

SISTEMA DE GERENCIAMENTO AUTOMÁTICO DE ILUMINAÇÃO FLUORESCENTE MULTI-LÂMPADAS, COM CORREÇÃO ATIVA DO FATOR DE POTÊNCIA

Moacyr A. G. de Brito¹, Castellane S. Ferreira, Carlos A. Canesin²
Universidade Estadual Paulista – UNESP
Laboratório de Eletrônica de Potência – Departamento de Engenharia Elétrica
Ilha Solteira, São Paulo, Brasil
e-mails: moa.brito@gmail.com¹, canesin@dee.feis.unesp.br²

Resumo - Este artigo apresenta o desenvolvimento e a implementação de um sistema de iluminação automático multi-lâmpadas, com correção ativa do fator de potência de entrada através da técnica dos valores médios instantâneos na forma digital, com capacidade de pré-aquecimento programável dos eletrodos e com controle de luminosidade. Além disso, o sistema proposto permite o gerenciamento e supervisão remota através de um aplicativo desenvolvido em Visual Basic 6.0, onde o sistema opera de forma automática ou manual, de acordo com a necessidade de cada ambiente e/ou do usuário.

Palavras-Chave – Controle de Luminosidade, Controle Digital, Correção Ativa do Fator de Potência, Iluminação Fluorescente e Rede Inteligente para o Controle de Iluminação.

AUTOMATIC MULTI-LAMP FLUORESCENT MANAGEMENT SYSTEM WITH ACTIVE POWER FACTOR CORRECTION

Abstract – This paper presents the development and implementation of an automatic multi-lamp lighting fluorescent system, with digital average current mode control for input power factor correction, based on electronic ballasts with capacity of ideal programmable preheating and dimming capabilities. Furthermore, the proposed system allows remote monitoring and management through a platform application developed in Visual Basic 6.0, where the system operates automatically or manually, according to the needs of each environment and/or user.

Keywords - Dimming Control, Digital Control, Active Power Factor Correction, Fluorescent Illumination and Smart Grid Control for Illumination.

I. INTRODUÇÃO

A iluminação artificial é responsável por aproximadamente 17% de toda energia elétrica consumida no país, por 24% do consumo no setor residencial e por mais de

44% do consumo no setor de comércio e serviços [1]. Assim, é essencial e viável projetar sistemas de iluminação extremamente eficientes e adequados a cada ambiente.

Estes sistemas são de altos custos de implementação nos dias atuais (abril, 2010). Entretanto, os custos com a melhoria no sistema de iluminação podem ser amortizados com o aumento da produtividade, como já comprovado em estudos realizados no edifício comercial *Lockheed-Martin's Building 157* em *Sunnyvale*, Califórnia. No caso em questão, os custos para se ter este sistema de iluminação foram completamente amortizados pelo aumento da produtividade dos funcionários em um único ano após a implantação do sistema [2].

Algumas estratégias tecnológicas aplicadas a estes sistemas podem torná-los ainda mais viáveis, como a utilização de lâmpadas com alta eficiência luminosa; uso de sensor de movimento; utilização de sensores de luminosidade, de maneira a adequar a iluminação local conjuntamente com o aproveitamento de luz natural; implementação de um sistema de gerenciamento remoto para acionamentos de acordo com a grade horária do expediente de trabalho, atuando de forma automática ou de acordo com preferências ou necessidades dos ocupantes do ambiente.

Uma das partes fundamentais de um sistema de iluminação fluorescente é o reator que alimenta a lâmpada fluorescente, sendo este elemento, indispensável para o correto funcionamento das lâmpadas, onde o mais comum atualmente é o reator eletrônico. Os reatores eletrônicos convencionais apresentam um estágio de entrada retificador com filtro capacitivo, apresentando elevada distorção harmônica para a corrente drenada da rede de corrente alternada (CA) e reduzido fator de potência, tipicamente inferior a 0,6. Neste contexto, por se tratar de uma carga considerável para os sistemas de distribuição em CA, técnicas especiais de correção do fator de potência devem ser aplicadas, para o atendimento às normas internacionais como a IEC 61000-3-2 [3-7].

Para a minimização do custo da implantação de um sistema de iluminação, diversas pesquisas propõem técnicas de integração dos estágios retificador e inversor [5-7]. Outra maneira de se diminuir os custos é a adoção da configuração para múltiplas lâmpadas fluorescentes [8-10]. Assim, um único estágio retificador com correção ativa do fator de potência e um único inversor são utilizados, sendo conectados a vários filtros ressonantes. No entanto, considerando-se uma área extensa a ser iluminada deve-se atentar aos prováveis problemas de interferências

eletromagnéticas, uma vez que correntes de elevadas frequências fluirão entre a saída do inversor e a entrada de cada filtro ressonante [8-10]. A fim de evitar tais problemas utilizam-se projetos especiais de cabeamento estruturado, o que encarece sobremaneira a estrutura do sistema de iluminação. Adicionalmente, não é possível nestas estruturas o controle individual das lâmpadas, ou, de conjuntos setorizados, em função das necessidades especiais dos ambientes, ou, usuários do sistema.

