

# PROPOSTA DE CONTROLE PRÉ-PROGRAMADO APLICADO AO CONVERSOR BOOST PFC SEM SENSOR DE CORRENTE

Antonio P. Finazzi<sup>1</sup>, Luiz C. G. Freitas<sup>2</sup>, João B. Vieira Jr.<sup>2</sup>, Ernane A. A. Coelho<sup>2</sup> e Luiz C. de Freitas<sup>2</sup>

1) Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, MT

2) NUPEP - Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência - Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU- Uberlândia, MG  
e-mail: [freitas@ufu.br](mailto:freitas@ufu.br), [apfinazzi@cpd.ufmt.br](mailto:apfinazzi@cpd.ufmt.br)

**Resumo** – O desenvolvimento de conversores pré-reguladores para realização da correção do fator de potência de entrada e controle da tensão no barramento CC dos mais diversos tipos de equipamentos eletrônicos, por exemplo, UPS, Inversores de Tensão e Fontes Chaveadas, tem atraído grande interesse por parte da comunidade científica que busca redução de custos, alto rendimento e confiabilidade operacional. Dentro deste contexto, este trabalho apresenta a proposta de uma nova concepção de controle micro-processado para imposição de corrente senoidal na rede CA de alimentação de um conversor Boost atuando como pré-regulador sem a utilização de sensor de corrente, denominado neste trabalho de conversor Boost-PFC-SSC. O método proposto consiste na obtenção experimental de uma tabela de seqüências de pulsos de gatilho correspondentes a um ciclo da tensão CA de entrada, para cada condição de carga ensaiada. Esta tabela de seqüências de pulsos é gravada em um microprocessador que reproduz os sinais de gatilho e assume o acionamento do conversor Boost, dispensando, portanto, o uso de um sensor de corrente. No sentido de comprovar e validar a proposta, um protótipo de 600W foi submetido à técnica de controle proposta e os resultados experimentais são apresentados.

**Palavras-Chave** – Correção do fator de potência, Conversor Boost, Controle digital, Sem sensor de corrente.

## PROPOSAL FOR PREPROGRAMMED CONTROL APPLIED TO A CURRENT-SENSORLESS PFC BOOST CONVERTER

**Abstract** – The development of front-end converters for power factor correction and DC link voltage control of electronics converters such as, UPS, Inverters, and Switched Power Supplies, has been attracting great interest from the scientific community that works toward the achievements of cost reduction, high efficiency, and reliability. In this context, this paper proposes an innovative micro processed control technique for sinusoidal input line current imposition of front-end sensorless Boost converters, named in this work as Boost-PFC-SSC. The proposed method is based on experimental acquisition of sequences of gate-to-source signals for different load conditions. These signals

correspond to a complete cycle of the AC input voltage and are recorded in the microcontroller memory in order to be reproduced when used in a Boost converter without current sensor. Aiming to prove the proposed digital concept, a 600W Boost-PFC-CSL was built and analyzed in laboratory and the main experimental results are presented in this paper.

**Keywords** – Boost converter, Digital Control, Power factor correction, Sensorless.

### I. INTRODUÇÃO

O conversor Boost, operando com fator de potência unitário (PFC), tem sido a principal opção da indústria em aplicações como conversor CA-CC pré-regulador [1-3].

Sabe-se que a forma mais comum de controle do pré-regulador Boost PFC, é realizada pela imposição de uma corrente senoidal retificada através do indutor de filtro do conversor. Para realizar esta tarefa, é necessário que a corrente do indutor de filtro siga uma corrente de referência ( $I_{ref}$ ), cuja amplitude e forma são o resultado do produto de um sinal de tensão CC de controle ( $V_c$ ) por um sinal de tensão senoidal retificada de amplitude fixa e conhecida ( $V_{sen}$ ). O sinal de tensão de controle ( $V_c$ ) é obtido pela integral do sinal de erro entre as tensões de referência ( $V_{oref}$ ) e a o sinal de tensão de saída obtido por realimentação ( $V_{oreal}$ ). A corrente de referência, obtida conforme procedimento acima, é comparada com a corrente do indutor de filtro ( $i_L$ ), amostrada por um sensor de corrente, produzindo os pulsos que acionam o interruptor do conversor Boost PFC. Observa-se que é indispensável o sensor de corrente na implementação desta estratégia de controle.

Esta tem sido a metodologia de controle mais utilizada pelos pesquisadores que atuam no estudo e implementação de conversores Boost CA-CC pré-reguladores operando com fator de potência unitário, conforme pode se verificar em [1-2] e [4-6]. Da mesma forma, tem sido indispensável o uso de sensor de corrente na realização do controle digital, aplicado ao conversor Boost PFC, utilizando-se FGA, DSP ou outro microprocessador [7-10].

No sentido de oferecer uma alternativa de controle para a operação do conversor Boost PFC atuando como pré-regulador, bem como estimular novas investigações, este trabalho propõe a aplicação de uma nova concepção de controle micro-processado e pré-programável, capaz de realizar a tarefa de impor a corrente senoidal CA de entrada, porém Sem a necessidade do uso de Sensor de Corrente (Boost PFC-SSC).

Artigo submetido em 15/10/2009. Revisões em 13/03/2010 e 19/06/2010. Aceito para publicação em 20/06/2010 por recomendação do editor F. L. M. Antunes.

A técnica de controle proposta destaca-se pela sua generalidade, sendo sua aplicação adequada ao controle de qualquer sistema periódico para o qual se deseja impor a forma, amplitude e a fase de uma dada variável periódica. A aplicação desta metodologia dispensa o uso de sensores para monitorar a variável a ser imposta uma vez que os sinais de acionamento são obtidos através de um ensaio onde o sistema é acionado sob análise em tempo real, utilizando controle com sensor.

Estas seqüências de acionamento gravadas são disponibilizadas, através do microprocessador, a outro sistema idêntico ao ensaiado. O novo sistema impõe exatamente a mesma amplitude e forma da variável sob controle e supervisão, porém sem a necessidade da utilização do sensor correspondente. Estas seqüências de acionamento também são obtidas através de ensaios virtuais e gravadas no micro-controlador para posterior utilização no controle e operação do sistema. Neste caso, as seqüências de acionamento, são obtidas através da modelagem matemática ou de programas computacionais simuladores tais como, PSPICE, PSIM, MULTISIM, ATP.

