

PLATAFORMA DE ENSINO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA VERSÁTIL E DE BAIXO CUSTO

Fellipe Saldanha Garcia, André Augusto Ferreira, José Antenor Pomilio

Universidade Estadual de Campinas

CEP 13083-852, Campinas - SP

Brasil

fgarcia@fee.unicamp.br, andre@dsce.fee.unicamp.br, antenor@dsce.fee.unicamp.br

Resumo – A despeito da importância da Eletrônica de Potência e do crescente número de aplicações no mercado, existe uma carência de dispositivos de uso prático de baixo custo que auxiliem o ensino de Eletrônica de Potência. Este artigo descreve uma plataforma de ensino, que foi desenvolvida na Unicamp e é atualmente utilizada como parte de uma disciplina de Laboratório de Eletrônica de Potência. É descrito um experimento envolvendo o controle, em malha aberta, de um motor de indução trifásico, bem como outros experimentos possíveis de serem realizados. Graças ao projeto versátil, o sistema pode ser facilmente modificado para experimentos envolvendo outros sistemas, por exemplo, fontes chaveadas.

Palavras-Chave – Aprendizado Auxiliado por Computador, Educação em Eletrônica de Potência, Ensino de Eletrônica de Potência, Ferramentas didáticas.

LOW COST VERSATILE POWER ELECTRONICS TEACHING PLATFORM

Abstract – Despite the importance of power electronics devices and the growing number of applications in the market, there is still a lack of low cost teaching platforms, which can be used by teachers to improve the education of Power Electronics, providing meaningful “hands on” experience to students. This paper describes a Power Electronics Teaching Platform, which was elaborated at Unicamp and become part of the curriculum for the undergraduate power electronics laboratory course. The system has been used as an inverter to drive an induction motor, showing interdisciplinary principles of power electronics, electrical machine drives, control and programming. With a few external connections and some software reprogramming the system can also be used in other experiences e.g. switching-mode power supplies.

Keywords - Computer Aided Learning, Didactic Tools, Power Electronics Education, Power Electronics Teaching.

Artigo submetido em 11/02/2008. Revisão em 12/03/2008.

Aceito por recomendação dos editores da Seção Especial W. Suemitsu e J. A. Pomilio.

I. INTRODUÇÃO

A Eletrônica de Potência possibilita o emprego e o aperfeiçoamento de tecnologias em diversas áreas, atuando como interface entre a fonte e o receptor de energia, quando esta precisa ser condicionada.

Além da já disseminada presença em aplicações domésticas e industriais, os avanços na Eletrônica de Potência estão ligados ao aumento da eficiência energética e à viabilização de novas fontes de energia. No entanto, o desenvolvimento de aplicações em Eletrônica de Potência é uma tarefa complexa, em virtude da sua natureza experimental e multidisciplinar [1].

Em resposta ao desafio de capacitar engenheiros a trabalhar com sistemas envolvendo Eletrônica de Potência, os cursos de Engenharia Elétrica buscam aprimorar a formação dos alunos por intermédio de mudanças curriculares e motivação dos alunos, empregando aplicações práticas que permitam desenvolver-lhes capacidade de medição e análise de sistemas reais [2]. Diversas universidades criaram plataformas práticas para ensino de eletrônica de potência [3, 4, 5].

Além disso, como parte do esforço de ensino, foram desenvolvidas ferramentas virtuais para dar suporte aos estudos [6, 7].

Os computadores digitais são excelentes ferramentas de aprendizado, não somente dedicado à realização de simulações, mas também em experimentos reais, em que uma interface gráfica com o usuário (GUI) possibilita a monitoração e comando do experimento.

Este artigo descreve uma plataforma de ensino, de baixo custo, projetada e construída na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, que se tornou parte do currículo da disciplina Eletrônica de Potência.

O conjunto de experiências desta disciplina utiliza outras montagens experimentais [8], as quais exploram aspectos distintos dos conversores e que, portanto, não necessariamente são revisitados nos experimentos baseados na plataforma aqui apresentada.

