



**COBENGE 2005**

**XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia**

“Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças”

12 a 15 de setembro - Campina Grande Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPE

## **CONTROLE E MODELAGEM DE PROCESSOS: DESENVOLVIMENTO DE UM MÓDULO EXPERIMENTAL INTEGRADO**

**Jonathan A. E.** – aguiasperidon@yahoo.com.br

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, Departamento de Energia.

Rua Benjamin Constant, 790 – Centro

36016.400 – Juiz de Fora – Minas Gerais

**Frederico T. G.** – fredelet@yahoo.com.br

**Rodrigo V.** – vianello.rd@ig.com.br

**Thiago S. S.** – axlsenra@yahoo.com

**Davi F. S.** – davifsbr@yahoo.com.br

**Francisco J. G.** – chicogomes@terra.com.br

**Resumo:** *O trabalho apresenta o desenvolvimento de um módulo de laboratório para ensino dos conceitos fundamentais associados ao controle e modelagem de processo. O sistema opera de forma integrada associando um módulo físico - dois motores interconectados em uma configuração motor-tacogerador – a um ambiente computacional que disponibiliza as facilidades para utilização do conjunto.*

*É fato conhecido a insuficiência, e mesmo, em muitos casos, a precariedade dos laboratórios, especialmente nas áreas de controle e automação, onde funcionam de maneira bem limitada. Esta situação, que tem suas raízes em condições as mais diversas possíveis - custo elevado de componentes, inexistência de fornecedores com quantidade e qualidade suficientes, necessidade de importação de diversas partes, entre outras. Adicionalmente, há que se assinalar o alto custo de material didático e de ferramentas adequadas para as simulações, que estejam ao alcance dos alunos.*

*Dada esta situação, a proposta deste trabalho consistiu no desenvolvimento de uma ferramenta para utilização em laboratório que permita ao aluno de engenharia elétrica/eletrônica o estudo e aplicação dos conceitos fundamentais de controle de processos, ajudando a superar, em certa medida, as deficiências estruturais da área. Trata-se de um equipamento mais acessível financeiramente que os existentes atualmente no mercado, mas que permite alcançar resultados equivalentes.*

**Palavras-chaves:** *Controle de Processo, Modelagem de Processos, Ambiente Computacional, Laboratório de Controle e Automação*

### **1. INTRODUÇÃO**

A área de controle de sistemas e processos, por sua interdisciplinaridade e multiplicidade de aplicações constitui, de forma crescente, um ramo fundamental da engenharia. Esta importância reforça a necessidade de se oferecer aos estudantes uma estrutura propícia a que os mesmos adquiram uma base sólida na área, tanto teórica quanto prática. A realidade universitária, porém, não responde a esta expectativa e, por uma série de razões históricas e estruturais, se defronta com uma grande deficiência de laboratórios para o ensino de controle e automação impossibilitando que os alunos possam visualizar e aplicar, nas práticas laboratoriais, as teorias que aprendem nas salas de aula.

Esta situação, vivenciada pelos autores, motivou a iniciativa de se desenvolver um módulo que possibilite aos alunos a prática laboratorial dos conceitos fundamentais de controle e modelagem de processos, a exemplo de outras instituições (COELHO,2001). A proposta implementada consistiu em um conjunto de dois motores, interconectados eixo-a-eixo, funcionando um deles como taco-gerador, associado a um ambiente computacional que disponibiliza as facilidades para utilização do conjunto. A partir da tensão gerada pelo tacômetro, é possível controlar e modelar o motor possibilitando aos alunos aplicarem os conceitos teóricos dos algoritmos de controle.

O ambiente computacional desenvolvido permite alterar, em tempo real, as diversas variáveis operacionais do sistema, tais como nível de tensão e tipo de referência aplicada ao motor. Pelas diferentes complexidades associadas, o ambiente disponibiliza perturbações em degrau, onda quadrada, rampa, parábola, ou mesmo sua combinação. Em sua primeira versão, o ambiente incorporou duas opções de controladores (P e PI), que devem ser sintonizados pelos alunos mostrando como o sistema e os controladores respondem às mudanças dos parâmetros dos controladores (ISERMANN, 1981). Outra facilidade disponibilizada pelo ambiente computacional é a possibilidade de se efetuar a modelagem do sistema, construindo as respectivas funções de transferência. Esta modelagem pode ser efetuada utilizando-se procedimentos clássicos, como a resposta ao degrau, ou estimação paramétrica através do algoritmo dos mínimos quadrados (COELHO, 2004). O ambiente possui concepção gráfica, amigável para o usuário, permitindo visualizar, também em tempo real, todas as respostas do módulo aos controles realizados.

O sistema apresenta ainda todos os diagramas de blocos dos diversos módulos, mostrando seu funcionamento, bem como os circuitos minuciosamente detalhados, com os valores e nomes dos componentes utilizados, permitindo aos usuários efetuar a associação entre os conceitos teóricos e sua aplicabilidade prática.