Na geração de seqüências de acionamento através de ensaios reais, sensores e comparadores, juntamente com os micro-controladores, gerenciam o funcionamento do sistema buscando o comportamento desejado a cada condição de sua operação. Neste caso, as ações dos comparadores que atuam nas mudanças de acionamento levam em consideração os parâmetros reais dos dispositivos que compõem o sistema.

Uma vez geradas e gravadas as seqüências de acionamento que controlam a operação do sistema, o conteúdo da memória do micro-controlador é copiado para vários outros. Assim, durante o funcionamento de um dado sistema, utilizando as seqüências de acionamento e controle pré-programadas, as mesmas ações serão reproduzidas, porém sem a necessidade da realimentação do sinal referente à variável a ser imposta. Pode-se dizer que o método consiste na ação de um mestre que, em uma única aula prática (ensaio de fábrica), ensina milhares de “aprendizes” (gravação das seqüências de acionamento em microprocessador).

## II TÉCNICA DE CONTROLE PRÉ-PROGRAMÁVEL PROPOSTA

O controle pré-programável proposto, aplicado ao conversor Boost PFC, resulta da sua operação em dois modos: “Modo Programando” e “Modo Programado”. O conversor Boost PFC operando no “Modo Programando” utiliza uma técnica de controle analógico com a qual são obtidos os pulsos de gatilho para o interruptor do conversor. Uma seqüência de pulsos obtida para um ciclo CA da rede de alimentação aciona o conversor e, ao mesmo tempo, é gravada na memória permanente de um microprocessador. Repete-se este procedimento para várias cargas e todas as seqüências de pulsos, gravadas durante a operação do conversor no modo programando, são utilizadas no acionamento do interruptor de outro conversor Boost PFC, idêntico ao submetido ao ensaio, para operar no modo “Programado”. Por outro lado, o conversor Boost PFC operando no modo programado dispensa o uso do sensor de corrente, do integrador de erro e do multiplicador, todos

necessários à operação do conversor no modo “Programando”.

No sentido de facilitar a compreensão da operação do conversor Boost PFC sob a ação desta nova técnica de controle, os dois modos de operação, isto é, Modo Programando e Modo Programado, são descritos e sua implementação é detalhada como segue.

### A. Operação no “Modo Programando”

A Figura 1 ilustra o diagrama esquemático do circuito de potência e de controle do conversor Boost PFC utilizado para operar no “Modo Programando”. Nesta configuração de circuito a corrente CA de entrada é imposta através de um comparador de histerese entre a corrente de referência  $I_{ref}$  e a corrente através do indutor de filtro  $i_L$ . Um protótipo construído segundo o circuito da Figura 1 é chamado Boost PFC Módulo Mestre (Boost PFC-MM).

Como se pode observar pela inspeção da Figura 1, o circuito de controle proposto atua de forma semelhante à maioria daqueles amplamente divulgados em outros trabalhos exceto quanto ao sinal de tensão de gatilho que, antes de ser disponibilizado para comandar o interruptor do conversor, é condicionado pelo micro-controlador, cuja entrada é a porta “B<sub>4</sub>” e a saída para o circuito de gatilho é a porta “B<sub>1</sub>”. Neste modo de operação, para uma dada condição de carga, são obtidos os pulsos “ $V_{comp}$ ”, para comandar o interruptor do conversor, através da comparação entre a corrente de referência  $I_{ref}$  e a corrente do indutor de filtro “ $i_L$ ” obtida por realimentação. Porém, antes de disponibilizar os pulsos para o circuito de gatilho, o micro-controlador lê, condiciona e grava na memória volátil cada pulso gerado durante um ciclo da rede CA de alimentação. Durante a operação do conversor Boost PFC-MM em regime permanente, a cada condição de carga, uma seqüência de pulsos de gatilho “ $V_{comp}$ ” é condicionada e gravada no microprocessador. Para cada seqüência obtida, o operador interrompe a operação do conversor e aciona as teclas que transferem esta seqüência gravada, da memória volátil (pulso a pulso) para a memória permanente. As teclas a serem acionadas pelo operador, para a realização desta tarefa, são apresentadas na Figura 1 e a função de cada uma é descrita a seguir:

Tecla “T<sub>G</sub>”: Coloca nível baixo na saída “B<sub>1</sub>” independente do valor de “ $V_{comp}$ ”, desligando o conversor através da abertura do interruptor “S<sub>C</sub>”;

Tecla “T<sub>inc</sub>”: Incrementa em uma unidade a posição do ponteiro de endereçamento da memória permanente;

Tecla “T<sub>dec</sub>”: Decrementa em uma unidade a posição do ponteiro de endereçamento da memória permanente;

Tecla “T<sub>R</sub>”: Transfere para a memória permanente a última seqüência de pulsos gravada na memória volátil, na página indexada pelo ponteiro de endereçamento da memória permanente, através do fechamento dos interruptores “S<sub>V</sub>” e “S<sub>P</sub>”.

Após a gravação, no sentido de verificar se a seqüência gravada reproduz a operação do modo programando, é reiniciada a operação do conversor Boost PFC-MM, porém

comutando  $T_{modo}$  para a posição “programado” utilizando a seqüência de pulsos obtida no modo “programando.”

Uma vez certificado que esta seqüência de pulsos reproduz a mesma corrente CA de entrada nos dois modos de operação, a tecla “Tmodo” é comutada para a posição “programando”, reiniciando a operação do conversor no “Modo Programando”, para uma nova carga conectada. O procedimento acima é repetido através do condicionamento do sinal “ $V_{comp}$ ” e enviando os devidos sinais para o circuito de gatilho, através da abertura do interruptor “ $S_p$ ” e fechamento dos interruptores “ $S_c$ ” e “ $S_v$ ”, para gravação de nova seqüência de pulsos, compatível com a nova carga ligada. Procedendo do modo descrito para “n” cargas, obtêm-se “n” seqüências de pulsos de gatilho, uma para cada carga ligada, e uma tabela de seqüências de pulsos é gravada.