Esta plataforma também pode ser usada em cursos focados em projeto em Eletrônica de Potência, pois possui uma configuração versátil que, com alterações no software e nas conexões, permite que seja usada em uma diversidade de aplicações.

As principais características do sistema projetado são:

- Baixo custo.
- Segurança e proteção contra uso incorreto.
- Interface amigável.

- Todos os detalhes da implementação acessíveis ao usuário.
- Motivação do aluno por intermédio de experimentos práticos.
- Desenvolvimento da habilidade de executar medições em sistemas reais.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A. Hardware

O sistema é composto por duas placas de circuito impresso (PCIs), sendo uma com os circuitos de controle e interface e outra com os circuitos de potência e proteção.

Na figura 1 é mostrada a foto do sistema usado no experimento de acionamento de um motor de indução trifásico. A placa, no centro da figura (A), realiza as tarefas de controle e interface. Nesta placa encontra-se o microcontrolador que executa o código de controle do motor.

A placa ao lado direito (B) possui o circuito de potência e proteção do sistema. Esta placa processa a energia fornecida por uma fonte externa (em corrente contínua) e aciona o motor de indução.

O motor de indução (trifásico, 220V, 0,5hp) é mostrado no lado esquerdo da figura (C) e está acoplado a uma máquina de corrente contínua que é utilizada como carga.

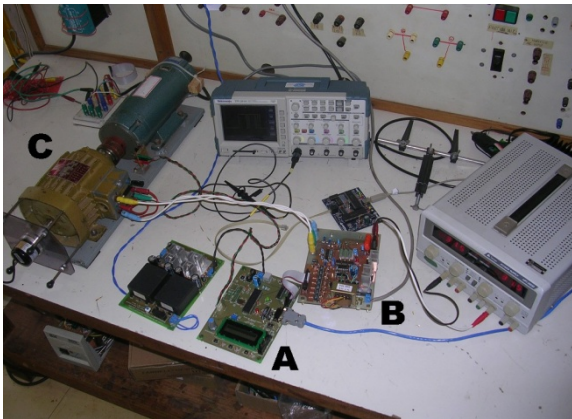


Fig. 1. Foto da montagem experimental.

1) *Circuito de Potência e Proteção* - O circuito de potência é baseado módulo IRAM10UP60A (figura 2), um circuito integrado de baixo custo que possui uma ponte inversora trifásica, os circuitos de acionamento dos transistores (*drivers*) e um termistor para proteção térmica do circuito. Os IGBTs que compõe a ponte são especificados para 600 V e 5 A (RMS por fase) a 100 °C (encapsulamento).

A fonte de tensão para alimentação do circuito de potência deve ser ligada externamente, mas esta placa possui sua própria fonte de alimentação para os circuitos lógicos, que pode ser alimentada em 127 V (-10% +5%), 60 Hz.

O circuito possui uma proteção térmica, baseada em um termistor integrado ao módulo dos transistores. Este circuito de proteção tem por objetivo proteger os semicondutores de uma sobrecarga moderada e prolongada, que leve ao aquecimento excessivo do circuito integrado. No entanto, no caso de sobrecarga elevada este circuito não atuará em tempo suficiente para proteção, pois a resistividade térmica e a capacidade térmica do material utilizado na fabricação do

circuito integrado causam um atraso considerável entre o aquecimento da junção de um dispositivo e o aquecimento do termistor.

