

PLATAFORMA DIDÁTICA PARA AVALIAÇÃO RÁPIDA E EXPERIMENTAL DE ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

Edson Adriano Vendrusculo, André Augusto Ferreira e José Antenor Pomilio.

Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação – UNICAMP

Departamento de Sistemas e Controle de Energia - Laboratório de Condicionamento de Energia Elétrica

CEP 13083-970 – C. P. 6101 – Campinas – SP – Brasil

e-mail: { adriano, andre, antenor }@dsce.fee.unicamp.br

Resumo – Este artigo apresenta um aparato educacional para ensino prático de estratégias de controle aplicadas a eletrônica de potência. Este aparato é composto por uma planta eletrônica configurável, um processador digital de sinais, um computador pessoal e placas de circuitos para comunicação e interface. O aparato desenvolvido permite uma interação do usuário, gradual e assistida, em todos os estágios, ou seja, desde a escolha e projeto dos compensadores até a comprovação experimental do comportamento dinâmico da planta sob controle. Os recursos didáticos da ferramenta educacional são ilustrados pelos resultados obtidos com o controle de uma máquina de corrente contínua. Neste caso a configuração selecionada permite operar nos quatro quadrantes, logo permitindo o fluxo bidirecional de energia, ou seja, contemplando motorização e geração. Outro atributo desta configuração é a identificação automática dos parâmetros elétricos e mecânicos da máquina através de um software adicional específico.

Palavras-Chave – controlador programável, ensino, eletrônica de potência, módulo didático, prototipagem rápida.

DIDATIC PLATFORM FOR POWER ELECTRONICS CONTROL STRATEGIES FAST EVALUATION AND TEST

Abstract – The goal of this paper is to present a custom solution for practical control strategies teaching in power electronics applications. The plant to be controlled, a personal computer, a digital signal processor and interface boards compose the system. The objective of the platform is to introduce the students gradually from initial controller design stage to the experimental validation of the system dynamic behavior within a short time interval. The users, in software algorithm or in hardware, should configure the system. The proportional-integral control of a dc motor is presented and evaluated. In addition, a tool developed to automatically identify dc motor parameters is presented at the end of this paper.

Keywords – power electronic learning, programmable controller, parameter estimation, rapid prototyping, educational application.

Artigo submetido em 14/03/2008. Revisão em 13/03/2008. Aceito por recomendação dos editores da Seção Especial W. Suemitsu e J. A. Pomilio.

I. INTRODUÇÃO

Apesar da característica não-linear das aplicações de eletrônica de potência em processos industriais, geralmente é possível obter um modelo linearizado do processo, o qual viabiliza o projeto e a avaliação experimental de estratégias de controle clássico e/ou moderno.

Existem diversos programas de computador (aplicativos) que auxiliam no projeto de sistemas de controle e apresentam elevada flexibilidade em termos da elaboração e simulação de estratégias usando circuitos esquemáticos e/ou diagramas de blocos. Por exemplo, a reconhecida interface do Simulink/Matlab permite elaborar algoritmos de controle complexos e possui ferramentas prestigiosas para integração com dispositivos externos como, por exemplo, o xPC Target e o dSpace [1]. No entanto, alguns detalhes podem limitar a aplicação das mesmas. Por exemplo, a plataforma xPC Target está limitada a frequência de 50kHz mesmo considerando o uso de um processador de alto desempenho da Intel ou AMD [2]. O algoritmo precisa ser compilado novamente e, o código gerado, transferido para o computador alvo a cada alteração feita pelo usuário no ambiente Simulink como, por exemplo, ao inserir uma nova malha de controle. O desenvolvimento de aplicações reais em eletrônica de potência é tipicamente muito complexo, pois exige domínio de recursos em hardware, teoria de circuitos elétricos e de controle, técnicas de processamento digital de sinais, estratégias de modulação e, em geral, domínio de conceitos sobre máquinas elétricas [3, 4]. De acordo com a literatura técnica, existe uma carência de soluções didáticas que combinam ferramentas de aprendizado com experimentos práticos [5]. Em muitas situações pode ocorrer o desinteresse do usuário, em virtude da dificuldade intrínseca que existe em sistemas digitais para aqueles não fortemente familiarizados com engenharia ou ciência da computação [6].

Na automação industrial é comum o uso de controladores lógicos programáveis (PLC) para simplificar o processo de controle de plantas industriais, devido sua grande adaptabilidade. Logo, o princípio de funcionamento deste dispositivo foi usado como referência para este trabalho. O PLC é basicamente constituído por um microcontrolador (ou microprocessador) que comanda o acionamento de dispositivos externos (relés, lâmpadas, motores, válvulas) com base na leitura de entradas lógicas externas (transdutores de tensão, de corrente, de temperatura, de pressão ou de fluxo) e na execução do código programado previamente em uma interface gráfica de alto nível com o usuário. Em virtude das facilidades em termos de hardware e software introduzidas pelo PLC, o seu emprego permite obter resultados mais confiáveis e reduzir o tempo de treinamento de técnicos e engenheiros.

A proposta deste artigo é o desenvolvimento de uma plataforma didática para auxílio ao ensino de técnicas de controle em eletrônica de potência, com funcionalidade similar a de um controlador programável e interagindo com o usuário de forma didática. O sistema integra ferramentas de simulação com a estrutura em hardware necessária para o comando, controle e monitoração do comportamento dinâmico do experimento. Deste modo, é possível guiar o usuário gradualmente na concepção das etapas que compreendem a obtenção do modelo linearizado do sistema, projeto dos controladores, simulação e, finalmente, ensaio experimental. Uma vez que o usuário efetua poucas conexões em hardware e atua mais no comando, ou seja, no ajuste assistido dos controladores e monitoração dos resultados em uma interface gráfica, o risco de má operação do sistema e o tempo de implementação são amplamente reduzidos.

No final do artigo, são apresentados os resultados experimentais também do software adicional que permite a identificação automática dos parâmetros elétricos e mecânicos de uma máquina de corrente contínua.

A estrutura disponível possibilita a implementação de algumas estratégias de controle e a plataforma de propósito geral agrega as seguintes características:

- Selecionar a planta (por enquanto limitada a aplicações de conversores como, por exemplo, acionamento de máquinas de corrente contínua e fontes chaveadas), a topologia do conversor (“chopper”, ponte completa, meia ponte) e os respectivos parâmetros (tensão e corrente nominal, frequência de chaveamento);
- Definição das variáveis de controle (tensão de saída, corrente de entrada, velocidade);
- Seleção e projeto do controlador (PI, PID, nebuloso);
- Transferência dos parâmetros (ganhos) do controlador para o processador digital de sinais (DSP, no presente caso);
- Comando (ligar, pausar e parar) e monitoração em tempo real da operação do sistema a partir da interface gráfica com o usuário;
- Alteração, durante o funcionamento, dos parâmetros do controlador (considerando aspectos de segurança);

Armazenamento dos parâmetros ajustados no controlador digital para posterior funcionamento independente do computador (operação “stand alone”).

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

Sistemas de controle embutido, usados para propósitos educacionais, devem ser simples, interativos e com funções adaptadas para o nível de conhecimento teórico dos usuários (estudantes) [5]. Sistemas que provêem aprendizado rápido e experiência efetiva são os mais almejados [7].

