

REATOR ELETRÔNICO COM CONTROLE DE LUMINOSIDADE E ELEVADO FATOR DE POTÊNCIA, PARA MÚLTIPLAS LÂMPADAS FLUORESCENTES TUBULARES

Fabio Toshiaki Wakabayashi

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Campus de Ilha Solteira
CEP 15385-000, C.P. 31, Ilha Solteira – SP
Brasil
e-mail: canesin@dee.feis.unesp.br

Carlos Alberto Canesin

Resumo - Neste trabalho, é apresentado um reator eletrônico para múltiplas lâmpadas fluorescentes tubulares. Este reator eletrônico apresenta elevado fator de potência e controle de luminosidade. O estágio retificador é composto por um conversor Sepic ZCS-PWM (*Zero-Current-Switching – Pulse-Width-Modulated*), com controle através da técnica de valores médios instantâneos de corrente de entrada. Em relação ao estágio inversor, o mesmo é formado por um clássico conversor Half-Bridge ressonante, associado a filtros SPLR (*Series-Parallel Loaded Resonant*), controlado pela técnica de imposição de defasagem da corrente processada através dos conjuntos filtro + lâmpada. Adicionalmente, resultados experimentais são mostrados para validar a análise desenvolvida.

Palavras-Chave – Reator Eletrônico, Controle de Luminosidade, Múltiplas Lâmpadas Fluorescentes Tubulares, Elevado Fator de Potência, Célula de Comutação ZCS-PWM.

DIMMABLE ELECTRONIC BALLAST WITH HIGH POWER-FACTOR, FOR MULTIPLE TUBULAR FLUORESCENT LAMPS

Abstract – An electronic ballast for multiple tubular fluorescent lamps is presented in this paper. This electronic ballast presents high power-factor and dimming capability. A Zero-Current-Switching – Pulse-Width-Modulated (ZCS-PWM) Sepic converter composes the rectifying stage, controlled by the instantaneous average input current technique. Regarding to the inverting stage, it is composed by a classical resonant Half-Bridge converter, associated to Series-Parallel Loaded Resonant (SPLR) filters. The control technique employed in this Half-Bridge is based on the phase-shift in the current processed through the sets of filter + lamp. In addition, experimental results are shown in order to validate the developed analysis.

Artigo Submetido em 20/07/2003. Primeira Revisão em 30/09/2003. Aceito sob recomendação do Editor Especial Prof. Walter Kaiser.

Keywords – Electronic Ballast, Dimming Control, Multiple Tubular Fluorescent Lamps, High Power Factor, ZCS-PWM Commutation Cell

I. INTRODUÇÃO

A utilização de sistemas de iluminação fluorescente com reatores eletrônicos tem se intensificado nos últimos anos. Estes sistemas oferecem diversas vantagens quando comparados a sistemas de iluminação fluorescente com reatores magnéticos convencionais. Dentre as principais vantagens, podem ser citadas: supressão de ruídos audíveis e de efeito estroboscópico, redução de peso e volume da estrutura, aumento da eficiência luminosa (lumens/watt) da lâmpada fluorescente, dentre outras.

Em sua configuração mais comum, o reator eletrônico é geralmente formado por um estágio retificador de entrada convencional, composto por uma ponte de diodos e um elevado filtro capacitivo, acoplado a um estágio inversor ressonante *Half-Bridge* clássico operado em frequências elevadas [1-3]. No entanto, é fato que reatores eletrônicos que empregam o estágio retificador convencional mencionado apresentam reduzido fator de potência, aproximadamente da ordem de 0,6. Desta forma, com o intuito de se melhorar o aproveitamento de energia elétrica por parte destes dispositivos, diversos estágios retificadores de elevado fator de potência têm sido propostos [4-8]. Em termos de resultados relacionados ao fator de potência e à taxa de distorção harmônica da corrente de entrada, as estruturas que mais se destacam são aquelas compostas por estágios retificadores chaveados.

De maneira geral, em aplicações monofásicas, o conversor Boost é a estrutura mais utilizada como estágio retificador chaveado de elevado fator de potência, em função de sua simplicidade e da característica de fonte de corrente de sua alimentação, obtida pela presença do indutor de entrada em sua estrutura. Entretanto, é preciso lembrar que o conversor Boost opera somente no modo elevador de tensão, o que significa que a tensão de barramento CC (Corrente Contínua) deve possuir um valor superior ao valor de pico da tensão de alimentação em CA (Corrente Alternada). Portanto, supondo-se uma aplicação para a faixa universal de tensão de alimentação (95V a 260V, em valores eficazes), a tensão de barramento CC do retificador Boost deve ser, obrigatoriamente, superior a 370V.

Com relação a aplicações de estágios retificadores chaveados em reatores eletrônicos, a possibilidade de

imposição de valores relativamente reduzidos de tensão de barramento CC permite a utilização de semicondutores de menor tensão de ruptura para o estágio inversor, podendo então representar redução de custos associados a estes componentes. Desta forma, torna-se possível optar por um conversor Sepic como estágio de retificação do reator, uma vez que este conversor possibilita a operação tanto no modo abaixador quanto elevador de tensão. Assim, o valor da tensão de barramento CC deste estágio pode ser especificado como sendo superior ou inferior ao valor de pico da tensão de alimentação em CA. Considerando-se aplicações para a faixa universal de tensão de alimentação, este fato permite maior grau de liberdade para o projeto do reator eletrônico, em relação ao emprego de um estágio retificador Boost.

A operação de dispositivos semicondutores em elevadas frequências leva ao aumento das perdas durante os processos de comutação dos mesmos, podendo acarretar significativas reduções de rendimento da estrutura. Neste sentido, a inclusão de técnicas de comutação não-dissipativa pode ser realizada, visando melhorar a eficiência global da estrutura.

Além da proposição de reatores eletrônicos com fatores de potência mais elevados, novos estudos têm sido realizados a respeito da incorporação de controle de luminosidade ao sistema de iluminação fluorescente [9-13]. O controle de luminosidade em lâmpadas fluorescentes é capaz de possibilitar a otimização do consumo deste tipo de sistema de iluminação, especialmente em ambientes que apresentem bom aproveitamento de iluminação natural. Basicamente, duas são as técnicas empregadas para este fim, a saber: variação da tensão de barramento CC [9 e 11] e variação da frequência de comutação do estágio inversor *Half-Bridge* [10 e 11]. Dentre estas técnicas, a variação da frequência de comutação é atualmente a mais difundida, pois representa uma opção mais simples de implementação, uma vez que a necessidade de concepção de estágios retificadores capazes de operar com largas faixas de variação de tensão do barramento CC acaba limitando a escolha de estruturas e técnicas de controle adequadas. Dentro deste contexto, um novo circuito integrado (CI) denominado IR2159 foi proposto em [12], possibilitando a inclusão de recursos sofisticados para o controle do inversor *Half-Bridge*, abrangendo desde o processo de ignição da lâmpada, provendo o devido pré-aquecimento dos filamentos dos eletrodos, até a operação em regime, permitindo o controle de luminosidade através da técnica de imposição de defasagem da corrente processada através do conjunto filtro ressonante + lâmpada fluorescente [12].