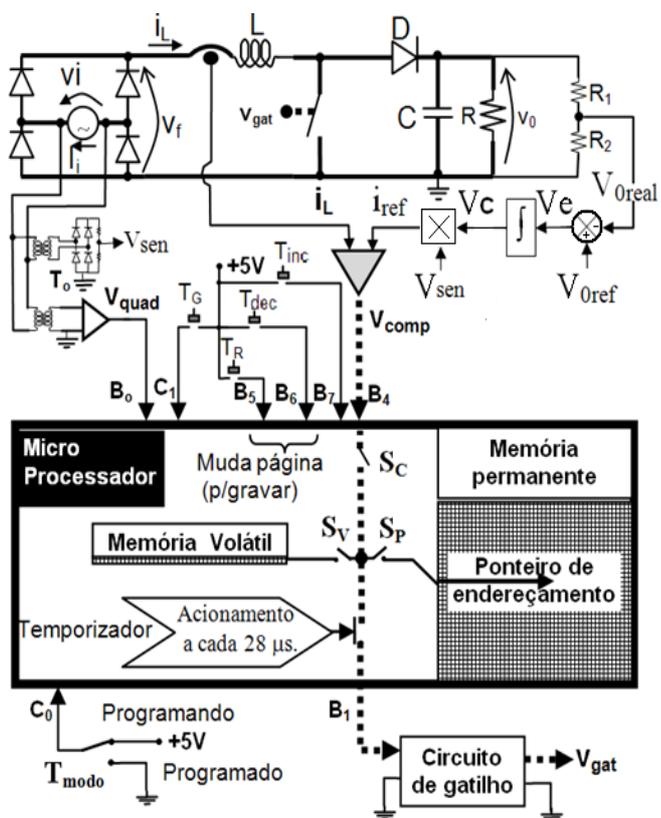


Fig. 1. Diagrama esquemático do conversor Boost PFC operando no "Modo Programando".

Como a comutação é condicionada por um micro-controlador, as larguras de pulso e a forma de onda da corrente, ficam condicionadas às características e limites do micro-controlador.

A Figura 2 ilustra o comportamento típico da corrente através do indutor de filtro ( $i_L$ ) e a correspondente seqüência de pulsos de gatilho obtida após o condicionamento do sinal  $V_{comp}$ , destacando os efeitos da discretização dos pulsos de gatilho endereçados ao interruptor do conversor Boost PFC, tanto no modo “programando” quanto no modo “programado”.

Para garantir o mesmo sinal de gatilho, tanto no “Modo Programando” como no modo “Programado”, os instantes de comutação do sinal para o circuito de gatilho só acontecem em tempos múltiplos de um tempo fixo. Assim, a imposição

da corrente CA de entrada é realizada por histerese com freqüência de chaveamento proporcional à freqüência de trabalho do microprocessador.

No “Modo Programando”, o sinal analógico vindo do comparador ( $V_{comp}$ ) não faz com que o micro-controlador mude de nível no instante em que acontece uma ultrapassagem da corrente “ $i_L$ ” em relação a corrente de referência “ $I_{ref}$ ”, mas sim, em um próximo instante, quando então o temporizador permite que o sinal de saída do micro-controlador comute para o nível alto ou baixo. Este intervalo de tempo mínimo ( $\Delta T_b$ ), é necessário para que o micro-controlador possa realizar as tarefas necessárias entre uma comutação e outra. No caso do PIC 16F876A com oscilador de 20 MHz, utilizando programação em linguagem *assembler* desenvolvida para este trabalho, o intervalo “ $\Delta T_b$ ” foi projetado para 28µs.

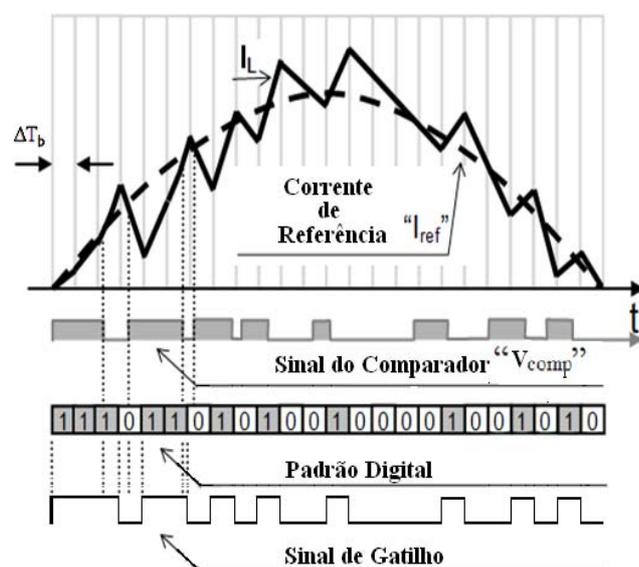


Fig. 2. Formas de onda mostrando os efeitos da discretização dos pulsos de acionamento.

Durante este intervalo de tempo, com o conversor operando no “Modo Programando”, o micro-controlador condiciona os sinais externos,  $V_{quad}$ , que determina o início de um ciclo CA,  $T_G$ , e  $V_{comp}$ , faz comparações, toma decisões, registra valores na memória volátil e permanece em estado de espera até que o temporizador habilite as mudanças de níveis na saída do micro-controlador para o circuito de gatilho. No “Modo Programado”, o micro-controlador realiza as tarefas de condicionar o sinal “ $V_{quad}$ ”, faz comparações, toma decisões, busca valores na memória permanente e permanece em estado de espera, até que o temporizador permita as mudanças de níveis na saída do micro-controlador, para o circuito de gatilho. A Figura 3 apresenta um fluxograma resumido da atuação do micro-controlador.

Vale ressaltar que o conversor Boost PFC “Módulo Mestre” (Boost PFC-MM), que é o módulo base montado na Fábrica, utiliza sensor de corrente para aquisição do sinal proporcional a corrente do indutor de filtro do conversor, programado representa as unidades de conversores Boost a serem produzidas e entregues ao cliente. Este sistema de produção dos conversores a serem entregues ao consumidor

final permite valiosa redução de custos, pois eles não utilizam sensores de corrente bem como circuitos auxiliares sofisticados para viabilizarem sua operação no “Modo Programado”, conforme descrito a seguir.