Desta forma, este artigo apresenta um sistema de iluminação fluorescente multi-lâmpadas, com correção ativa do fator de potência de entrada, utilizando um estágio pré-regulador retificador boost controlado por um dispositivo FPGA, usando a técnica dos valores médios instantâneos da corrente de entrada na forma digital [11], onde a transmissão de energia entre o capacitor de saída do retificador de entrada e cada reator eletrônico é realizado em corrente contínua, minimizando prováveis problemas de compatibilidade eletromagnética. Além disto, este sistema de iluminação apresenta reatores eletrônicos totalmente controlados por microcontroladores Atmega8 de baixo custo, onde através de uma interface gráfica amigável, desenvolvida em Visual Basic 6.0, usando um adequado protocolo de comunicação, permite ao usuário e/ou microcomputador atuar de forma local e/ou remota alterando o ponto de operação de cada conjunto de reatores eletrônicos, de acordo com a necessidade dos usuários ou de acordo com agendamentos pré-estabelecidos, incorporando ainda sensores de iluminação e presença, de forma a otimizar o consumo de energia elétrica, constituindo-se uma rede inteligente e eficiente (*Smart Grid*) para o controle e gerenciamento de um sistema de iluminação fluorescente [12].

II. SISTEMA MULTI-LÂMPADAS COM RETIFICADOR DE ENTRADA COM ALTO FATOR DE POTÊNCIA

Com o intuito de reduzir os problemas com interferências eletromagnéticas e custos associados com blindagem de cabos, o sistema proposto neste trabalho, conforme Figura 1, é composto por um único retificador controlado e vários estágios inversores, sendo estes alimentados em corrente contínua. O Pré-regulador retificador emprega a técnica dos valores médios instantâneos da corrente de entrada para a correção ativa do fator de potência, sendo controlado de forma digital por um dispositivo FPGA XC3S1000 Spartan 3.

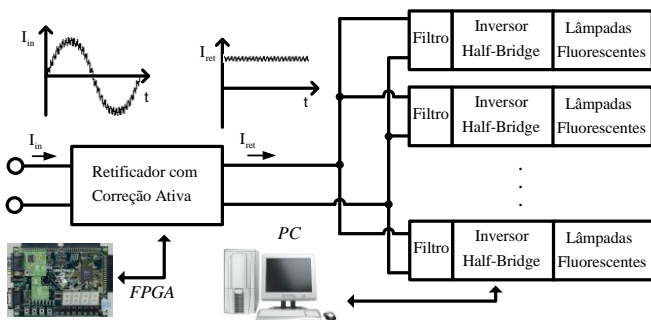


Fig. 1. Concepção do sistema de iluminação multi-lâmpadas proposto.

O retificador controlado é responsável pela entrega de energia a todos os estágios inversores, sendo que cada estágio inversor corresponde a um reator eletrônico para duas lâmpadas fluorescentes tubulares. Os estágios inversores devem ser posicionados o mais próximo das lâmpadas, para reduzir o comprimento dos cabos que conduzem correntes em altas frequências. Devido a esta configuração, é possível operar cada estágio inversor em diferentes frequências, caso necessário, o que permite desenvolver luminosidade distinta para cada conjunto de lâmpadas. Esta característica torna o sistema ainda mais atrativo, quando aplicado em grandes ambientes ou em ambientes setorizados, já que cada local pode possuir uma incidência diferente de luz natural, com diferentes fluxos ou necessidades de usuários.

Um filtro de entrada conectado a cada estágio inversor elimina problemas relacionados a ressonâncias e circulação de correntes em elevadas frequências pelo barramento de corrente contínua devido à característica ZVS de funcionamento do estágio inversor. A estrutura deste filtro é apresentada na Figura 2.

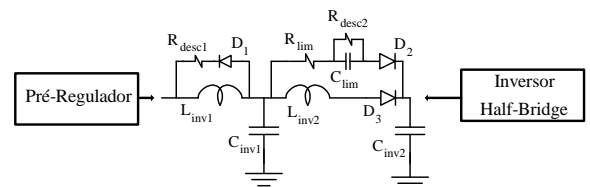


Fig. 2. Circuito esquemático do filtro proposto.

Os estágios inversores são os clássicos meia ponte (*Half Bridge*) com filtro série-ressonante com carga em paralelo (SPRL), os quais são amplamente utilizados em reatores eletrônicos convencionais [13]. A Figura 3 representa o circuito esquemático do estágio inversor utilizado.

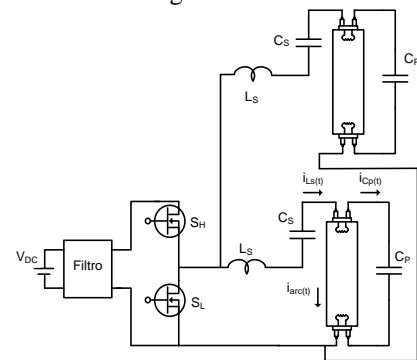


Fig. 3. Circuito esquemático do estágio inversor *Half Bridge* com filtro SPRL.

O projeto do filtro série-ressonante foi baseado na metodologia apresentada em [14], utilizando-se do modelo da coluna de gás da lâmpada fluorescente utilizado em [15].

Os dados básicos de projeto para o estágio inversor são a potência nominal da coluna de gás de 32W; potência mínima processada de 5W; tensão de alimentação de 400V; frequência de comutação do estágio inversor em regime permanente na potência nominal de 50kHz.

A partir destes dados, foram obtidos os seguintes parâmetros:

$$L_s = 2,1\text{mH}, C_s = 180\text{nF} \text{ e } C_p = 8,2\text{ nF}.$$

Por se tratar de um estágio inversor *Half Bridge* com filtro SPRL, é possível impor o valor de corrente pela frequência de comutação dos interruptores controlados. Sendo assim, utiliza-se um protocolo de partida com uma etapa de pré-aquecimento adequado dos filamentos dos eletrodos por imposição de valor eficaz constante de corrente, adequando-se a frequência de comutação e o tempo de pré-aquecimento de acordo com a metodologia de projeto proposta em [15]. Isto reduzirá os desgastes dos filamentos dos eletrodos provocados durante a ignição das lâmpadas, promovendo uma maior vida útil para o sistema de iluminação [15]. A faixa de valores eficazes de tensão nos filamentos dos eletrodos na potência nominal da lâmpada estão de acordo com as normas ANSI [16].