O trabalho está dividido como segue: a seção dois apresenta a parte física do módulo, a seção três o ambiente computacional e a quatro exemplos de aplicação e resultados. As conclusões gerais compõem a seção cinco, encerrando o trabalho.

## **2. MÓDULO FÍSICO**

A parte física do módulo construído baseia-se na estrutura de um sistema de geração e distribuição de energia elétrica, onde as cargas são simuladas através de resistores e “leds”, alimentados pelo taco-gerador. Os circuitos utilizados para análise, observação e experimentação das teorias de controle e modelagem de processos, dividem-se em duas partes principais: a primeira parte envolve a estrutura necessária ao acionamento e medição de parâmetros do grupo motor-gerador (MALVINO, 1987), enquanto a segunda é responsável pela interface módulo – computador. A figura 1 a seguir apresenta a concepção estrutural do circuito de acionamento.

Ainda compondo essa primeira parte existe o circuito associado à parte de medição, que efetua a aquisição do sinal oriundo do taco-gerador, enviando-o para o circuito de controle. Este sinal coletado corresponde a um nível de tensão para cada incremento da rotação. Sua concepção estrutural é mostrada na figura 2

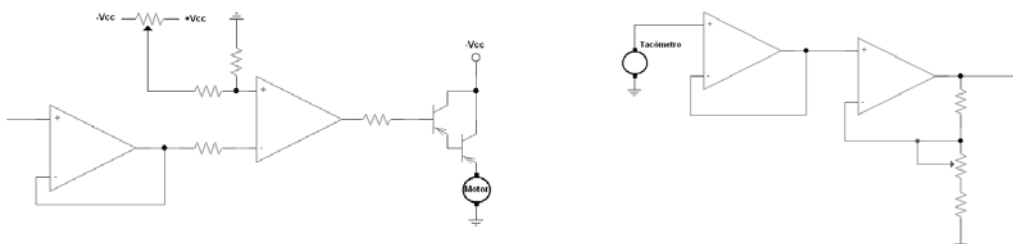


Figura 1 – Concepção do circuito de acionamento      Figura 2 – Concepção do circuito de medição

Aspecto importante a considerar na elaboração do projeto e implementação do módulo foi a seleção apropriada dos motores, com características necessárias à montagem do conjunto. Para operar como tacômetro, buscou-se um motor que pudesse funcionar como gerador cc e que possuísse uma relação rotação x tensão gerada a mais linear possível, proporcionando uma informação exata do sistema, assegurando o estabelecimento de uma lei de controle eficaz, bem como a construção de modelos representativos do sistema. Para se chegar à uma solução final, foram ensaiados diversos motores de fabricantes nacionais (<http://www.actionmotors.com.br>), com aplicação de torques constantes em seus eixos e efetuando-se a medição da tensão em seus terminais. O mesmo tipo de ensaio foi utilizado para escolha do motor, porém neste caso, aplicou-se tensão em seus terminais medindo-se a rotação em seu eixo através de um tacômetro digital. As figuras 3 e 4 apresentam os resultados obtidos para os motores escolhidos.

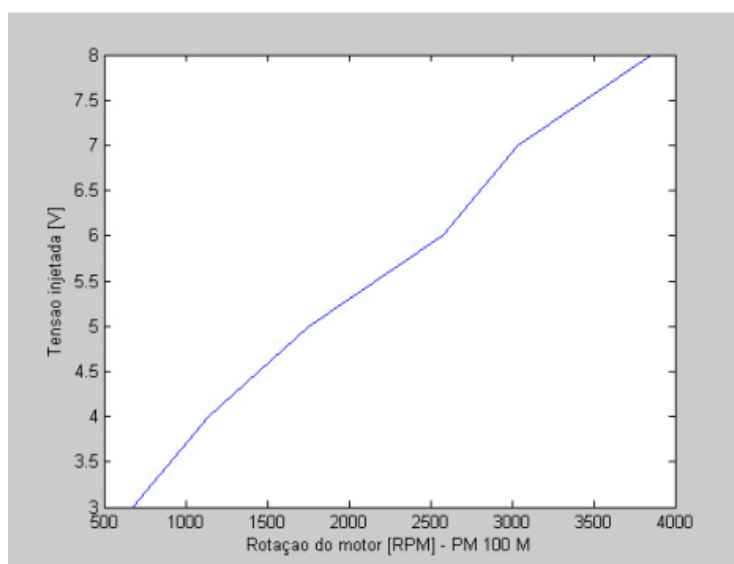


Figura 3 – Curva do motor selecionado (PM100-M)