### B. Operação no “Modo Programado”

No modo “Programado”, apenas com realimentação de tensão, todo o sistema de aquisição e comparação da corrente no indutor de filtro “ $i_L$ ” é dispensado, uma vez que as seqüências de acionamento já se encontram gravadas no micro-controlador obtidas durante a operação do conversor Boost PFC-MM no modo programando. A Figura 4 apresenta o diagrama esquemático de ligação do conversor BOOST PFC bem como o Circuito de Controle, operando no modo Programado, Sem uso de Sensor de Corrente (Boost PFC-SSC).

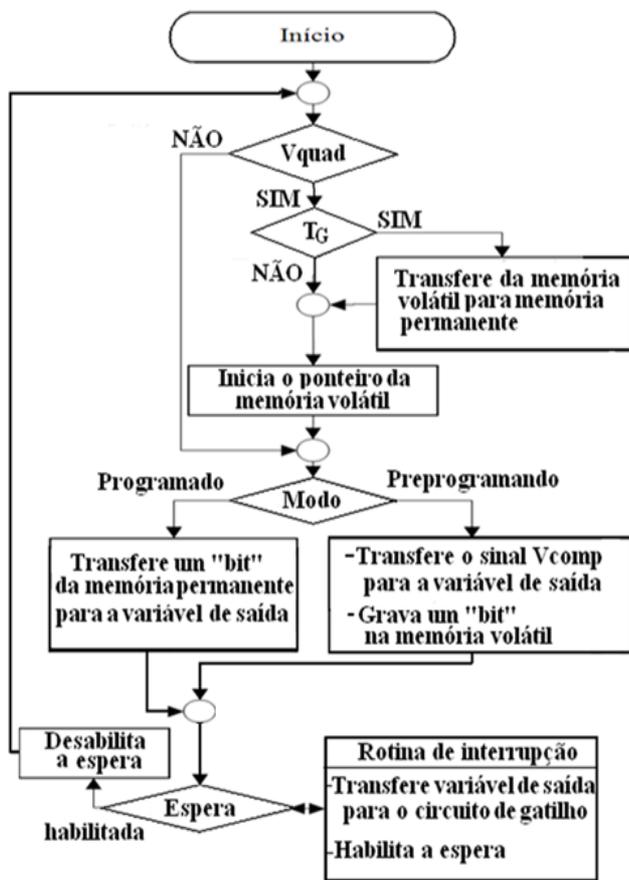


Fig. 3. Fluxograma simplificado da operação do conversor Boost PFC micro-controlado - Modo Programando.

Neste modo de operação, o micro-controlador busca na memória permanente uma das seqüências de acionamento, previamente gravada durante a operação no modo programando. Esta seqüência de acionamento do circuito de gatilho do conversor Boost PFC-SSC produz, para uma determinada condição de carga, um valor de tensão de saída “ $V_o$ ”. Este valor é comparado com valores mínimo “ $V_{min}$ ” e máximo “ $V_{max}$ ” de referência para a faixa de tensão de erro desejada para a tensão de saída. O resultado desta comparação é enviado ao micro-controlador, determinando a nova posição do ponteiro de endereçamento da memória

permanente. Todo novo endereçamento é realizado no sentido de buscar uma seqüência de pulsos de gatilho capaz de reduzir a tensão de erro atual. Esta operação se repete, a cada ciclo completo de rede CA, mudando o endereçamento da memória permanente, tantas vezes quanto necessária até que o erro da tensão de saída não exceda um limite preestabelecido.

Através da programação em ASSEMBLER, garante-se que a variação da posição do ponteiro de endereçamento da memória permanente seja sempre compensatória. Assim, no caso de queda na tensão de saída do conversor, uma nova seqüência de pulsos produz maior nível de corrente CA de entrada incrementando a tensão de saída. Por outro lado, no caso de elevação de tensão de saída, o ponteiro de endereçamento atua no sentido de habilitar uma nova seqüência de pulsos que reduz a corrente CA de entrada e a tensão de saída ( $V_o$ ). Este procedimento operacional garante a busca permanente do posicionamento do ponteiro de endereçamento, sempre no sentido de, em qualquer condição de carga, buscar a posição mais adequada e a correspondente seqüência de pulsos capaz de garantir o menor desvio da tensão de saída em relação à tensão desejada. A Figura 5 apresenta o fluxograma simplificado relativo à operação do conversor Boost PFC-SSC.

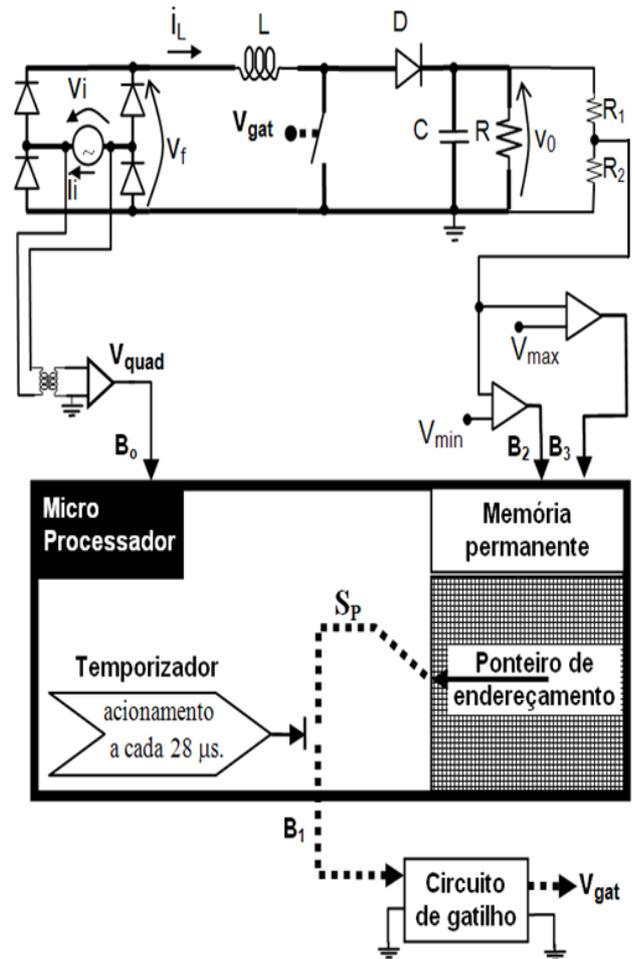


Fig. 4. Diagrama esquemático operacional do conversor Boost-PFC-SSC.

