

# UM PROGRAMA DIDÁTICO PARA ENSINO DE SISTEMAS DE CONTROLE EM LABORATÓRIO DO CURSO DE ENGENHARIA

Wânderson O. Assis<sup>1</sup> ; Alessandra D. Coelho<sup>1</sup>; Fábio Roberto Garcia de Lima<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, Escola de Engenharia Mauá  
Praça Mauá, 1

CEP : 09580 900 , São Paulo, SP

[wanderson.assis@maua.br](mailto:wanderson.assis@maua.br); [alessandra.coelho@maua.br](mailto:alessandra.coelho@maua.br); [fabio.guimaraes@gm.com](mailto:fabio.guimaraes@gm.com)

***Resumo:** Este artigo apresenta a utilização de sistemas de aquisição de dados no desenvolvimento de experiências de laboratório e aplicações didáticas de controle de processos contínuos. A abordagem demonstra a associação entre os conceitos aprendidos em teoria, resultados de simulação e resultados práticos obtidos utilizando sistema computadorizado aplicado aos seguintes sistemas: sistema de controle de velocidade de motor de corrente contínua e sistema de controle de temperatura de uma estufa.*

***Palavras-chave:** aquisição de dados, ensino de engenharia, laboratório, sistemas de controle.*

## 1. INTRODUÇÃO

Um dos principais desafios no ensino de engenharia é associar os conceitos teóricos demonstrados na teoria com os resultados experimentais obtidos em laboratório. Particularmente na área de controle de processos contínuos, muitos resultados podem ser obtidos facilmente utilizando ferramentas de simulação, mas tipicamente devido a vários fatores operacionais e aspectos práticos, nem sempre os mesmos resultados podem ser verificados experimentalmente.

Atualmente, com a crescente evolução da eletrônica digital e à produção de novas tecnologias e ferramentas computacionais, novos experimentos vêm sendo desenvolvidos permitindo reproduzir em laboratórios, com relativa facilidade, vários aspectos estudados na teoria (LI e KHAN, 2005).

Dentro deste contexto, este artigo apresenta a aplicação de ferramentas computacionais e equipamentos modernos no desenvolvimento de experiências da área de controle de processos contínuos para cursos de engenharia do Instituto Mauá de Tecnologia (IMT).

## 2. LABORATÓRIOS DA ÁREA DE CONTROLE DE PROCESSOS

Na área de controle de processos contínuos o curso de Engenharia Elétrica do IMT apresenta no programa dois laboratórios, além das disciplinas teóricas, “Laboratório Integrado II” e “Laboratório de Controle e Automação II”. O “Laboratório Integrado II” (L.I. II), oferecido na 4º série, integra experiências das áreas de eletrônica analógica e digital, telecomunicações, microcontroladores, eletrônica de potência e controle de processos. Na área de controle de processos, a disciplina objetiva demonstrar a utilização de conceitos básicos do controle linear e de ferramentas de simulação e de aquisição de dados. O “Laboratório de Controle e Automação

II” (L.C.A. II), disciplina eletiva do último ano do curso de engenharia, que pode ser escolhida pelo aluno conforme a especialização desejada ou a área de atuação pretendida. Apresenta experiências mais elaboradas e que exigem conhecimentos mais aprofundados permitindo aplicar conhecimentos relacionados ao controle e identificação de sistemas e desenvolver aplicações mais complexas.

De um modo geral os laboratórios da área de controle de processos contínuos abordam um conjunto de experiências preparadas para fornecer ao Engenheiro Eletricista que atua na área de controle de processos contínuos os seguintes fundamentos:

- utilização de softwares de simulação no projeto de sistemas de controle;
- utilização de ferramentas de aquisição de dados no desenvolvimento de sistemas de controle;
- utilização de técnicas tais como o lugar das raízes e a resposta em frequência no projeto de controladores;
- aplicação de técnicas de identificação de sistemas na modelagem de sistemas lineares;
- aplicação de técnicas de projeto e sintonia de controladores PID e fuzzy;
- desenvolvimento de aplicações práticas de controle com otimização das características de desempenho.

No projeto de sistemas de controle básico os compensadores podem ser introduzidos em série (em cascata) ou através de retroação. A escolha entre compensação em série ou compensação através de retroação, depende da natureza dos sinais no sistema, do nível de potência nos diversos pontos, dos componentes disponíveis, da experiência do projetista, de considerações econômicas, entre outros aspectos. De um modo geral, a compensação em série pode ser mais simples que a compensação através de retroação.

Os compensadores ou controladores em cascata mais utilizados são: controlador ON/OFF; compensador proporcional; compensador integrador puro; compensador proporcional-derivativo (PD); compensador proporcional integral (PI); compensador PID; compensador de avanço de fase; compensador de atraso de fase; compensador de atraso-avanço de fase.

A escolha do tipo de compensador mais apropriado depende das características do sistema a ser controlado e do desempenho desejado. De modo geral, deseja-se que qualquer sistema controlado apresente resposta estável, com um transitório aceitável e com eliminação (ou pelo menos uma redução) do erro estacionário. Os principais parâmetros a serem considerados no projeto são: relação de amortecimento, frequência natural não amortecida, localização dos pólos em malha fechada e erro estacionário. No projeto de compensadores costuma-se especificar os valores desejados para os parâmetros citados acima e efetuar o projeto para atender a estas especificações. Dependendo de suas características, cada compensador permite satisfazer a algumas destas exigências.

Atualmente a utilização de ferramentas computacionais facilita em muito o projeto de sistemas de controle permitindo utilizar além das técnicas citadas acima outras estratégias de controle diversas tais como controle robusto, métodos de otimização, controle não-linear e inteligência artificial (tais como redes neurais, controle fuzzy, etc.). A implementação das técnicas é possível graças à utilização do computador onde são introduzidos algoritmos de controle e circuitos de interface (tais como placas de aquisição de dados) para monitorar sinais externos (sensores e transdutores) e produzir sinais de controle.