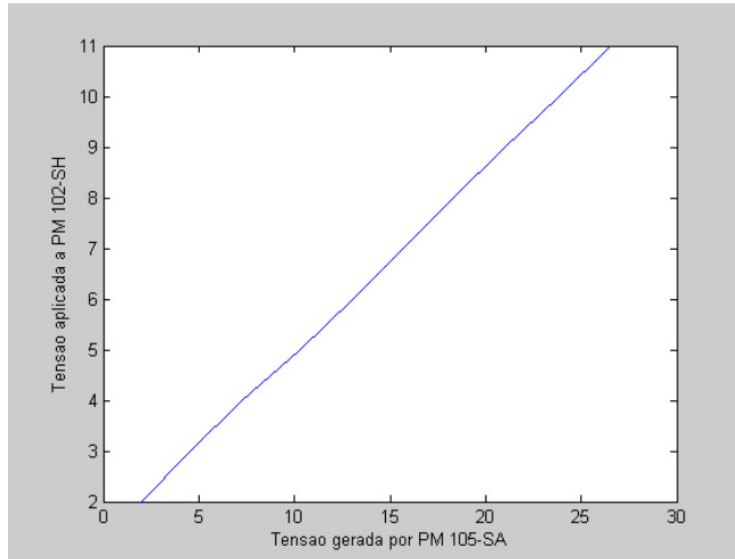


Figura 4 – Curva do taco-gerador selecionado (PM105-SA)

A segunda etapa de implementação do módulo envolveu o projeto e construção de uma placa de aquisição de dados, necessária ao interfaciamento do ambiente computacional com os dispositivos de acionamento e medição do sistema, efetuando tanto a conversão digital – analógica como a analógica – digital. O sistema de conversão digital – analógico faz o interfaciamento entre os algoritmos de controle oriundos do computador e os motores. O sistema de conversão analógico – digital faz o interfaciamento entre as variáveis do sistema e o computador. Ambos trabalhando de forma independente e simultânea. A comunicação entre o computador e a placa de aquisição de dados foi realizada utilizando-se porta paralela do computador.

No processo de controle do sistema, mais especificadamente do motor, utilizou-se na comunicação do computador com os motores um conversor digital – analógico. Existem diversos métodos e circuitos para implementar a operação D/A. Neste caso específico, utilizou-se uma rede R/2R de 4 bits (TOCCI, 2003; SEDRA, 2000), cuja concepção é mostrada na figura 5.

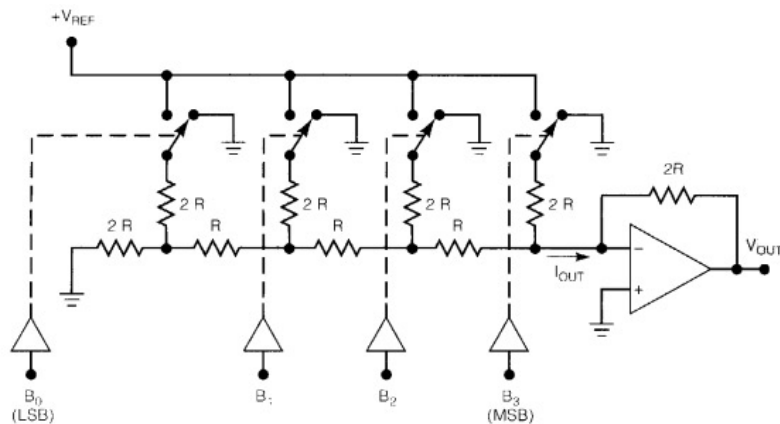


Figura 5 – Circuito básico da rede R/2R

Nesta topologia somente dois valores diferentes de resistores são utilizados, R e 2R. A corrente  $I_{OUT}$  depende da posição das quatro chaves, e as entradas binárias  $B_3 B_2 B_1 B_0$  controlam os estados das chaves. Sendo assim para uma determinada palavra binária teremos uma composição de chaves abertas e fechadas resultando num determinado valor de tensão de saída. No processo de monitoramento dos motores, utilizou-se um conversor analógico – digital. O processo de funcionamento do D/A é simples. Ele recebe um sinal analógico de tensão na entrada, proveniente do gerador que está acoplado ao motor. E, após um certo tempo, produz um código digital na saída, proporcional à entrada analógica, que é dirigido para o computador. O conversor A/D utilizado foi o TLC0820ACN (<http://www.ti.com>) que utiliza o método “flash”. Conversores A/D com esta característica funcionam através de lógica interna baseada em comparadores de magnitude associados a um codificador de prioridade. Este modelo foi selecionado por suas excelentes características relacionadas ao tempo de conversão.

A figura 6 mostra os circuitos de acionamento do motor e de medição dos sinais provenientes do tacômetro enquanto as chaves à esquerda possibilitam inserir distúrbios no sistema. A inserção de perturbações é sinalizada ao operador por um conjunto de “leds”, que se acendem informando que o sistema está funcionando em um novo regime.