A incorporação de técnicas de correção de fator de potência, células de comutação não-dissipativa e controle de luminosidade proporciona elevação nos custos associados ao reator eletrônico, quando em comparação com uma estrutura

convencional. Portanto, com o intuito de minimizar, ou ao menos reduzir, o custo deste tipo de sistema de iluminação, foi proposto o conceito de reatores eletrônicos para múltiplas lâmpadas fluorescentes [13].

Neste sentido, este trabalho apresenta um reator eletrônico com controle de luminosidade, fator de potência e rendimento elevados, para múltiplas lâmpadas fluorescentes tubulares. O estágio retificador do reator proposto é composto por um retificador Sepic com comutação em corrente nula (*ZCS, Zero-Current-Switching*) e modulação por largura de pulso (*PWM, Pulse-Width-Modulated*), controlado através da técnica de valores médios instantâneos de corrente de entrada. O estágio inversor é composto por um conversor *Half-Bridge* e filtros *SPLR (Series-Parallel Loaded Resonant)* [1-3], controlado pela técnica de imposição da defasagem da corrente processada através dos conjuntos filtro + lâmpada.

II. REATOR ELETRÔNICO PROPOSTO

O reator eletrônico proposto neste trabalho é diretamente derivado da estrutura apresentada em [14]. As principais diferenças entre estas estruturas referem-se à célula de comutação empregada no estágio retificador e à incorporação de controle de luminosidade ao reator.

A respeito da célula de comutação apresentada em destaque na Figura 1, quando comparada à célula proposta em [14], informa-se que o diodo de equalização do ramo auxiliar (D_1) foi retirado de sua posição original (entre os emissores de S_1 e S_2 , com o cátodo conectado ao emissor de S_1) e posicionado entre os dois indutores ressonantes L_{r1} e L_{r2} , com seu cátodo conectado a L_{r2} . Desta forma, nesta nova configuração, os interruptores S_1 e S_2 passam a apresentar referência comum para o pulso de acionamento, eliminando então a necessidade de circuitos isolados de comando de *gate*.

Conforme informado anteriormente, o controle de luminosidade é obtido através do emprego de um circuito integrado (CI) especialmente desenvolvido para a função, denominado IR2159 [12]. Contudo, a aplicação deste controlador é explorada apenas para sistemas com uma ou, no máximo, duas lâmpadas fluorescentes. Portanto, como parte das contribuições deste trabalho, uma aplicação para seis lâmpadas fluorescentes é apresentada.

A. Retificador Sepic ZCS-PWM

Informa-se que todas as análises relacionadas ao estágio retificador proposto (condições simplificadoras, etapas de funcionamento, equações e restrições de operação) são diretamente derivadas das análises desenvolvidas para a estrutura apresentada em [14], devido à similaridade entre as

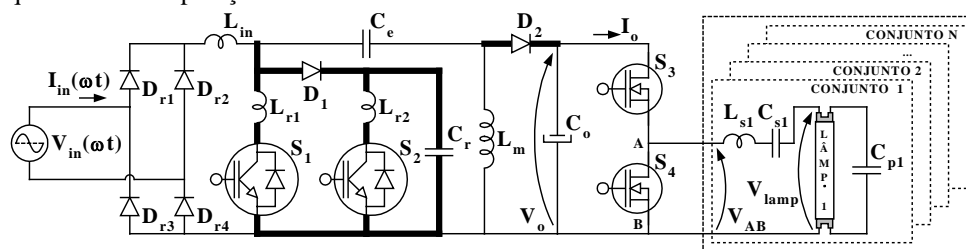


Figura 1 – Novo reator eletrônico com elevado fator de potência para múltiplas lâmpadas fluorescentes.

duas topologias. Na realidade, a alteração na posição do diodo D_1 não acarreta nenhuma mudança na operação do conversor, mas, como dito anteriormente, representa grande vantagem por permitir a eliminação da necessidade de circuitos isolados para comando de *gate*.

As etapas de funcionamento e as principais formas de onda do circuito simplificado do retificador proposto são mostradas na Figura 2. Conforme esta figura, verifica-se que os interruptores S_1 e S_2 são comandados à condução em $t=t_0$ e $t=t_2$, respectivamente, sendo que ambos apresentam entrada em condução do tipo ZCS (corrente nula). Ambos os interruptores são bloqueados simultaneamente, de forma ZCZVS (corrente e tensão nulas), durante o intervalo de tempo destinado à sexta etapa de funcionamento (Δt_6). Em relação aos diodos D_1 e D_2 , verifica-se que ambos são respectivamente levados à condução em $t=t_3$ e $t=t_8$, com tensões nulas aplicadas a seus terminais, caracterizando processos de entrada em condução em ZVS (tensão nula). Além disto, é possível ainda observar que D_1 e D_2 não conduzem conjuntamente a corrente de carga, eliminando assim a desvantagem das células ZCS-PWM apresentadas em [15 e 16], quando aplicadas ao conversor Sepic.

B. Inversor Ressonante Half-Bridge

A respeito do clássico inversor *Half-Bridge* com filtro SPLR, diversos trabalhos têm sido publicados, analisando seu princípio de funcionamento e propondo metodologias de projeto adequadas para a operação com controle de luminosidade [9-13 e 17]. Neste sentido, a metodologia proposta em [17] é empregada neste trabalho, devido à possibilidade de realização de análises bastante apuradas para a especificação dos elementos do filtro SPLR. É importante destacar que a aplicação desta metodologia está diretamente vinculada à escolha de um modelo adequado de resistência equivalente para a lâmpada fluorescente. Tendo em vista que a temperatura ambiente possui grande influência sobre as características de operação da lâmpada fluorescente, incluindo suas características elétricas, torna-se necessário então optar por um modelo capaz de incorporar os efeitos de alterações na temperatura ambiente, permitindo então a correta avaliação de parâmetros para posterior especificação dos elementos do filtro SPLR. Dentro deste contexto, o modelo de lâmpada fluorescente apresentado em [18] é adotado para o desenvolvimento do projeto do estágio inversor ressonante *Half-Bridge*, em conformidade com [17].