Para dar uma visão geral sobre a aplicação de técnicas de controle de processos contínuos o programa oferece um conjunto de 21 experiências distribuídas nos dois laboratórios citados acima conforme demonstrado na Tabela I. As oito primeiras experiências fazem parte do programa do “Laboratório Integrado II” e as outras onze experiências são oferecidas no

“Laboratório de Controle e Automação II”. Todas as experiências são desenvolvidas em sala, semanalmente, durante 4 horas/aula, de forma que o professor pode orientar os alunos durante todo o processo de programação, montagem e análise de resultados dos projetos.

Tabela 1 – Experiências da área de controle de processos contínuos

Exp.	Título	Lab.
1	Um curso introdutório de Matlab <sup>®</sup>	L.I. II
2	Análise de desempenho de sistemas lineares utilizando Matlab <sup>®</sup>	L.I. II
3	Conhecendo e trabalhando com o Simulink <sup>®</sup>	L.I. II
4	Introdução ao LabVIEW <sup>®</sup>	L.I. II
5	Utilização do LabVIEW <sup>®</sup> e do kit educacional ELVIS ( <i>Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite</i> ) em sistemas de aquisição de dados	L.I. II
6	Resposta em frequência e sua utilização na modelagem de sistemas	L.I. II
7	Identificação de parâmetros de sistemas de 2ª ordem utilizando aquisição de dados	L.I. II
8	Controle de velocidade de um motor de corrente contínua	L.I. II
9	Modelagem do sistema de controle de posição de um servomotor	L.C.A. II
10	Controle de posição de um servomotor – controle proporcional contínuo e discreto	L.C.A. II
11	Controle de posição de um servomotor – projeto de controladores PD e avanço de fase	L.C.A. II
12	Modelagem de um sistema de controle de temperatura de uma estufa – Identificação pelo método dos mínimos quadrados recursivos	L.C.A. II
13	Controle de temperatura de uma estufa	L.C.A. II
14	Modelagem do sistema de controle de velocidade de um servomotor	L.C.A. II
15	Controle de velocidade de um servomotor aplicando métodos de sintonia de controladores PID – Controle P e PI contínuos	L.C.A. II
16	Controle de velocidade de um servomotor aplicando métodos de sintonia de controladores PID – Controle PID digital	L.C.A. II
17	Introdução ao controle fuzzy	L.C.A. II
18	Aplicação do controle fuzzy no controle de velocidade de servomotores	L.C.A. II
19	Utilização de controladores industriais – planta de controle de processos contínuos com controle de nível, vazão e temperatura	L.C.A. II

Nas próximas seções são apresentadas as ferramentas de aquisição de dados utilizadas no desenvolvimento das experiências práticas. Também são apresentados os equipamentos utilizados e os resultados obtidos no desenvolvimento das experiências com sistema de controle de velocidade (7 e 8) e de temperatura (12 e 13).

### 3. SISTEMAS DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Um sistema de controle computadorizado geralmente consiste de um computador digital, uma placa de aquisição de dados, circuitos de interface e um pacote de software que permite obter, analisar e mostrar os dados obtidos na aquisição. Para fazer a comunicação entre o

computador e dispositivos externos encontram-se disponíveis no mercado várias soluções. Dentre elas incluem-se as soluções listadas abaixo que foram utilizadas em laboratório:

- placas de aquisição de dados AD512 / MF614 da Humusoft;
- kit educacional ELVIS<sup>®</sup> (*Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite*) da National Instruments.

Detalhes sobre estas soluções são apresentados a seguir.

### 3.1 Placa de Aquisição da Humusoft

As placas de aquisição de dados da Humusoft, ilustradas na Figura 1, foram desenvolvidas para permitir compartilhar sinais com computadores compatíveis com a linha IBM PC. Possui um conversor A/D de 12 bits a 100 KHz com circuito *Sample & Hold* e 2 conversores D/A com *buffers* duplos com 12 bits de resolução com acréscimo simultâneo. Apresenta 8 canais de entrada multiplexadas com seleção das referências de entrada ( $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V, 0 – 10 V e 0 – 5 V) através do software, clock e voltagem de referência. Apresenta seleção nas saídas analógicas (2 canais de saída) por *jumpers* com faixa de tensão ajustáveis ( $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V, 0-10 V e 0-5 V). Apresenta além disso, portas de entrada e saída digitais com 8 bits TTL, com seleção da base de endereços de entrada e saída por chave.

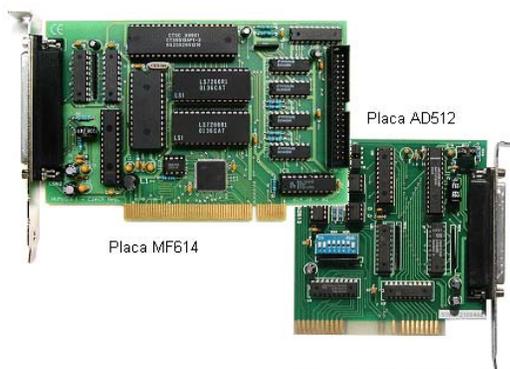


Figura 1 – Placas de aquisição da Humusoft

O controle de aplicações e as otimizações utilizam a *Real Time Toolbox*, pacote de programação compatível com o Matlab<sup>®</sup> e Simulink<sup>®</sup>, utilizando a sua interface para desenvolver a aquisição de dados. A Figura 2 ilustra o diagrama de blocos do programa que deve ser desenvolvido em Matlab<sup>®</sup> para desenvolver um controle proporcional em malha fechada.

