



CONTROLE DIGITAL DE MALHA DE NÍVEL DE UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

Paulo Afonso Ferreira Junior – paulo_junior90@hotmail.com

Vlademir Aparecido Freire Junior – vlad_freire@hotmail.com

Bruno Augusto Angélico – bangelico@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Avenida Alberto Carazzai, 1640 – Centro

86300-000 – Cornélio Procópio – Paraná

Resumo: *Este artigo apresenta a implementação de um hardware de condicionamento de sinais juntamente com uma interface gráfica GUI (Graphical User Interface), bem como a utilização de uma placa de aquisição de sinais digitais e analógicos, com o intuito de automatizar e controlar uma planta didática industrial. A malha de controle de nível é particularmente considerada. Utiliza-se o conceito de identificação de sistemas, modelagem e sintonia de controladores, proporcionando aos alunos de graduação contato com tecnologias presentes nas indústrias, agregando assim conhecimentos teóricos e aspectos práticos no ensino de engenharia.*

Palavras-chave: *Identificação de Sistemas, Automação, Controle, GUI, MatLab.*

1. INTRODUÇÃO

O contínuo crescimento e evolução tecnológica no setor industrial, principalmente no âmbito de controle de processos, exigem cada vez mais engenheiros capacitados com conhecimento sólidos na área de controle e automação.

A utilização de plantas didáticas industriais que emulam em menor escala processos industriais é uma ferramenta poderosa na formação de profissionais qualificados para o mercado de trabalho, pois proporciona ao estudante um crescimento técnico, pelo fato de se depararem com problemas reais e terem que buscar soluções.

A automação de um processo industrial visa sempre produzir bens com menor custo, maior quantidade, menor tempo e maior qualidade, ou seja, otimizar a produção (DORF & BISHOP, 2001). Neste trabalho, é apresentada uma forma alternativa e de baixo custo para automação e controle de uma planta didática industrial readaptada da FESTO (FESTO DIDACTIC, 2006), utilizando circuitos de condicionamento e acionamento, bem como uma placa de aquisição de sinais. Utiliza-se a estratégia de controle PI e uma interface gráfica GUI (Graphical User Interface) do software MATLAB®. Atualmente a automação e controle são realizados por um CLP (Controlador Lógico Programável) do fabricante Altus, série Ponto (ALTUS S.A, 2007) utilizando o software supervisor Elipse SCADA (ELIPSE SCADA, 2002).

Após essas modificações, espera-se que a planta se torne mais flexível em relação a suas estratégias de controle, proporcionando aos alunos do Curso de Engenharia Elétrica e Engenharia de Controle e Automação da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procopio, a possibilidade de implementar algoritmos de controle ao invés de se utilizar, por exemplo, soluções pré-estabelecidas por fabricantes de CLPs. Além disso, há a possibilidade de desenvolvimento de estratégias de controle mais complexas, como as baseadas em sistemas inteligentes.

2. PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

O trabalho foi desenvolvido no sistema descrito nesta seção. A planta didática readaptada possui quatro malhas de controle: Temperatura, Pressão, Nível e Vazão, e cada uma das malhas possui uma bomba centrífuga, duas válvulas solenóide para o controle de entrada e saída de fluido no reservatório da malha, dois sensores capacitivos, um indicando o nível máximo e outro o nível mínimo de fluido no reservatório, além dos equipamentos específicos de cada malha, como uma resistência e um sensor de temperatura do tipo PT100 na malha de Temperatura, um tanque e um sensor de pressão na malha de Pressão, um sensor de nível ultrassônico na malha de Nível, e uma válvula proporcional e um sensor de vazão na malha de Vazão, completando assim o sistema a ser automatizado e controlado, mostrado na Figura 1 (ALMEIDA, 2012).