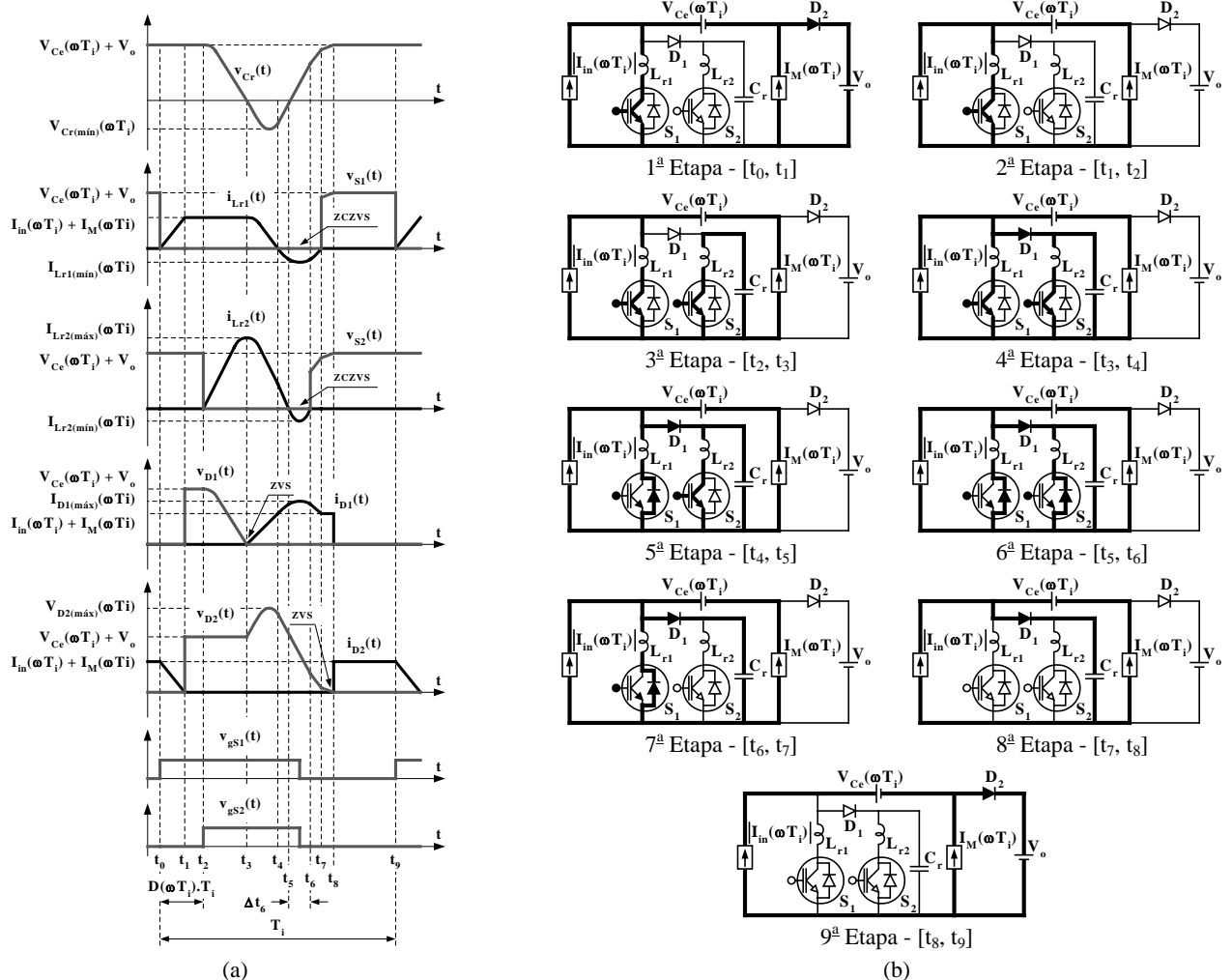


Figura 2 – (a) Principais formas de ondas idealizadas, e (b) Etapas de funcionamento do novo retificador Sepic ZCS-PWM com elevado fator de potência, durante um período genérico de comutação (T_1).

III. METODOLOGIA E EXEMPLO DE PROJETO

O exemplo de projeto é desenvolvido de acordo com os dados de entrada e saída apresentados na Tabela I.

O projeto do estágio retificador é diretamente derivado de [14]. Os elementos ressonantes dos filtros SPLR empregados no estágio inversor *Half-Bridge* são especificados de acordo com metodologia apresentada em [17]. Assim sendo, a Tabela II mostra os parâmetros referentes à implementação do retificador Sepic ZCS-PWM e do clássico inversor ressonante *Half-Bridge*.

Determinados os parâmetros referentes aos estágios retificador e inversor, procede-se com a especificação dos circuitos de comando do reator eletrônico proposto.

O controle do estágio retificador é realizado através do CI UC3854, dedicado à técnica de valores médios instantâneos de corrente de entrada, sendo que seus parâmetros externos são determinados de acordo com [19]. Como dito anteriormente, o estágio inversor *Half-Bridge* é controlado pelo CI IR2159, especialmente projetado para o controle de luminosidade da lâmpada fluorescente através da técnica de imposição da defasagem da corrente drenada pelo conjunto filtro + lâmpada. Além disso, o IR2159 provê ainda um processo adequado de pré-aquecimento dos filamentos dos eletrodos das lâmpadas fluorescentes. Os parâmetros

TABELA I

Dados de Entrada e Saída do Reator Eletrônico Proposto

Valor eficaz da tensão de alimentação ($V_{in(ef)}$)	95V a 260V
Frequência de oscilação da rede de alimentação em CA (f_{CA})	60Hz
Frequência de comutação do retificador Sepic (f_{Sepic})	50kHz
Valor médio da tensão no barramento CC (V_o)	250V
Mínimo rendimento adotado para o estágio retificador ($\eta\%$)	95%
Frequência de comutação nominal do inversor <i>Half-Bridge</i> ($f_{HB(nom)}$)	50kHz
Intervalo de tempo destinado ao pré-aquecimento	1s
Valor pico-a-pico da tensão de ignição da lâmpada	800V
Potência nominal de saída (P_o) (6 lâmpadas fluorescentes F40T12)	240W
Temperatura ambiente (T)	25°C

TABELA II

Parâmetros de Implementação do Reator Eletrônico

Retificador Sepic ZCS-PWM	
$\alpha_{m\acute{a}x}$	0,328
β	0,5
f	0,105
C_r	2 // 5,6nF
L_{r1}	20 μ H
L_{r2}	10 μ H
L_{in}	5mH
L_M	5mH
C_e	2200nF
C_o	3 // 330 μ F
D_{r1}, \dots, D_{r4}	1n5408
S_1	HGTP12N60A4D
S_2	HGTP7N60A4D
D_1, D_2	RHRP8100
Inversor <i>Half-Bridge</i> Ressonante	
$L_{s1} = L_{s2} = \dots = L_{s6}$	835 μ H
$C_{s1} = C_{s2} = \dots = C_{s6}$	180nF
$C_{p1} = C_{p2} = \dots = C_{p6}$	6,8nF
S_3, S_4	IRF740

externos deste controlador são especificados a partir de um programa computacional fornecido pelo fabricante, denominado *Ballast Designer* [20].