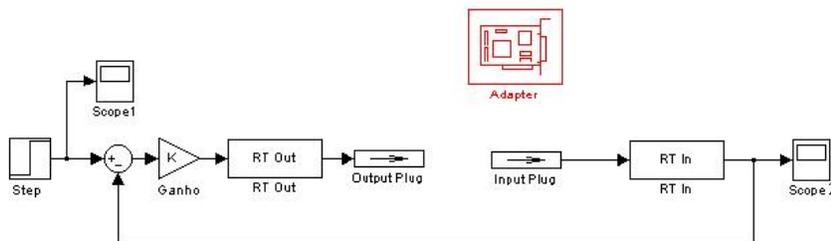


Figura 2 – Diagrama de blocos do controle proporcional em malha fechada Utilizando placa de aquisição AD512

### 3.2 Sistema de aquisição da National Instruments

O kit educacional da National Instruments conhecido como ELVIS<sup>®</sup> (*Educational Laboratory Virtual Instrumentation Suite*) ilustrado na Figura 3 utiliza um software baseado em LabVIEW<sup>®</sup>, uma placa de aquisição de dados (DAQ – *Data Aquisition*) multifuncional e uma estação de trabalho com *protoboard* onde o projetista pode desenvolver as aplicações. Além de manipular sinais de entrada e saída analógicos e digitais o kit permite desenvolver uma série de instrumentos virtuais que incluem um osciloscópio, um gerador de função, um multímetro digital (DMM), uma fonte de tensão variável, um analisador de Bode, um analisador de sinais dinâmicos, um analisador de impedâncias e um analisador de tensão-corrente.

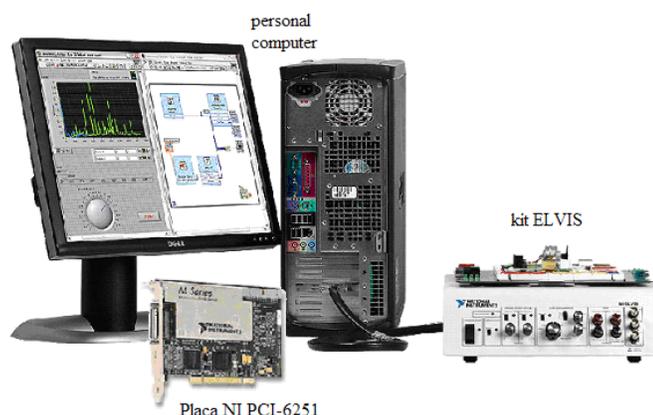


Figura 3 – Aplicação de aquisição de dados com kit ELVIS

A placa de aquisição de dados disponível no kit ELVIS (DAQ – *Data Aquisition*) é o modelo NI PCI-6251, sendo desenvolvido para permitir compartilhar sinais com computadores. Possui oito canais de entrada analógica diferencial (ou 16 entradas *single-end*) com conversor A/D com 16 bits de resolução e taxa de amostragem de 1.25 MS/s (*single-channel*) a 1 MS/s (*multi-channel*). Estes canais de entrada apresentam acoplamento DC e faixas de tensão configuráveis de  $\pm 10$  V,  $\pm 5$  V,  $\pm 2$  V,  $\pm 1$  V, 0.5 V,  $\pm 0.2$  V e  $\pm 0.1$  V. Possui dois canais de saída analógica com conversor D/A com 16 bits de resolução e taxa de amostragem de 2.86 MS/s (*single-channel*) a 2 MS/s (dois canais). Estes canais de saída apresentam acoplamento DC, impedância de  $0.5 \Omega$  e faixas de tensão de configuráveis de  $\pm 10$  V e  $\pm 5$  V.

### 4. CONTROLE DE VELOCIDADE DE MOTOR DE CORRENTE CONTÍNUA

Considere o sistema de acionamento de motor de corrente contínua (CC) ilustrado na Figura 4, constituído de motor de corrente contínua, fonte de alimentação e circuito de acionamento. Para efetuar o controle de velocidade, um tacogerador é acoplado ao eixo do motor CC e um freio magnético permite verificar o efeito da introdução de carga no eixo. Em operação a vazio o motor trabalha com tensão nominal de 10 V e velocidade de 6300 rpm, produzindo tensão no tacogerador de 16,95 V. Contudo no laboratório utilizaremos tensões de entrada mais reduzidas para limitar a tensão de saída do tacogerador em 10 V, respectivamente quando a velocidade é 3717 rpm.

O sistema pode ser representado pelo diagrama de blocos da Figura 5 (ASSIS, 1997) onde:  $V_t$  é a tensão de alimentação de armadura (V);  $E_a$  é a força eletromotriz (V); T é o torque no eixo

do motor ( $N \times m$ );  $I_a$  é a corrente de armadura (A);  $E_f$  é a tensão de excitação (campo) (V);  $I_f$  é a corrente de campo (A);  $\omega$  é a velocidade angular (rad/s);  $R_a$  é a resistência do enrolamento de armadura ( $\Omega$ );  $L_a$  é a indutância do enrolamento de armadura (H);  $J$  é o momento de inércia do motor ( $N \times m \times s^2$ );  $B$  é o coeficiente de atrito viscoso equivalente do motor ( $N \times m / rad / s$ );  $K$  é a constante de torque do motor ( $N \times m / A$ );  $R_f$  é a resistência do enrolamento de campo ( $\Omega$ ); e  $L_f$  é a indutância do enrolamento de campo (H).