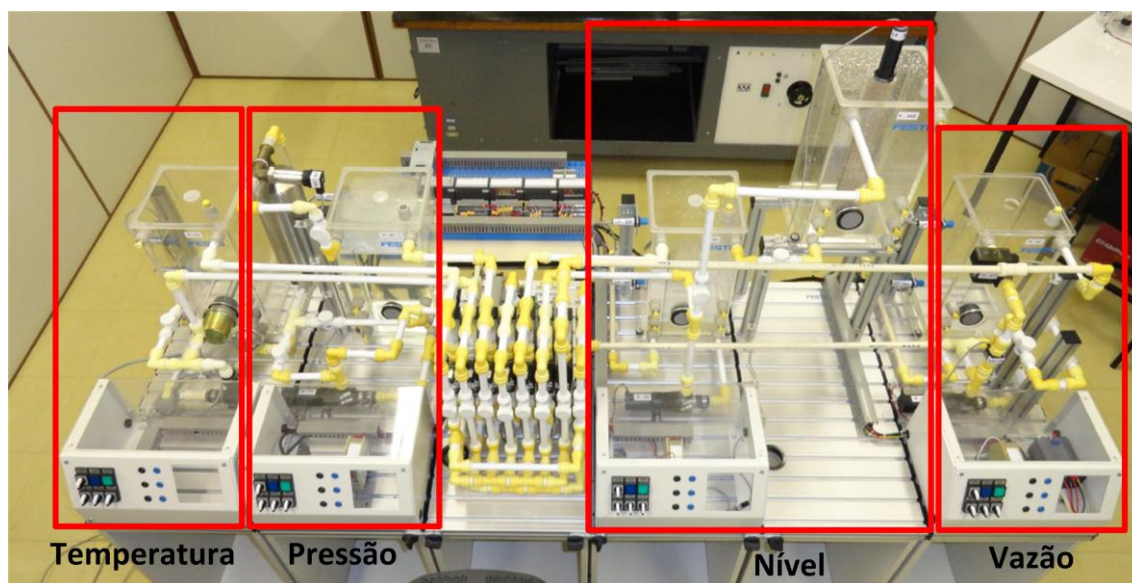


Figura 1: Planta didática Industrial readaptada

Fonte: ALMEIDA (2012)

3. PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para realizar tanto as leituras dos sensores como para ligar as bombas e acionar as válvulas da planta, a proposta necessitou de uma interface de comunicação entre o elemento a ser controlado e o controlador, provido por uma placa de aquisição (DAQ)

da National Instruments, USB – 6221, conforme Figura 2. (NATIONAL INSTRUMENTS, 2012).



Figura 2: Placa de aquisição de dados

Fonte: NATIONAL INSTRUMENTS (2012)

Os sinais de controle oriundos da planta são adquiridos e processados na plataforma MATLAB®, essa comunicação é feita via USB. A placa de aquisição apresenta as seguintes especificações.

- a) 16 entradas analógicas de 16 bits, até 250KS/s;
- b) 2 saídas analógicas de 16 bits;
- c) 24 entradas/saídas digitais de 0 a 5V;
- d) 2 contadores 32-bits, 80 MHz;
- e) *Digital Triggering*;
- f) Compatível com software MATLAB®.

4. CONDICIONAMENTO DE SINAIS

É importante ressaltar que para realizar a comunicação entre a placa de aquisição de dados e a planta didática, é necessária uma etapa de condicionamento de sinais, pois tanto as entradas quanto as saídas analógicas e digitais da placa possuem uma faixa de tensão de $\pm 10V$ e 0 a 5V, respectivamente, e correntes limitadas em 5mA, sendo valores inferiores aos necessários para a ligação direta com a planta, tornando assim obrigatória esta etapa. Para o acionamento das válvulas solenóides, é necessário uma tensão de 24V e uma corrente de aproximadamente 330mA. Já para o driver de acionamento das bombas centrífugas são necessários 10V de tensão e 10mA de corrente.