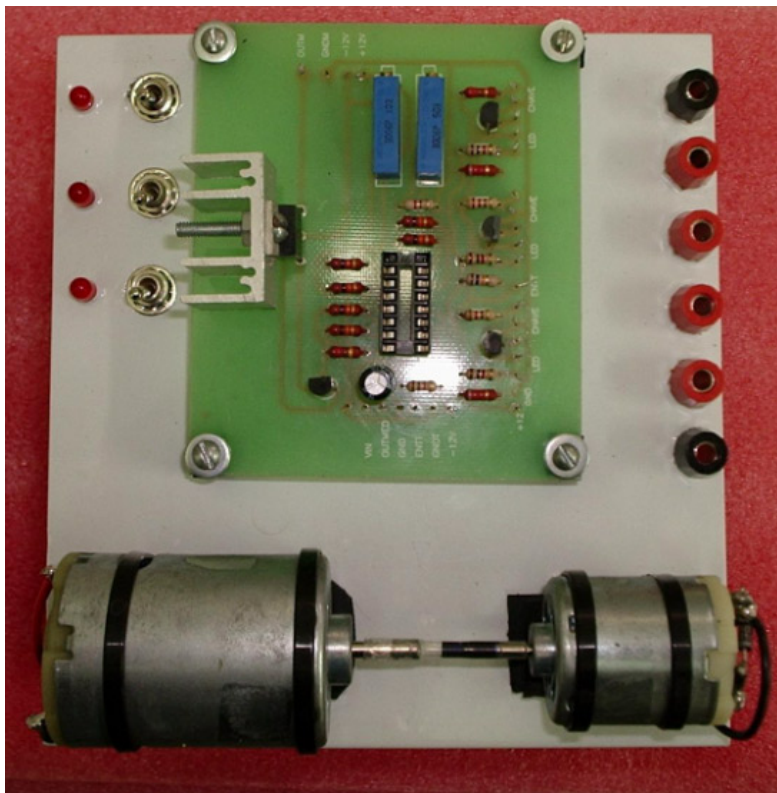


Figura 6 – Circuito de acionamento e de medição

A placa contendo o circuito de aquisição de dados, com o respectivo interfaceamento com o computador, executado através de sua porta paralela, é mostrada na figura 7.

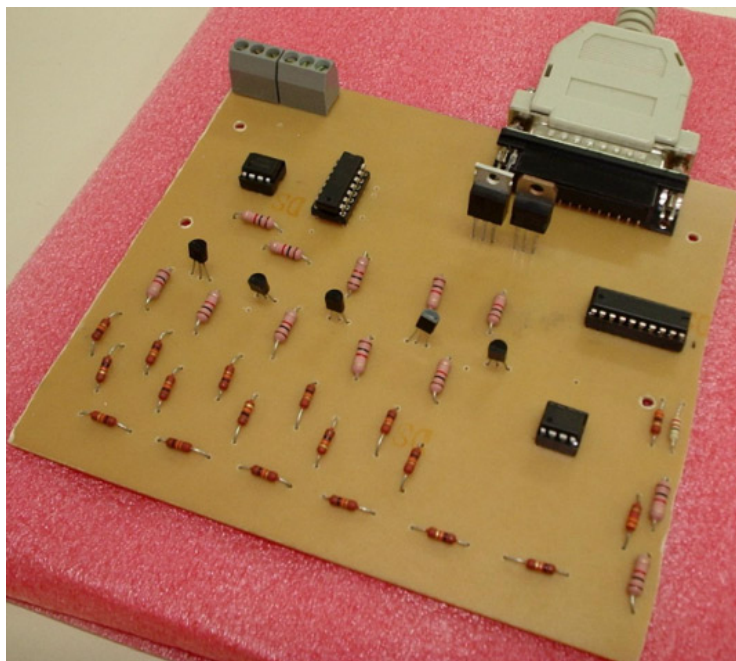


Figura 7 – Circuito de conversão do sinal ADA

Uma visão geral o módulo implementado pode ser observada na figura 8. Suas dimensões são compactas (15cm x 9cm x 14cm), permitindo sua utilização pelos alunos em laboratório, sem complexidades ou necessidade de bancadas adicionais ou construídas especificamente para este tipo de ensaio.

