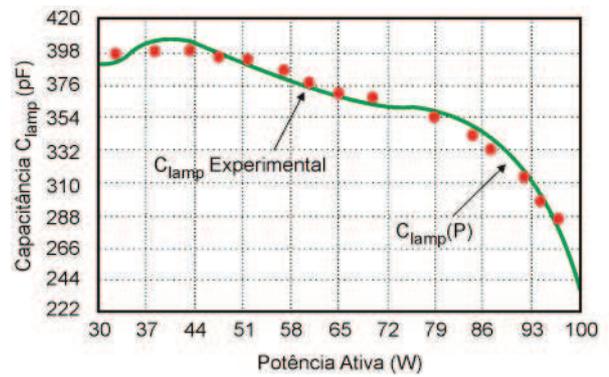


Fig. 13. C_{lamp} em função da potência ativa da lâmpada.

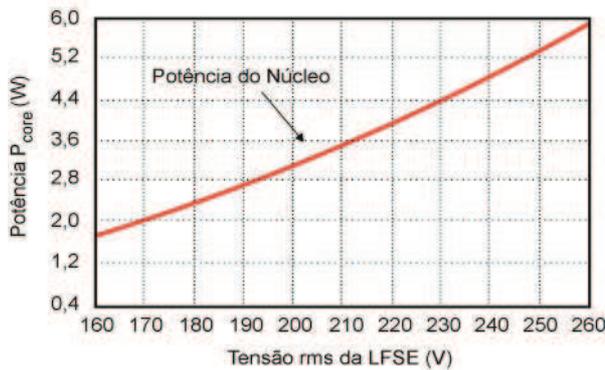


Fig. 10. P_{core} em função da tensão rms da LFSE.

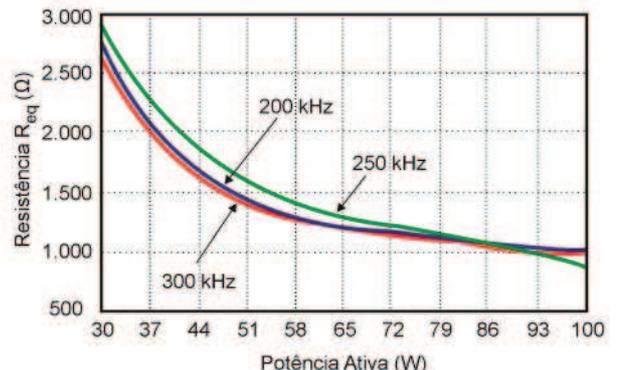


Fig. 14. R_{eq} da LFSE para diferentes frequências.

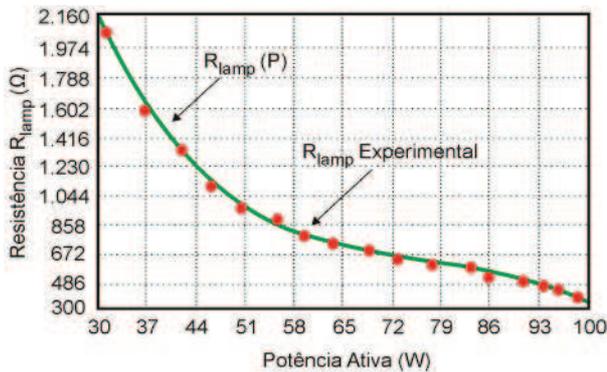


Fig. 11. R_{lamp} em função da potência ativa da LFSE.

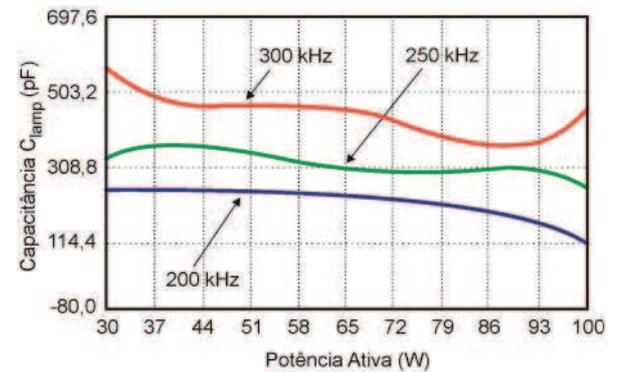


Fig. 15. C_{lamp} da LFSE para diferentes frequências.