A Figura 3 apresenta o módulo de condicionamento de sinais, que é dividido nas seguintes partes:

- a) Fontes simétricas de alimentação de 5V e 12V;
- b) Entrada e saída de sinais analógicos via pinos tipo banana;

- c) Acionamento das válvulas solenóides de 5V para 24V;
- d) Conversão dos sinais dos sensores capacitivos de 24V para 5V;
- e) Buffer para saídas analógicas;
- f) Multiplexação das saídas analógicas;
- g) Conversão do sinal do PT 100 de 4 a 20mA para 0 a 10V;
- h) Conexões do módulo de condicionamento para a placa de aquisição de dados.

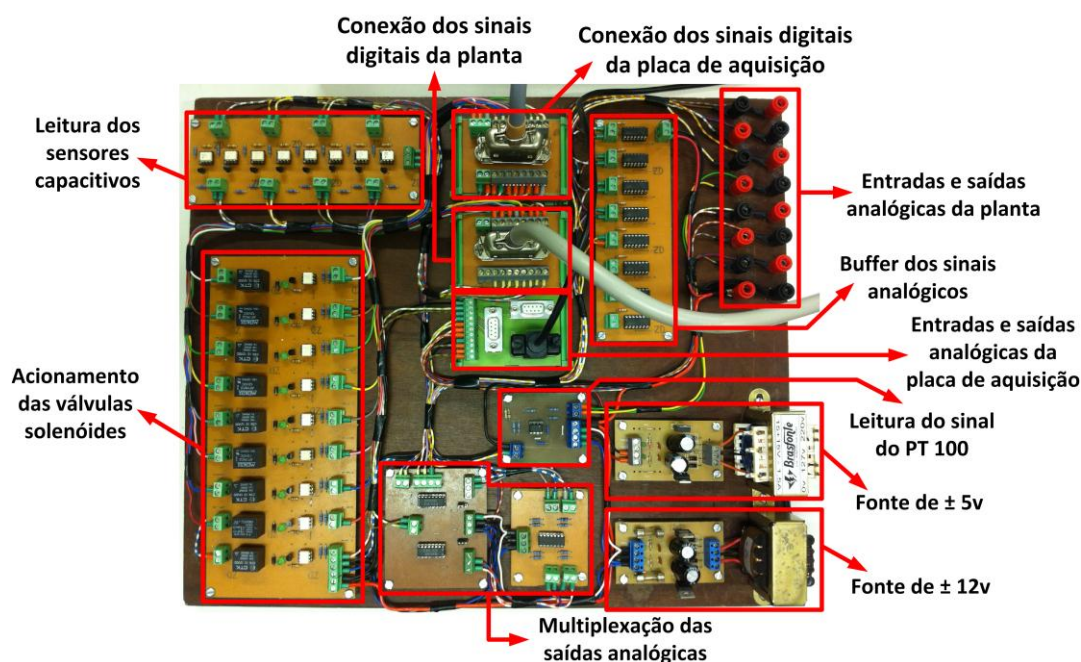


Figura 3: Módulo de condicionamento de sinais

5. GUIDE MATLAB

O GUIDE (GUI Development Environment), é uma ferramenta da MathWorks, incorporada ao MATLAB, que permite a criação de uma interface gráfica, tornando assim interativa a execução de tarefas pelo usuário, por meio de controles, como botões, réguas, menus entre outros.

Através do editor de *layout* GUIDE, pode-se projetar graficamente uma GUI que gera automaticamente o código MATLAB que define todas as propriedades dos componentes e estabelece um quadro para *callbacks*, rotinas que são executadas quando o usuário interage com um componente GUI, possibilitando a criação de rotinas de programação dentro dos *callbacks*, e este GUI por sua vez, pode ser totalmente personalizado, e também executado no MATLAB ou até mesmo como aplicativo independente.

Utilizando algumas funções específicas de entrada e saída digitais e analógicas do *Data Acquisition Toolbox*, que é realizado o *link* entre a placa de aquisição de dados e a interface criada.

5.1. Interface de Manobras de Fluidos

A automação da manobra dos fluidos da planta é realizada através da GUI mostrada na Figura 4, que permite ao usuário selecionar tanto a malha de origem quanto a malha de destino e também o monitoramento das bombas e dos sensores capacitivos das malhas através de animações que emulam *led's* (*Light Emitting Diode*) indicativos, mostrando o seu status acionado ou não.