O algoritmo de controle deve ser preferencialmente implementado em um microcontrolador ou DSP, uma vez que sistemas operacionais como Windows e Linux não são apropriados para aplicações em tempo real. Qualquer processador poderia ser usado, mas o DSP apresenta elevada flexibilidade em software, excelente desempenho em aplicações de tempo real e requer baixo tempo de desenvolvimento [1, 8-13]. Os mesmos dispõem de conversor analógico-digital, modulação por largura de pulso,

portas de comunicação, configuração de tempo morto, proteção através de alta impedância e outros periféricos que simplificam a construção da plataforma. O computador, por sua vez, é útil para a implementação de recursos gráficos avançados que auxiliam o usuário no projeto dos controladores, na visualização e análise dos resultados de simulação e de ensaio.

A. Elementos da Plataforma

O diagrama esquemático dos elementos básicos que compõem a plataforma para o acionamento de uma planta genérica é mostrado na Figura 1. A capacidade de implementar alguns tipos de aplicações (controle de máquinas CA ou CC e fontes chaveadas) com a mesma estrutura assegura a sua portabilidade e conseqüente redução de custos.

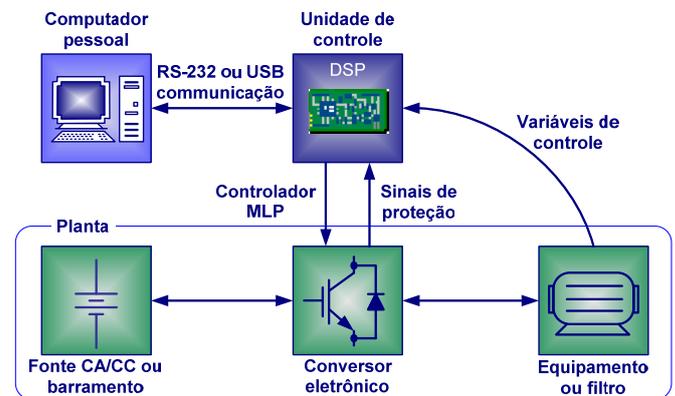


Fig. 1. Diagrama esquemático dos elementos da plataforma.

A comunicação de dados entre o PC e o hardware de controle é realizada via RS-232, ou seja, o computador envia e recebe dados do processador digital de sinais (DSP), por intermédio de um protocolo padrão de comunicação serial (RS-232). A programação da transmissão de dados no computador em ambiente protegido é feita usando as bibliotecas disponibilizadas pela API (“Application Program Interface”) do Windows, enquanto que no DSP TMS320F2812 é utilizada a porta SCI (padrão RS232). Os parâmetros de comunicação, ou seja, taxa de transmissão, paridade, bit de parada e outros que estão previamente configurados no DSP. O programa instalado no computador deve ser configurado com os mesmo parâmetros do DSP para que a comunicação seja estabelecida.

A comunicação serial bidirecional simplifica a interação do usuário com o experimento, uma vez que a partir da interface gráfica é possível comandar o acionamento da planta e monitorar o comportamento médio de algumas variáveis do sistema. Na detecção de erros ou situações de risco, uma mensagem de alerta é imediatamente exibida no computador e a execução do experimento é imediatamente interrompida.

A bancada experimental da plataforma para acionamento do motor de corrente contínua é mostrada na Figura 2. A unidade de controle, mostrada em detalhe na Figura 3, é composta basicamente por um processador digital de sinais TMS320F2812, por uma placa de condicionamento de sinais e uma placa de interface. Na placa de condicionamento de sinais estão localizados os sensores de corrente e de tensão

de efeito Hall, cujas saídas em correntes são condicionadas e filtradas. Circuitos de proteção atuam no caso de ocorrência de sobretensão e/ou sobrecorrente.

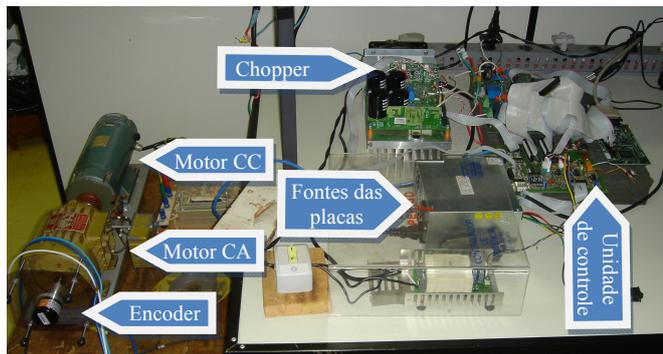


Fig. 2. Bancada experimental de ensaio do controle do motor CC.

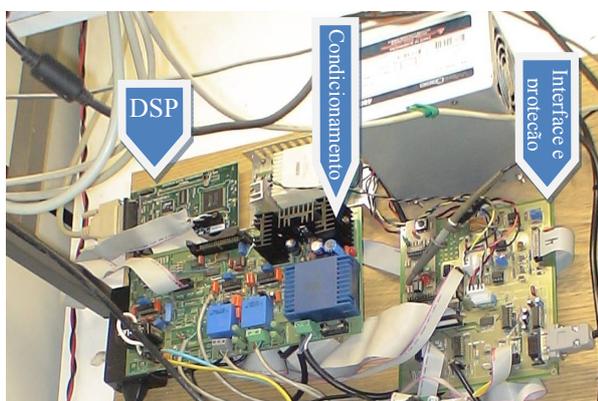


Fig. 3. Placas da unidade de controle.

A placa de interface isola opticamente os sinais de Modulação por Largura de Pulso (MLP) do DSP do circuito de acionamento do conversor do módulo de potência. O circuito de adequação dos sinais da porta serial também é implementado nesta placa. Adicionalmente, há alguns botões de comando que possibilitam o acionamento da plataforma no modo “stand alone”.

Em termos de representação esquemática, o diagrama de blocos na Figura 4 sintetiza a conexão da unidade de controle com a planta e computador. A planta, no caso de um motor, é composta por um módulo de potência (conversor) acoplado ao equipamento (exemplo, motor). Caso o experimento fosse uma fonte chaveada, o módulo de potência seria considerado como as chaves acopladas aos elementos de filtragem, isto é, capacitores e indutores.

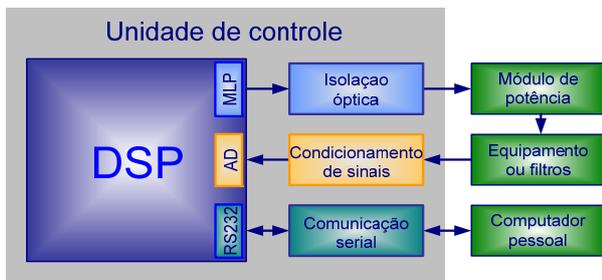


Fig. 4. Diagrama esquemático da interconexão entre a unidade de controle com dispositivos ou equipamentos externos.

No acionamento da máquina de corrente contínua com excitação independente, é possível realizar o controle do motor nos quatro quadrantes usando-se a topologia do conversor em ponte H, conforme ilustrado na Figura 5. Observar que o circuito de campo é alimentado por uma fonte de tensão CC fixa, independente do circuito de armadura. O comando dos pares de chaves do conversor “chopper” T1/T4 e T2/T3 são complementares, o que permite inverter o sentido da corrente no motor a partir controle da razão cíclica. Na interface gráfica é possível ajustar parâmetros para a proteção tanto do conversor, quanto do motor.