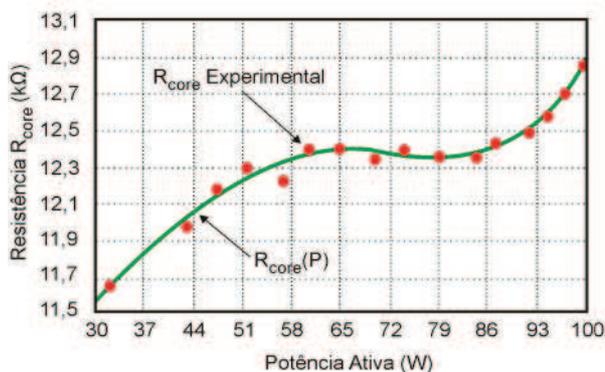


Fig. 12. R_{core} de acordo com a potência ativa da lâmpada.

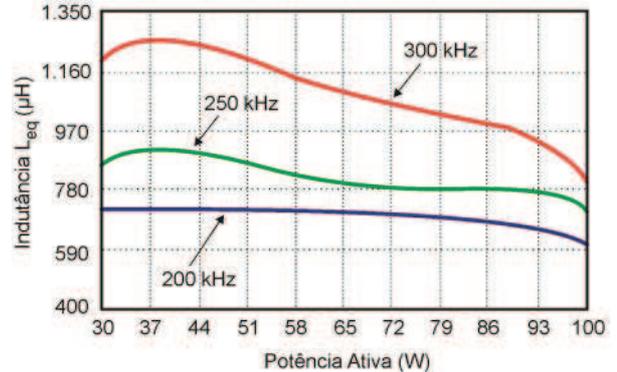


Fig. 16. L_{eq} da LFSE para diferentes frequências.

Com base no comportamento apresentado da capacitância do plasma em relação à frequência, confirmou-se a tendência esperada em relação à indutância equivalente, visto que estas estão em paralelo.

A comparação entre o modelo e os resultados experimentais, será realizada em 250 kHz, frequência nominal da LFSE utilizada.

IV. MODELO IMPLEMENTADO NO OrCAD/PSpice

Esta seção apresenta a implementação de um modelo genérico de regime permanente no programa de simulação OrCAD/PSpice, usando as equações de $R_{lamp}(P)$ (8), $R_{core}(P)$ (9) e $C_{lamp}(P)$ (10). O modelo proposto pode ser empregado em outros programas de simulação. O circuito utilizado para a simulação do modelo e os blocos de simulação, que representam cada grandeza, é apresentado na Figura 17.

Para obtenção dos modelos utilizados no software de simulação, a resistência e a capacitância do plasma referida ao primário, apresentados na Figura 17.b, 17.c e 17.d, foram obtidas através do procedimento de cálculo, apresentado abaixo. A representação do modelo, através da Figura 17, não é única, podendo o mesmo ser obtido através de blocos de simulação utilizando circuitos duais equivalentes.

A. Cálculo da Potência Ativa (P) Entregue à Lâmpada

O circuito utilizado para a simulação da potência ativa entregue a LFSE é apresentado na Figura 17.a, onde: $V(1)$ – Equivale a tensão aplicada a LFSE; $V(1,2)$ – Representa a parte real da corrente do plasma, referida ao primário; $I(V)$ – Representa o sensor de corrente na LFSE.