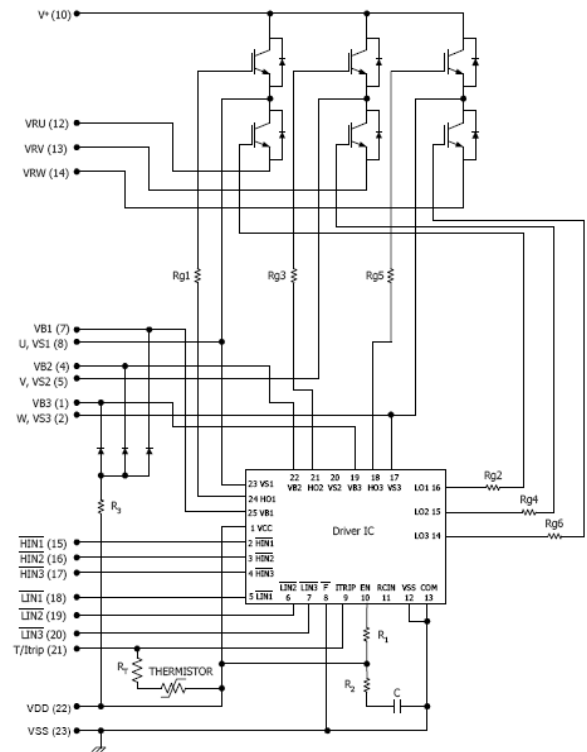


Fig. 2. Diagrama do Circuito Integrado de Potência [9].

Contra sobrecargas, há um circuito para proteção de sobrecorrente em hardware, que atua em poucos microssegundos. Este circuito funciona através da medição das correntes nos braços do inversor. A corrente medida é comparada com uma referência ajustada pelo usuário, através de comparadores de alta velocidade e, caso ultrapasse o valor pré-definido, o sistema é desligado de modo seguro. Um exemplo de atuação desta proteção é no caso da tentativa de impor a um motor uma rampa de aceleração muito elevada, o que resultaria em uma corrente excessiva para os transistores de potência.

A terceira proteção presente nesta placa consiste em uma proteção contra subtensão da fonte de alimentação dos circuitos lógicos. Esta proteção se mostrou necessária, pois foram observados acionamentos incorretos das chaves nos casos em que a fonte de alimentação dos circuitos lógicos era desligada e o barramento CC mantido com tensão elevada. Esta proteção detecta a subtensão dos circuitos lógicos e desliga o sistema de forma segura, ainda que exista tensão presente no barramento CC.

2) *Circuito de Controle e Interface* - A placa com os circuitos de controle e interface possui as mesmas dimensões da placa de potência e proteção, de modo a facilitar a montagem vertical, caso necessário. Esta placa é baseada no microcontrolador de baixo custo PIC18f4431, cuja frequência máxima de operação é de 40MHz (realizando 10MIPS). Neste circuito foi utilizado a 20MHz.

A placa possui uma porta de comunicação RS-232 para interface do sistema através de um computador. Possui

também uma interface própria, através de um display de LCD, potenciômetro e botões, de forma que o sistema também possa ser usado sem a presença de um computador.

Nesta placa há um *buffer* de saída para proteger o microcontrolador em caso de falha externa ou ligação incorreta, entrada para *encoder* ou tacômetro e entradas para conversores A/D, que podem ser utilizados em malhas de realimentação.

B. Software do microcontrolador

O software do microcontrolador foi programado em linguagem C, com exceção de algumas rotinas críticas, que foram programadas em linguagem *assembly*. A compilação foi realizada pelo programa PIC-C da empresa CCS®.

O *software* do microcontrolador executa todas as rotinas de controle (geração do PWM, ajuste da tensão e frequência no motor etc.). Também está implementada no software do microcontrolador a interface local e a comunicação com o computador através de interface serial (RS-232) e protocolo dedicado.

III. INTERFACE COM O USUÁRIO

A. Interface Gráfica

A interface gráfica com o usuário foi desenvolvida para ambiente Windows 32 bits, em linguagem de programação Borland C++ Builder 5. A comunicação entre a placa do microcontrolador e o computador é feita via comunicação serial, empregando a interface RS-232. A API (“Application Program Interface”) do Windows disponibiliza um conjunto de funções que possibilita configurar e acessar a porta serial do computador, em modo protegido.

Deste modo, é possível comandar o funcionamento da carga e monitorar o comportamento médio das variáveis enviadas pelo microcontrolador que, na presente aplicação, envia a informação da velocidade. Isto permite, por exemplo, enviar continuamente os dados de um perfil de velocidade como referência para o acionamento do motor e verificar o resultado na tela do computador, sem o auxílio de outro instrumento.