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

As figuras 3 e 4 mostram fotografias do protótipo implementado.

As formas de onda da tensão de alimentação e da corrente de entrada do reator eletrônico são mostradas na Figura 5, para as situações de máxima e mínima luminosidade do conjunto de lâmpadas. Os espectros de frequência da corrente de entrada são também mostrados na Figura 5.

Informa-se que a condição de máxima luminosidade do conjunto de lâmpadas está relacionada com o processamento de aproximadamente 40W em cada uma das seis lâmpadas fluorescentes. Já a condição de mínima luminosidade é associada ao menor valor de potência processada através das lâmpadas fluorescentes, sem que o fenômeno do estriamento possa ser visualmente detectado [21]. Para as lâmpadas utilizadas nos ensaios experimentais (GE – F40T12 – Super Luz do Dia), o fenômeno do estriamento torna-se visualmente detectável para valores de potência inferiores a 3W através de cada lâmpada. Assim, o limite inferior de processamento de potência para o conjunto de seis lâmpadas, responsável pela condição de mínima luminosidade, é admitido como sendo um valor em torno de 20W.

Adicionalmente, destaca-se que a alimentação do reator foi realizada por uma fonte de tensão controlada (California Instruments – 5001i), sendo que a TDH (Taxa de Distorção Harmônica) da tensão em CA (Corrente Alternada) fornecida ao reator foi inferior a 0,5%, em todos os ensaios realizados.

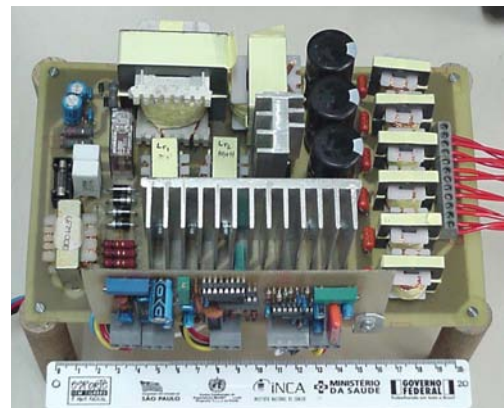


Figura 3 – Fotografia do protótipo implementado.

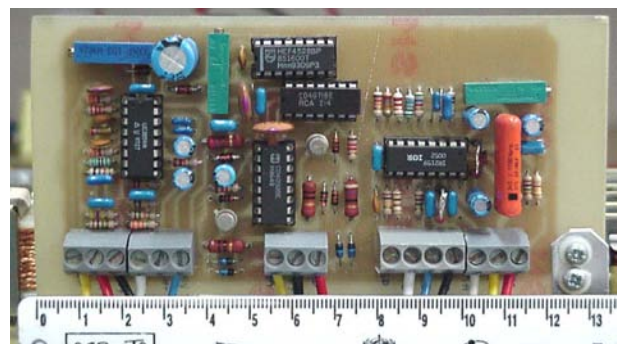


Figura 4 – Detalhe do circuito de comando implementado para o reator proposto.

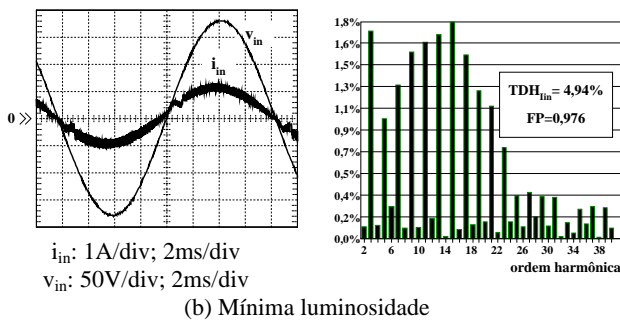
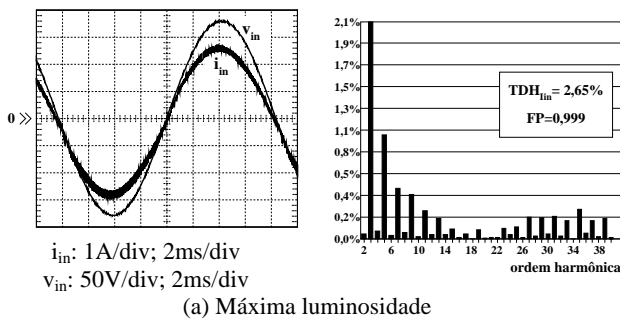


Figura 5 – Formas de onda da tensão de alimentação e corrente de entrada do reator proposto e espectro harmônico da corrente de entrada, para diferentes condições de luminosidade.

Com base na Figura 5, é possível observar que a defasagem angular é praticamente nula entre a corrente de entrada e a tensão de alimentação, tanto para a condição de máxima luminosidade quanto para mínima. Associado a este fato, os reduzidos valores de distorção harmônica das correntes de entrada fazem com que o fator de potência desta estrutura seja praticamente unitário, considerando-se a faixa analisada para a variação de luminosidade do conjunto de lâmpadas. É possível verificar ainda que a redução da carga leva a um aumento percentual das componentes harmônicas de ordem superior na corrente de entrada, além do aumento do deslocamento angular em relação à tensão de alimentação, reduzindo o fator de potência da estrutura. Tal fato é comumente verificado em retificadores Sepic operados no modo de condução contínua, conforme [22].

Em conjunto com os resultados de FP e TDH, é importante que o reator proposto enquadre-se ainda em normas relacionadas à compatibilidade eletromagnética (EMC, *Electromagnetic Compatibility*).

Em função do equipamento disponível no Laboratório de Eletrônica de Potência da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS-UNESP), é possível realizar medições de ruídos eletromagnéticos conduzidos, cuja banda de frequências compreende a faixa entre 150kHz e 30MHz. Uma vez que o conceito de reator eletrônico para múltiplas lâmpadas fluorescentes é bastante novo, optou-se por realizar sua adequação mediante a norma relativa a equipamentos do tipo fonte chaveada. Portanto, a norma escolhida para a análise de compatibilidade eletromagnética foi a EN55011, classe A, grupo 1, destinada a produtos industriais, científicos ou médicos, utilizados em estabelecimentos não-domésticos.