De acordo com a escolha da malha de origem e de destino pelo usuário, são definidas algumas variáveis importantes no programa, para o remanejamento do fluido na planta.

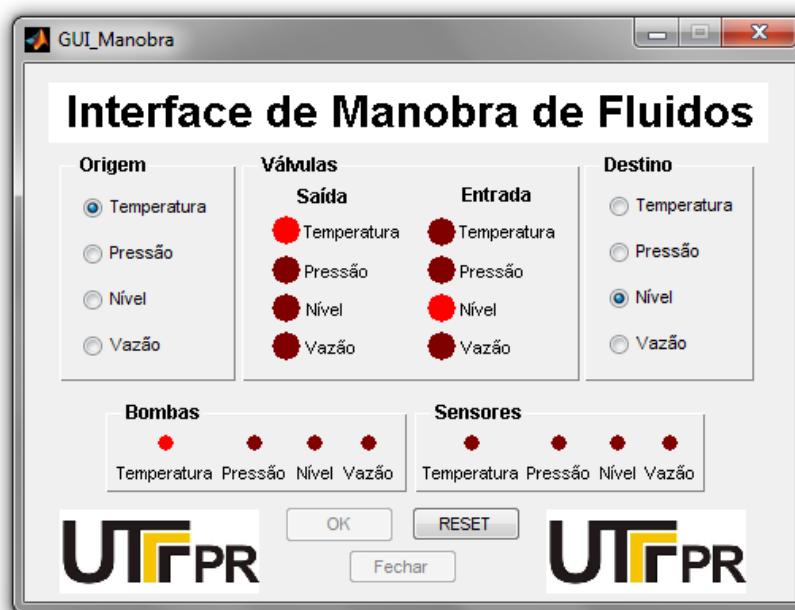


Figura 4: GUI de Manobra de fluidos entre as malhas de controle

As variáveis correspondentes às válvulas de entrada e saída, bombas e sensores, são respectivamente: "valvin", "valvout", "bomba" e "sensor". Estas variáveis recebem um valor específico de acordo com a seleção do usuário. Como exemplo, na Figura 4, a malha de origem é a de temperatura e a de destino é a malha de nível, assim "valvout" recebe o valor 14 e "valvin" recebe o valor 34, correspondendo assim às malhas de temperatura e nível.

A variável "bomba" recebe o valor 10, que corresponde à bomba centrífuga localizada na malha de temperatura, que é de onde sairá o fluido, e a variável "sensor" recebe o valor 18, que corresponde ao sensor de nível máximo do reservatório da malha de nível, que é para onde o fluido irá, podendo assim ser monitorado (o led na GUI acende caso o sensor seja acionado).

O monitoramento dos sensores de nível máximo é essencial para a manobra dos fluidos, pois o estado dos sensores permite que as válvulas e a bomba sejam acionadas ou não, enviando um sinal para que a entrada de fluido no reservatório seja interrompida, caso este já esteja cheio, fazendo com que tanto as válvulas de entrada e saída como a bomba sejam desligadas, evitando que o reservatório transborde.

6. IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

A identificação de sistemas se propõe a obter um modelo matemático que explique, pelo menos em parte e de forma aproximada, a relação de causa e efeito presente nos dados extraídos da dinâmica do sistema (AGUIRRE, 2007). Consiste na determinação do modelo matemático que representa seus aspectos essenciais de forma adequada para uma utilização particular, ou seja, para o diagnóstico, a supervisão, a otimização ou o controle. Em um processo de identificação de sistemas, diferentes procedimentos para a geração do sinal de entrada, medição do sinal de saída são utilizados, a saber: identificação pelo teste de resposta ao degrau, pela resposta em frequência, identificação *on-line* e identificação *off-line*, apresentados em (COELHO & COELHO, 2004). Neste trabalho foi utilizado o método de identificação pelo teste de resposta ao degrau, onde o processo é submetido a uma mudança na entrada do tipo degrau e a saída é armazenada. Com a curva de reação da saída do processo é possível então o uso de técnicas gráficas, numéricas ou computacionais para modelar o sistema. Boa parte dos processos industriais podem ser modelados por função de transferência de primeira ou segunda ou sem ordem com atraso de transporte (MORARI E ZAFIROU, 1989).