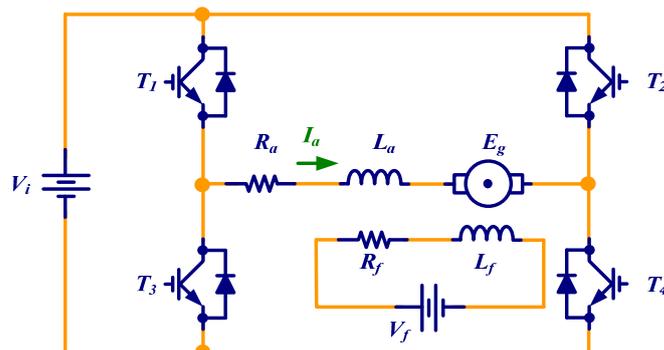


Fig. 5. Circuito esquemático de acionamento do motor de corrente contínua em quatro quadrantes.

B. Elementos de software

A estratégia de controle do sistema compreende malhas de realimentação simples ou dupla. Isto é adequado o suficiente para o projeto e análise de controladores aplicados em eletrônica de potência. O sistema provê ferramentas adicionais para auxílio ao projeto dos controladores, simulação e teste.

1) Algoritmo implementado no DSP

O DSP contém um programa, gravado na memória Flash, no qual estão inseridas todas as funcionalidades e parâmetros que podem ser selecionados na interface gráfica, mostrada na Figura 6. Logo, todas as leis de controle estão contidas no programa gravado na memória Flash do DSP. Por exemplo, se o usuário selecionar malha de controle da tensão de saída, escolher ganho para o respectivo controlador PI e escolher um valor de tempo para *startup* estas informações são enviadas para o DSP. Este envio de dados do computador para o DSP é feito através de um comando disponível na interface gráfica. Quando o DSP receber o comando para executar o programa, novamente através de uma tecla disponível na interface gráfica, somente as funções em linguagem C e/ou IQMath que executam aquilo que o usuário selecionou serão ativadas no DSP. As outras funções permanecerão inativas. A seguir, por exemplo, o usuário pode inserir a malha de corrente e verificar novamente a resposta da planta, mas agora com as duas malhas ativas (tensão e corrente). Para tal, o usuário simula a planta controlada e configura os compensadores na interface gráfica e depois envia as informações tais como tipo de controle, respectivos ganhos e tempo de *startup* para o DSP. Ao ser acionado o DSP executará somente as funções respectivas a esta nova estratégia de controle.

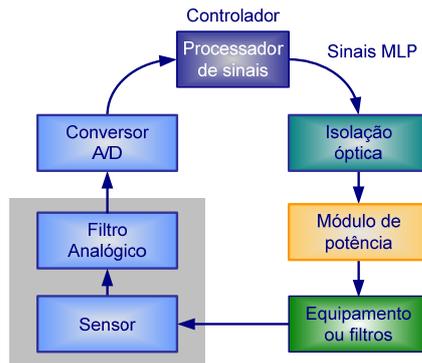


Fig. 6. Diagrama esquemático da seqüência de etapas no controle em malha fechada de uma planta genérica.

A seqüência de instruções que constituem o programa genérico implementado no DSP é executada dentro do intervalo de tempo (período) referente à freqüência de chaveamento do módulo de potência (conversor). Um sinal proveniente do temporizador, o qual é à base de tempo para a modulação PWM, é utilizado para disparar o conversor analógico-digital. Ao término de uma conversão a CPU é interrompida e as rotinas de cálculo são executadas. O fluxo de sinais na plataforma é ilustrado na Figura 6. O DSP opera executando rotinas concorrentes de controle do módulo de potência (maior prioridade) e de comunicação com o computador. O usuário pode inserir um trecho extra de código (linhas de programa) no DSP, em local pré-estabelecido, desde que o tempo total de processamento não ultrapasse aquele referente à freqüência de chaveamento, a qual por sua vez, também pode ser alterada pelo usuário. Obviamente, neste caso é necessária a compilação do novo código usando interfaces de desenvolvimento específicas do processador.

2) Interface gráfica

O aplicativo disponível no computador, desenvolvido na linguagem de programação visual Borland C++ Builder 5, permite que o usuário selecione leis de controle, configure a planta (conversor eletrônico) e monitore os dados através da seleção de funções disponíveis nos blocos do diagrama ilustrado na Figura 7. Duas malhas de controle, interna e externa, podem ser selecionadas concomitantemente ou de forma independente permitindo ao usuário avaliar o comportamento da planta de acordo com o grau de liberdade escolhido. O funcionamento em malha aberta também pode ser estabelecido permitindo a comparação com aquele em malha fechada.

a) Descrição do diagrama de blocos

A configuração mostrada na Figura 7, no exemplo de acionamento de uma máquina de corrente contínua, permite ao usuário avaliar a resposta em freqüência e o comportamento dinâmico do sistema sob controle. A um clique de mouse o usuário pode configurar a funcionalidade desejada para cada bloco. Por exemplo, no bloco PWM é possível selecionar as chaves que estarão ativas alterando a funcionalidade (topologia) do módulo de eletrônica de potência. Selecionando a função de transferência é possível optar pelo controle de corrente, velocidade ou ambos no exemplo de acionamento da máquina de corrente contínua. Blocos específicos para configurar ganhos para os sensores também devem ser configurados pelo usuário de acordo com a variável a ser controlada. O tipo de compensador P, PI, PID, "fuzzy" também pode ser selecionado. O ajuste de ganhos dos compensadores tipo proporcional e proporcional + integral é assistido por um "wizard", o qual orienta o usuário durante a escolha dos parâmetros do compensador