Para a variação da potência processada na coluna de gás da lâmpada fluorescente, adota-se a técnica de variação da frequência de comutação do estágio inversor, o que provoca alteração da característica da impedância do circuito, promovendo uma reconfiguração dos níveis de energia ativa e reativa processados [14].

III. SISTEMA DE CONTROLE E GERENCIAMENTO

A. Retificador de Entrada

O estágio de entrada é composto pelo pré-regulador retificador boost, controlado pela técnica dos valores médios instantâneos da corrente de entrada, possuindo duas malhas de controle interdependentes. Uma malha de controle de corrente rápida, que é responsável por garantir o formato senoidal retificado à corrente no indutor; sendo este formato, realizado através de uma tabela de valores internos, de amplitude unitária, e, sincronizada com a rede de alimentação. A outra malha de controle é a malha de realimentação da tensão de saída, que modifica a amplitude da corrente de referência de forma a garantir tensão de saída regulada e estabilizada. Malha esta de caráter lento a fim de não influenciar nas dinâmicas da malha de corrente, onde se optou por controlar o valor médio da tensão de saída ao invés de seu valor instantâneo, utilizando para tanto um filtro *notch* digital sintonizado em 120Hz. Com a adoção de uma tabela de valores internos e o uso do filtro *notch*, minimizam-se possíveis distorções na corrente de referência, tendo vantagens em relação ao controle analógico convencional, que faz a leitura instantânea da tensão de entrada e da tensão de saída, incorporando as distorções destas leituras na corrente de referência [11]. O Diagrama esquemático simplificado do controle por valores médios na forma digital aplicado ao pré-regulador retificador boost está representado na Figura 4, onde L_B representa o indutor boost, C_f o capacitor de saída e R_L a resistência de carga.

A malha de controle de corrente está representada na Figura 5, e engloba o ganho do sensor de corrente (K_i), o filtro anti-aliasing (PB), o ganho do conversor AD (G_{AD}), o compensador de corrente ($C_{i(z)}$), o ganho do modulador ($1/K_{PWM}$) e a planta de corrente do conversor (G_{id}), juntamente com o retentor de ordem zero.

A malha de controle de tensão, representada na Figura 6, contempla o ganho do sensor de tensão (K_v), o filtro anti-aliasing, o ganho do conversor AD, o compensador de tensão

($C_{v(z)}$), o multiplicador, a malha interna de corrente e a planta de tensão do conversor (G_{vi}).

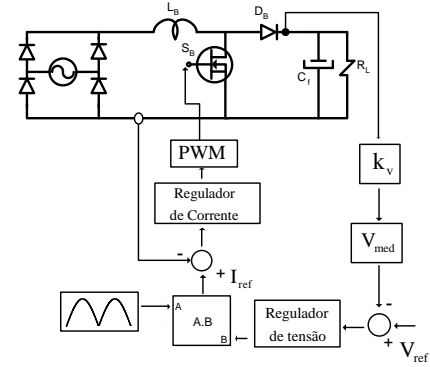


Fig. 4. Diagrama esquemático simplificado do controle por valores médios na forma digital aplicado ao pré-regulador retificador boost.

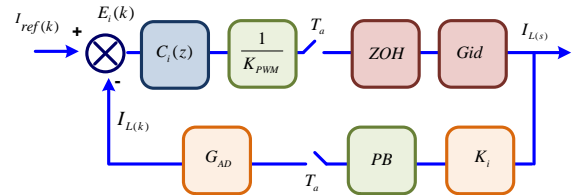


Fig. 5. Malha de Controle de Corrente.

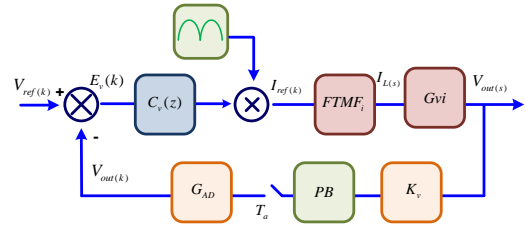


Fig. 6. Malha de Controle de Tensão.

As funções de transferência para o adequado projeto dos controladores do pré-regulador retificador boost foram obtidas usando a modelação por equações de estados média, escolhendo como variáveis de estado a corrente no indutor boost (I_i) e a tensão no capacitor de saída (V_o). A matriz de espaços de estados média foi obtida a partir da ponderação das matrizes de espaços de estados para cada etapa de funcionamento, utilizando-se como peso a razão cíclica (d).

A matriz de espaços de estados média é apresentada em (1).

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_o \\ \dot{I}_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & (1-d) \\ -(1-d) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_o \\ I_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C} \\ \frac{1}{L} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_i \\ V_o/R_L \end{bmatrix} \quad (1)$$

Considerando o efeito da variável de controle d , as equações de espaços de estados médias são descritas conforme (2), também em função da tensão de entrada (V_{in}).

$$\dot{x} = F(x, V_{in}, d) \quad (2)$$

Assim, o modelo à pequenos sinais se resume a (3).

$$\begin{aligned} \hat{\dot{x}} &= A' \hat{x} + B' \hat{v}_{in} + K \hat{d} \\ A' &= \frac{\partial F}{\partial x}, B' = \frac{\partial F}{\partial v_{in}}, K = \frac{\partial F}{\partial d} \end{aligned} \quad (3)$$

Aplicando as devidas transformadas de Laplace, considerando variações a pequenos sinais nulas na tensão de entrada, a função de transferência da variável de controle em função da razão cíclica é expressa por (4) [17].