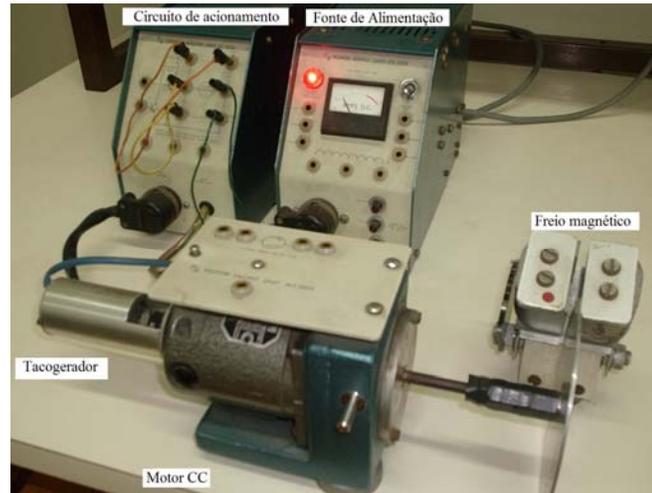


Figura 4 – Sistema de controle de velocidade de motor CC

O sistema apresenta duas entradas ( $V_t$  e  $E_f$ ), uma saída ( $\omega$ ) além de uma entrada de perturbação referente à variação de carga. A representação matemática do sistema em função de transferência resulta em um modelo não-linear e com múltiplas entradas. Sistemas de controle de velocidade de motor CC convencionais utilizam o circuito de campo alimentado separadamente, onde a tensão de campo é mantida constante no valor nominal, permitindo obter uma função de transferência linear que relaciona  $\omega$  e  $V_t$ . Contudo, no protótipo do laboratório, o acionamento é efetuado conforme o circuito ilustrado na Figura 6. A principal vantagem desta configuração é que permite não somente controlar a velocidade do motor conforme a tensão aplicada mas também inverter o sentido de rotação por meio da inversão da polaridade dos terminais do enrolamento de campo. Isto é conseguido fazendo com que a entrada de controle do motor ( $V_t$ ) seja conectada em  $V_{t1}$  ou  $V_{t2}$  conforme se deseje respectivamente acionar o motor no sentido horário ou anti-horário. Note que a configuração se assemelha à configuração série pois a relação entre as correntes de armadura e campo é equivalente à relação entre as correntes de emissor e coletor do transistor, dada por:

$$\alpha = \frac{I_C}{I_E} = 0,9901 \cong 1 \quad (1)$$

Se considerarmos, por exemplo, a operação com tensão positiva em  $V_{t1}$ , desprezando a queda de tensão na junção base-emissor do transistor, então o diagrama de blocos da Figura 6 pode ser simplificado, resultando no diagrama da Figura 7.

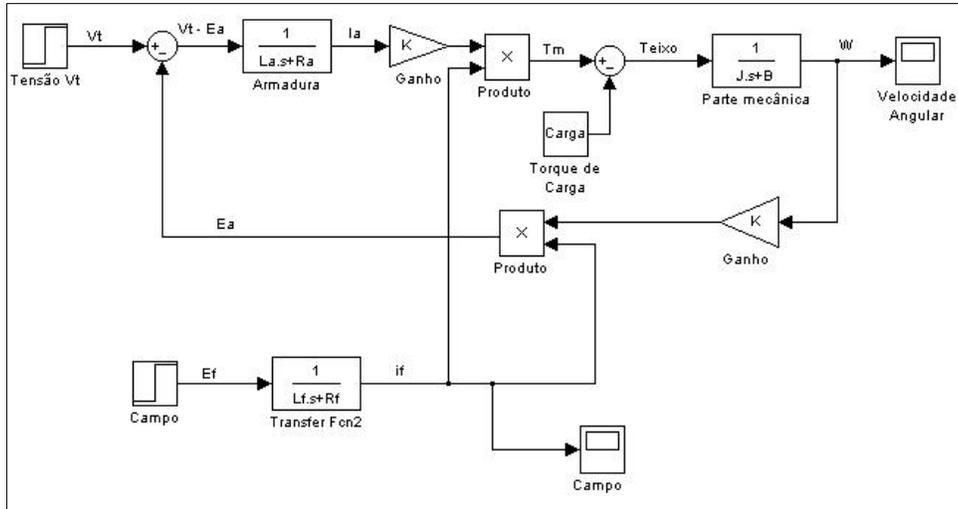


Figura 5 – Diagrama de blocos de motor de corrente contínua com excitação independente

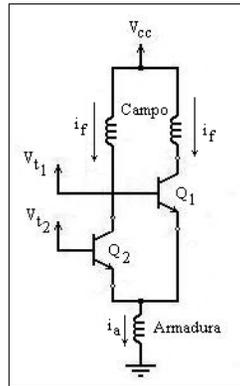


Figura 6 – Circuito de acionamento de motor CC

A função de transferência resultante é totalmente não linear conforme apresentado em (2) pois a corrente de campo varia com a corrente de armadura que por sua vez varia com a variação da tensão de entrada. Além disso, o modelo matemático fica totalmente dependente da variação da carga.

$$G(s) = \frac{\omega}{V_t} = \frac{i_f K}{(sL_a + R_a)(sJ + B) + (i_f K)^2} \quad (2)$$

Para obter-se uma aproximação do modelo matemático foram efetuados ensaios considerando condições operacionais típicas no sistema em malha fechada. A partir de ensaios efetuados pelos próprios alunos e utilizando as metodologias apresentadas nas experiências 7 e 12 baseadas em Ogata, 1997 e Campos e Teixeira, 2006, estimou-se a função de transferência do motor CC. A função de transferência resultante é dada por:

$$G(s) = \frac{4,5}{s^2 + 6,2s + 3,8} \quad (3)$$

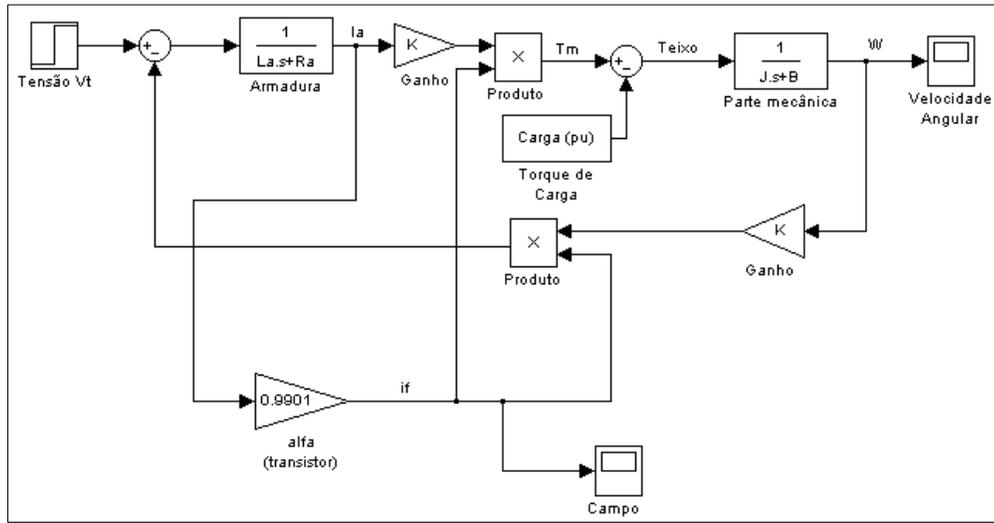
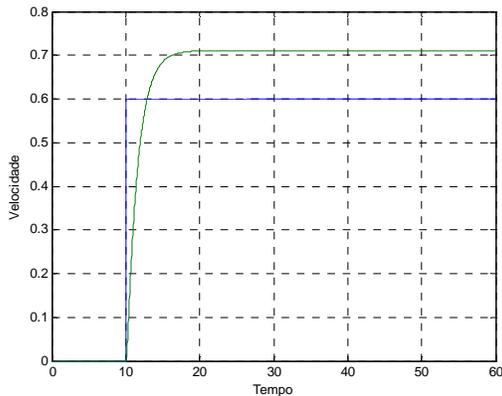