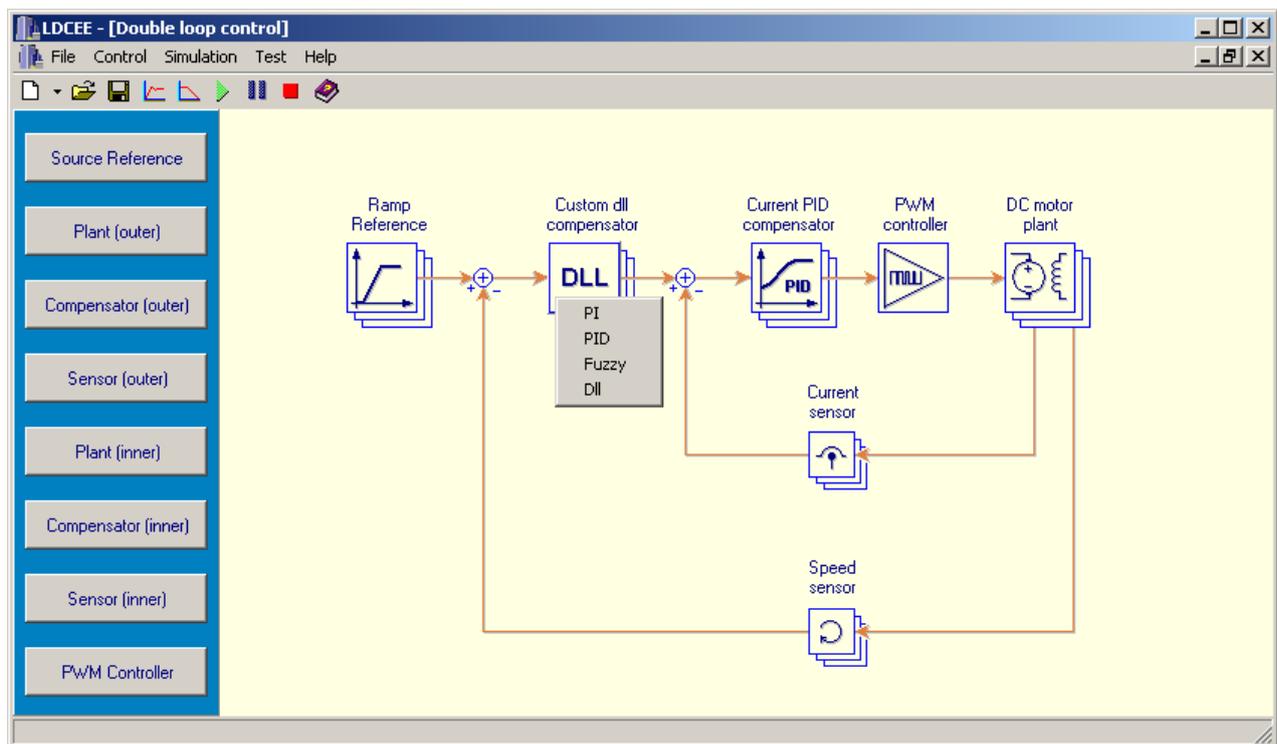


Fig. 7. Janela principal da interface gráfica com o usuário.

usando a técnica de alocação de pólos [14]. Esta funcionalidade será estendida para os outros compensadores em futuras versões.

O usuário também pode optar por escrever seu próprio algoritmo de controle num bloco especial, funcionalidade esta baseada no software (aplicativo) PSIM/SIMCAD. Neste caso é necessário compilar o código, escrito em C ou C++, para gerar uma biblioteca dinâmica (DLL) [15]. A compatibilidade da DLL com o aplicativo PSIM é uma característica interessante, pois possibilita avaliar o controle em ambiente de simulação. Além disso, o usuário pode inserir este código no DSP, desde que fazendo os ajustes necessários, por exemplo, na declaração de variáveis.

b) Simulação

A transição gradual da análise conceitual (teoria) para o sistema real (prática) foi considerada no desenvolvimento da plataforma didática. Um ambiente gráfico de simulação do comportamento médio das variáveis de controle foi implementado na interface gráfica com o usuário, a partir da discretização das funções de transferência usando a transformação bilinear, que é equivalente ao método do trapézio implícito. Logo, o usuário pode analisar através da simulação local os efeitos do tipo de compensador e dos respectivos valores escolhidos para seus parâmetros, tais como ganho e constante de tempo. Desta forma o usuário (estudante) somente acionará a planta (neste exemplo, uma máquina CC) após deter sensibilidade a respeito dos efeitos dos compensadores sobre o sistema. Cabe ressaltar que a escolha dos compensadores é assistida, ou seja, o software delimita valores iniciais para os parâmetros dos compensadores a partir dos dados da planta, especificados nas caixas de diálogo mostradas na Figura 8. A partir deste instante o usuário simula e executa alterações para obter o efeito desejado. Estes resultados de simulação podem ainda ser comparados com outros obtidos em algum aplicativo

comercial, por exemplo, PSIM, Matlab, Saber, etc.

O simulador desenvolvido oferece como saída as respostas em frequência em malha aberta e fechada do sistema, e a correspondente resposta no domínio do tempo. Cada bloco contém uma função de transferência obtida usando a transformada de Laplace e a transformação bilinear, que é utilizada para a discretização [16]. Por exemplo, (1) e (2) mostram as funções para a corrente de armadura e a velocidade da máquina. Note que estas funções são apresentadas para o usuário na Figura 8 de acordo com sua opção de controle.

$$I_a(s) = \frac{B + sJ}{(R_a + sL_a)(B + sJ) + k_T \cdot k_E \cdot I_f^2} \cdot V_a(s) + \frac{k_E \cdot I_f}{(R_a + sL_a)(B + sJ) + k_T \cdot k_E \cdot I_f^2} \cdot T_L(s) \quad (1)$$

$$\omega(s) = \frac{k_T \cdot I_f}{B + sJ} \cdot I_a(s) - \frac{1}{B + sJ} \cdot T_L(s) \quad (2)$$

em que,

- R_a - resistência de armadura.
- L_a - indutância de armadura.
- I_f - corrente de campo.
- I_a - corrente de armadura.
- V_a - tensão de armadura.
- B - atrito viscoso.
- J - momento de inércia.
- T_L - torque de carga.

O algoritmo de controle com ações proporcional e integral, ou simplesmente PI, foi implementado no DSP com saturação dinâmica (“anti-windup”), para melhorar a resposta transitória e usando o método de discretização de Euler.

Para efetuar a simulação, além dos compensadores, o usuário deve delimitar o tempo de início e fim da simulação e taxa de amostragem ou frequência inicial e final e número

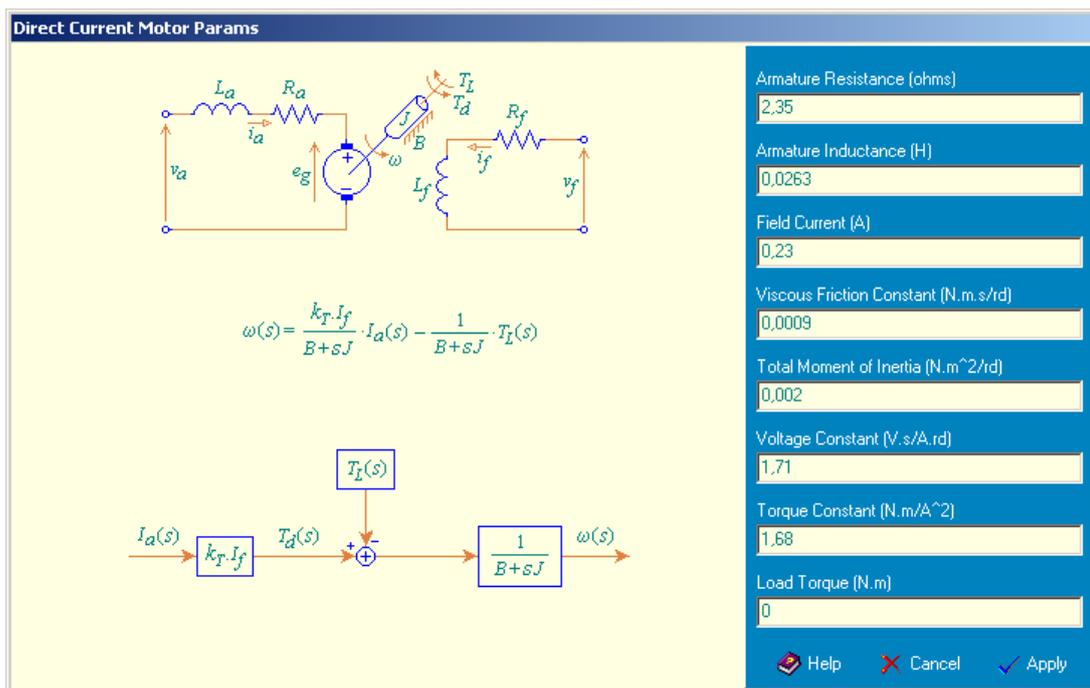


Fig. 8. Janela de configuração dos parâmetros do motor CC.

de pontos por década. Estes últimos para traçar a resposta em frequência.

c) Teste e acompanhamento de resultados

A plataforma didática integra simulação, teste e acompanhamento de resultados práticos. Depois de efetuadas as configurações e simulações desejadas, ao pressionar o botão “go”, todas as informações são transferidas para o processador DSP e o sistema começa sua operação. Cabe destacar que o código fonte do DSP não é alterado, ou seja, a interface gráfica envia somente os parâmetros e comandos necessários para realizar o ensaio. De acordo com a seleção das opções de controle pelo usuário, somente algumas rotinas do programa do DSP são executadas. Notar que a estrutura de controle é fixa, isto é, não é possível alterar o diagrama de blocos após selecionar a estratégia de controle (malha simples ou dupla de realimentação).