$$\frac{\hat{x}}{\hat{d}} = (sI - A')^{-1} K \quad (4)$$

Desta forma, são obtidas as funções de transferência $G_{id}(s)$, que representa as variações de pequenos sinais na corrente do indutor quando da presença de variações de pequenos sinais na razão cíclica, e a função de transferência $G_{vi}(s)$, que representa as variações de pequenos sinais na tensão de saída pelas variações de pequenos sinais na corrente do indutor, que estão representadas em (5) e (6), respectivamente.

$$G_{id}(s) = \frac{2V_{out}}{R_L(1-D)^2} \left[\frac{1 + sC_f \left(\frac{R_L}{2} \right)}{1 + s \left[\frac{L_\beta}{R_L(1-D)^2} \right] + s^2 \frac{L_\beta C_f}{(1-D)^2}} \right] \quad (5)$$

$$G_{vi}(s) = (1-D)R_L \left[\frac{1}{1 + sC_f R_L} \right] \quad (6)$$

O projeto dos compensadores, tanto da malha de controle de tensão, quanto da malha de controle de corrente, foram realizados diretamente no plano discreto, usando a ferramenta no domínio da frequência, lançando mão dos diagramas de bode de módulo e de fase, considerando-se a aplicação da transformada w [18]. A vantagem do uso da transformada w é que se eliminam os problemas apresentados pelas técnicas de aproximação e se minimizam as taxas de amostragem necessárias, otimizando-se o projeto dos controladores digitais.

Os compensadores escolhidos para as malhas de controle de corrente e de tensão são compensadores PI.

Para a malha de controle de corrente apresentam-se os diagramas de bode do sistema compensado, módulo e fase, Figuras 7 e 8, respectivamente, onde o sistema apresenta frequência de cruzamento de ganho em torno de 5kHz e margem de fase de 56° , o que torna o sistema rápido e estável.

O compensador obtido para a malha de corrente está apresentado em (7), e, sua respectiva equação à diferenças, obtida via anti-transformada está apresentada em (8).

$$PI_{corrente}(w) = 1,445 \frac{(w + 3142,6)}{w} \quad (7)$$

$$y(k) = y(k-1) + 1,49u(k) - 1,40u(k-1) \quad (8)$$

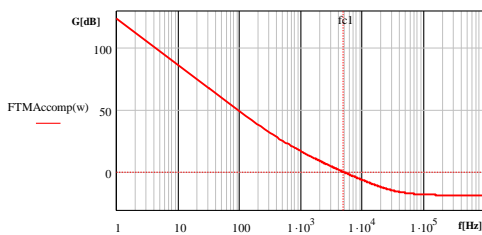


Fig. 7. Diagrama de bode do módulo do sistema compensado no plano w , malha de corrente.

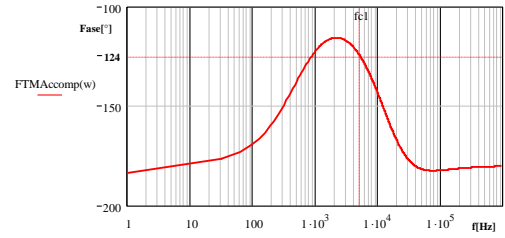


Fig. 8. Diagrama de bode da fase do sistema compensado no plano w , malha de corrente.

Para a malha de controle de tensão, são apresentados os diagramas de bode de módulo e de fase do sistema compensado, Figuras 9 e 10, respectivamente, onde o sistema compensado apresenta frequência de cruzamento em 10Hz e margem de fase de 94° , o que torna o sistema lento e estável.

O compensador obtido no plano w é apresentado em (9) e a correspondente equação à diferenças, obtida via anti-transformada, está representada em (10).

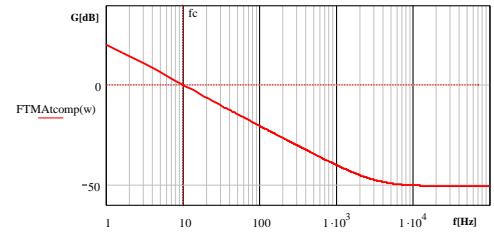


Fig. 9. Diagrama de bode do módulo do sistema compensado no plano w , malha de tensão.

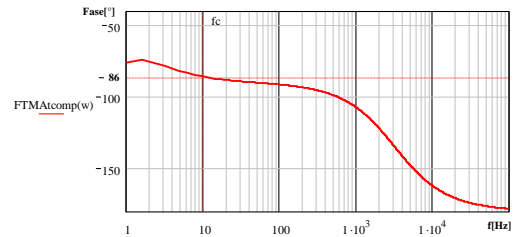


Fig. 10. Diagrama de bode da fase do sistema compensado no plano w , malha de tensão.

$$PI_{tensão}(w) = 6,135 \frac{(w + 6,283)}{w} \quad (9)$$

$$y(k) = y(k-1) + 6,14(k) - 6,143u(k-1) \quad (10)$$

B. Construção da Lógica de Controle em VHDL para o Estágio Retificador Boost

A lógica de controle foi construída utilizando-se a linguagem de descrição de hardware VHDL em conjunto com os núcleos parametrizáveis de registradores e somadores da biblioteca *SystemGenerator*. Criou-se sub-blocos para realizar as aquisições da corrente no indutor, da tensão de saída, para gerar a senóide interna e sincronizá-la com a rede, para geração dos pulsos PWM e para as proteções. Além disto, os filtros e compensadores foram implementados através da representação direta de sua equação à diferenças, usando aritmética de ponto fixo, através dos núcleos parametrizáveis de registradores, somadores e multiplicadores. Estes sub-blocos foram interconectados através de uma entidade para compor toda a estratégia de controle. O FPGA utilizado foi um FPGA XC3S1000

Spartan 3, onde a lógica desenvolvida ocupou 23% da pastilha, com um atraso máximo de propagação de 40,2 nanosegundos.