## II. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para verificar e demonstrar a eficácia operacional da técnica de controle digital pré-programado proposta e aplicada a um conversor Boost PFC, dois protótipos cuja especificação é apresentada na Tabela I, foram construídos e colocados em operação com vistas a obter as sequências de pulsos para dez diferentes condições de carga, começando com da 10% da potência nominal até atingir a condição nominal de operação com incrementos de 10%. Neste contexto, um conversor Boost com sensor de corrente por efeito Hall, denominado Conversor Boost Mestre, foi ensaiado em laboratório. As sequências de pulsos obtidas foram gravadas no microcontrolador do Conversor Boost sem sensor de corrente e controle micro processado (Boost-PFC-SSC) construído e analisado experimentalmente.

As principais formas de onda obtidas em laboratório com o Conversor Boost Escravo (operação em modo programado - Boost-PFC-SSC) são apresentadas nas Figuras 6 a 10 e foram obtidas utilizando-se o osciloscópio *TPS 2024 Tektronix®* e uma ponteira de corrente *Tm 502A Tektronix®*.

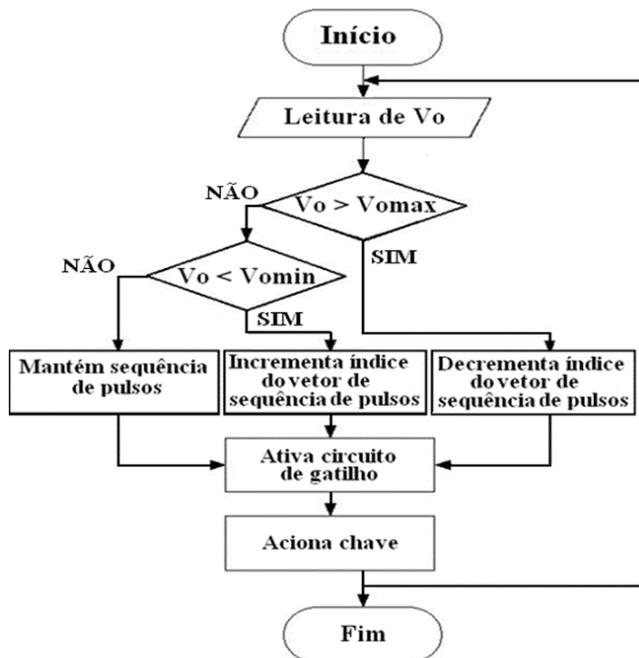


Fig. 5. Fluxograma simplificado da operação do conversor Boost-PFC-SSC - Modo Programado.

**TABELA I**  
**Dados do Protótipo**

Especificações de Projeto
Tensão de Saída, $V_0 = 230$ V
Potência Máxima de Saída, $P_0 = 600$ W
Tensão de entrada, $V_{in}$ (rms) = 127 V
Frequência de chaveamento – máxima, $f = 35.714$ kHz
Conversor Boost-PFC-SSC
Ponte retificadora – Diodos MUR1560
Indutor de filtro, $L_f = 4$ mH
Capacitor de filtro, $C_f = 400$ uF
Interruptor principal, S – IRFP460
Diodos de saída, D – MUR1560
Microcontrolador – PIC16F876A

Vale ressaltar que o objetivo da pesquisa proposta foi de desenvolver um sistema robusto de alta potência, mas, obviamente, este não é ainda um protótipo modelo para produção em escala industrial, portanto, o arranjo de circuito implementado no laboratório não conta com filtro de modo comum nem com filtro de modo diferencial, assim como qualquer outro dispositivo de proteção. Desta forma, os resultados experimentais obtidos apresentam imperfeições compatíveis com o nível de sofisticação do protótipo. Todavia, a eficácia da técnica de controle digital pré-programado proposta foi comprovada, ficando evidenciado seu grande potencial para aplicação em escala comercial.

A Figura 6 ilustra as formas de onda de tensão e corrente e de entrada e tensão de saída para 100%, 50% e 20% de carga, respectivamente. Analisando as formas de ondas apresentadas, nota-se que a imposição de corrente senoidal na rede CA de alimentação foi alcançada sem a utilização de um sensor de corrente conforme esperado. Assim como observado em qualquer conversor Boost PFC, a amplitude da ondulação de tensão no capacitor de saída do conversor depende da condição de carga, ficando evidenciado que, em condição nominal de carga, este se torna mais acentuado e, em condição de baixa carga, a ondulação de tensão observada é bastante reduzida, conforme esperado.

A Figura 7 ilustra as formas de onda de tensão e corrente CA de entrada e de tensão CC de saída, destacando-se os instantes de em que são realizados degraus positivos e negativos de carga. Inicialmente, foi realizado um degrau positivo de carga ficando evidenciado que a corrente se estabiliza após um ciclo completo de 60Hz. Logo em seguida, foi aplicado um degrau negativo de carga provocando um aumento na ondulação de tensão sobre o capacitor de saída e um respectivo aumento do valor de pico da corrente de entrada. Após o degrau positivo de carga, a tensão de saída se estabilizou em 230V médio em aproximadamente 35ms. Desta forma, conforme observado na literatura [6], [15-16], conclui-se que a resposta dinâmica do Conversor Boost-PFC-SSC, quanto ao transitório de tensão no barramento CC e a imposição de corrente senoidal na rede CA de alimentação, é bastante atrativa. O afundamento de tensão durante o transitório foi de 24V, equivalente a algo em torno de 11%, o que pode ser considerando um desempenho bastante satisfatório no contexto de conversores pré-reguladores, uma vez que, geralmente, o estágio de carga, comumente conectado ao barramento CC, suporta afundamentos de tensão dessa magnitude [17-18].