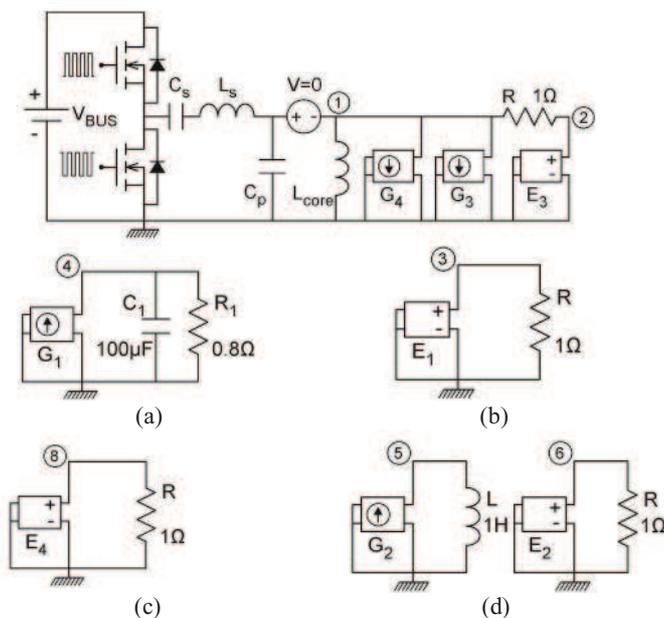


Fig. 17. Modelo de simulação. (a) Potência ativa. (b) Resistência do plasma. (c) Resistência do núcleo. (d) Capacitância do plasma.

Como as grandezas representadas são modeladas em função da potência ativa consumida pela LFSE, encontra-se essa potência com base no valor médio da potência instantânea, através da análise do circuito da Figura 17.a.

Para tanto, utiliza-se a fonte de corrente (G_1), responsável por emular uma corrente igual a magnitude da potência instantânea da lâmpada, conforme (11). A corrente (G_1) é então aplicada a um circuito RC (R_1 - C_1) que representa um filtro passa-baixa, com constante de tempo dada por $R_1 \cdot C_1$. Logo, a tensão $V(4)$ representa a potência média da LFSE.

$$G_1 = V(1) \cdot I(V) \quad (11)$$

Os valores do capacitor C_1 e do resistor R_1 são definidos

de tal forma que a frequência de corte do filtro RC esteja localizada substancialmente abaixo da frequência de operação da LFSE. A frequência de corte adotada é 2 kHz.

B. Modelo da Resistência do Plasma Referida ao Primário

O modelo da resistência do plasma referida ao primário, implementado como mostrado na Figura 17.b, é atribuído em função da potência ativa consumida pela LFSE. A tensão no ponto 3 representa R_{lamp} . Considera-se a fonte de tensão E_1 igual ao modelo da resistência do plasma, referida ao primário, que é matematicamente calculado através de (8). A fonte E_1 é responsável por emular o valor da resistência para a potência representada pela tensão no ponto 4.

A tensão emulada pela fonte de tensão E_3 representa a resistência da lâmpada multiplicada pela corrente que circula por ela, conforme (12). A queda sobre o resistor R deve ser diminuída da magnitude da tensão emulada por E_3 .

$$E_3 = V(3) \cdot V(1,2) - V(1,2) \quad (12)$$

C. Modelo da Resistência Equivalente do Núcleo

O modelo da resistência do núcleo, implementado como mostrado na Figura 17.c, é atribuído em função da potência ativa consumida pela LFSE. A tensão no ponto 8 ($V(8)$) representa R_{core} que é determinada através de uma fonte E_4 , a qual representa o modelo da resistência dos núcleos, matematicamente calculado através de (9), sendo responsável por emular o valor da resistência dos núcleos para a potência representada pela tensão no ponto 4. Portanto, a tensão no ponto 8 apresenta uma magnitude igual a resistência dos núcleos. A fonte de corrente G_4 é responsável por emular a corrente drenada por R_{core} , conforme (13).

$$G_4 = \frac{V(1)}{V(8)} \quad (13)$$

D. Modelo da Capacitância do Plasma Referida ao Primário

O modelo da capacitância do plasma referida ao primário (C_{lamp}), implementado como mostrado na Figura 17.d, é dado em função da potência ativa consumida pela lâmpada.

A tensão no ponto 6 ($V(6)$) representa C_{lamp} , e a fonte de tensão E_2 é igual ao modelo da capacitância do plasma, matematicamente calculado através de (10). Esta fonte de tensão é responsável por emular o valor da capacitância para cada potência ativa. Portanto, a tensão em 6 apresenta uma magnitude igual a capacitância do plasma.