O programa pode ser instalado em computador com sistema operacional Windows (95, 98, 2000 ou XP), a partir do programa de instalação, disponível na internet. Deste modo, é possível reduzir custos para o uso do aplicativo, uma vez que não é necessária a instalação do programa comercial que gerou o aplicativo, nem um grande espaço em disco. Cabe destacar que os computadores antigos podem ser aproveitados para essa tarefa. Por exemplo, nos testes em bancada foi utilizado um computador Pentium 200 MHz, com 64 Mb de memória RAM e sistema operacional Windows 98.

O aplicativo funciona basicamente da seguinte forma:

- Usuário habilita a comunicação serial entre o computador e a placa do microcontrolador;
- Os dados começam a ser enviados pelo microcontrolador e são esboçados no gráfico. O intervalo entre cada amostra é de aproximadamente 50 milissegundos;
- O usuário pode clicar no botão abrir e carregar o perfil de velocidade que será enviado para o microcontrolador. Como os dados armazenados em

arquivo, a nova referência é configurada para ser enviada a cada segundo;

- Ao clicar no botão verde, o gráfico será limpo e tem-se o início do envio da referência e monitoração dos dados. Caso nenhum perfil de velocidade seja carregado, o usuário pode criar seu próprio perfil de velocidade usando a barra lateral do aplicativo, localizada no canto esquerdo;
- O resultado experimental obtido quando o software é carregado com um dado perfil de velocidade é mostrado na figura 3.
- É possível, a qualquer tempo, interromper a monitoração dos dados e copiar o gráfico para um relatório ou editor de imagens;
- Para interromper o acionamento do motor, basta clicar no botão parar, que é representado por um botão vermelho.

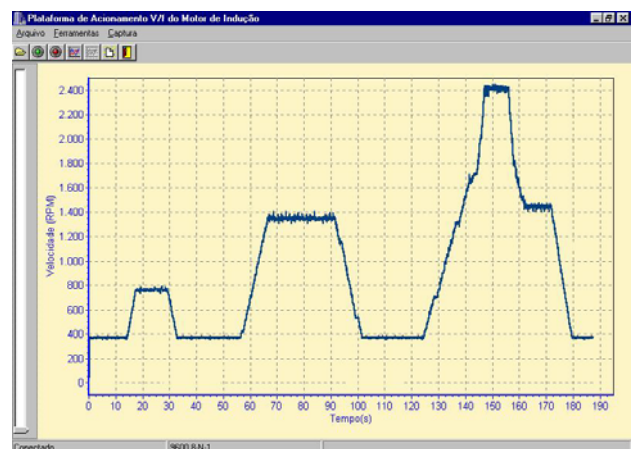


Fig. 3. Perfil de velocidade do motor.

Uma possível solução para melhorar a comunicação com o microcontrolador seria usar uma interface USB no lugar da serial, utilizar um “device-driver” para acessar a porta via Windows e implementar a monitoração dos dados via interrupção, também no Windows.

Cabe destacar a importância dos perfis de velocidade utilizados, os quais servem, por exemplo, para simular um ciclo de condução que podem ser empregadas para avaliar o desempenho de veículos elétricos. Neste contexto, o presente software desenvolvido pode ser usado para avaliar experimentalmente o desempenho do sistema de propulsão (motor, conversores de potência e fontes de suprimento) de um veículo elétrico.

B. Painel de comando

No modo de funcionamento através de um painel de comando, a interface é realizada através de uma tela de LCD de 16x2 caracteres, um potenciômetro e três botões, conforme mostrado na figura 4.

Neste modo, no momento que se liga a plataforma há uma interação com usuário a partir de mensagens no painel LCD que auxiliam na definição das características do experimento. Depois de configurado, o usuário pode controlar o experimento (por exemplo, a velocidade e direção de rotação do motor) através do potenciômetro e dos botões, recebendo

informações (como a velocidade medida por um tacômetro) no display de LCD.