6.1. Identificação da Malha de Nível

Ao aplicar-se um degrau unitário em malha aberta, o sistema apresentou uma curva característica para sistema de primeira ordem com atraso de transporte, sendo representado, segundo Ogata (2000), pela seguinte expressão:

$$G(s) = \frac{K e^{-Ls}}{Ts + 1} \quad (1)$$

onde,

K é o ganho estático do processo;

L é o atraso de transporte;

T é a constante de tempo.

No presente trabalho o método de identificação aplicado no sistema foi o de Smith, o qual é marcado sobre curva de reação sistema os instantes de tempo t_1 e t_2 correspondentes às passagens da resposta pelos pontos $y = 0,283$ e $y = 0,632$, respectivamente, conforme Figura 5 (COELHO & COELHO, 2004).

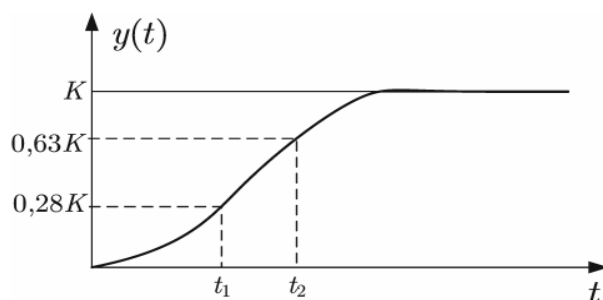


Figura 5: Curva de reação de sistema de primeira ordem pelo método Smith

Fonte: (COELHO E COELHO, 2004).

Os valores de K , L e T são calculados da seguinte forma:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (2)$$

$$T = 1,5 \cdot (t_2 - t_1) \quad (3)$$

$$L = t_2 - T \quad (4)$$

Para obtenção da função de transferência que descreve a dinâmica do sistema, foi implementado via software MATLAB® um algoritmo de identificação, aplicando um degrau de 6V em malha aberta.

A Figura 6 apresenta uma comparação entre a curva real do sistema e a curva obtida pelo modelo matemático identificado. O qual teve uma boa aproximação do modelo real.