Analogamente, a Figura 8 ilustra a resposta dinâmica do Conversor Boost-PFC-SSC durante a realização de um degrau negativo de carga, ficando evidenciado que a corrente de entrada se estabiliza após 1,5 ciclo completo de 60Hz e que a sobretensão observada ficou em torno de 8V. Após 45ms aproximadamente, a tensão de saída se estabilizou em torno de 230V médio, conforme desejado. Portanto, no que tange à resposta dinâmica do Conversor Boost-PFC-SSC proposto, pode-se concluir que a técnica de controle desenvolvida apresenta um desempenho bastante satisfatório.

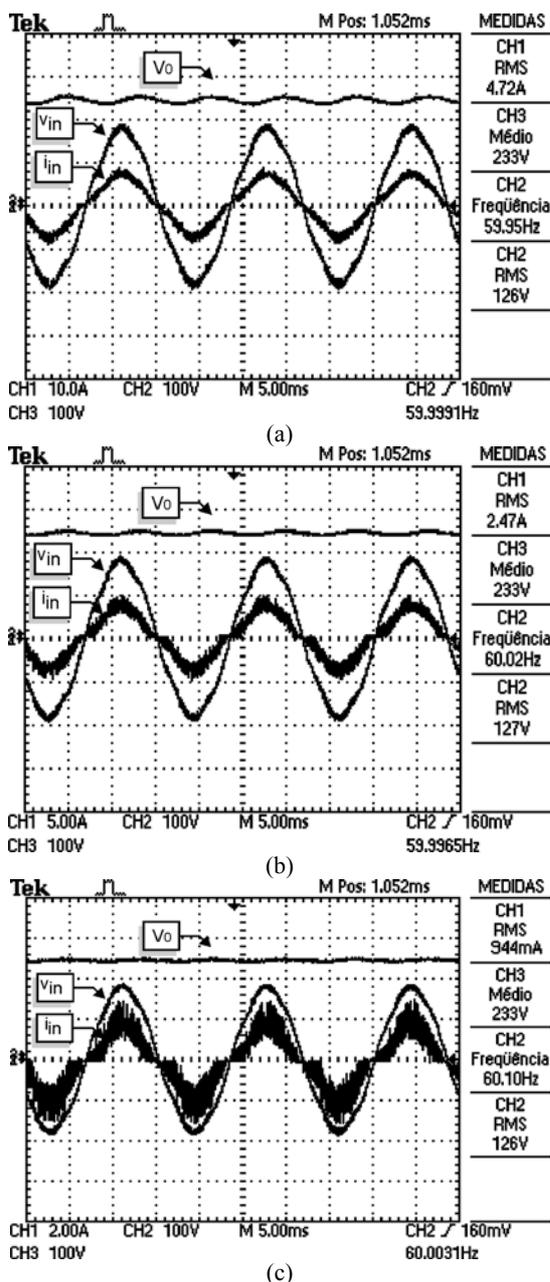


Fig. 6. Formas de onda de tensão e corrente de entrada e tensão de saída (a) plena carga – 600W (b) 50% de carga (c) 20% de carga.

Finalmente, após a realização diversos ensaios, sob diferentes condições de carga, foram traçadas as curvas de rendimento e de distorção harmônica total de corrente, em função da potência total de entrada, conforme apresentado na Figura 9. Os dados de rendimento foram obtidos utilizando-se o equipamento *Yokogawa® wt230 Multimeter* (“true RMS”) e os dados de  $DHT_1$  foram obtidos através da análise espectral da corrente de CA de alimentação realizada utilizando-se o *MATLAB®*. Conforme observado, em condições nominais de operação ( $P_0 = 600W$ ), o rendimento e a  $DHT_1$  alcançados foram 94,5% e 10,6%, respectivamente.

Vale ressaltar que, devido a limitação técnica do microcontrolador utilizado, a frequência média de chaveamento alcançada foi de 20kHz. Como consequência, pode-se destacar as seguintes questões observadas durante a operação do conversor, que contribuíram para o aumento da

$DHT_1$ , principalmente nas situações em que o conversor Boost-PFC-SSC foi colocado em operação com fator de carga inferior a 50%:

- Elevado *ripple* de alta frequência;
- Forte distorção da forma de onda nos instantes de tempo em que a tensão de alimentação passa por zero.

Por outro lado, conforme observado na Figura 10, apesar do alto valor de  $DHT_1$  alcançado em condições nominais de operação, a análise do espectro harmônico da corrente de alimentação, em comparação com os limites individuais de impostos pela norma IEC61000-3-2, demonstra que os resultados alcançados são aceitáveis, uma vez que apenas a 25ª harmônica de corrente ficou acima do limite imposto pela referida norma

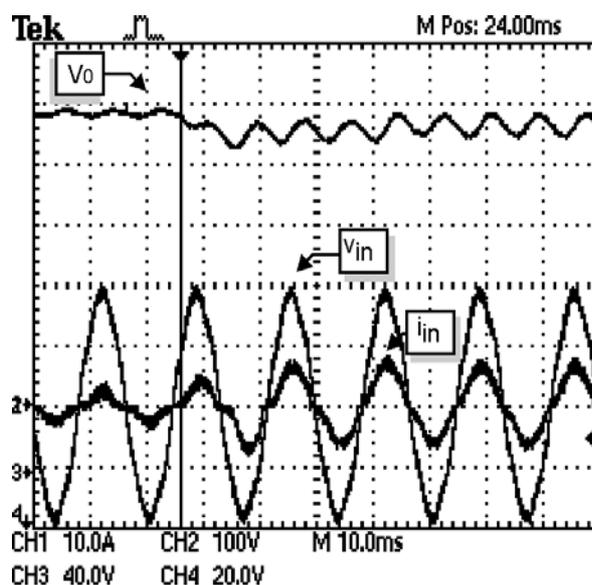


Fig. 7. Formas de onda de tensão e corrente de entrada e tensão de saída durante a realização de um degrau positivo de carga – 120W para 600W.