C. Controle do Reator Eletrônico Utilizando o Microcontrolador Atmega8

Foi utilizado o microcontrolador Atmega8, operando com *clock* interno em 8MHz, o qual possui características de I/O TTL, canais de saída PWM e conversores AD multiplexados. Este dispositivo permite que, após configurada uma das saídas PWM para a liberação dos pulsos, na frequência desejada para os interruptores controlados do estágio inversor, o microcontrolador prossiga executando outras rotinas, operando com eventos concorrentes. Por possuir canais de saída com conversores AD internos, há a possibilidade da utilização de sensores de luminosidade, tornando possível adquirir a luminosidade do ambiente e adequar a potência processada pela lâmpada fluorescente. Outra ferramenta também muito importante presente neste dispositivo é o USART (*Universal Synchronous/Asynchronous Receiver/Transmitter*). Este componente interno permite converter um dado serial para paralelo ou vice-versa, o que torna possível a interpretação e o processamento do dado serial enviado pelo microcomputador.

O processo de controle para o sistema de gerenciamento automático opera no modo mestre-escravo, sendo o microcomputador responsável por envio de ordens ao microcontrolador, o qual executará as devidas ações a ele desempenhadas, como por exemplo, acionamentos, desligamentos, controle de luminosidade e leitura do sensor de luminosidade e presença. Foi programado um protocolo de partida com pré-aquecimento adequado dos filamentos dos eletrodos das lâmpadas fluorescentes, para reduzir os desgastes provocados durante a ignição destas, maximizando a vida útil do sistema de iluminação multi-lâmpadas [15].

A Figura 11 ilustra a interação existente entre o sistema de gerenciamento automático e o microcontrolador.

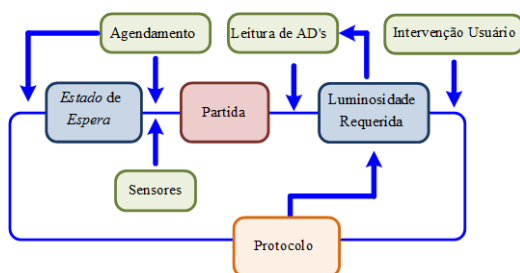


Fig. 11. Diagrama de blocos representativo da atuação do sistema de gerenciamento.

D. Protocolo de Comunicação e Interfaceamento entre Microcomputador e Microcontrolador

Foi desenvolvido um protocolo de comunicação que utiliza o canal *full-duplex*, transmissão de dados serial no modo assíncrono de 8 bits, 2400 bits por segundo, com 1 *Stop Bit* e sem paridade. Este tipo de canal de comunicação permite que mensagens sejam trocadas simultaneamente em ambas as direções. Desta maneira, o sistema pode estar recebendo um dado de um determinado reator e enviando

outro dado para outro reator eletrônico, simultaneamente [19].

Na transmissão assíncrona, o barramento de dados não é acompanhado pelo barramento de *clock*, que tem a função de sincronizar a recepção de um *bit* para outro. Assim, cada *byte* transmitido é acompanhado de um *Start Bit*, que sinaliza o início da transmissão de dados, e um ou mais *Stop Bits*, que sinalizam o fim da palavra transmitida. Diferentemente da transmissão síncrona, o primeiro *bit* enviado é o LSB (*Least Significant Bit*), o *bit* menos significativo.

O padrão de comunicação RS232 e RS485 ainda continuarão sendo mais populares para uso em aplicativos com a finalidade de monitorar e controlar sistemas, como por exemplo, em centros de controle de motores e comando de inversores de frequência. A utilização do padrão RS485 juntamente com o RS232 deve-se à desvantagem do padrão RS232 de possuir limitação com relação à distância entre dispositivos e não possibilitar comunicação *point to point*. Utilizando o padrão RS485 é possível prover uma comunicação entre vários dispositivos sem se preocupar com a distância entre eles, tendo uma distância total de cabeamento com limite de até 1200m em baixas velocidades, utilizando somente cabos não blindados. Estas vantagens apresentadas pelo padrão RS485 devem-se ao modo de operação diferencial, minimizando efeitos de terra flutuante. Para o interfaceamento destes padrões de comunicação foi utilizado o MAX232, que converte de RS232 para TTL e, em seguida, de TTL para RS485 utilizando o SN75179. Em cada reator é convertido o sinal de RS485 para TTL, o qual é o padrão de comunicação dos microcontroladores. O interfaceamento do sistema completo pode ser visualizado nas Figuras 12 e 13.

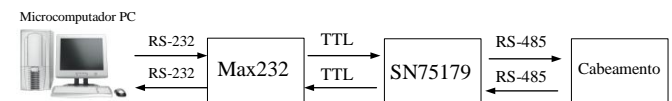


Fig. 12. Interfaceamento do sistema até o cabeamento.

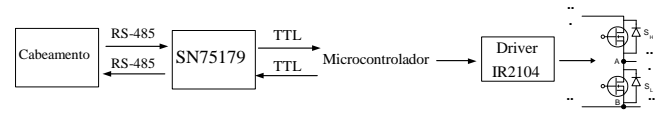


Fig. 13. Interfaceamento do cabeamento até cada estágio inversor.