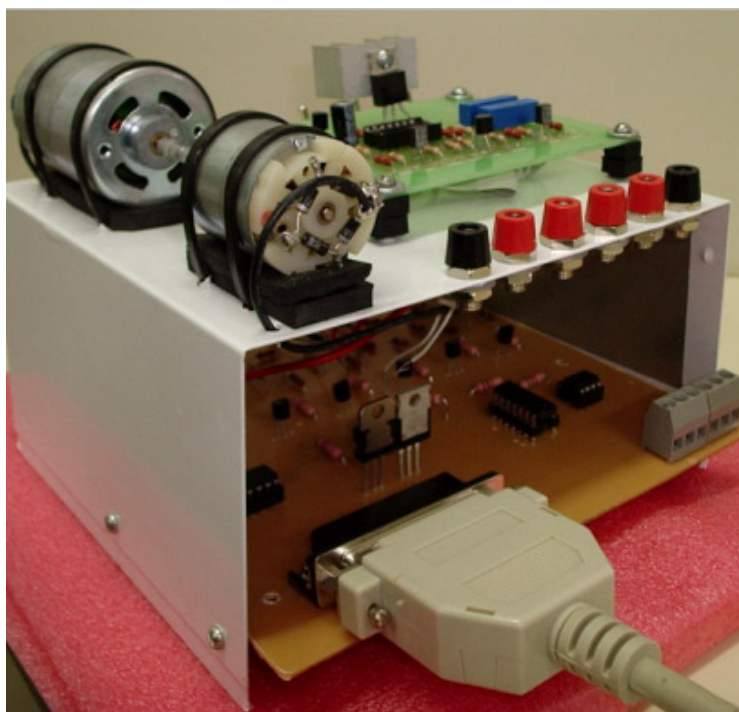


Figura 8 – Visão geral do módulo implementado

### 3. AMBIENTE COMPUTACIONAL

A implementação do módulo abrangeu o desenvolvimento de um ambiente computacional que possibilitasse ao aluno utilizar, de forma fácil e integrada, todas as ferramentas incorporadas ao sistema. Dentro do enfoque de ser totalmente amigável, o ambiente apresenta uma janela principal onde o aluno pode operar, e visualizar, diversos tipos de referência, respostas do sistema, comportamentos do controlador, modelos obtidos e erros existentes. Estas informações são atualizadas em tempo real permitindo melhor compreensão das diversas opções disponibilizadas pelo sistema. A janela principal do ambiente desenvolvido pode ser visualizada na figura 9. O ambiente disponibiliza duas opções básicas: controle e modelagem do sistema. Para o primeiro caso, a seqüência de passos será a seguinte:

- 1) Selecionar a referência desejada, dentre as apresentadas e ajustar os seus parâmetros;
- 2) Selecionar a estrutura do controlador a ser utilizado e sintonizar seus parâmetros;
- 3) Habilitar o início do processo e efetuar o monitoramento dos resultados, inserindo ou não perturbações de carga.

A segunda opção disponibilizada consiste em efetuar a modelagem do processo, para o que o sistema disponibiliza a opção de modelagem clássica ou por estimação paramétrica, utilizando o algoritmo dos mínimos quadrados. Para este caso, a seqüência de passos será a seguinte:

- 1) Selecionar o tipo de modelagem desejada;
- 2) Informar os parâmetros solicitados pelo sistema;
- 3) Habilitar o início do processo e efetuar o monitoramento dos resultados.

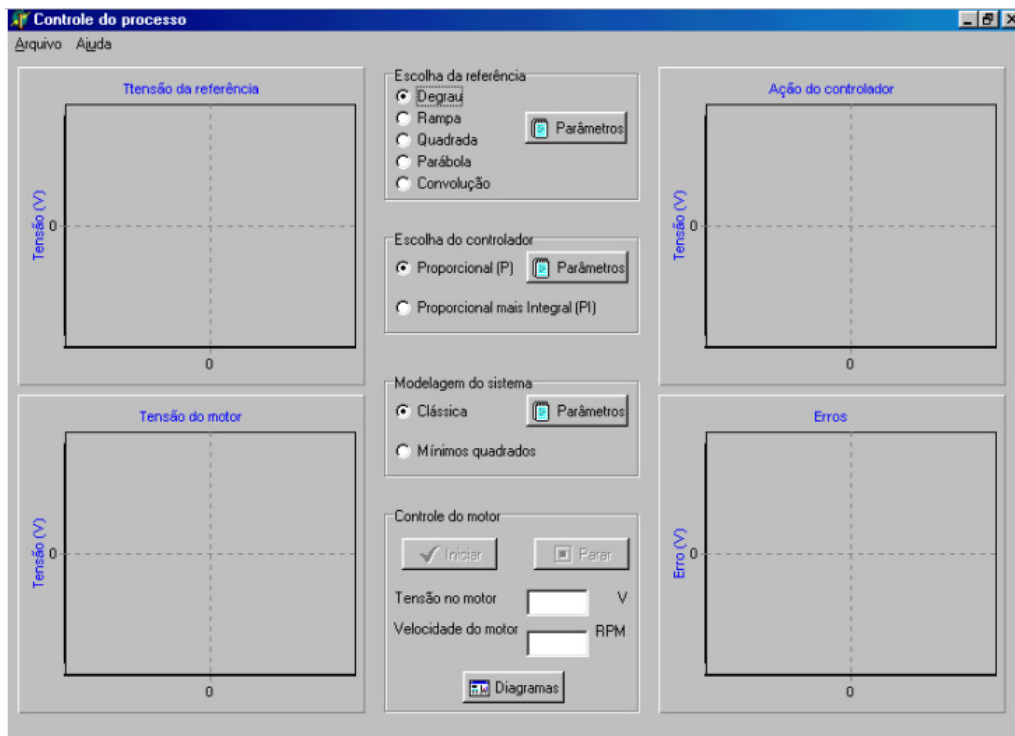


Figura 9 – Tela inicial do ambiente

Adicionalmente ao conjunto de ferramentas de controle e modelagem, o ambiente disponibiliza para o aluno todos os diagramas de bloco do sistema, com detalhamento dos respectivos circuitos elétricos, onde são especificados os valores dos componentes utilizados e as respectivas ligações. Para acessar a esta parte do programa, basta pressionar o botão “Diagramas”, localizado na parte central inferior da tela principal do ambiente. A janela contendo os diagramas e esquemas dos circuitos é mostrada na figura 10.