A fonte de corrente G_2 é responsável por emular uma corrente de amplitude igual a tensão sobre a lâmpada, conforme (14). Se a corrente da fonte G_2 circular pela indutância L a tensão sobre essa indutância será correspondente a derivada da tensão em C_{lamp} . Desta forma, a tensão $V(5)$ representará a derivada da tensão sobre a LFSE. A fonte de corrente G_3 é responsável por emular a corrente reativa do plasma, conforme (15).

$$G_2 = V(1) \quad (14)$$

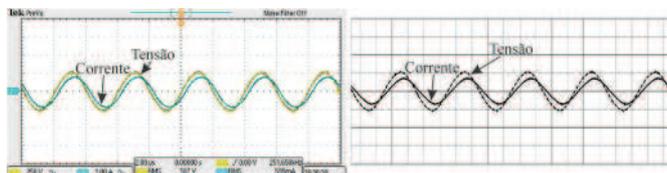
$$G_3 = V(5) \cdot V(6) \quad (15)$$

Os valores da resistência R utilizados para os circuitos auxiliares, com fontes de tensão dependentes, não influenciam no resultado do modelo.

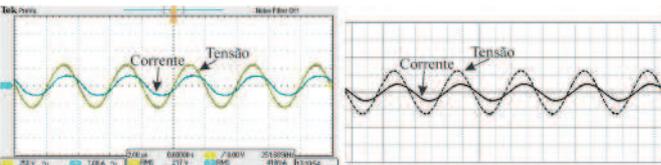
V. ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE SIMULAÇÃO E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para validar a precisão do modelo apresentado, foram efetuadas simulações para cada tensão de barramento utilizada na obtenção dos dados experimentais. Nas simulações foram adquiridos os seguintes valores: potência ativa e aparente, tensão e corrente no primário, potência ativa no plasma e no núcleo da lâmpada. A Tabela V apresenta os valores experimentais e simulados da potência ativa, aparente, tensão e corrente rms na LFSE. A Tabela VI apresenta os valores experimentais e simulados das potências ativas do plasma (P_{plasma}), do núcleo (P_{core}) e o ângulo da impedância total da lâmpada (ϕ_1).

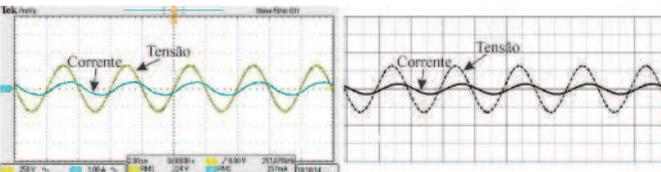
A Figura 18 apresenta os resultados experimentais e de simulações para diferentes tensões de barramento, 300 V, 220 V e 140 V. Os resultados das simulações demonstram concordância com a operação da lâmpada em regime permanente, com resultados próximos aos experimentais.



(a) 300 V - Experimental. (b) 300 V - Simulado.



(c) 220 V - Experimental. (d) 220 V - Simulado.



(e) 140 V - Experimental. (f) 140 V - Simulado.

Fig. 18. Resultados experimentais e simulados. Tensão: Vertical: 250 V/div. Corrente: Vertical: 1 A/div. Horizontal: 2 us/div.

As magnitudes dos erros de potência são apresentadas na Figura 19 e de tensão e corrente rms aplicadas a LFSE na Figura 20. As magnitudes dos erros de P_{plasma} e P_{core} são apresentadas na Figura 21 e os erros de ϕ_1 na Figura 22. Observa-se uma tendência dos erros serem maiores para menores valores de V_{BUS} , pois a LFSE está próxima de seu ponto de instabilidade de manutenção da descarga do plasma.

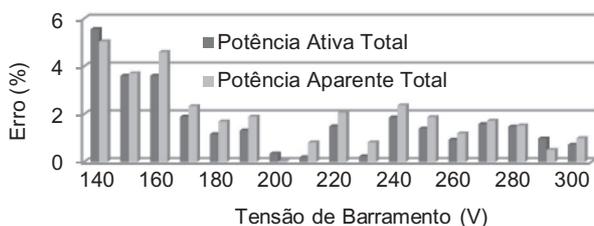


Fig. 19. Erros de potência ativa e aparente.