O protocolo de comunicação utilizado foi criado para fazer o endereçamento e o controle dos acionamentos realizados pelo aplicativo. Existem outros protocolos de comunicação vigentes e alguns até normatizados. Um protocolo exclusivo para o controle de sistemas de iluminação artificial normatizado é denominado DALI (*Digital Addressable Lighting Interface*), regido pela norma IEC 60929, o qual já está sendo adotado como padrão por grandes fabricantes de reatores eletrônicos, como a *OSRAM*, a *Philips Lighting* e a *International Rectifier*, por exemplo. No entanto, este protocolo permite acoplar ao sistema somente 64 dispositivos, com limite de velocidade de transferência de dados de 1200 bits por segundo, além de utilizar cinco condutores para se comunicar [12]. Em contrapartida, o protocolo desenvolvido neste trabalho possui vantagens de não possuir um número limite de dispositivos acoplados ao sistema, além de prover a comunicação

utilizando somente três condutores, minimizando custos e problemas com interferências eletromagnéticas, e ainda, se adapta a qualquer taxa de transferência, possibilitando a expansão do protocolo para a utilização da porta USB, a qual opera com elevadas taxas de transferências de dados.

Os dados de comunicação trafegados pelo canal de comunicação estão codificados em ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*) e são interpretados pelo microcomputador e pelo microcontrolador. Cada ordem enviada pelo microcomputador ao microcontrolador possui 2 bytes: o primeiro é o endereçamento do reator eletrônico e o segundo é a ordem de mudança do estado. Caso o microcontrolador não possua o endereçamento correspondente ao dado, ele permanece no estado anterior à recepção do dado. Para a leitura do sensor de luminosidade, o microcomputador envia somente um byte designado pelo protocolo a cada intervalo de tempo definido e os microcontroladores executam a leitura dos conversores AD's para que seja readequado o nível de luminosidade, caso necessário, desde que o reator eletrônico não esteja sofrendo alguma intervenção do sistema de gerenciamento.

A interface gráfica e remota desenvolvida em Visual Basic 6.0 tem o intuito de promover uma interface homem-máquina amigável ao usuário, permitindo que qualquer usuário leigo possa operar o sistema. O software permite a intervenção ou monitoramento de cada reator, executar os acionamentos e/ou variar as luminosidades. A partir dele, pode-se ter acesso ao agendamento de acionamentos em função do dia da semana e do expediente de trabalho do ambiente, programando acionamentos e desligamentos de acordo com o horário e necessidade.

Apesar de se ter vários dispositivos e muitas variáveis de controle, o software utiliza formulários-mestres, sendo a acumulação de dados interna realizada com a utilização de matrizes. Assim, simplificam-se as tarefas indexando-se linhas e colunas das matrizes para cada tarefa desejada.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os resultados apresentados correspondem a um conjunto de 14 reatores eletrônicos, com duas lâmpadas fluorescentes F32T8 para cada reator. Na Figura 14 apresentam-se as formas de onda de tensão e de corrente na entrada do pré-regulador retificador boost, para carga nominal, onde se verifica a excelente qualidade da forma de onda de corrente drenada do sistema de alimentação, apresentando uma taxa de distorção harmônica de apenas 3,5% e fator de potência FP de 0,997.

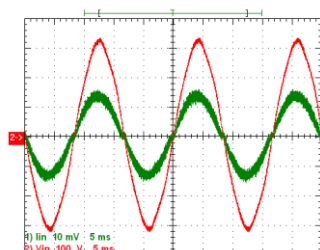


Fig. 14. Formas de onda da corrente (em verde) e da tensão (em vermelho) de entrada; (100V/div; 5A/div; 5ms/div).

Para verificar a qualidade dos compensadores projetados, um degrau de meia carga para carga nominal foi aplicado no sistema iluminação, onde na Figura 15 pode-se observar que a forma de onda de corrente da entrada sempre mantém o formato senoidal e se estabiliza no valor de regime em menos de 2 ciclos de rede.

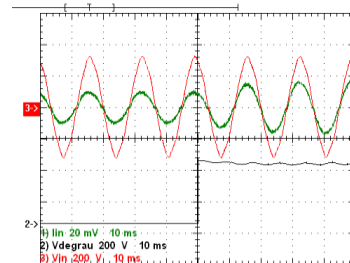


Fig. 15. Detalhe do degrau de meia carga para nominal. (200V/div; 10A/div; 10ms/div).

Na Figura 16 é apresentada a tela inicial do programa para intervenção no sistema de iluminação via microcomputador, onde o usuário do sistema pode optar pela utilização em modo "manual" ou "automático".



Fig. 16. Formulário que possibilita a alteração do modo de operação do sistema de iluminação.

Durante a utilização em modo "manual" o usuário pode atuar em cada calha separadamente, de acordo com o formulário apresentado na Figura 17.



Fig. 17. Seleção da calha onde o usuário pode atuar de forma remota.

Após a seleção da calha, um novo formulário é executado, conforme Figura 18, o qual permite que o usuário tenha acessos a acionamentos, monitoração da porcentagem da potência processada na lâmpada em relação à nominal, permitindo assim que o usuário varie a luminosidade de cada conjunto de lâmpadas, além de permitir o acesso aos agendamentos de acionamentos, em função do dia da semana, e, ajuste do nível de luminosidade pelo usuário, conforme mostra a Figura 19.



Fig. 18. Acionamentos e Monitoramentos da "Calha 1".

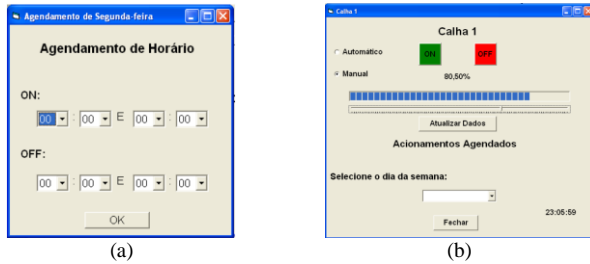


Fig. 19. Acionamentos conforme: (a) dia da semana e (b) ajuste do nível de luminosidade pelo usuário.