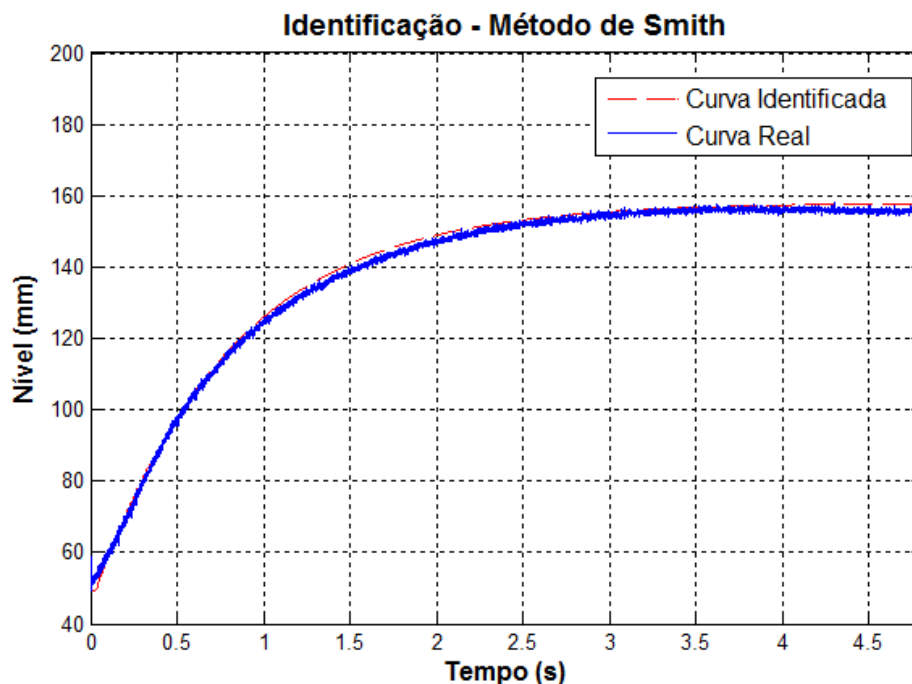


Figura 6: Curva de identificação do sistema

Note que o ensaio começou a ser registrado a partir de 50mm devido o range mínimo do sensor, porém, para os devidos cálculos este valor foi desconsiderado. Utilizando a curva da Figura 6, foi possível através do algoritmo de identificação, obter $t_1 = 0.2965$ e $t_2 = 0.8285$, podendo então calcular os valores de T e L chegando à seguinte função de transferência.

$$G(s) = \frac{4,805}{0,798s + 1} e^{-0,0305s} \quad (5)$$

6.2. Controle da Malha de Nível

A estratégia de controle adotada para o presente trabalho foi do tipo PI, na forma paralela que reúne as características do controle proporcional e integral em um mesmo controlador. A Figura 7 apresenta a topologia do controlador PI em paralelo.

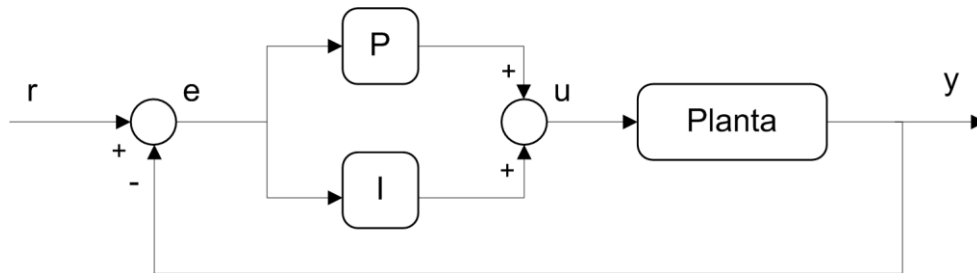


Figura 7: Topologia do controlador PI em paralelo

onde : r referência de entrada, o erro e (diferença entre o valor medido e referência de entrada), u a ação de controle e o sinal de saída do sistema y .

Ação do controlador PI é definida por:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt, \quad (6)$$

apresenta-se como função de transferência do controlador a relação,

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \quad (7)$$

Esta equação pode ser representada na forma discreta aplicando-se uma transformação *trapezoidal* para o termo integrativo (FRANKLIN *et al.*, 1998). Com isso, obtém-se,

$$\frac{U(z)}{E(z)} = K_p \left(1 + \frac{T_s(1 + z^{-1})}{2T_i(1 - z^{-1})} \right) \quad (8)$$

A seguinte equação de diferenças é formulada:

$$u[n] = u[n - 1] + a(e[n] - e[n - 1]) + \frac{b}{2}(e[n] + e[n - 1]), \quad (9)$$

onde: $a = K_p$, $b = K_p \frac{T_s}{T_i}$.

Para sintonia foi utilizado o método de Cohen-Coon. Tal método baseia-se também no ganho estático do processo, no tempo de atraso e na constante de tempo do processo.

Esse método resume-se conforme a Tabela 1.

Tabela 1: Tabela de Sintonia do Controlador PI, método de Cohen – Coon

Controlador	K_p	T_i	T_d
PI	$\frac{0,9T}{KL} \left(1 + \frac{0,92\tau}{1-\tau} \right)$	$\frac{3,3-3\tau}{1+1,2\tau}$	0

Fonte: (ÅSTRÖM e HÄGGLUND, 1934).