Figura 7 – Diagrama de blocos de motor de corrente contínua simplificado

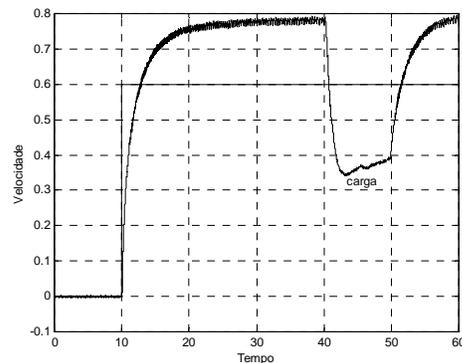
Para validar a função de transferência foi efetuado o ensaio em malha aberta e utilizando como referência um degrau de 0,6 (60% da máxima tensão de controle) conforme mostrado na Figura 8. Os resultados obtidos na saída por simulação e em ensaio prático estão também ilustrados na Figura 8. Observa-se a similaridade nos resultados. Observa-se também que, no resultado prático verificou-se o efeito da introdução da carga. Note que ocorre uma grande redução na velocidade que cai de aproximadamente 79% do seu valor de operação (cerca de 2936 rpm) para até 34% do valor de operação (1264 rpm).

A Figura 9 mostra o resultado obtido em malha fechada com ganho unitário, por simulação e prático, com degrau de 0,7. No ensaio prático mostra-se também a variação de carga e a pequena queda de velocidade resultante.

Em ambos observa-se que a saída apresenta resposta superamortecida, estabilizando-se num valor totalmente diferente do sinal de entrada mostrando que o sistema possui erro estacionário elevado.

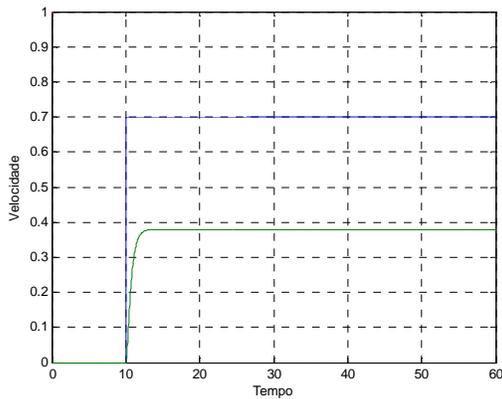


(a)

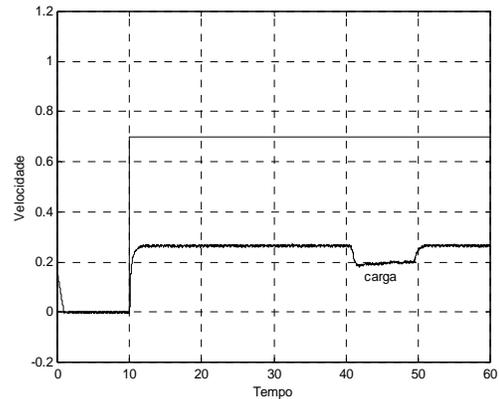


(b)

Figura 8 – Resposta a degrau do sistema em malha aberta  
(a) Simulação – Degrau de 0,6 e resposta obtida na saída  
(b) Resultado prático com aquisição de dados e variação de carga



(a)



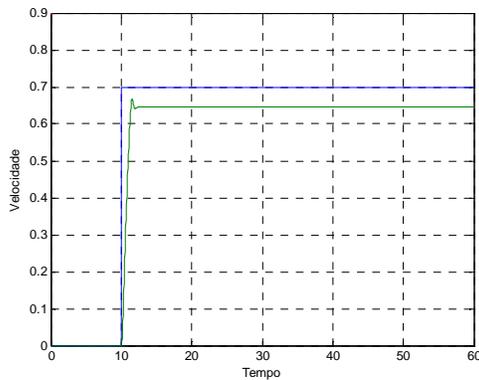
(b)

Figura 9 – Resposta a degrau do sistema em malha fechada

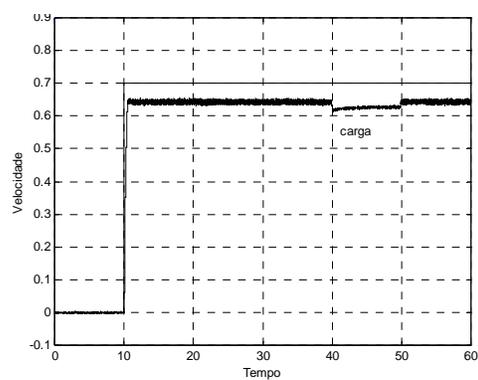
(a) Simulação – Degrau de 0,7 e resposta obtida na saída

(b) Resultado prático com aquisição de dados e variação de carga

A partir da função de transferência (3), na experiência 8 os alunos aplicaram metodologias de controle de processos para determinar os compensadores mais apropriados para o sistema (OGATA, 1997 e CAMPOS e TEIXEIRA, 2006). Alguns dos resultados são apresentados nas Figuras 10, 11, 12 e 13.