Durante o processo de partida cada reator eletrônico pré-aquece os filamentos dos eletrodos das lâmpadas fluorescentes, maximizando a vida útil das mesmas, de acordo com o protocolo pré-programado utilizando-se da metodologia proposta em [15]. Para o processo de pré-aquecimento do conjunto de lâmpadas idênticas utilizadas, foi injetado um valor eficaz constante de corrente de 500 mA nos filamentos dos eletrodos durante 1,42 segundos, como pode ser observado na Figura 20.

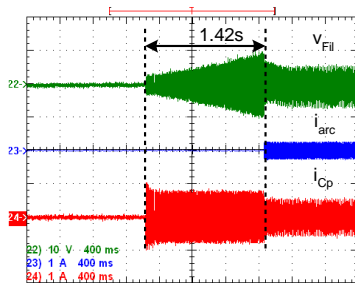


Fig. 20. Tensão nos filamentos dos eletrodos (em verde), corrente na coluna de gás da lâmpada (em azul) e corrente no capacitor Cp (em vermelho).

Em regime permanente, a lâmpada fluorescente operará na sua potência nominal até que o microcomputador ordene que o microcontrolador faça a leitura do conversor AD, onde está acoplado o sensor de luminosidade, habilitando a necessária alteração do nível de luminosidade, ou que ocorra alguma intervenção pelo usuário no sistema de gerenciamento.

Observa-se que todas as lâmpadas são sempre acionadas para a condição nominal, permitindo-se o controle de luminosidade somente após a execução do protocolo completo de ignição. Adicionalmente, pode-se ainda ajustar o protocolo de pré-aquecimento de acordo com a alteração do tipo/fabricante das lâmpadas.

A Figura 21 apresenta as formas de onda da tensão nos filamentos dos eletrodos, cujo valor eficaz está de acordo com as normas ANSI (4,29 V) [16], a corrente de entrada do

estágio inversor e a corrente de entrada do filtro do estágio inversor, quando um reator eletrônico opera na potência nominal e frequência de comutação dos interruptores em 50kHz.

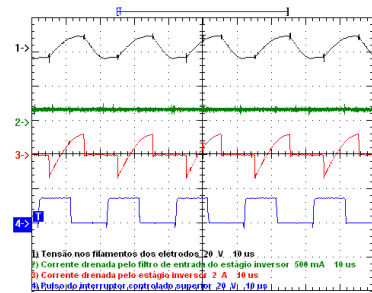


Fig. 21. Tensão nos filamentos dos eletrodos (em preto); Corrente drenada pelo filtro de entrada do reator eletrônico (em verde); Corrente drenada pelo estágio inversor (em vermelho); Pulso de acionamento do interruptor controlado superior/inversor (em azul).

A partir da atuação do usuário no sistema de gerenciamento ou pelo nível de luminosidade ambiente sensorado, o reator passará a operar em outro ponto de operação, como por exemplo, a 50% da potência nominal. Assim, a Figura 22 apresenta as formas de onda de um reator eletrônico para tal potência e frequência de comutação dos interruptores em 53,20kHz.

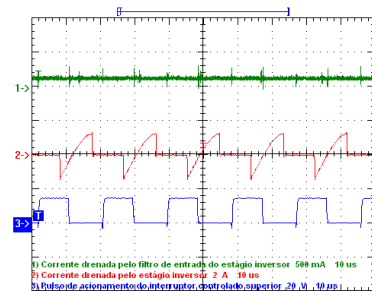


Fig. 22. Corrente drenada pelo filtro de entrada do reator eletrônico (em verde); Corrente drenada pelo estágio inversor (em vermelho); Pulso de acionamento do interruptor controlado superior/inversor (em azul).

IV. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um sistema de iluminação fluorescente multi-lâmpadas possibilitando a redução das distorções harmônicas da corrente drenada do sistema de alimentação, utilizando o controle digital por valores médios da corrente de entrada, controlado por um dispositivo FPGA. Além disso, apresenta controle pré-programado do pré-aquecimento dos eletrodos, controle de luminosidade individual de cada conjunto de duas lâmpadas fluorescentes, monitoramento e gerenciamento remoto e sensores de luminosidade e de presença, permitindo um controle eficiente do sistema de iluminação, maior vida útil e otimização do consumo de energia elétrica.

O sistema utiliza microcontroladores Atmega8 de baixo custo e um aplicativo em plataforma amigável ao usuário, onde é possível gerenciar e supervisionar o sistema de iluminação multi-lâmpadas fluorescentes, executar acionamentos remotos e agendamentos em função do expediente de trabalho do ambiente. Com o auxílio de sensores de luminosidade é possível adaptar a luminosidade à