Também é acessível ao usuário alterar o ganho dos compensadores com o sistema em operação (“on-line”), contudo somente pequenas variações são permitidas. A transferência de informações via porta serial é feita através de “API do Windows. No entanto, o emprego futuro de “device drivers” poderá melhorar o fluxo de informações entre o computador e o DSP. Com a planta em operação o usuário passa a acompanhar o comportamento de algumas grandezas físicas do sistema através de uma interface gráfica (função osciloscópio). Neste caso o DSP além de controlar o processo em si, passa a enviar para o computador pacotes de dados (porta serial) de acordo com a capacidade de recepção (“baud rate”) do computador, a qual neste exemplo é de 115 kbps.

III. EXEMPLO DE APLICAÇÃO: ACIONAMENTO DE UMA MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA

Os resultados de simulação e experimentais são mostrados a seguir considerando o sistema mostrado na Figura 7, ou seja, o acionamento da máquina CC com realimentação simultânea de corrente e velocidade. A velocidade é realimentada através de um “encoder” incremental conforme indicado na Figura 2 e a corrente através de um sensor com efeito Hall.

Adicionalmente o usuário pode selecionar somente controle de velocidade (sem realimentação de corrente) e ou somente controle de corrente (sem realimentação de velocidade). Em ambas as estratégias de controle, uma das variáveis pode variar naturalmente, portanto a plataforma didática automaticamente impõe um limitador de corrente, com valor estabelecido pelo usuário, ou um limitador de velocidade, de acordo com o controle escolhido.

A plataforma didática permite o fluxo bidirecional de energia, portanto na aplicação da máquina CC a mesma pode ser motorizada ou atuar como gerador, caso o usuário disponha de uma máquina primária conforme mostrado na Figura 2. O barramento CC do conversor eletrônico dispõe de um resistor de descarga, o qual somente é conectado quando um nível máximo de tensão, configurado pelo usuário, for ultrapassado. Esta proteção é indispensável em aplicações didáticas onde a máquina opera como gerador CC.

A. Ambiente de simulação

Inicialmente, o usuário pode avaliar a resposta do sistema através do ambiente de simulação, conforme ilustrado nas Figuras 9, 10 e 11. As respostas em frequência, com os

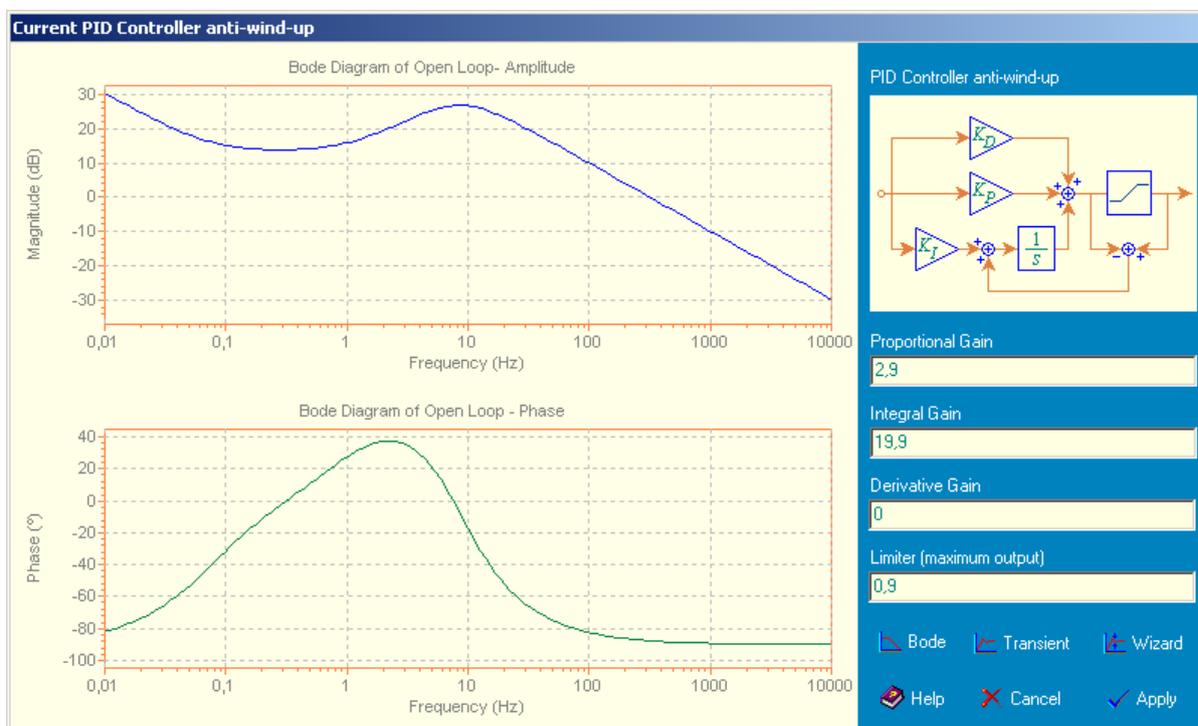


Fig. 9. Diagrama de bode da malha interna de corrente.