(a)



(b)

Figura 10 – Resposta a degrau do sistema com controle proporcional  $K_p = 10$

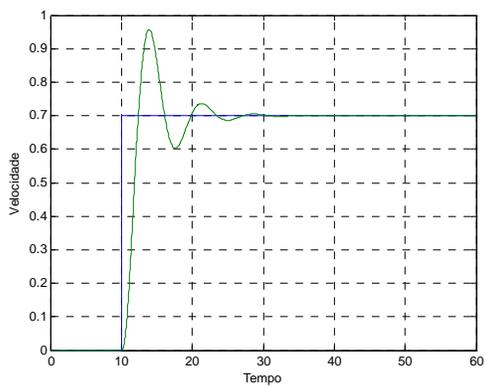
(a) Simulação – Degrau de 0,7 e resposta obtida na saída

(b) Resultado prático com aquisição de dados e variação de carga

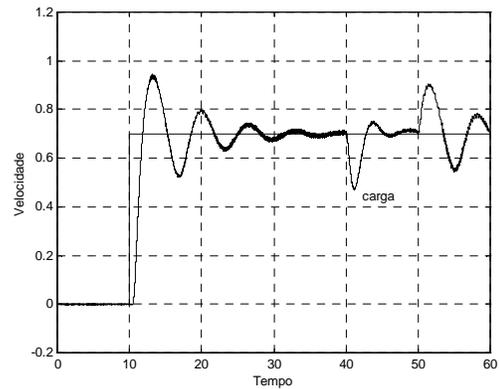
Em cada caso apresenta-se a forma de onda obtida por simulação utilizando o software Matlab<sup>®</sup> bem como os resultados experimentais obtidos por aquisição de dados utilizando sistema com placa de aquisição AD512 e a configuração de software ilustrada na Figura 2, apenas substituindo o ganho  $K$  pelo compensador projetado. Em todas as simulações utilizou-se também um bloco de saturação com limites  $\pm 1$  após o controlador, pois no sistema prático a máxima tensão produzida pela placa de aquisição de dados é  $\pm 10$  V (ou seja,  $\pm 100$  % da tensão

nominal). Observa-se o efeito da variação de carga. Observa-se também que comparando simulação e prática que:

- há uma grande similaridade nas respostas;
- no controle proporcional o ganho ajustado apenas reduz o erro estacionário, não o elimina, e ainda produz maior amplificação de ruídos, sendo, além disso, sensível a variação de carga;
- o integrador puro não deve ser utilizado, pois torna o sistema muito mais lento, podendo ainda produzir oscilações;
- o controle PI bem projetado elimina o erro estacionário sem provocar piora considerável no tempo de resposta;
- o controle PID é eficiente, mas produz amplificação de ruídos.

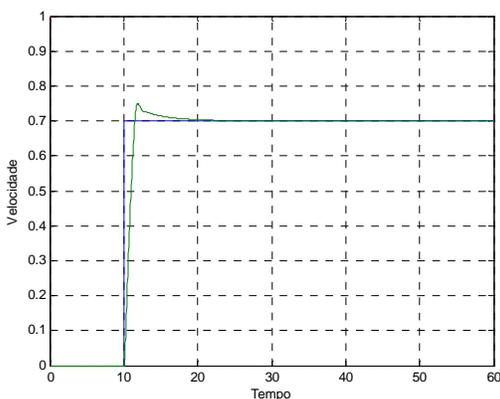


(a)

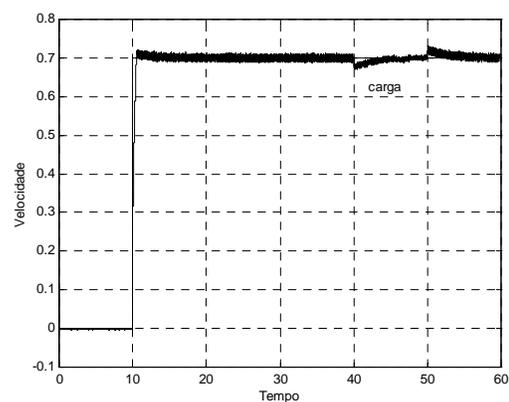


(b)

Figura 11 – Resposta a degrau do sistema com integrador puro  
 (a) Simulação – Degrau de 0,7 e resposta obtida na saída  
 (b) Resultado prático com aquisição de dados e variação de carga



(a)



(b)

Figura 12 – Resposta a degrau do sistema com controle PI dado por  $G_C(s) = 5 \frac{(s + 0,3226)}{s}$

(a) Simulação – Degrau de 0,7 e resposta obtida na saída  
 (b) Resultado prático com aquisição de dados e variação de carga

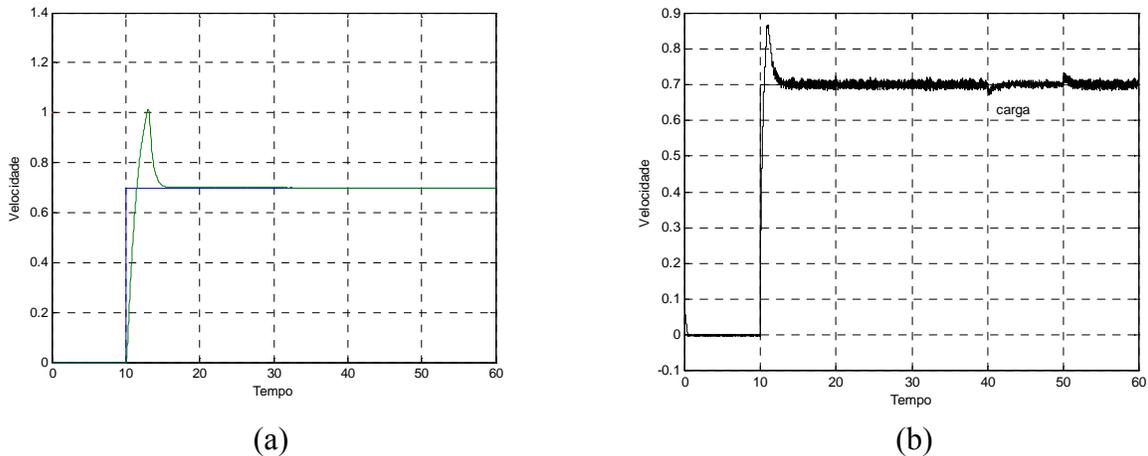


Figura 13 – Resposta a degrau do sistema com PID dado por

$$G_C(s) = 1.2464 \frac{(s^2 + 14.2705s + 21.9604)}{s} = 17.7868 + 1.2464s + \frac{27.3714}{s}$$