necessidade do local, podendo haver pleno aproveitamento da luz natural, o que torna em algumas ocasiões a iluminação artificial complementar à natural, reduzindo o consumo de energia elétrica destinado à iluminação, podendo substituir os atuais sistemas de iluminação convencionais. Portanto, o sistema proposto se constitui como uma rede eficiente para o controle da iluminação fluorescente, podendo ainda evoluir com técnicas de inteligência artificial para a otimização do controle de luminosidade, da eficiência e do gerenciamento do sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP e ao CNPq pelo suporte financeiro concedido para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Plano Nacional de Energia 2030 -Ministério de Minas e Energia, 2007. Disponível em: <www.mme.gov.br/mme/menu>. Acesso em: 19 Julho 2010.
- [2] Lighting Controls - Energy Design Resources. Disponível em: <www.energydesign-resources.com>. Acesso em: 05 Abril 2010.
- [3] J. Spangler, B. Hussain and A. K. Behera. "Electronic Fluorescent Ballast using Power Factor Techniques for Loads greater than 300 Watts". In: *IEEE APEC*, pp.393-399, 1991.
- [4] J. A. Alves, A. J. Perin and I. Barbi. "An Electronic Ballast with High Power Factor for Compact Fluorescent Lamps". In: *IEEE IAS*, pp. 2129-2135, 1996.
- [5] M. A. C6, D. S. L. Simonetti and J. L. F. Vieira. "High-Power-Factor Electronic Ballast Operating in Critical Conduction Mode". *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 13, no. 1, pp. 93-101, 1998.
- [6] F. Tao, Q. Zhao, F. C. Lee and N. Onishi. "Single-Stage Power-Factor-Correction Electronic Ballast with a Wide Continuous Dimming Control for Fluorescent Lamps". In: *IEEE PESC*, 2001, CD-ROM.
- [7] C. S. Lin and C. L. Chen. "A Novel Single-Stage Push-Pull Electronic Ballast with High Input Power Factor". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 48, n. 4, pp. 770-776, 2001.
- [8] M. A. Dalla Costa, M. L. Landerdahl and R. N. Prado. "Independent Multi-Lamp Electronic Ballast". In: *V INDUSCON*, 2002, CD-ROM.
- [9] F. T. Wakabayashi and C. A. Canesin. "A High Efficiency HPF-ZCS-PWM SEPIC for Electronic Ballast with Multiple Tubular Fluorescent Lamps". In: *IEEE APEC*, 2002, CD-ROM.
- [10] F. T. Wakabayashi, R. A. N. Oliveira and C. A. Canesin. "A. High Power Factor Dimmable Electronic Ballast for Multiple Fluorescent Lamps". In: *IEEE ISIE*, 2004, CD-ROM.
- [11] M. A. G Brito, C. S. Ferreira e C. A. Canesin. "Pré-Regulador Retificador Boost com Controle Digital por Valores Médios, utilizando dispositivo FPGA e VHDL". In: *VII Induscon*, 2008, CD-ROM.
- [12] C. Contenti, T. Ribarich and R. Fosler. "Digital Dimming DALI Ballast for 32W/T8 110V Input". *International Rectifier -Reference Design*, pp. 1-14, 2007.
- [13] M. C. Cosby and R. M. Nelms. "A Resonant Inverter for Electronic Ballast Applications". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 41, no. 4, pp. 418-425, 1994.
- [14] F. T. Wakabayashi and C. A. Canesin. "An Improved Design Procedure for LCC Resonant Filter of Dimmable Electronic

Ballasts for Fluorescent Lamps, Based on Lamp Model". *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 20, no 5, pp. 1186-1196, 2005.

- [15] F. T. Wakabayashi, M. A. G Brito and C. S. Ferreira. "Setting the Preheating and Steady-State Operation of Electronic Ballasts, Considering Electrodes of Hot-Cathode Fluorescent Lamps". *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 22, no. 3, pp. 899-911, 2007.
- [16] American National Standard for Ballasts for Fluorescent Lamps: Specifications, ANSI C82.1-1985 and C82.11-1993.
- [17] R. W. Erickson and D. Maksimović. *Fundamentals of Power Electronics*. 2. ed., Kluwer Academic Publisher, USA, 1995.
- [18] K. Ogata. *Engenharia de Controle Moderno*, 3 ed., LTC, Rio de Janeiro, 1998.
- [19] J. Axelson. *Serial Port Complete – Programming and Circuits for RS-232 and RS-485 Links and Networks*, 1 ed., Lakeview Research, USA, 1999.

DADOS BIOGRÁFICOS

Moacyr Aureliano Gomes de Brito, nascido em Andradina (SP), em 1982. É engenheiro eletricitista (2005) e mestre (2008) pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente, está desenvolvendo projeto de pesquisa de Doutorado em Engenharia Elétrica pela UNESP-FE/IS, desenvolvendo seu trabalho dentro das dependências do Laboratório de Eletrônica de Potência (LEP), desta instituição. Suas áreas de interesse são: reatores eletrônicos para lâmpadas fluorescentes, controle de luminosidade, técnicas de correção ativa do fator de potência, controle digital e conversores CC-CC, uso de DSPs e FPGAs, inversores isolados e em conexão com a rede de distribuição de energia elétrica.

Castellane Silva Ferreira, nascido em Conceição das Alagoas (MG), em 1983. É engenheiro eletricitista (2005) e mestre (2008) pela Universidade Estadual Paulista – UNESP-FE/IS, em Ilha Solteira (SP). Atualmente é engenheiro de aplicações da Varix. Suas áreas de interesse são: reatores para lâmpadas fluorescentes, controle de luminosidade, controle digital, conversores CC-CC, fontes de alimentação chaveadas e técnicas de correção do fator de potência, uso de microcontroladores e protocolos de comunicação.

Carlos Alberto Canesin, nascido em Lavínia (SP), em 1961, é engenheiro eletricitista (1984) pela Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (UNESP-FE/IS, 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 titular do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da UNESP-FE/IS. Foi editor geral da Revista Eletrônica de Potência (gestão 2003-2004), é editor associado da *IEEE Transactions on Power Electronics* e ex-presidente da SOBRAEP – Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência (gestão 11/2004 – 10/2006). Suas áreas de interesse incluem técnicas de comutação não-dissipativa, conversores CC-CC, retificadores e inversores, fontes de alimentação chaveadas, reatores para iluminação e técnicas de correção ativa do fator de potência.