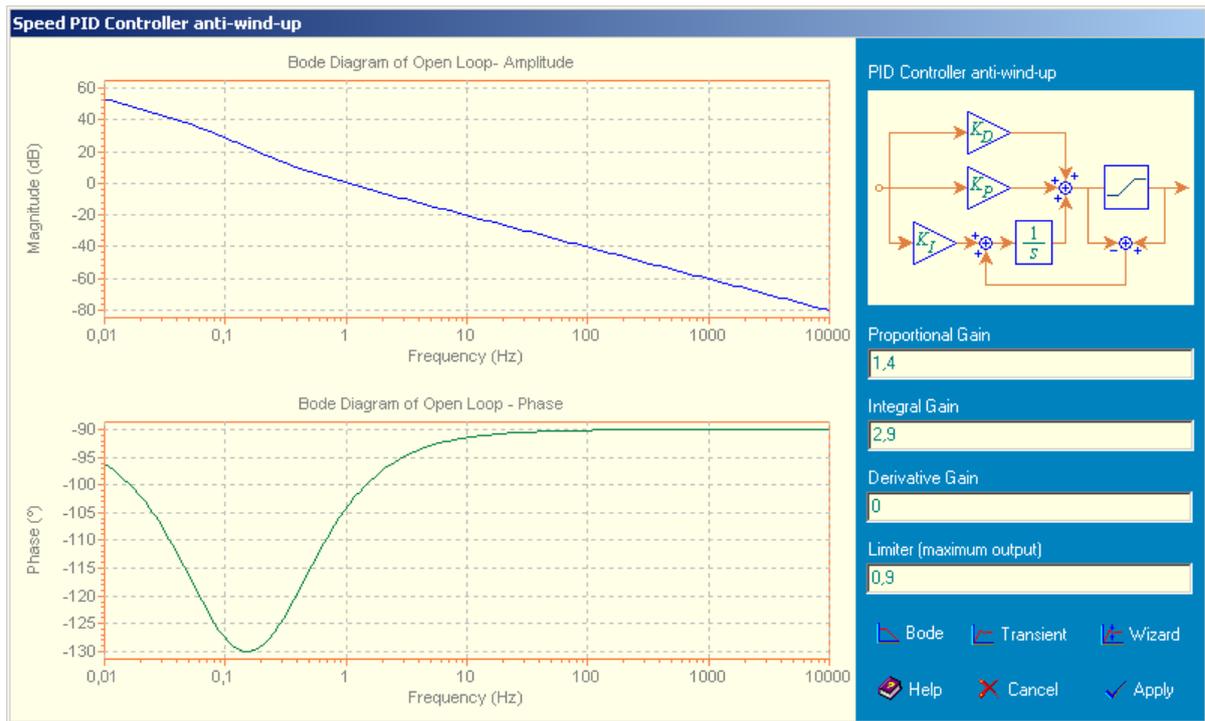


Fig. 10. Diagrama de bode da malha externa de velocidade.

ganhos escolhidos pelo usuário, para as malhas de corrente e velocidade são visualizadas na Figura 9 e na Figura 10, respectivamente. No caso de uma situação de aprendizado e/ou pouco conhecimento, o usuário é assistido durante o projeto, ou seja, dispõe de um auxílio (botão “wizard” no canto inferior direito) o qual estabelece parâmetros iniciais para os compensadores. O usuário pode verificar a resposta transitória e a situação de regime, conforme mostra a Figura 11, a partir de um clique de mouse na própria caixa de diálogo de configuração dos compensadores.

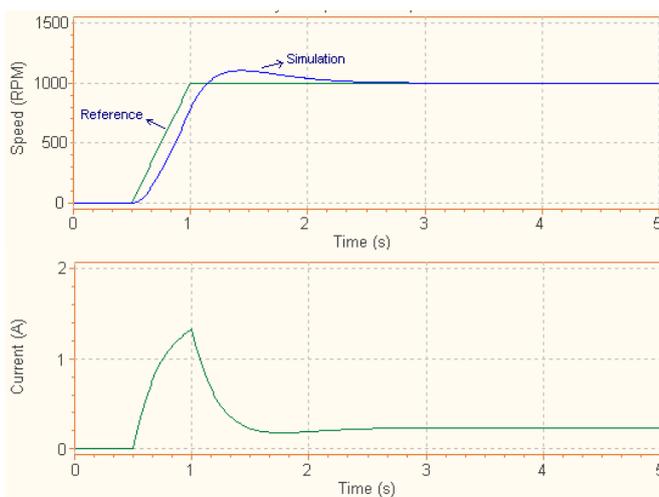


Fig. 11. Simulação da resposta dinâmica da variação da referência de velocidade do motor CC.

O perfil desejado para a referência de velocidade também é configurado pelo usuário, ou seja, pode ser um perfil próximo ao degrau ou uma rampa com o tempo de aceleração

desejado, conforme visualizado na Figura 11. Notadamente, a plataforma dispõe de proteção de corrente para os casos, por exemplo, onde o usuário estabelece ganhos “errôneos” que permitem a ocorrência de elevado “overshoot”, o qual pode ultrapassar a capacidade física do hardware.

B. Resultados Experimentais

Conforme citado anteriormente, a plataforma didática dispõe de uma interface de monitoração de variáveis, ou seja, uma função “osciloscópio”, a qual é visualizada na Figura 12. Este resultado experimental está muito próximo aquele previsto durante a fase de projeto dos compensadores com o auxílio do simulador (Figura 11). A Figura 13 mostra a aquisição da corrente, feita com um osciloscópio Tektronix, a qual pode ser confrontada com a interface de monitoração de variáveis reais.

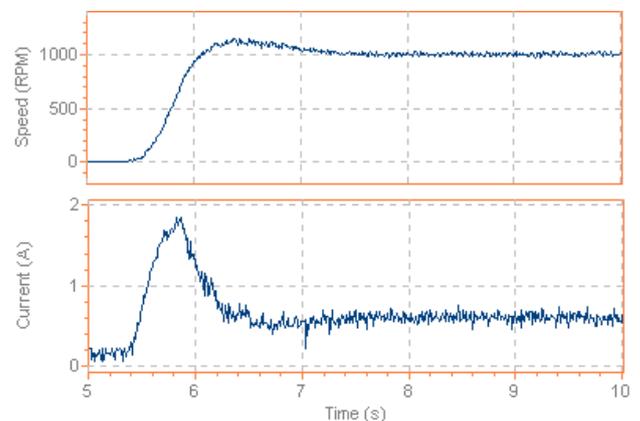


Fig. 12. Resultado experimental da variação da referência de velocidade, visualizado na janela de interface gráfica com o usuário.

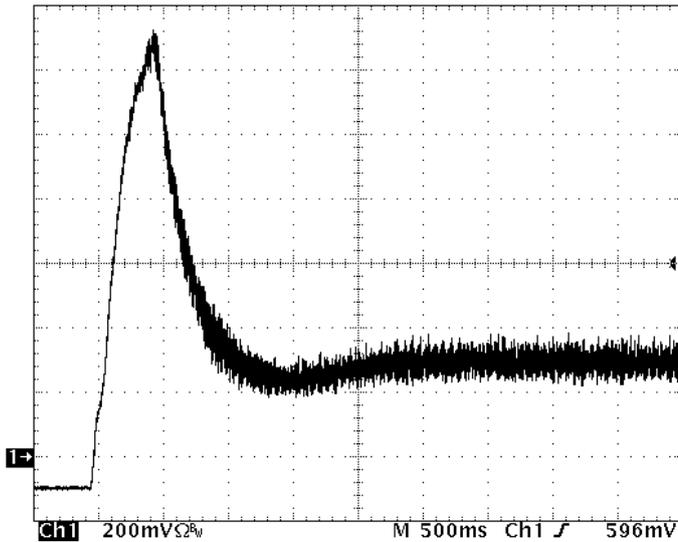


Fig. 13. Perfil da corrente de armadura da máquina CC obtida com o osciloscópio (0,2A/div e 500ms/div).

IV. ESTIMADOR DE PARÂMETROS

Para aplicações em máquinas elétricas de corrente contínua a plataforma didática dispõe de um software que submete a máquina a um ensaio elétrico e outro mecânico, executa a aquisição dos sinais e calcula os parâmetros elétricos e mecânicos.

Os cálculos para obter os parâmetros elétricos são feitos

utilizando uma versão modificada da técnica de Pask's a qual se aplica para modelos de segunda ordem. Uma descrição clara e objetiva é apresentada em [17].

Sucintamente, o ensaio elétrico consiste em aplicar um degrau de tensão à máquina e, a partir do perfil das formas de onda de tensão, de velocidade e do valor de tensão aplicada, adquiridos automaticamente pelo software (Figura 14) são determinados os parâmetros elétricos.