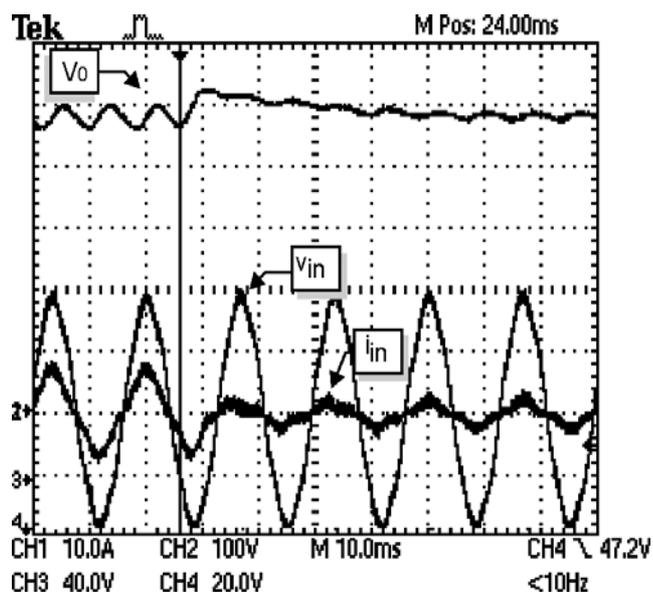
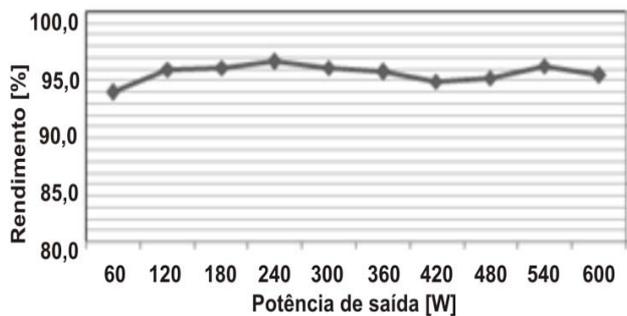
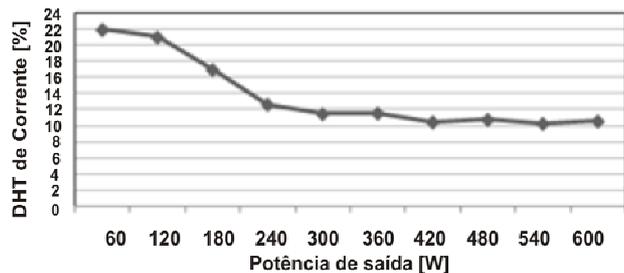


Fig. 8. Formas de onda de tensão e corrente de entrada e tensão de saída durante a realização de um degrau negativo de carga – 600W para 120W.



(a)



(b)

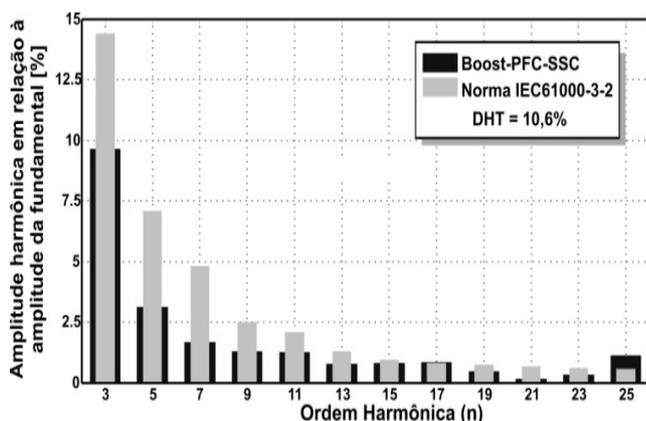
Fig. 9. Rendimento e DHT<sub>I</sub> em função da potência de saída.

Fig. 10. Espectro de frequência da corrente de entrada em comparação com os limites impostos pela norma internacional IEC61000-3-2.

Finalizando, ressalta-se o fato de que a utilização de um microcontrolador mais rápido pode promover o aumento da frequência de chaveamento e, conseqüentemente, contribuindo significativamente para redução da DHT da corrente CA de alimentação, além de contribuir para a redução do indutor de entrada do conversor Boost. Cabe ressaltar ainda que a tensão de alimentação utilizada apresenta uma DHT de 5% e contribuiu significativamente para o aumento do DHT<sub>I</sub>.

### III. CONCLUSÕES

Através dos resultados experimentais obtidos, pode-se observar que o emprego de um microcontrolador para pré-programar as seqüências de pulsos de gatilho do conversor Boost PFC sem sensor de corrente, conforme proposto neste trabalho, é eficaz e produz resultados de tensão de saída

controlada com fator de potência de entrada quase unitário, conforme se deseja para a operação de um conversor Boost empregado como pré-regulador. A gravação de seqüências, através de ensaios em tempo real, gera resultados bastante próximos àqueles obtidos quando o conversor opera sob a ação de controle utilizando sensor de corrente. Pode-se melhorar o desempenho desta proposta, empregando-se microcontroladores mais rápidos. Além disso, destaca-se que a aplicação desta técnica de controle pode ser estendida a qualquer projeto, de qualquer natureza, onde o objetivo é a imposição de uma determinada variável periódica. Os resultados experimentais apresentados comprovam a eficácia da nova técnica de controle proposta, abrindo, portanto, um novo horizonte de investigações.

### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte financeiro conseguido junto aos seguintes órgãos de fomento, CNPq, FAPEMIG e CAPES.

### REFERÊNCIAS

- [1] W. M. P. Filho; A. J. Perin, "Uma Nova Abordagem Do Controle De Corrente Do Conversor Boost Aplicado Para a Correção Do Fator De Potência", *Eletrônica de Potência*, Vol. 5, n°2, Nov. 2000, pp.17-24.
- [2] C. M. O. Stein; J. R. Pinheiro; H. L. Hey, "Correção De Fator De Potência Com Conversores Boost ZCS Entrelaçados Operando No Modo De Condução Crítica". *Eletrônica de Potência*, Vol. 5, n°1, Maio 2000, pp. 28-34.
- [3] F. T. Wakabayashi; C. A. Canesin, "Retificador Pré-regulador Boost Com Elevados Fator De Potência e Rendimento, Para Sistemas De Telecomunicações", *Eletrônica de Potência*, Vol. 7, n°1, Nov. 2002, pp. 71-78.
- [4] R. W. Erickson; D. Maksimóvic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2<sup>nd</sup> Edition, Springer Science+Business Media Inc., 912p.
- [5] C. Fu-Zen; D. Maksimovic, "Digital Control for Improved Efficiency and Reduced Harmonic Distortion over Wide Load Range in Boost PFC Rectifiers" in *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Fevereiro 2009, pp.760 – 766.
- [6] M. R. Sahid; N. A. Azli; N. D. Muhammad, "A comparative study on the performances of the boost PFC circuit" in *Proc. of IEEE Power and Energy Conference*, 2004, pp. 143 – 147.
- [7] W. Zhang; G. Feng; Y. Lui; B. Wu, "A digital power factor correction (PFC) control strategy optimized for DSP", in *IEEE Trans. on Power Electron.*, vol. 19, no. 6, pp. 1474-1485, Nov. 2004.
- [8] P. Mattavelli; W. Stefanutti; G. Spiazzi; P. Tenti, "Digital control of single-phase power factor preregulators suitable for smart-power integration", in *Proc. of IEEE Power Electronics Specialist Conference 2004*, pp. 3195-3201.