A Figura 6 mostra os resultados de medições preliminares de compatibilidade eletromagnética realizadas antes da inclusão de filtro específico para ruídos conduzidos de EMI, na condição de máxima luminosidade do conjunto.

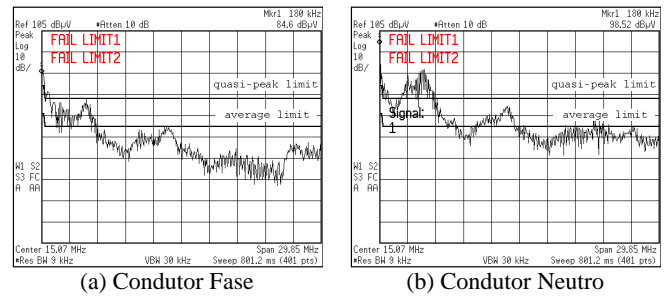


Figura 6 – Medições de EMI conduzida, sem filtro específico.

De acordo com a figura 6, o protótipo projetado não atende à norma de EMC especificada. Torna-se necessário então compor um filtro adequado para suprimir o ruído indesejado. Para tanto, escolhe-se uma das configurações mais simples de filtro de supressão de EMI, conforme a Figura 7.

A especificação dos parâmetros do filtro é realizada a partir do uso de um programa computacional denominado *Westbay Compufilt Lite* [23], concebido especificamente para auxiliar o projeto de filtros para EMI.

Os resultados mostrados na Figura 8 referem-se a medições realizadas no protótipo implementado, para máxima luminosidade do conjunto de lâmpadas, após a inclusão do filtro da Figura 7. Resultados referentes à condição de processamento de mínima luminosidade são mostrados na Figura 9. Da análise das Figuras 8 e 9, conclui-se que o reator passa a atender devidamente às normas de EMC especificadas.

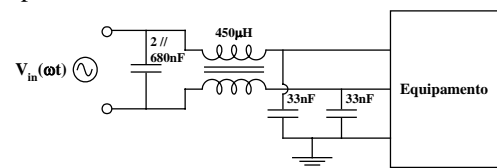


Figura 7 – Diagrama esquemático do filtro de EMI implementado.

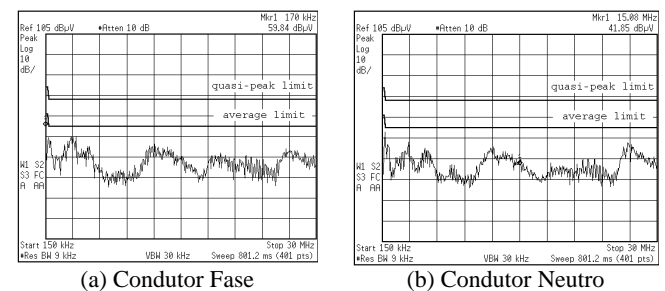


Figura 8 – Medições de EMI conduzida, após inclusão do filtro, para máxima luminosidade do conjunto de lâmpadas.

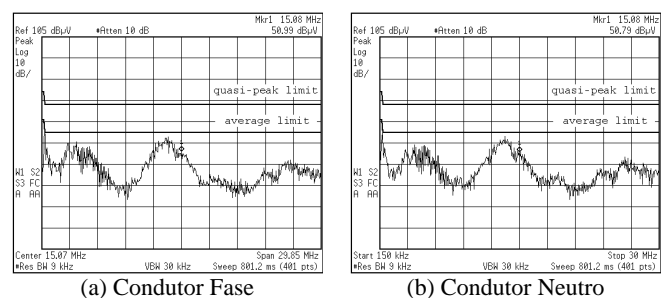


Figura 9 – Medições de EMI conduzida, após inclusão do filtro, para mínima luminosidade do conjunto de lâmpadas.

Além do elevado fator de potência e da compatibilidade eletromagnética, o reator foi concebido para prover uma operação com elevado rendimento, em função das técnicas de comutação não-dissipativa empregadas nos estágios retificador e inversor. Em função da operação com controle de luminosidade, os resultados referentes ao circuito de potência do reator são divididos em duas partes, cobrindo então as faixas de operação de máxima e mínima luminosidade.

1) *Máxima Luminosidade do Conjunto de Lâmpadas*

A Figura 10 mostra detalhes das comutações dos interruptores do estágio retificador, S_1 e S_2 , cujas aquisições foram realizadas para diferentes valores instantâneos da tensão de alimentação.

Analisando-se a Figura 10, é possível notar que as comutações suaves ocorrem adequadamente, conforme esperado, além de serem preservadas no decorrer de um período de rede de alimentação em CA, propiciando elevado rendimento à estrutura.

As formas de onda das correntes processadas através dos diodos são apresentadas na Figura 11, na qual é possível notar que os mesmos não conduzem simultaneamente a corrente transferida à carga.

As formas de onda relacionadas com as comutações dos interruptores do estágio inversor, S_3 e S_4 , são mostradas na Figura 12. Nesta figura, constata-se a ocorrência de comutações do tipo ZVS nos semicondutores empregados no estágio inversor.

A Figura 13 mostra as formas de onda associadas aos elementos ressonantes de um dos conjuntos filtro + lâmpada. Nesta figura é possível notar claramente que o capacitor C_s se encarrega de barrar o fluxo da componente CC da tensão aplicada aos pontos A e B da Figura 1 para os terminais da lâmpada fluorescente.

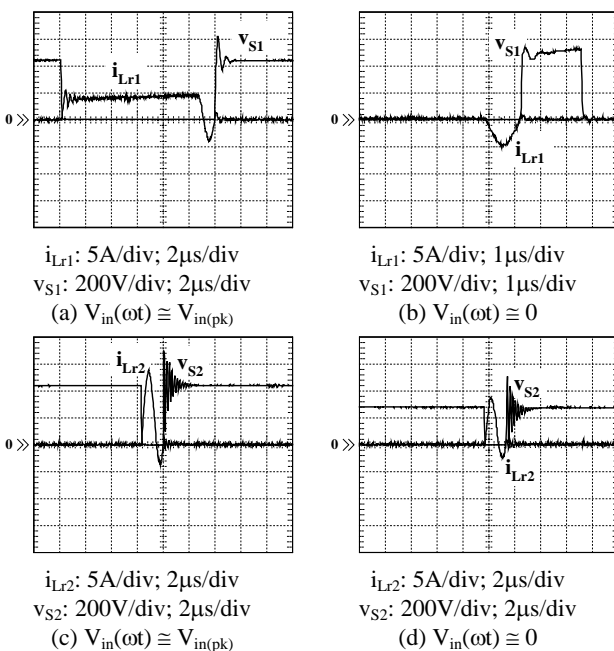


Figura 10 – Detalhes de comutações dos interruptores S_1 e S_2 , para máxima luminosidade.