Para realizar o teste, o usuário deve informar a tensão nominal, velocidade nominal em RPM, percentual da tensão que será aplicada a máquina na forma de um degrau de tensão. O valor de 10% é pré-definido, pois valores elevados podem causar picos que acionam a proteção de corrente. Contudo, o usuário tem total liberdade para configurar qualquer valor de tensão. Recomenda-se aumentar, se necessário, com cautela o valor percentual até verificar uma forma de onda de corrente semelhante aquela da Figura 14. O intervalo de tempo deve ser ajustado para que a forma de onda de corrente, característica a resposta degrau, seja totalmente capturada. Este tempo varia de acordo com a máquina.

Os cálculos dos parâmetros mecânicos seguem a metodologia proposta em [18]. Na estimação dos parâmetros mecânicos o software automaticamente acelera a máquina, usando uma das estratégias de controle de velocidade já descrita anteriormente. Ao atingir um valor de regime, que pode ser estabelecido pelo usuário, o conversor eletrônico é desconectado automaticamente. O perfil de velocidade

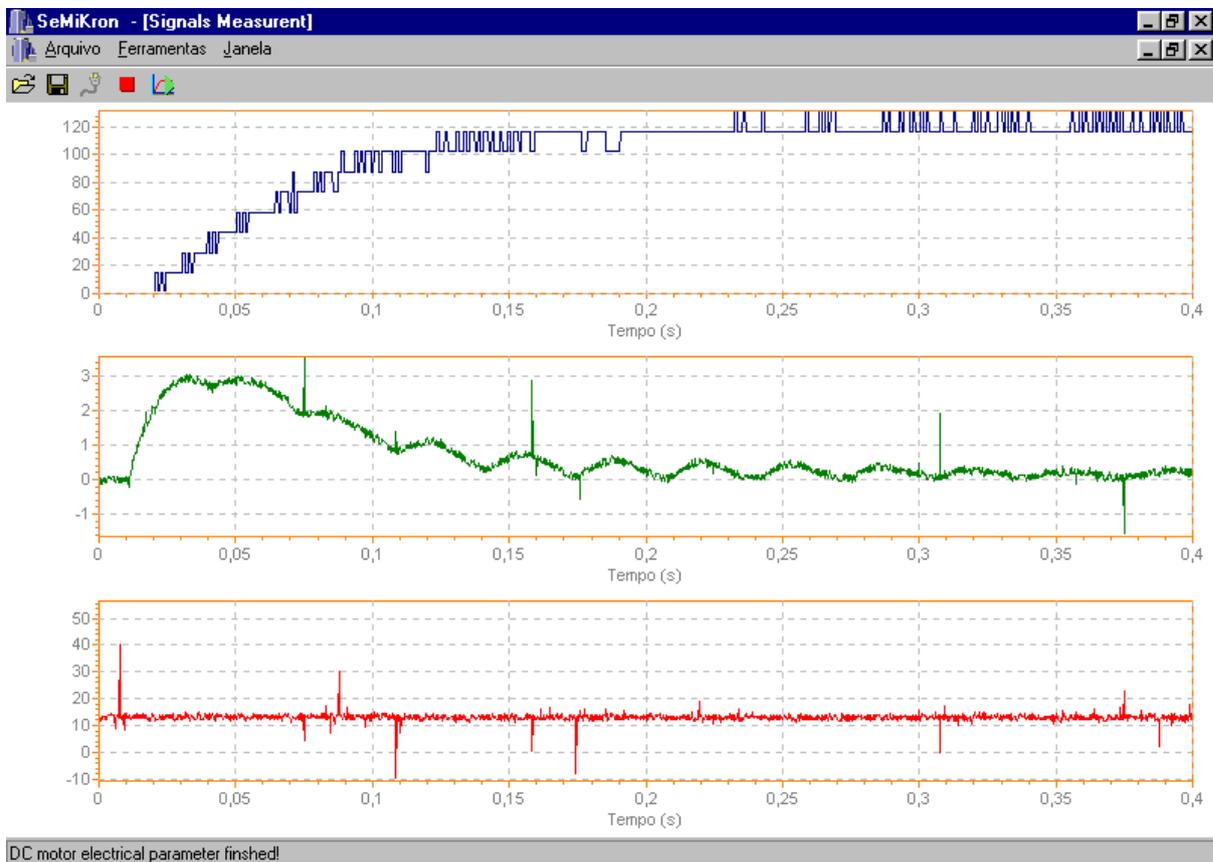


Fig. 14. Ensaio para a determinação de parâmetros elétricos. De cima para baixo: velocidade [RPM], corrente [A], tensão [V].

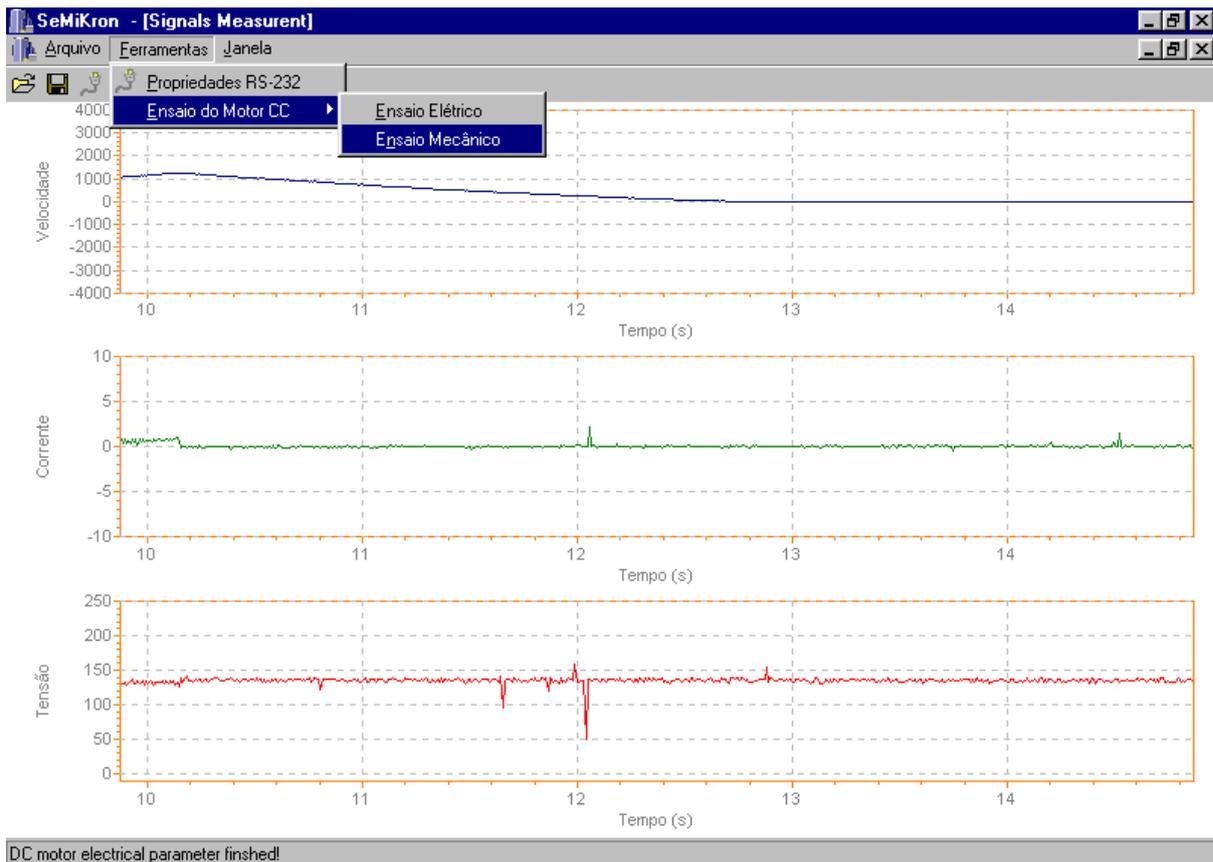


Fig. 15. Ensaio para a determinação de parâmetros mecânicos. De cima para baixo: velocidade [RPM], corrente [A], tensão [V].

resultante é utilizado para estimar os parâmetros mecânicos, a partir da constante de tempo mecânica conforme ilustrado na Figura 15.