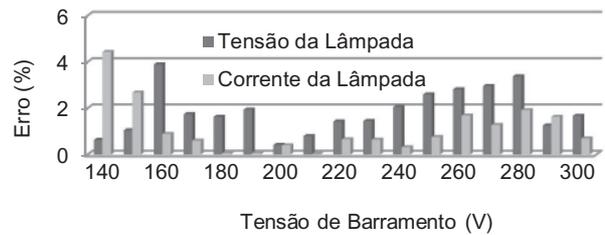


Fig. 20. Erros de tensão (V_1) e corrente (I_1) na LFSE.

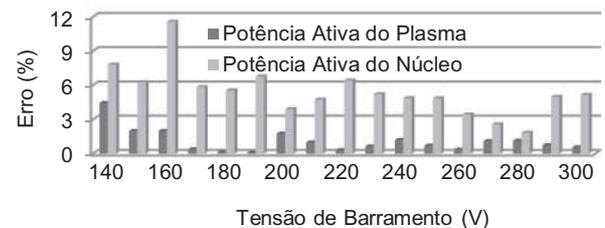


Fig. 21. Erros de potência ativa no núcleo e no plasma.

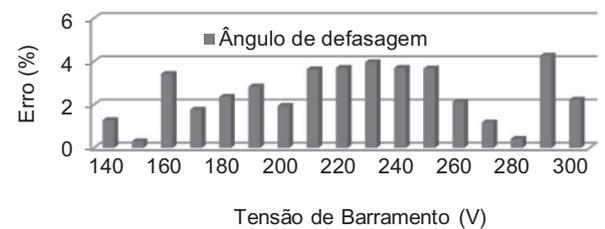


Fig. 22. Erros de ângulos de fase ϕ_1 .

VI. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta uma metodologia para o desenvolvimento de um modelo elétrico equivalente para a LFSE. Inicialmente importantes características sobre as LFSE são apresentadas, juntamente com as diferenciações do modelo apresentado, aqui, em relação aos já propostos na literatura. O modelo leva em consideração, não apenas a variação da resistência do plasma, mas também a variação da reatância do mesmo, bem como as perdas relacionadas aos núcleos. Dessa forma, obtêm-se informações mais detalhadas em relação aos parâmetros da lâmpada. Os resultados obtidos são de extrema valia para a predição do comportamento em regime permanente da LFSE.

As formas de ondas de tensão, corrente e ângulo de fase apresentaram características semelhantes em simulação e experimentalmente. É importante salientar que esta metodologia de modelo é aplicável para a LFSE com coeficiente de acoplamento próximo ao unitário, sendo também aplicado para diferentes frequências impostas a LFSE, levando-se em consideração os diferentes valores de impedância do plasma. Apesar da implementação do modelo ser no programa de simulação OrCAD/PSpice, o mesmo pode ser estendido a outros programas de simulação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a FAPERGS Proc. 101664-3, CAPES/DGU n°249/11 e ao Governo Espanhol DGPU PHB2010-0145-PC pelo suporte financeiro a este trabalho.

TABELA IV

Comparação entre dados simulados e experimentais

V _{bus}	EXPERIMENTAL				SIMULADO			
	P(W)	S(VA)	V _{rms}	I _{rms}	P(W)	S(VA)	V _{rms}	I _{rms}
300	104,91	111,53	187,22	0,596	104,16	110,43	184,09	0,600
290	103,31	109,00	190,31	0,587	102,31	108,45	187,93	0,577
280	101,90	108,04	198,68	0,544	100,41	106,39	191,97	0,554
270	99,685	105,86	202,29	0,523	98,111	104,03	196,31	0,530
260	96,596	102,78	206,41	0,498	95,704	101,56	200,60	0,506
250	94,351	100,83	210,21	0,480	93,041	98,941	204,78	0,483
240	91,717	98,338	213,09	0,461	90,014	96,013	208,72	0,460
230	86,768	93,457	215,16	0,434	86,572	92,697	212,05	0,437
220	84,185	91,154	217,86	0,418	82,939	89,273	214,75	0,416
210	78,663	85,679	217,46	0,394	78,515	84,983	215,73	0,394
200	73,627	80,731	216,46	0,373	73,881	80,714	215,56	0,374
190	69,717	77,194	218,28	0,354	68,803	75,735	214,04	0,354
180	64,629	72,243	216,20	0,334	63,882	71,024	212,68	0,334
170	60,336	68,269	216,61	0,315	59,197	66,678	212,83	0,313
160	56,655	65,583	222,36	0,295	54,613	62,570	213,71	0,292
150	51,446	60,454	219,64	0,275	49,594	58,217	217,35	0,268