- (a) Simulação – Degrau de 0,7 e resposta obtida na saída  
 (b) Resultado prático com aquisição de dados e variação de carga

## 5. CONTROLE DE TEMPERATURA DE UMA ESTUFA

O sistema de controle de temperatura é apresentado na Figura 14. Trata-se de um sistema de aquecimento fabricado pela CONTEMP para controlar a temperatura de uma estufa de madeira por meio de uma lâmpada. A estufa foi projetada e construída por outros professores na instituição. Um termopar (PT100) é utilizado como sensor de temperatura e fornece um nível de tensão proporcional à temperatura na estufa. A conversão do sinal do sensor e o ajuste da potência na lâmpada são controlados através de dispositivos distribuídos em um quadro elétrico, conforme Figura 15.



Figura 14 – Sistema de controle de temperatura

Na parte superior do painel de controle encontram-se dois transmissores de sinais (modelo CTA-3). Estes transmissores são responsáveis pela conversão do sinal do termopar em um nível de tensão apropriado para o controle e pela conversão do sinal de controle em níveis de tensão e

potência apropriados para o relé de estado sólido (AFC-01). Na parte inferior esquerda encontra-se o relé de estado sólido responsável pelo controle de potência da lâmpada (ângulo de fase) a partir da tensão gerada pelo transmissor CTA-3. O controle pode ser implementado externamente utilizando o sinal do sensor (após a conversão no CTA-3) e gerando uma tensão de controle. O sistema apresenta controlador PID industrial (modelo CTM-44) disponível no quadro elétrico. Utilizando o controlador CTM-44 ou desenvolvendo o controle externamente por meio de outras ferramentas (tais como, placas de aquisição, circuitos eletrônicos, etc.) o controle de temperatura deve ser implementado conforme o diagrama de blocos da Figura 16.

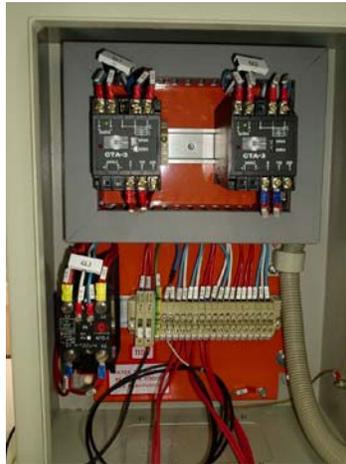


Figura 15 – Quadro elétrico para controle de potência / temperatura

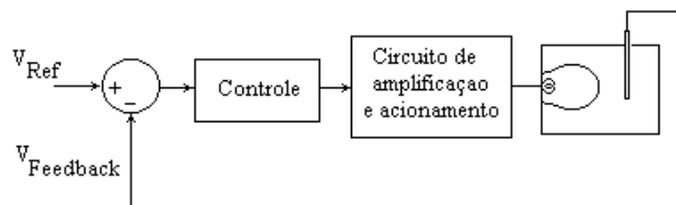


Figura 16 – Diagrama de blocos do sistema de controle de temperatura

A modelagem de sistemas térmicos pode ser feita analisando a resistência e capacitância térmica, resultando na equação que representa o comportamento do sistema, conforme Ogata, 1997, dada por:

$$C \frac{d\theta_o}{dt} = h + \frac{1}{R} (\theta_i - \theta_o) \quad (4)$$

onde: R é a resistência térmica (s°C/kcal), C é a capacitância térmica (kcal/°C), h é a variação do calor produzido pelo sistema de aquecimento em relação ao ponto de operação em regime permanente (kcal/s),  $\theta_i$  é a variação da temperatura do ar de entrada em relação ao ponto de operação em regime permanente (°C) e  $\theta_o$  é a variação da temperatura do ar de saída em relação ao ponto de operação em regime permanente (°C). Após algumas manipulações matemáticas e aplicando transformada de Laplace considerando condição inicial  $\theta_o = 0$ , obtemos:

$$\Theta_0(s) = \frac{R}{RCs+1}H(s) + \frac{1}{RCs+1}\Theta_i(s) \quad (5)$$

Para adaptar esta solução para o sistema de controle de temperatura da Figura 14 faremos as seguintes considerações:

- assumimos que a estufa não tem entrada de ar externa, portanto  $\Theta_i = 0$ ;
- desprezamos o atraso de resposta do sensor de temperatura (PT100) e assumimos que a tensão de saída deste sensor  $V_0(s)$  é proporcional à temperatura, ou seja,  $V_0(s) = K_0 \Theta_0(s)$ ;
- assumindo que a entrada de calor  $H(s)$  é proporcional à tensão de entrada aplicada na lâmpada, ou seja,  $H(s) = K_i V_i(s)$ .

Então, assumindo estas considerações, a equação (5) resulta:

$$V_0(s) = \frac{K_0 K_i R}{RCs+1}V_i(s) \quad (6)$$

que pode ser reescrita como:

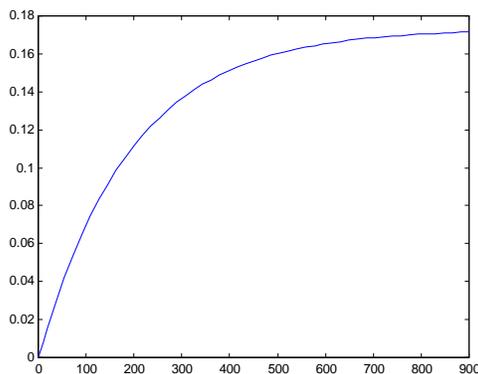
$$V_0(s) = \frac{K_s}{s+1/T_s}V_i(s) \quad (7)$$

onde  $K_s$  é a constante de ganho em malha aberta e  $T_s$  é a constante de tempo do sistema.