Vários ensaios podem ser feitos e o software disponibiliza ao final um valor médio para cada parâmetro conforme mostrado na Figura 16.

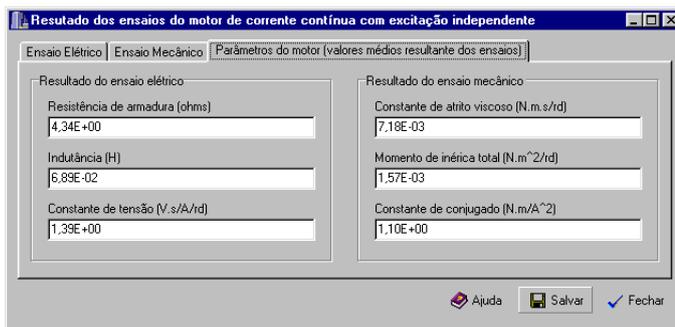


Fig. 16. Valores estimados para os parâmetros elétricos e mecânicos da máquina CC.

V. CONCLUSÕES

A plataforma didática apresentada propicia ao usuário uma visão integrada do conhecimento, permitindo que o mesmo aplique, de forma sistemática e segura, conceitos de eletrônica de potência em ambiente de laboratório acadêmico.

Todos os conceitos necessários para uma aplicação industrial podem ser experimentados, ou seja, estimação de parâmetros, escolha de leis de controle, projetos de

compensadores, além da visualização dos respectivos resultados.

A plataforma confere ao usuário uma rápida inserção no ambiente experimental, uma vez que dispõe de software assistente para projeto e proteções que evitam danos a planta contra eventuais erros cometidos durante o aprendizado.

Os testes executados em ambiente acadêmico comprovaram a eficácia da plataforma.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Texas Instruments, Analog Devices e Semikron pelos processadores e dispositivos utilizados durante o desenvolvimento deste trabalho. Este projeto foi parcialmente financiado pelas agências de fomento a pesquisa CNPq e FAPESP.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Monti, et al., "Rapid prototyping of digital controls for power electronics". IEEE Transactions on Power Electronics, May 2003, vol. 18, issue 3, pp. 915-923.
- [2] xPC Target 3.4. "Product Description. Working with xPC Target". <http://www.mathworks.com/products/xpctarget/description2.html>.
- [3] J. Pontt, J. Rodriguez and R. Huerta, "Digital signal processing course innovations for power electronics practice". 33rd Annual Frontiers in Education, Nov. 2003, vol.2, pp. F1B 6 – 11.

- [4] J. Guo, D. Boroyevich, S.H. Edwards, “Distributed, modular, open control architecture for power conversion systems”. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, June 2004, vol. 3, pp. 2258 – 2263.
- [5] M.J Moure et al., “Educational application of virtual instruments based on reconfigurable logic”. *IEEE International Conference on Microelectronic Systems Education*, July 1999, pp. 24 – 25.
- [6] L. Cristaldi, A. Ferrero, V. Piuri, “Programmable instruments, virtual instruments, and distributed measurement systems: what is really useful, innovative and technically sound?” *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, Sep 1999, vol. 2, issue 3, pp.20 – 27.
- [7] S. Finco, W. R. Melo, J. A. Pomilio, M. I. Castro Simas, “Smart power device targeted to educational purposes”, *IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference*, June 2002, vol. 2, pp. 473 – 478.
- [8] F. C. Dezza, L. Cristaldi, A. Ferrero, A. Monti, “Real time virtual system for electric drive testing: basic concepts and implementation”, *8th Mediterranean Electrotechnical Conference*, May 1996, vol. 1, pp. 513 – 516.
- [9] I. Sadasiva, F. Flinders, W. Oghanna, “A graphical based automatic real time code generator for power electronic control applications”, *Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, July 1997, vol. 3, pp. 942 – 947.
- [10] J. Jacobs, D. Detjen, C.U.Karipidis, R. W. de Doncker, “Rapid Prototyping Tools for Power Electronic Systems: Demonstration with Shunt Active Power Filters”. *IEEE Transactions on Power Electronics*, March 2004, vol. 19, no 2, pp. 915-923.
- [11] Texas Instruments. “TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812, TMS320c2810, TMS320c2811, TMS320c2812, Digital Signal Processors Data Manual. Literature number: SPRS1740”, Apr. 2001 – Revised July 2007.
<http://www.focus.ti.com/lit/ds/sprs1740/sprs1740.pdf>.
- [12] Spectrum Digital. eZdsp™ F2812, Technical Reference, Rev. F. Sept, 2003.
http://c2000.spectrumdigital.com/ezf2812/docs/ezf2812_techref.pdf.
- [13] Code Composer Studio Development Tools v3.3 *Getting Started Guide (Rev. H)*, SPRU509H, October, 2006. Texas Instruments.
<http://focus.ti.com/lit/ug/spru509h/spru509h.pdf>.
- [14] K. J. Astrom, T. Hagglund, “PID Controllers: Theory, Design, and Tuning”, 2nd ed., International Society for Measurement and Con, 1985, ISBN 1556175167, ch. 4.
- [15] B. Kamiriski, K. Wejrzanowski, W. Koczara, “An application of PSIM simulation software for rapid prototyping of DSP based power electronics control systems”. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference*, June 2004, vol. 1, pp. 336 – 341.
- [16] A. Kern, U. Kunz, “A modular simulation system for power electronics and control applications”, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, June 1993, pp. 305 – 310.
- [17] W. Lord, J. H. Hwang, “DC Servomotors – Modeling and Parameter Determination”. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-13, n° 3, May/June 1977.
- [18] J.C.Geromel e A. B. Palhares, “Análise Linear de Sistemas Dinâmicos: Teoria, Ensaio Práticos e Exercícios”. Editora Edgard Blücher, 2001.

DADOS BIOGRÁFICOS

Edson Adriano Vendrusculo, é engenheiro eletricitista, mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual de Campinas. Atua como consultor na área de eletrônica industrial e pesquisador colaborador junto a Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Unicamp. Realizou estágio de pós-doutoramento junto ao Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da Unicamp e foi consultor-membro da International Energy Initiative – IEI/LA. Dr. Vendrusculo é membro da SOBRAEP.

André Augusto Ferreira, é engenheiro eletricitista (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 no desenvolvimento de soluções em eletrônica de potência para o suprimento de energia de veículos elétricos. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência e veículos elétricos.

José Antenor Pomilio, é engenheiro eletricitista, 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 Associação Brasileira de Eletrônica de Potência – SOBRAEP e membro do comitê administrativo da IEEE Power Electronics Society. Atualmente é 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, da ABENGE e Senior Member do IEEE.