REFERÊNCIAS

- [1] D Wharmby, D.O.; "Electrodeless lamps for lighting: a review" *Science, Measurement and Technology, IEE Proceedings A*, vol. 140, no. 6, pp. 465-473, Nov. 1993.
- [2] Shaffer, J.W.; "The Development of Low Frequency, High Output Electrodeless Fluorescent Lamps," *Journal of the Illuminating Engineering*, vol. 28, 1999.
- [3] Piejak, R.B.; Godyak, V. A.; and Alexandrovich, B. M.; "A simple analysis of an inductive RF discharge," *Plasma Sources Sci. Technol.* vol. 1, no. 3 pp. 179-186, Jul. 1992.
- [4] Nerone, L.R.; Qureshi, A.H.; "Mathematical modeling and optimization of the electrodeless, low-pressure, discharge system," *Power Electronics Specialists Conference, 1993. PESC '93 Record., 24th Annual IEEE*, pp. 509-514, Jun 1993.
- [5] Nerone, L.R.; "A novel ballast for electrodeless fluorescent lamps," *Industry Applications Conference, 2000. Conference Record of the 2000 IEEE*, vol. 5, pp. 3330-3337, 2000.
- [6] Shinomya, M.; "The matching network of the inductively coupled discharge lamps", *Journal of Light & Visual Environment*, vol. 19, pp. 33-39, 1995.
- [7] Shaffer, J. W.; and Godyak, V. A.; "The development of low frequency high output electrodeless fluorescent lamps", *Journal of the IES*, vol. 28, no. 1, p. 142, 1999.
- [8] Godyak, V.A.; "Bright idea, radio-frequency light sources", *Industry Applications Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 3, pp. 42-49, Mai/Jun 2002.
- [9] Yuming Chen; Dahua Chen; "Simulation the Impedance of Electrodeless Fluorescent Lamp", *Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE*, vol. 1, pp. 242-245, 8-12 Outub. 2006.
- [10] Ben-Yaakov, S.; Shvartsas, M.; Lester, J.; "A behavioral SPICE compatible model of an electrodeless fluorescent lamp", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE*, vol. 2, pp. 948-954, 2002.
- [11] Lester, J. N.; Alexandrovich, B. M.; "Ballasting electrodeless fluorescent lamps," *Journal of the*

TABELA V

Comparação entre potência do núcleo e plasma

V _{bus}	EXPERIMENTAL			SIMULADO		
	P _{core}	P _{plasma}	Ø ₁ (°)	P _{core}	P _{plasma}	Ø ₁ (°)
300	2,611	102,300	19,830	2,745	101,700	19,390
290	2,723	100,500	18,580	2,859	99,840	19,370
280	3,039	98,860	19,390	2,984	97,750	19,310
270	3,182	96,500	19,650	3,100	95,440	19,420
260	3,349	93,240	19,970	3,234	92,910	19,550
250	3,508	90,840	20,640	3,338	90,200	19,880
240	3,632	88,080	21,140	3,455	87,030	20,360
230	3,722	83,040	21,810	3,528	83,570	20,940
220	3,841	80,340	22,540	3,595	80,080	21,710
210	3,823	74,840	23,340	3,642	75,570	22,490
200	3,779	69,840	24,210	3,632	71,070	23,740
190	3,860	65,850	25,420	3,599	65,800	24,700
180	3,768	60,860	26,540	3,559	60,750	25,910
170	3,786	56,550	27,890	3,565	56,330	27,400
160	4,044	52,610	30,240	3,577	51,560	29,210
150	3,921	47,520	31,680	3,676	46,570	31,580

Illuminating Engineering Society, Beverly, Massachusetts. 06 Jan. 1999.