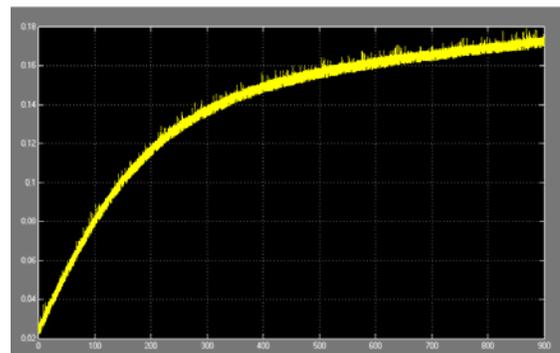
A função de transferência resultante (7) foi estimada em laboratório na experiência (12) a partir de ensaios efetuados pelos próprios alunos obtendo-se:

$$G(s) = \frac{V_0(s)}{V_i(s)} = \frac{K_s}{s + \frac{1}{T_s}} = \frac{9 \times 10^{-4}}{s + 52 \times 10^{-2}} \quad (8)$$

Para validar a função de transferência foi efetuado o ensaio em malha aberta e utilizando como referência um degrau unitário (100% da tensão de referência). Os resultados obtidos na saída por simulação e em ensaio prático utilizando o kit educacional ELVIS<sup>®</sup> estão também ilustrados na Figura 17. Observa-se a similaridade nos resultados.



(a)



(b)

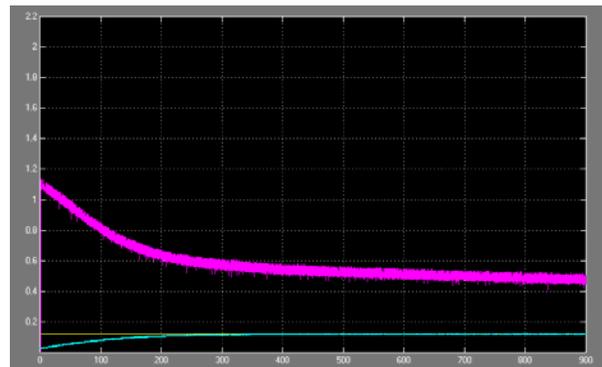
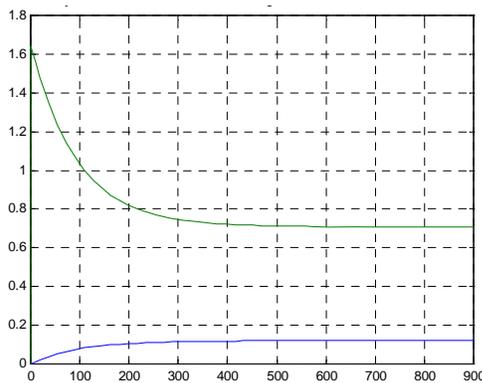
Figura 17 – Resposta a degrau do sistema de controle de temperatura em malha aberta

(a) Simulação – Resposta a degrau unitário

(b) Resultado prático com aquisição de dados e variação de carga

A partir da função de transferência (8), os alunos aplicaram metodologias de controle de processos para determinar um compensador PI para o sistema. O resultado é apresentado na Figura 18 onde são mostradas as formas de onda obtidas por simulação e por aquisição de dados. Observa-se que:

- há uma grande similaridade nas respostas;
- utilizou-se degrau de 0,12 (12% da tensão de referência), reduzido para evitar saturação no sinal de controle;
- há eliminação do erro estacionário e a resposta é mais rápida que no sistema original;
- o sinal de controle apresenta um pico instantâneo mas após cerca de 300 s estabiliza-se.



(a)

(b)

Figura 18 – Resposta a degrau de 0,12 do sistema de controle de temperatura

$$\text{com controle PI dado por } G_c(s) = 13.7 \frac{(s + 4.6 \times 10^{-3})}{s}$$

(a) Simulação – Saída (azul) e sinal de controle (verde)

(b) Resultado prático – Saída (azul), sinal de controle (rosa) e entrada (amarelo)

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a metodologia para o desenvolvimento de aplicações de controle de processos práticos em laboratórios de engenharia. A proposta utiliza sistema de aquisição de dados utilizando computador e placas de aquisição, e interfaces de programação didáticas utilizando softwares reconhecidos no meio acadêmico. Os resultados apresentados mostram a aplicabilidade da solução no ensino de aspectos práticos relacionados ao controle de processos, bem como uma equivalência entre resultados de simulação e práticos e suas relações com os conceitos teóricos apresentados no curso de engenharia.

### *Agradecimentos*

À equipe do almoxarifado da Engenharia Elétrica do IMT – Instituto Mauá de Tecnologia, pelo apoio técnico no projeto dos sistemas de controle.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSIS, W. O. **Análise Comparativa de Estratégias de Controle para Acionamentos Industriais Utilizando Chopper**. 1997. Dissertação (Doutorado em Engenharia Elétrica) – UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá.

CAMPOS, M. C. M. M., TEIXEIRA, H. C. G. **Controles Típicos**. Ed. Edgard Blücher, 2006.

LI, S.; KHAN, A. A. Applying IT Tools to a Laboratory Course for Measurement, Analysis, and Design of Electric and Electronic Circuits. **IEEE Transactions on Education**. v. 48, n. 3, p. 520-530, August 2005.

MORAES, C. C., CASTRUCCI, P. L. Um Programa Didático em Automação Industrial. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 9, 2002, Natal. **Anais**. p. 1397-1402.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Ed. Prentice Hall do Brasil, 1997.

SILVA JR., J. M. G., BAZANELLA, A. S. Um Sistema Didático para o Ensino de Ajuste de Controladores PID. In: XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA, 9, 2002, Natal. **Anais**. p. 1403-1408.

## A DIDACTIC PROGRAMME FOR EDUCATION OF CONTROL SYSTEMS IN LABORATORY COURSE OF ENGINEERING

**Abstract:** *This paper presents the use of data acquisition systems to development applications and didactic experiences of control systems. The approach shows the relationship between the concepts learned in theory, simulation results and practical results obtained by using computerized system applied to the following systems: speed control motor DC drive and furnace temperature control system.*

**Key-words:** *Computer data acquisition, engineering education, laboratory, control systems.*