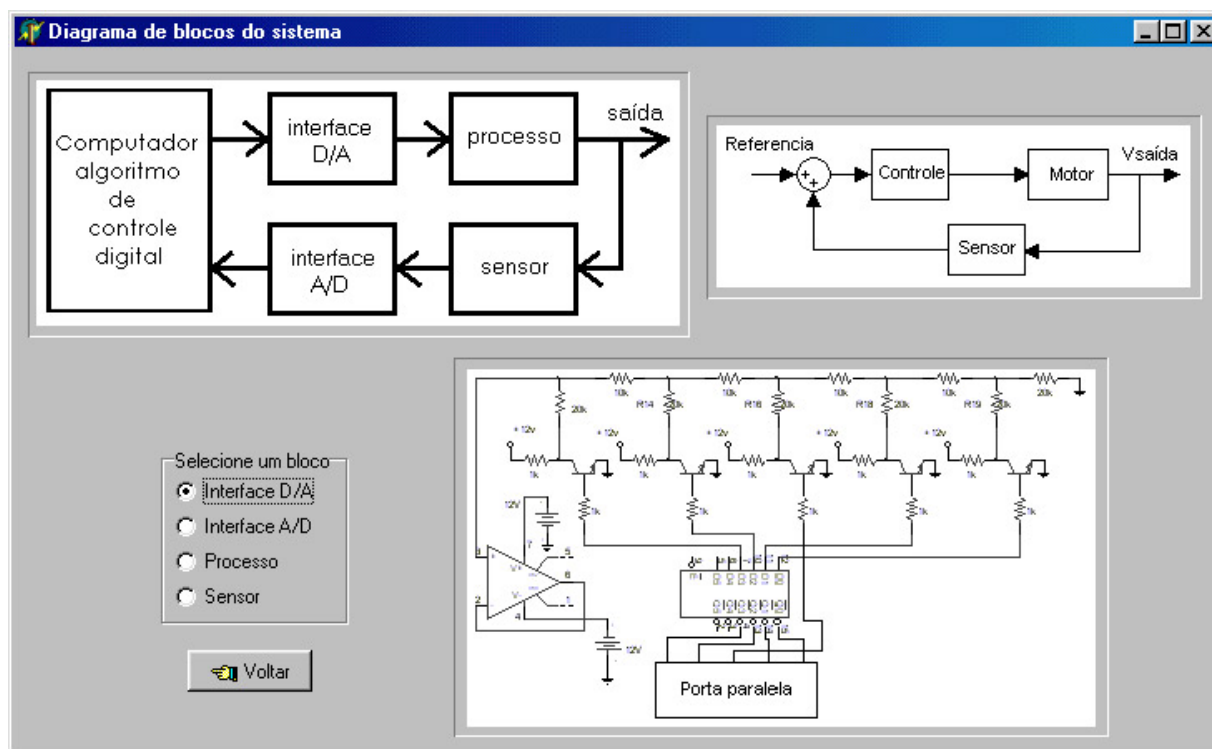


Figura 10 – Tela contendo os diagramas e circuitos do módulo

#### 4 UTILIZAÇÃO DO MÓDULO

Para melhor visualização das facilidades e procedimentos fornecidos pelo módulo desenvolvido, apresenta-se um exemplo com demonstração de alguns resultados obtidos bem como os procedimentos para sua utilização. Em sua janela principal, mostrada na figura 9, foi escolhida como de referência a função convolução. Vale a observação que o termo é aqui utilizado para expressar uma composição de sinais, e não a operação matemática clássica. Esta função possibilita submeter o motor a uma referência variável, composta de distintos sinais. Utilizando-se os ajustes disponibilizados por esta função, efetuou-se a seleção dos valores mostrados na figura 11.

Ajustados os parâmetros da fonte de referencia, escolhe-se a estrutura de controlador desejada, no caso um controlador proporcional mais integral, com os respectivos parâmetros de sintonia, conforme mostrado na tela da figura 12.