- [12] da Silva, M.F.; de P Lopes, J.; Chagas, N.B.; Seidel, A.R.; Costa, M.A.D.; do Prado, R.N.; "High power factor dimmable lighting system for electrodeless fluorescent lamp," *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion, 2010 International Symposium on*, pp. 379-384, 14-16 Jun. 2010.
- [13] Seidel, A.R.; Bisogno, F.E.; Pappis, D.; do Prado, R.N.; "Automatic luminous control for self-oscillating electronic ballast," *Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the*, pp. 773-778 vol.2, 12-16 Out. 2003.
- [14] de P. Lopes, J.; da Silva, M.F.; Menke, M.F.; Luz, P.C.; Borin, V.; Bisogno, F.E.; Seidel, A.R.; "Self-Oscillating electronic ballast with lighting intensity regulation", *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium*, pp.374-378, 14-16 Jun. 2010.
- [15] Stanic, E.; Tanach, V. "A new approach to the evaluation of the discharge parameters of the electrodeless fluorescent lamps," *Plasma Sources Science Technology*, vol. 13, pp. 515-521, Jul. 2004.
- [16] Cervi, M.; Seidel, A.R.; Bisogno, F.E.; do Prado, R.N.; "Fluorescent lamp model employing tangent approximation," *Power Electronics Specialists Conference, 2002. pesc 02. 2002 IEEE 33rd Annual*, vol.1, pp. 187-191, 2002.
- [17] Mader, U.; Horn, P.; "A dynamic model for the electrical characteristics of fluorescent lamps", *Industry Applications Society Annual Meeting, 1992., Conference Record of the 1992 IEEE*, vol. 2, pp.1928-1934, Oct 1992.
- [18] Onishi, N.; Shiomi, T.; Okude, A.; Yamauchi, T.; "A fluorescent lamp model for high frequency wide range dimming electronic ballast simulation", *Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC. Fourteenth Annual*, vol.2, pp. 1001-1005, Mar. 1999.
- [19] Stanic, E.; Tanach, V.; "Investigation of the electrical discharge parameters in electrodeless inductive lamps with a re-entrant coupler and magnetic core," *Plasma Sources Science Tech.*, vol. 15, pp. 465-473, 2006.

- [20] Popov, O.; Maya, J.; "Characteristics of electrodeless ferrite-free fluorescent lamp operated at frequencies of 1-15 MHz", *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 9, no. 2, pp. 227-237, 2000.
- [21] Razzak, M. Abdur; Kondo, Kenji; Uesugi, Yoshihiko; Ohno, Noriyasu; Takamura, Shuichi; "Transition from electrostatic-to-electromagnetic mode in a radio-frequency Ar inductively coupled plasma in atmospheric pressure", *Journal of Applied Physics*, vol.95, no.2, pp.427-433, Jan. 2004.
- [22] Yoon, N.S.; Kim, B.C.; Yang, J.G.; Hwang, S.M.; "A theoretical formula of E-H discharge transition power in a transformer-coupled discharge", *Plasma Science, IEEE Transactions*, vol.26, pp.190-197, Abr. 1998.
- [23] Bowers, K.J.; Qiu, D.W.; Birdsall, C.K.; "Resonant discharges: initiation and steady state; comparisons with theory, simulation and experiment," *Plasma Science, 1999. ICOPS '99. IEEE Conference Record - Abstracts. 1999 IEEE International Conference*, pp.138, 1999.
- [24] Gonzalez, J.J.; Shabalin, A.; "Electrical characteristics of plasma sheaths in transformer-coupled toroidal discharges," *Plasma Sources Science and Technology*, vol. 12, no. 3, pp. 317-323.
- [25] do Prado, R.N.; Seidel, A.R.; Bisogno, F.E.; Costa, M.A.D.; "A design method for electronic ballast for fluorescent lamps," *Industrial Electronics Society, 2000. IECON 2000. 26th Annual Conference of the IEEE*, vol.4, pp.2279-2284, 2000.

DADOS BIOGRÁFICOS

Marcelo Freitas da Silva, nascido em 23/07/1970 em São Paulo-SP é engenheiro eletricitista (1995), mestre (1999), doutorando e professor na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM). Realizou seu estágio doutoral na Universidad de Oviedo, Espanha. Suas áreas de interesse são: conversores de potência, modelamento e controle de sistemas de iluminação, e novas topologias de conversores.