- [9] L. T. Jakobsen; N. Nielsen; C. Wolf; M. A. E. Andersen, "Hybrid control method for a single phase PFC using a low cost microcontroller", in *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition 2005*, pp. 1710-1715.
- [10] Z. Wanfeng; L. Yan-Fei; W. Bin, "A New Duty Cycle Control Strategy for Power Factor Correction and FPGA Implementation", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, n° 6, Novembro 2006, pp. 1745 – 1753.
- [11] D. M. Van de Sype; K. De Gussemé; A. P. Van den Bossche, J. A. A. Melkebeek, "A sampling algorithm for digitally controlled boost PFC converters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, n° 3, Maio 2004, pp.649 – 657.
- [12] B. Mather; B. Ramachandran; D. Maksimovic, "A Digital PFC Controller without Input Voltage Sensing", in *Proc. of IEEE Applied Power Electronics Conference 2007*, pp.198 – 204.
- [13] S. Somkun; P. Sethakul; U. Kamnarn; V. Chunkag, "Simulation of DSP-based control of paralleled boost PFC with minimized current sensors", in *Proc. of IEEE International Conference on Industrial Technology 2005*, pp. 1215 – 1220.
- [14] L. Zheren; K. M. Smedley, "A family of continuous-conduction-mode power-factor-correction controllers based on the general pulse-width modulator", in *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 13, n° 3, May 1998, pp. 501 – 510.
- [15] P. C. Todd, UC 3854 Controlled Power Factor Correction Circuit Design, *Unitorde Application Notes*, V. 4-134, PP. 3-269-3-288, 1994.
- [16] L. Yu-Tzung; T. Ying-Yu, "Digital Control of Boost PFC AC/DC Converters with Low THD and Fast Dynamic Response", in *Proc. of IEEE IPMC 2009*, pp. 1672 – 1677.
- [17] M. H. J. Bolen; L.D. Zhang; "Analysis of Voltage Tolerance of AC Adjustable-Speed Drives for Three-Phase Balanced and Unbalanced Sags", in *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 36, no. 3, May/June 2000, pp. 904-910.
- [18] N. X. Melo; R. P. T. Bascope; R. P. S. Leão; F. L. M. Antunes, "A Boost Converter to Improve the Low Voltage Ride-Through Capability of an Adjustable Speed Drive", in *Proc. of COBEP - Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, 2007.

#### DADOS BIOGRÁFICOS

**Antonio de Pádua Finazzi**, nascido em Mogi-Mirim (SP), em 1956, é engenheiro eletricitista (1978) e mestre (1983) pela Universidade Federal de Santa Catarina – Faculdade de Engenharia Elétrica (UFSC). Atualmente é professor adjunto nível IV da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT, Cuiabá). Sua área de atuação é eletrônica de potência

e suas áreas de interesse são conversores micro-controlados e programação de softwares aplicados ao ensino de engenharia.

**Luiz Carlos Gomes de Freitas**, nascido em Uberlândia (MG), em 1976, é engenheiro eletricitista (2001), mestre (2003) e doutor (2006) pela Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica (UFU-FEELT). Atualmente é professor adjunto nível I da Faculdade de Engenharia Elétrica da UFU, fazendo parte do Núcleo Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP). Sua área de atuação é eletrônica de potência e suas áreas de interesse incluem qualidade da energia elétrica, correção ativa do fator de potência, técnicas de comutação não dissipativa, conversores CC-CC, CA-CC e CC-CA, retificadores híbridos e técnicas de controle utilizando FPGA e DSP.

**Ernane A. A. Coelho**, nascido em Teófilo Otoni, Minas Gerais, em 1962, é engenheiro eletricitista (1987) pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, mestre (1989) pela Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis e doutor (2000) pela Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. Atualmente é professor titular do departamento de engenharia elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais. Sua área de atuação envolve inversores PWM, correção do fator de potência e novas tecnologias usando controle digital.

**João B. Vieira Jr.**, possui graduação em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Uberlândia (1980), mestrado (1984) e doutorado (1991) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina. Atualmente é professor da Universidade Federal de Uberlândia e membro do Núcleo de Pesquisa em Eletrônica de Potência (NUPEP). Tem experiência na área de Engenharia Elétrica, com ênfase em Eletrônica Industrial, atuando principalmente nos seguintes temas: alto fator de potência e conversores PWM.

**Luiz Carlos de Freitas**, nascido em Monte Alegre (MG), em 1952, é engenheiro eletricitista (1975) pela Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Elétrica (UFU-FEELT, Uberlândia (MG)) mestre (1985) e doutor (1992) em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina – Instituto de Eletrônica de Potência (UFSC-INEP), Florianópolis (SC). Atualmente é professor adjunto efetivo da Faculdade de Engenharia Elétrica (FEELT) da UFU e membro do Núcleo de Eletrônica de Potência (NUPEP). Ele já publicou diversos artigos em áreas como conversores DC-DC, DC-AC e AC-DC com comutação suave e retificadores multipulsos. O professor Luiz Carlos publicou no PESC'92, no APEC'93, no PESC'93 e na IEEE Transactions on Power Electronics – jan/1995, a evolução de células de comutação suave que promovem a entrada e saída de condução de interruptores com tensão zero, as quais têm sido amplamente utilizadas em pesquisas relativas à Eletrônica de Potência desde então.