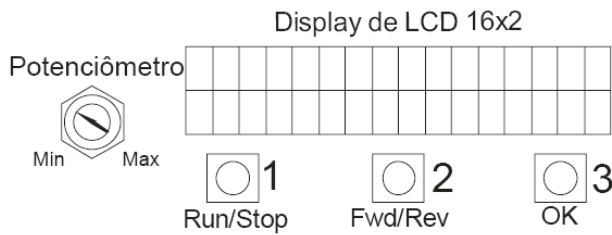


Fig. 4. Painel de comando.

IV. EXEMPLOS DE EXPERIMENTOS

A. Tempo morto e atraso na comutação

Para a compreensão de um inversor por modulação por largura de pulso, uma das características mais importantes é a geração dos pulsos de largura variável. Neste sistema, a geração dos pulsos é feita no microcontrolador. Estes pulsos irão controlar a condução dos transistores conforme mostrado na figura 5.

Os dois canais superiores são os sinais de comando para os transistores de um braço do inversor. Os sinais inferiores correspondem à tensão nos respectivos transistores que estão sendo controlados. Pode-se observar que existe um atraso para ligar o transistor (neste caso aproximadamente $0,5 \mu s$), bem como para desligar o transistor (aproximadamente $1 \mu s$). Como este transistor é ligado mais rapidamente do que desligado, é especialmente necessária a inserção de um tempo morto, no qual o comando de ambas as chaves permanecem desligados. Este tempo morto é mostrado na figura como $1,5 \mu s$.

Ainda sobre a figura 5, o aluno pode observar que a forma de onda medida é um sinal pulsado e não uma senóide, como poderia esperar em seu primeiro curso de eletrônica de potência, já que se trata da alimentação de um motor de corrente alternada.

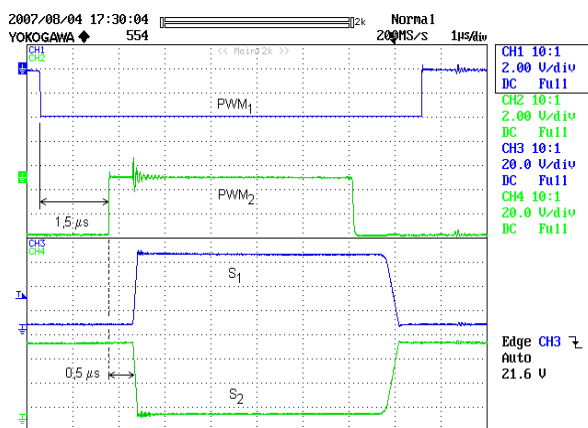


Fig. 5. Sinais de comando e tensão nos transistores acionados.

B. Filtragem do sinal PWM

Na figura 6 são mostradas a corrente no barramento CC (topo) e as correntes nas três fases do motor. Diferentemente da tensão no motor, a corrente apresenta um formato senoidal, porém é notável a presença de ondulação, em alta frequência, superposta à senóide de frequência fundamental.

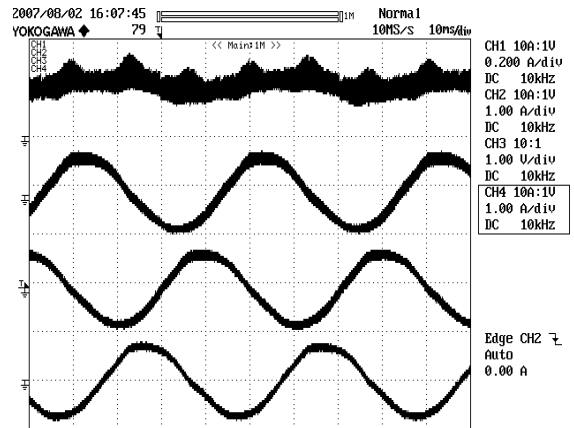


Fig. 6. Corrente no barramento CC e nas fases do motor.