O parâmetro τ varia entre 0 e 1 e é definido como $\tau = \frac{L}{L+T}$, podendo ser utilizado para caracterizar a dificuldade em se controlar um processo. Quanto maior τ , mais difícil se torna o controle, pois são processos com tempo morto dominante. Tal método também é baseado em uma resposta com taxa de decaimento de 1/4 na resposta, quando o atraso de transporte é pequeno comparado à constante de tempo.

Considerando as equações da Tabela 1 para cálculo, a fim de obter os parâmetros do controlador PI chegou-se em,

$$K_p = 4.9635$$

$$T_i = 3.0545$$
(10)

Através dos parâmetros da Equação (10) obtidos aplicando técnicas de sintonia, juntamente com a Equação (9), é possível implementar, com auxílio do *software* MATLAB®, o controlador PI. A Figura 8 apresenta a resposta da malha de nível controlada tendo como referência de controle um nível de 200mm.

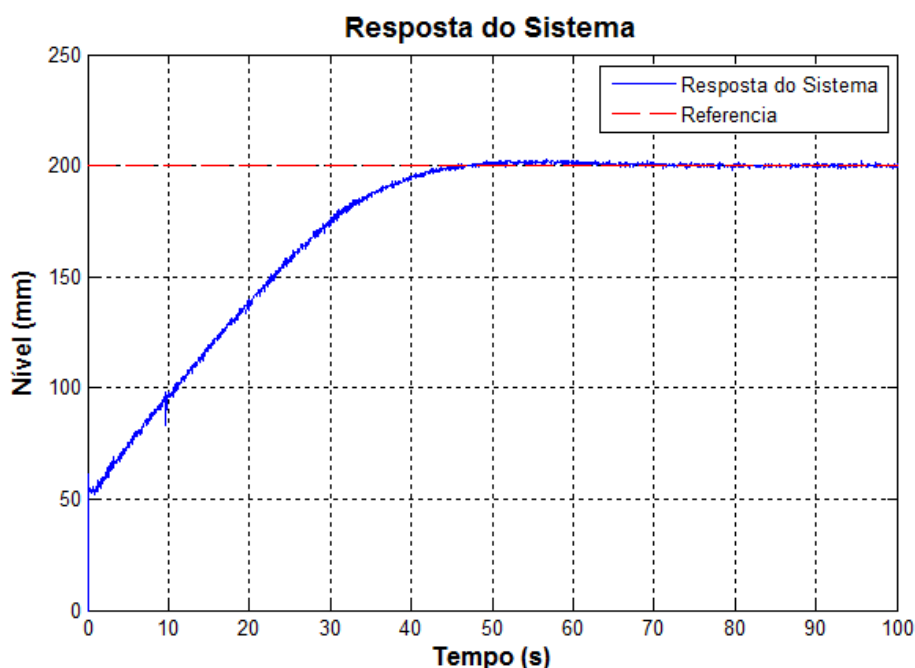


Figura 8: Resposta do sistema controlado

É possível constatar pela Figura (8) que o desempenho do controlador foi satisfatório, pois a resposta do sistema apresenta baixo tempo de assentamento e erro de regime estacionário nulo.

Na Figura (9) pode-se ver a resposta do sistema e a ação de controle através da tela da GUI de controle de nível em funcionamento utilizando os parâmetros de sintonia de Cohen-Coon da Equação (10).