Natalia Braun Chagas, nascida em 18/07/1990 em Chapecó-SC, graduanda em engenharia elétrica pela UFSM. Trabalha como bolsista pesquisadora junto ao grupo GEDRE. Suas áreas de interesse são: conversores de potência, modelagem e sistemas de iluminação.

Marson Eduardo Schlittler, nascido em 08/06/1990 em Santa Cruz do Sul-RS, graduando em engenharia elétrica pela UFSM. Trabalha como bolsista pesquisador junto ao grupo GEDRE. Suas áreas de interesse são: conversores de alta frequência e sistemas para o acionamento de lâmpadas.

Jeferson Fraytag, nascido em 02/04/1990 em Coronel Bicaco-RS, graduando em engenharia elétrica pela UFSM. Trabalha como bolsista pesquisador junto ao grupo GEDRE. Suas áreas de interesse são: integração e controle de conversores e sistemas de acionamento de lâmpadas.

Tiago Bandeira Marchesan, graduação em Engenharia Elétrica pela UFSM (2003) e doutorado em Engenharia Elétrica (2007) na área de Processamento de Energia pela

mesma Universidade. Realizou seu doutorado com estágio na Universidad de Oviedo, Espanha. Atualmente, é Professor Adjunto do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria no Rio Grande do Sul. Já atuou como pesquisador da WEG T&D (Weg Transformadores), professor do curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS) e da Universidade do Noroeste do Estado do RS (UNIJUI). Atua, principalmente, nas seguintes áreas: Transformadores de Potência, Simulações em Elementos Finitos e Fontes Chaveadas.

Fabio Ecke Bisogno, nascido em 07/04/1973 em Santa Maria-RS é engenheiro eletricitista (1999), mestre (2001), e professor adjunto na Universidade Federal de Santa Maria. Prof. Fabio fez seu doutorado em Engenharia Elétrica pela Technische Universität Chemnitz (2006) e em paralelo esteve empregado no instituto de pesquisa Fraunhofer, Alemanha. Suas áreas de interesse são: sistemas auto oscilante, miniaturização de fontes de potência, conversores ressonantes e sistemas de iluminação.

José Marcos Alonso Álvarez, nascido em Gijón, Espanha, possui graduação em Engenharia Industrial e Doutorado pela Universidade de Oviedo, Espanha, em 1990 e 1994, respectivamente. De 1990 a 1994 trabalhou como Professor Assistente no Departamento de Eletrônica da Universidade de Oviedo. De 1997 a 2007 foi Professor Associado no mesmo departamento, onde desde 2007 é Professor Catedrático. Alonso é coautor de mais de 250 artigos publicados em congressos e jornais internacionais. Prof. Alonso foi premiado pelo governo espanhol no Programa de Intensificação de Atividades de Pesquisa, no período de 2008-2012. Também recebeu o prêmio intitulado Early Career Award, da IEEE Industrial Electronics Society em 2006. Seus interesses incluem: reatores eletrônicos, modelagem de lâmpadas de descarga, conversores eletrônicos para aplicações eletrostáticas e geração de ozônio, topologias para correção do fator de potência.

Ricardo Nederson do Prado, nascido em Itapiranga-RS em 1961. Graduação em Engenharia Elétrica pela UFSM (1984). Mestrado e Doutorado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 1987 e 1993, respectivamente. De 1987 a 1992 trabalhou como Professor Assistente na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Atualmente é Professor Associado junto ao Departamento de Processamento de Energia Elétrica da UFSM. Em 1997 fundou o grupo GEDRE. De 2005 a 2006 realizou estágio pós-doutoral junto ao Fraunhofer Institute, Alemanha. É autor de mais de 200 artigos técnicos publicados em congressos nacionais e internacionais e revistas. Seus tópicos de interesse incluem: conversores estáticos, lâmpadas de descarga de alta e baixa pressão, eficiência luminosa, reatores eletrônicos, LEDs como fontes de luz e correção do fator de potência. Dr. Prado é membro fundador da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência, membro da Sociedade Brasileira de Automática e de várias sociedades da IEEE. Também é revisor da Revista Eletrônica de Potência, Revista Brasileira de Automática e de várias revistas da IEEE.