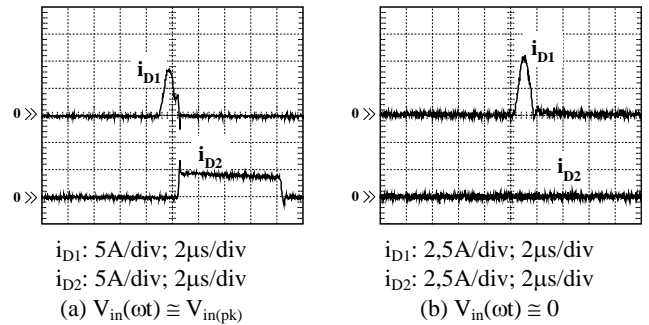


Figura 11 – Detalhes das correntes que circulam através de D_1 e D_2 , para máxima luminosidade.

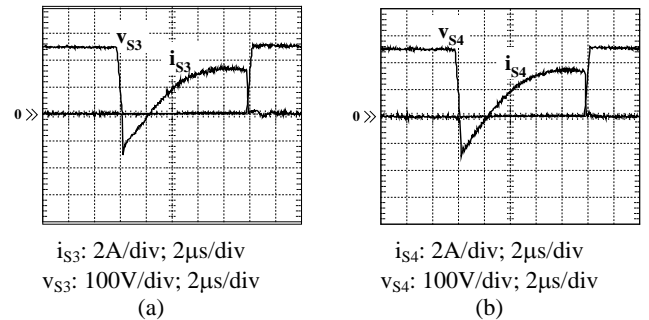


Figura 12 – Detalhes das comutações nos interruptores S_3 e S_4 , para máxima luminosidade.

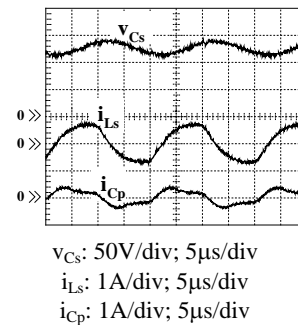


Figura 13 – Formas de ondas das grandezas processadas nos elementos do filtro ressonante LCC do estágio inversor, para máxima luminosidade.

A Figura 14.a mostra as formas de onda de tensão e de corrente em uma das lâmpadas fluorescentes, enquanto que a Figura 14.b mostra a tensão sobre uma das lâmpadas durante seu processo de ignição.

Da figura 14 é possível verificar a operação adequada do reator, tanto em regime permanente quanto durante a ignição da lâmpada. Informa-se que o tempo de pré-aquecimento e ignição resultou relativamente elevado (cerca de 1,5s) em função de ajustes necessários ao controlador IR2159, com o intuito de se propiciar a ignição simultânea de todo o conjunto de lâmpadas fluorescentes.

2) *Mínima Luminosidade do Conjunto de Lâmpadas*

A Figura 15 mostra os resultados obtidos para as comutações em S_1 e S_2 , para a condição de processamento de mínima luminosidade. Conforme esperado, as comutações nos interruptores S_1 e S_2 são preservadas durante todo o período de rede de alimentação em CA.

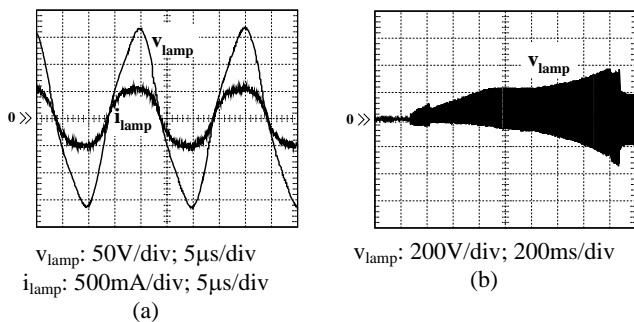


Figura 14 – (a) Formas de onda da tensão e corrente em uma das lâmpadas, para máxima luminosidade, e (b) tensão sobre uma das lâmpadas, durante a ignição.

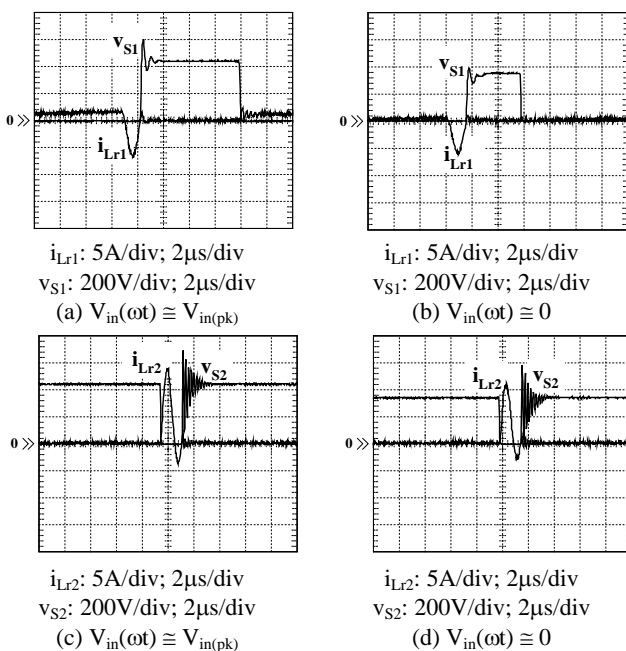


Figura 15 – Detalhes de comutações dos interruptores S_1 e S_2 , para mínima luminosidade.

As formas de onda das correntes que circulam através de D_1 e D_2 são mostradas na Figura 16, onde é possível observar que os mesmos preservam a característica de não conduzirem conjuntamente a corrente de carga.

Em relação ao estágio inversor, as formas de onda das comutações dos interruptores são mostradas na Figura 17. Analisando-se esta figura, nota-se que as comutações ZVS são devidamente preservadas. Comparando-se as Figuras 12 e 17, é possível ainda visualizar a mudança de fase da

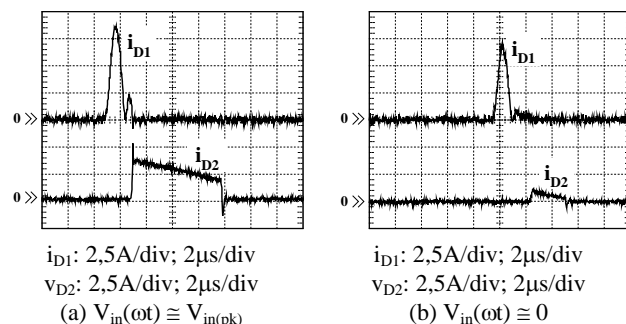


Figura 16 – Detalhes das correntes que circulam através de D_1 e D_2 , para mínima luminosidade.