Na figura 7 pode-se observar a razão desta diferença: o chaveamento na tensão é filtrado pela indutância do motor, restando a corrente senoidal filtrada. Observar a ondulação da corrente, que possui um aspecto triangular.

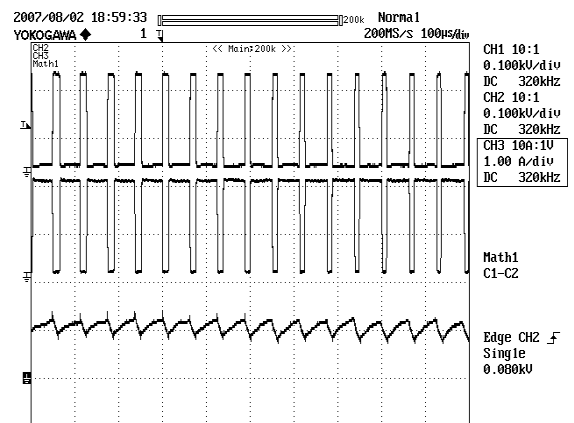


Fig. 7. Tensões nas chaves de um braço do inversor e corrente em uma fase do motor.

C. Perdas nas chaves

A eficiência do sistema é sempre um parâmetro de primeira importância nos projetos em eletrônica de potência. Os semicondutores de potência que processam a energia são responsáveis por parte significativa das perdas de energia no sistema.

A figura 8 mostra a observação da tensão (canal 1), corrente (canal 2) e potência (multiplicação dos canais 1 e 2), quando o conversor opera com carga resistiva.

A medição da tensão e corrente nas chaves é facilitada por pontos de medição incorporados às placas. Não é necessária uma ponteira de corrente para medição da corrente na chave, pois o sinal de corrente é transformado em tensão no circuito de proteção da placa e um ponto de medição disponibiliza este sinal ao usuário.

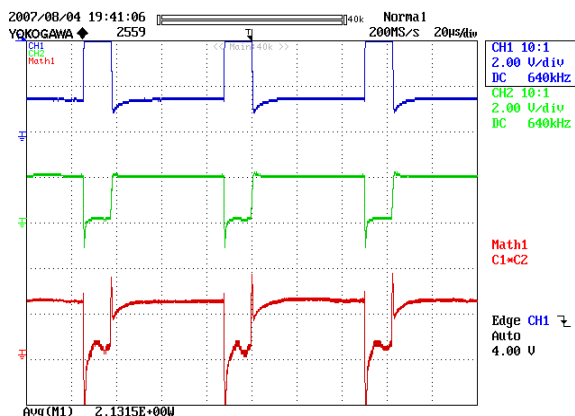


Fig. 8. Tensão, corrente e potência em um transistor.

V. OUTRAS APLICAÇÕES

Através da mudança das ligações externas e da alteração do software do microcontrolador, é possível realizar a síntese de novas aplicações. Esta abordagem é adequada a um curso com o objetivo de introduzir o aluno ao projeto em eletrônica de potência.

Como exemplo, será mostrado a implementação de um conversor elevador de tensão na plataforma proposta.

O conversor elevador de tensão é mostrado na figura 9.

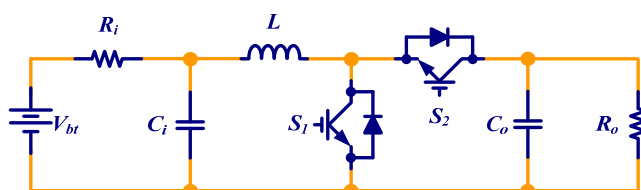


Fig. 9. Conversor elevador de Tensão.

As chaves S1 e S2 correspondem a um dos três braços do inversor mostrado na figura 2.

Como neste circuito a corrente é sempre no sentido da fonte (V_{bt}) para a carga (R_o), a chave S2 permanece sempre desligada.

Na figura 10 é mostrado o conversor montado em uma bancada. No lado esquerdo da fotografia encontra-se a carga resistiva e o capacitor de saída e no canto inferior direito encontra-se o indutor.