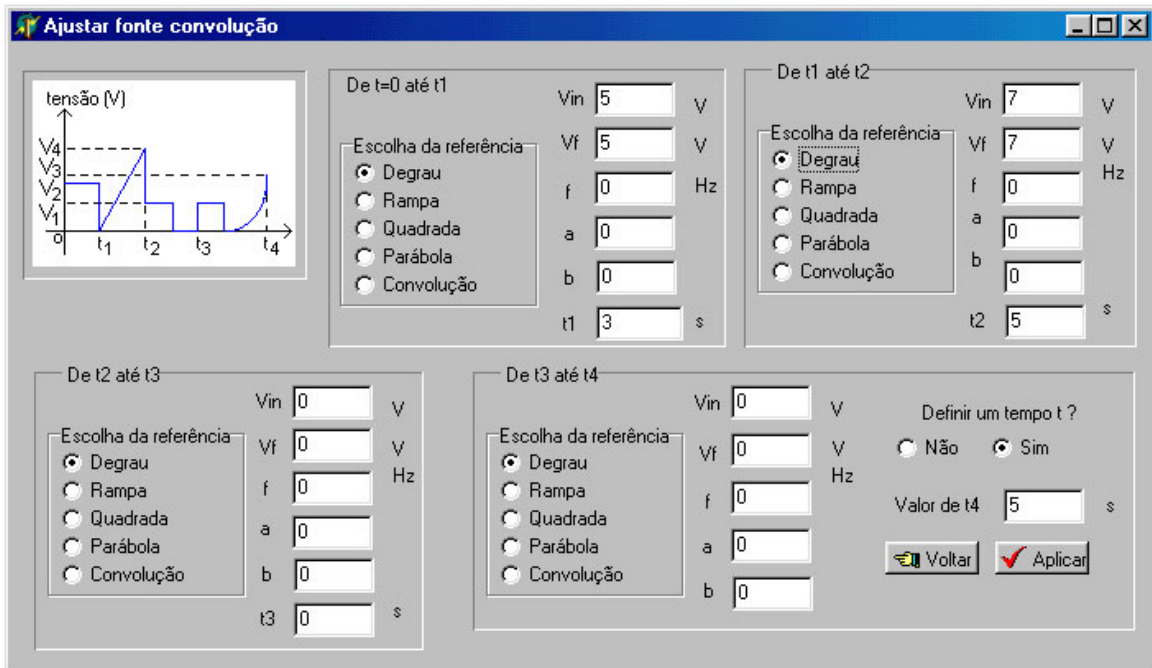


Figura 11 – Tela de ajuste da função convolução.

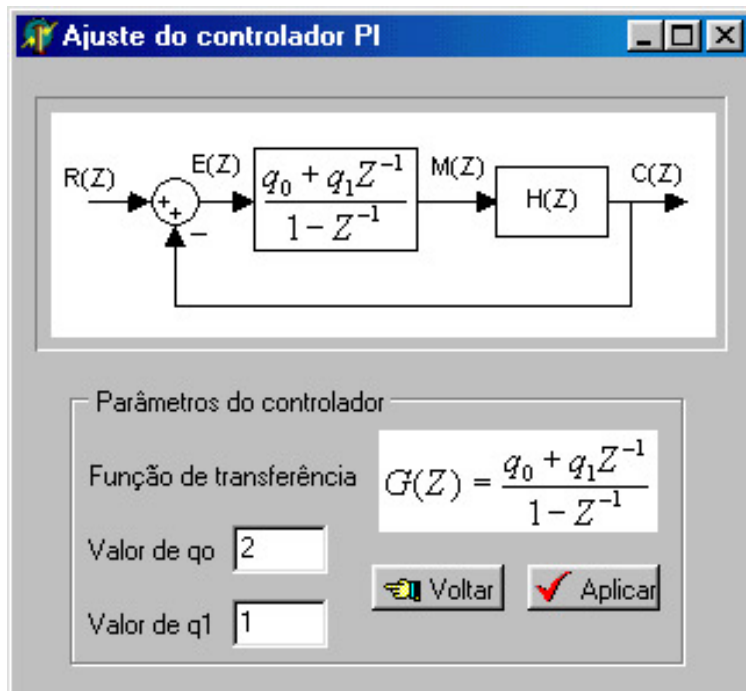


Figura 12 – Tela de ajuste do controlador proporcional mais integral

Efetuada estes procedimentos, inicia-se o sistema, com os resultados sendo acompanhados na tela mostrada na figura 13, para uma entrada em degrau, onde são disponibilizadas, para os alunos, as seguintes informações: referência utilizada, tensão de saída do motor, ação do controle/referência/saída do sistema e erro em relação à referência.