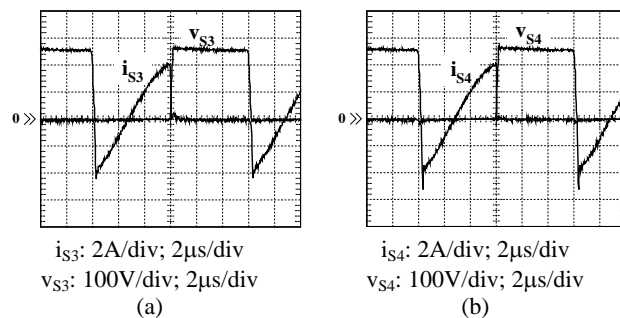


Figura 17 – Detalhes das comutações nos interruptores S_3 e S_4 , para mínima luminosidade.

corrente processada, fato denotado pela alteração nas proporções de tempo de circulação da corrente que flui através do sentido direto e reverso do interruptor.

As formas de onda ressonantes associadas a um dos conjuntos filtro + lâmpada são mostradas na figura 18. Nesta figura, é importante notar que as correntes que circulam através do indutor série (L_s) e através do capacitor paralelo (C_p) são muito semelhantes. Este fato ocorre porque, com o aumento da frequência de comutação do estágio inversor, a reatância do capacitor C_p tem seu valor reduzido, tornando-se um caminho preferencial para a corrente, em relação à lâmpada fluorescente. Além disso, as variações da característica da lâmpada fluorescente fazem com que sua resistência equivalente torne-se extremamente elevada para condições de mínima luminosidade. Assim sendo, torna-se possível comprovar que o controle de luminosidade, através da variação da frequência de comutação do estágio inversor, impõe uma redistribuição do fluxo de reativos que flui através do conjunto filtro + lâmpada, conforme [17].

A Figura 19 mostra as formas de onda de tensão e corrente em uma das lâmpadas fluorescentes, assim como um detalhe da ignição da mesma. Desta figura, é possível notar a reduzida corrente que flui através da lâmpada, caracterizando a redução da potência processada e do grau de luminosidade emitido. Em relação à ignição da lâmpada, é possível verificar que quase não há diferenças entre as formas de onda apresentadas nas Figuras 14.b e 19.b. Tal fato é devido à forma de operação do controlador IR2159, a qual promove a ignição para uma condição de máxima luminosidade. O CI passa a operar na condição de luminosidade ajustada pelo usuário do sistema somente após o estabelecimento do arco através da lâmpada fluorescente, garantindo assim as condições de ignição para quaisquer situações de luminosidade pré-estabelecidas pelo usuário.

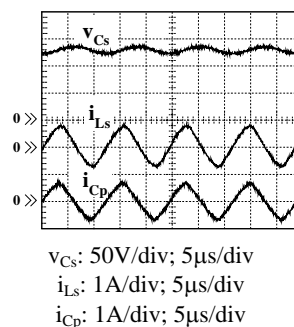


Figura 18 – Formas de ondas das grandezas processadas nos elementos do filtro ressonante LCC do estágio inversor, para mínima luminosidade.

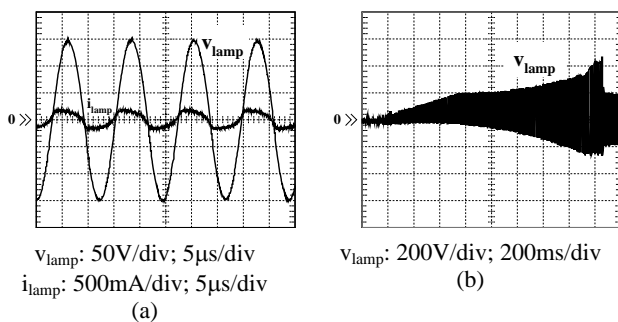


Figura 19 – (a) Formas de onda da tensão e corrente em uma das lâmpadas, para mínima luminosidade, e (b) tensão sobre uma das lâmpadas, durante a ignição.

Finalmente, informa-se que a condição de aquecimento dos filamentos dos eletrodos das lâmpadas fluorescentes foi mantida em níveis recomendados pela ANSI (*American National Standards Institute*), conforme [24], durante todo o processo de controle de luminosidade. Adicionalmente, o fator de crista da corrente através da lâmpada fluorescente apresenta valores entre 1,35 (para a condição nominal) e 1,5 (para a condição de mínima luminosidade do conjunto de lâmpadas), adequando-se às exigências para manutenção do tempo de vida útil das lâmpadas (fator de crista com valor inferior a 1,6).

V. CONCLUSÕES

Neste artigo foi apresentado um reator eletrônico com controle de luminosidade, destinado a sistemas de iluminação com múltiplas lâmpadas fluorescentes.

O estágio retificador é composto por um conversor Sepic ZCS-PWM, controlado pela técnica de valores médios instantâneos de corrente de entrada. Os resultados obtidos experimentalmente para a taxa de distorção harmônica da corrente de entrada e para o fator de potência da estrutura, considerando-se a faixa de variação de luminosidade imposta ao conjunto de lâmpadas fluorescentes, permitem verificar o excelente aproveitamento de energia elétrica deste reator.

As análises de compatibilidade eletromagnética realizadas para o reator mostram que os primeiros resultados obtidos violam a norma EN55011 – classe A – grupo 1, fazendo com que seja necessária a adição de um filtro de EMI à estrutura. O projeto deste filtro é desenvolvido através do emprego de um programa computacional, simplificando assim a especificação de todos os elementos do filtro. O resultado final, alcançado após a inclusão do filtro, atende plenamente à norma especificada.

Além disso, a célula de comutação suave empregada no estágio retificador proposto permite que a entrada em condução dos interruptores controlados ocorra de forma ZCS, enquanto que o bloqueio dos mesmos é desenvolvido de forma ZCZVS. Adicionalmente, informa-se que os diodos de equalização e de saída da célula desempenham processos de entrada em condução do tipo ZVS, além de apresentar reduzidos efeitos de recuperação reversa sobre os interruptores controlados. Verifica-se ainda que os processos de comutação dos dispositivos semicondutores são mantidos durante todo o período da rede de alimentação em CA.

Em relação ao circuito inversor utilizado no reator, conclui-se que a entrada em condução dos interruptores

ocorre de forma ZVS, conforme esperado. O filtro ressonante empregado promove uma ótima estabilização da corrente fornecida à lâmpada. A adaptação do controlador IR2159 a aplicações em sistemas de iluminação com múltiplas lâmpadas fluorescentes é considerada muito bem-sucedida. O controle de luminosidade é devidamente verificado em todas as lâmpadas alimentadas pelo sistema, sem que haja nenhum comprometimento da estabilidade do mesmo.