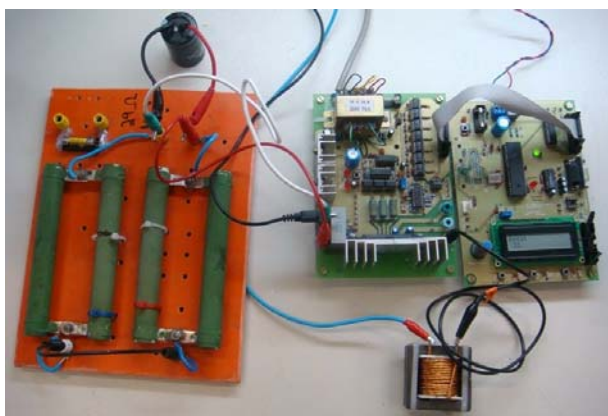


Fig. 10. Foto do conversor elevador de Tensão.

A programação do microcontrolador foi alterada para permitir o controle da razão cíclica da chave S1 através do potenciômetro, sendo a razão cíclica indicada para o usuário através do display de LCD.

Pode-se então propor um experimento no qual o estudante, após projetar o circuito (escolher a topologia, calcular o valor dos componentes etc.), obtenha, por exemplo, a curva de ganho estático e rendimento do circuito em função da razão cíclica.

O resultado deste experimento para o conversor elevador de tensão é mostrado na figura 11.

Foram utilizados os seguintes parâmetros:

- Tensão de entrada: 20 V
- Resistência em série com a fonte: 2 Ω
- Indutor: 500 μH
- Resistência da carga: 330 Ω
- Capacitor de Saída: 470 μF

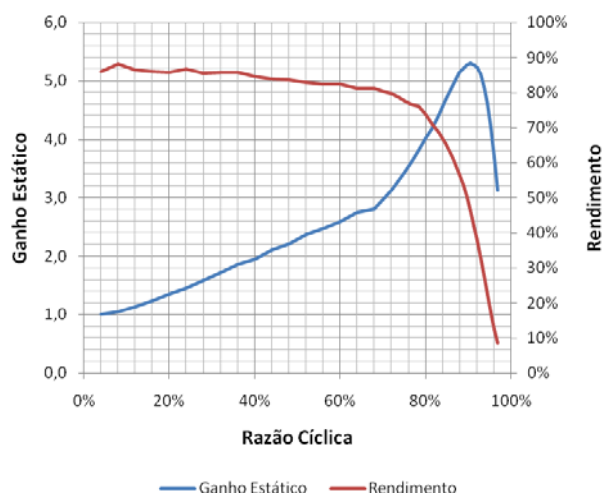


Fig. 11. Curvas de ganho estático e eficiência do conversor elevador de tensão.

VI. CUSTO

Os componentes com custo mais alto são o módulo de potência IRAM10UP60A (em torno de R\$ 50,00), o microcontrolador PIC18f4431 (em torno de R\$ 35,00) e a fabricação das PCIs (em torno de R\$100,00 para pequenas quantidades). Pode-se estimar o custo total de montagem do sistema sendo em torno de R\$250,00.

VII. CONCLUSÕES

Os experimentos descritos neste artigo são ilustrativos e muitos outros são possíveis sem mudanças no hardware.

Foram construídas quinze unidades deste sistema que estão sendo utilizadas com alunos de graduação em engenharia elétrica na disciplina de laboratório de eletrônica de potência. O sistema também foi utilizado por alunos do ensino médio que participaram de uma exposição de projetos desenvolvidos na Unicamp.

Até o presente momento, nenhum das placas utilizadas apresentou problemas, como falhas de componentes, o que mostra que são adequadas ao ambiente de ensino.