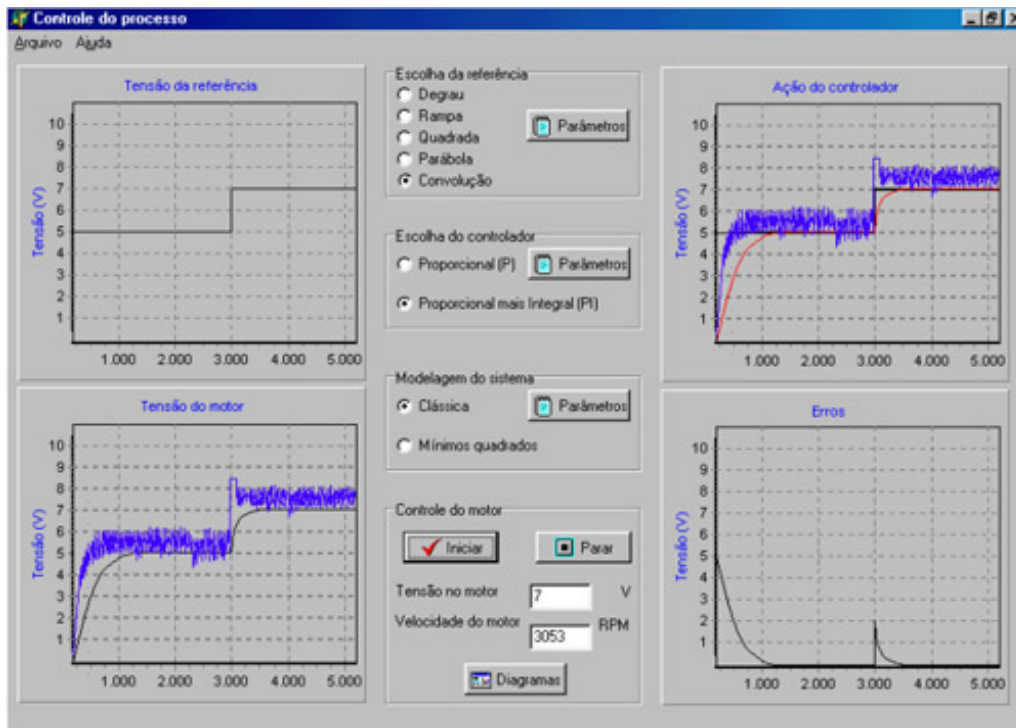


Figura 13 – Tela de controle do processo com os gráficos de resposta.

#### 4. CONCLUSÕES

O presente trabalho tratou do desenvolvimento de um módulo experimental para utilização nos cursos de controle e automação, que permite o trabalho laboratorial de modelagem e controle de um sistema, representado por um conjunto motor-tacômetro. A relevância deste trabalho para o estudante de engenharia se justifica pela necessidade de se ter disponíveis ferramentas que venham a permitir que o graduando tendo um contato prático com sistemas de controle similares aos que ele irá encontrar no mercado de trabalho, como por exemplo, os existentes na indústria. Adicionalmente, o estudo dos assuntos abordados nesta ferramenta de simulação possibilita ao aluno uma sólida base no manejo de controladores e na modelagem de sistemas bem como nas técnicas aplicáveis para análise dos mesmos (FRANKLIN, 1991).

Como produto tangível do trabalho, desenvolveu-se um módulo experimental integrando aspectos de “hardware” e “software”, com interfaces amigáveis ao usuário, facilitando sua utilização e apreensão dos conceitos e técnicas utilizadas.

A característica diferencial deste trabalho foi concepção de uma ferramenta didática que estivesse ao alcance dos alunos, tendo como principal característica o baixo custo quando comparada com ferramentas tradicionais, cuja aquisição é geralmente impraticável para as instituições de ensino, impedindo a oportunidade de um contato prático do aluno com as teorias de controle.

#### *Agradecimentos*

Ao Programa de Ensino Tutorial – PET/SESu/UFJF – Engenharia Elétrica – em especial ao petiano Thiago Correa César pela sua ajuda crucial para concepção deste trabalho e ao Professor Antonio Coelho, da UFSC, pela originalidade da idéia.

## 5. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- BOYLESTAD, R. ; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. Rio de Janeiro: LTC, 1999
- COELHO, R. A. A. ; COELHO, L. S. **Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares**. Florianópolis: EdUFSC, 2004.
- COELHO, R. A. A. ; ALMEIDA, O. M. ; SANTOS, J. E. S. ;SUMAR, R. R. **”Da Teoria à Prática: Projeto Motor Taco-Gerador”**. XXIX Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia, 2001, Porto Alegre – RS.
- FRANKLIN, G. F. ; POWELL, J. D. ;NALINI, A. E. **Feedback Control of Dynamic Systems**. New York: Addison-Wesley, 1991.
- ISERMANN, R. **Digital Control Systems**. New York: Springer-Verlag, 1981.
- MALVINO, A. P. ; **Eletrônica I**. São Paulo: McGraw-Hill, 1987
- SEDRA, A. S. ; SMITH, K. C. **Microeletrônica**. São Paulo: Makron Books, 2000
- TOCCI, R. J. ; WIDMER, N. S. **Sistemas Digitais Princípios e Aplicações**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.
- <http://www.actionmotors.com.br>
- <http://www.ti.com>
- <http://www.rogercom.com>

### **CONTROL AND MODELING OF PROCESSES: DEVELOPMENT OF AN INTEGRATED EXPERIMENTAL MODULE**

**Abstract:** *The work presents the development of a module of laboratory for education of the basic concepts associates to the control and modeling of process. The system operates of integrated form associating a physical module - two engines interconnected in a configuration engine-tachogenerator - to a computational environment that offers the eases for use of the set.*

*Is known fact the insufficiency, and same, in many cases, the precariousness of the laboratories, especially in the areas of control and automation, where they function in limited way. This situation, that has its roots in the most diverse conditions possible - high cost of components, inexistence of suppliers with sufficient amount and quality, necessity of importation of diverse parts, among others. Additionally, it has that if to cite the high cost of didactic material and tools adjusted for the simulations that, are to the reach of the students.*

*Given this situation, the proposal of this work consisted of the development of a tool for use in laboratory that allows to the student of electric/electronic engineering the study and application of the basic concepts of control of processes, helping to surpass, in some measure, the structural deficiencies of the area. One is about a accessible equipment financially that the existing ones currently in the market, but that it allows to reach resulted equivalents.*

**Key-words:** *Control of Process, Modeling of Processes, Computational Environment, Laboratory of Control and Automation.*