Em síntese, tem-se neste trabalho o desenvolvimento de um reator eletrônico para múltiplas lâmpadas fluorescentes tubulares, com completo controle do nível de luminosidade, elevado fator de potência e atendimento às normas de compatibilidade eletromagnética especificadas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP e ao CNPq pelo apoio concedido ao presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. L. Steigerwald, "A Comparison of Half-Bridge Resonant Converter Topologies", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 3, no. 2, pp. 174-182, October, 1988.
- [2] M. K. Kazimierczuk e W. Szaraniec, "Electronic Ballast for Fluorescent Lamps", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 8, no. 4, pp. 386-395, October, 1993.
- [3] M. C. Cosby Jr. e R. M. Nelms, "A Resonant Inverter for Electronic Ballast Applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, no. 4, pp. 418-425, August, 1994.
- [4] J. Spangler, B. Hussain, e A. K. Behera, "Electronic Fluorescent Ballast using Power Factor Correction Techniques for Loads greater than 300Watts", in *Proc. of IEEE APEC'91*, pp. 393-399, 1991.
- [5] R. N. Marques e H. A. C. Braga, "Valley Fill Filter Derived Electronic Ballasts – A Comparative Study", in *Proc. of INDUSCON'02*, CD-ROM, 2002.
- [6] M. A. C6, D. S. L. Simonetti e J. L. F. Vieira, "High-Power-Factor Electronic Ballast Operating in Critical Conduction Mode", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no 1, Janeiro, pp. 93-101, 1998.
- [7] R. N. Prado, A. R. Seidel, F. E. Bisogno e T. B. Marchezan, "Comparisons Among Electronic Ballasts Topologies with High Power Factor", in *Proc. of IEEE APEC'01*, pp. 651-657, 2001.
- [8] F. Tao, Q. Zhao, F. C. Lee e N. Onishi, "Single-Stage Power-Factor-Correction Electronic Ballast with a Wide Continuous Dimming Control for Fluorescent Lamps", in *Proc. of IEEE PESC'01*, pp. 926-931, 2001.
- [9] C. S. Moo, H. L. Cheng, T. F. Lin e H. C. Yen, "Designing a Dimmable Electronic Ballast with Voltage Control for Fluorescent Lamp", in *Proc. of IEEE ISIE'99*, pp. 786-791, 1999.
- [10] C. S. Moo, H. L. Cheng, H. N. Chen e H. C. Yen, "Designing a Dimmable Electronic Ballast with Frequency Control", in *Proc. of IEEE APEC'99*, pp. 727-733, 1999.

- [11] Y. K. E. Ho, S. T. S. Lee, H. S. H. Chung e S. Y. Hui, "A Comparative Study on Dimming Control Methods for Electronic Ballasts", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 16, no 6, November, pp. 828-836, 2001.
- [12] J. Adams, T. J. Ribarich e J. J. Ribarich, "A New Control IC for Dimmable High-Frequency Electronic Ballasts", in *Proc. of IEEE APEC'99*, pp. 713-719, 1999.
- [13] R. Gules, E. U. Simões, e I. Barbi, "A 1.2kW Electronic Ballast for Multiple Lamps, with Dimming Capability and High Power-Factor", in *Proc. of IEEE APEC'99*, pp. 720-726, 1999.
- [14] F. T. Wakabayashi e C. A. Canesin, "Novo Reator Eletrônico com Elevado Fator de Potência para Múltiplas Lâmpadas Fluorescentes Tubulares", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 6, no 1, 2001, pp. 16-24
- [15] C. A. Canesin e I. Barbi, "A Novel Single-Phase ZCS-PWM High-Power-Factor Boost Rectifier", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 14, no 4, pp. 629-635, 1999.
- [16] F. T. Wakabayashi, M. J. Bonato e C. A. Canesin, "Novel High-Power-Factor ZCS-PWM Preregulators", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no 2, pp. 322-333, 2001.
- [17] F. T. Wakabayashi, e C. A. Canesin, "An Improved Design Procedure for LCC Resonant Filter of Dimmable Electronic Ballasts for Fluorescent Lamps, Based on Lamp Model", in *Proc. of IEEE IECON'03*, to be published in November, 2003.
- [18] F. T. Wakabayashi, e C. A. Canesin, "A New Model for Tubular Fluorescent Lamps Operated at High Frequencies for Dimmable Applications", in *Proc. of IEEE ISIE'03*, CD-ROM, 2003.
- [19] C. S. E. Silva, "Power Factor Correction with the UC3854", Application Note U125, Unitrode Corporation, pp 287-296, 1990.
- [20] "Ballast Designer – version 3.0.40", programa computacional, <http://www.irf.com>.
- [21] G. C. Hsieh e C. H. Lin, "Harmonized Strategy for Breaking the Striations in the Fluorescent Lamp", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, no. 2, pp. 352-366, April, 2001.
- [22] G. Spiazzi and P. Mattavelli, "Design criteria for power factor preregulators based on Sepic and Cuk converters in continuous conduction mode", in *Proc. of IEEE IAS'94*, pp. 1084-1089, 1994.
- [23] "Westbay Compufilt Lite – version 2.0", programa computacional, <http://www.westbay.ndirect.co.uk>.
- [24] Y. Ji, R. Davis, C. O'Rourke e E. W. M. Chui, "Compatibility Testing of Fluorescent Lamp and Ballast Systems", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 35, no. 6, pp. 1271-1276, November / December, 1999.

DADOS BIOGRÁFICOS

Fabio Toshiaki Wakabayashi, nascido em Jales (SP), em Julho de 1974, é engenheiro eletricista (1996) formado na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FEIS, Ilha Solteira (SP)). Obteve os títulos de mestre (1998) e doutor (2003) em Engenharia Elétrica nesta mesma instituição, tendo desenvolvido seus trabalhos no Laboratório de Eletrônica de Potência. Suas áreas de interesse abrangem técnicas de comutação não-dissipativa, fontes de alimentação chaveadas, qualidade de energia elétrica e reatores eletrônicos para iluminação.

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavínia (SP), em 1961, é engenheiro eletricista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FEIS, Ilha Solteira (SP)), mestre (1990) e doutor (1996) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – Instituto de Eletrônica de Potência (UFSC-INEP), Florianópolis (SC). Atualmente é professor adjunto efetivo do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FEIS. Suas áreas de interesse incluem técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC/CC, fontes de alimentação chaveadas, reatores para iluminação e técnicas de correção do fator de potência.