Em relação ao artigo apresentado no COBEP 2007, também descrevendo este sistema [10], foram feitas atualizações na interface com o usuário, incluindo a possibilidade de simulação de um ciclo de condução através da interface via computador, e o sistema foi efetivamente testado em ambiente de ensino nas aulas de graduação. Ainda, os materiais referentes a este projeto foram disponibilizados na internet [8], inclusive os circuitos e desenhos das placas, possibilitando a sua reprodução e/ou modificação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Edson Vendrusculo, Giuliano Sperandio e Leonardo Silva pelas contribuições no desenvolvimento do sistema e a FAPESP pela concessão de uma bolsa de iniciação científica para este projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, E. A. Vendrusculo, "Integrated Platform for Power Electronics Applications Fast Evaluation and Teaching Purposes", *IEEE Power Electronics Education Workshop, PEEW 2005*, 2005, Recife, Brasil. p. 81-86.
- [2] E. A. McShane, M. Trivedi, and K. Shenai, "An Improved Approach to Application-Specific Power Electronics Education – Curriculum Development", *IEEE transactions on Education*, vol. 44, No. 03, 2001.
- [3] L.G.B. Rolim, R.M. Stephan, W.I. Suemitsu, J.L. S. Neto, "UFRJ Power Electronics Teaching Lab: Ten Years", *IEEE Power Electronics Education Workshop, PEEW 2005*, Recife, Brasil. p. 69 – 73.
- [4] R. M. S. Filho, M. A. S. Pinto. "Modular Laboratory Equipment for Undergraduate and Technician Courses in Power Electronics", *IEEE Power Electronics Education Workshop, PEEW 2005*, Recife, Brasil. p. 120-124
- [5] R. E. Araújo, H. Teixeira, J. Barbosa, V. Leite, "A hardware tool for explained power electronics control of induction motors", *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005.
- [6] C. A. Canesin, F. A. S. Gonçalves, L. P. Sampaio "Interactive Java Applets for Power Electronics Education". *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência 2007*, Blumenal, SC, Brasil
- [7] U. Drogenik, J. W. Kolar, "Interactive Power Electronics Seminar (iPES)-a Web-Based Introductory Power Electronics Course Employing Java Applets", in Proceedings of the 2002 IEEE Power Electronics Specialists Conference, pp.443-448.
- [8] <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/ee833.htm> (consultada em 28/01/2008)
- [9] International Rectifier, datasheet do componente IRAM10UP60A. Disponível em www.irf.com.
- [10] F. S. Garcia, A. A. Ferreira, J. A. Pomilio, "Low Cost Power Electronics Teaching Platform". *Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência 2007*, Blumenal, SC, Brasil.

DADOS BIOGRÁFICOS

Fellipe Saldanha Garcia, Engenheiro Eletricista (2008), e Mestrando em Eletrônica de Potência, ambos pela Universidade Estadual de Campinas. Em 2006 realizou iniciação científica em eletrônica de Potência. Em 2007 realizou estágio na empresa Metso Minerals, trabalhando com instalações elétricas e acionamento de motores em equipamentos para mineração. Garcia é Student Member do IEEE.

André Augusto Ferreira, é engenheiro eletricista (2000) pela Universidade Federal de Juiz de Fora e mestre (2002) e doutor (2007) em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. Atualmente é pesquisador colaborador na Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da UNICAMP, com bolsa de pós-doutorado FAPESP, em que desenvolve suas pesquisas na área de veículos elétricos. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, qualidade de energia elétrica e veículos elétricos.

José Antenor Pomilio, é engenheiro eletricista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. De 1988 a 1991 foi chefe do grupo de eletrônica de potência do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron. Realizou estágios de pós-doutoramento junto à Universidade de Pádua e à Terceira Universidade de Roma, ambas na Itália. Foi presidente da Sociedade Brasileira de Eletrônica de Potência – SOBRAEP e membro do comitê administrativo da IEEE Power Electronics Society. Atualmente é editor da revista *Eletrônica de Potência*, e editor associado da *IEEE Trans. on Power Electronics* e da revista *Controle & Automação*. É professor Titular da Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp, onde é docente desde 1984. Dr. Pomilio é membro da SOBRAEP, da SBA, da SBPC e Senior Member do IEEE.