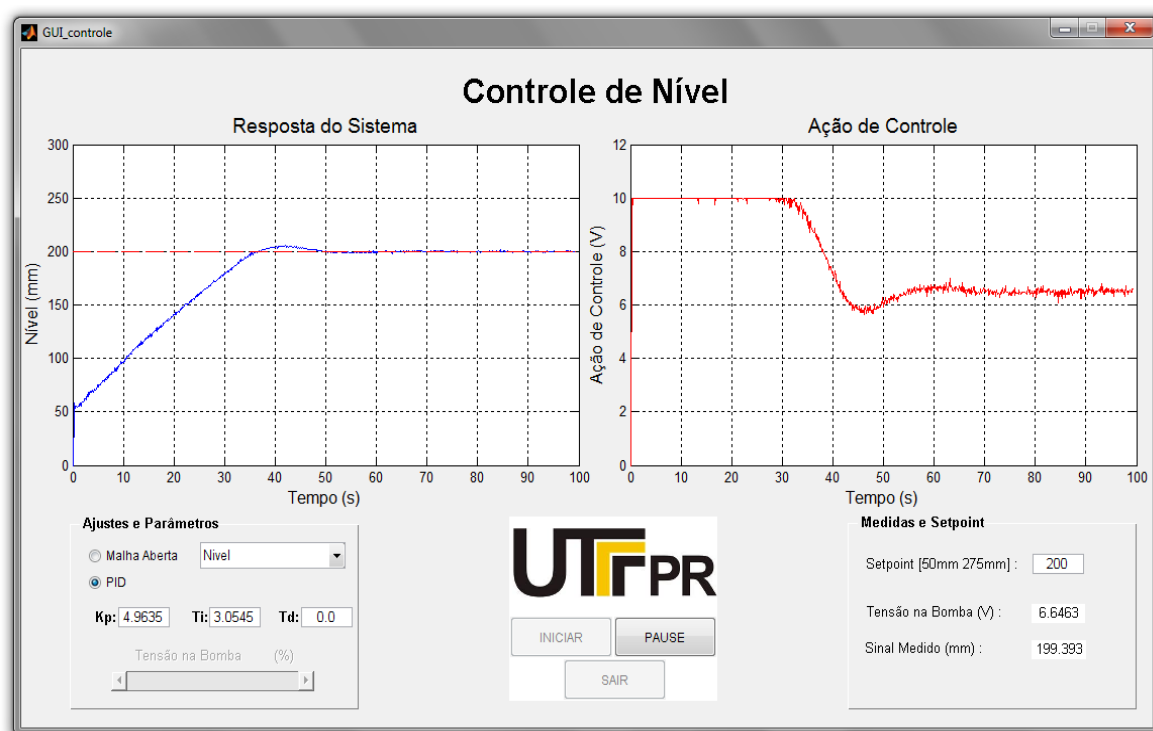


Figura 9: GUI de Controle em funcionamento

7. CONCLUSÕES

O trabalho desenvolvido no presente artigo é de extrema importância para formação de profissionais qualificados a atender as necessidades do mercado de trabalho, pois envolve vários conceitos e conhecimentos de diversas áreas da Engenharia Elétrica e da Engenharia de Controle e Automação. Depois de realizadas algumas simulações, concluiu-se que o desenvolvimento da interface gráfica de manobra e o controle dos processos da planta didática podem ser efetuados no ambiente GUIDE do MATLAB®, utilizando uma placa de aquisição de sinais e condicionadores de sinais.

A estratégia proposta funcionou como o esperado, ou seja, todas as etapas de manobra, identificação de sistema, controle e supervisão funcionaram perfeitamente executadas, evidenciando o aprofundamento e aperfeiçoamento do conhecimento teórico aplicado na prática.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer a Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR pelo apoio e incentivo para execução deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A. Introdução à Identificação de Sistemas. 3. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

ALMEIDA, J. P. L. S. de. Automação de uma planta didática de sistemas de controle. 122f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Tecnologia em Automação Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná: Cornélio Procópio, 2012.

ALTUS S.A. UCPs Série Ponto. São Paulo, SP, 2007.

ÅSTRÖM, K. J.; HÅGGLUND, T. PID Controllers: Theory, Design, and Tuning. 2. ed. Research Triangle Park, NC: Instrument Society of America, 1934.

CARMO, M. J.; GOMES, F. J. Sintonia de controladores e análise funcional de malhas industriais em ambiente multifuncional integrado. Anais: XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Campina Grande: UFCG, 2005.

COELHO, A. A. R.; COELHO, L. d. S. Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares. Florianópolis: Ed. UFSC, 2004.

DORF, R. C.; BISHOP, R. H. Sistemas de Controle Modernos. 8. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2001.

ELIPSE SCADA - SUPERVISORY CONTROL AND DATA ACQUISITION SYSTEM. Sistemas de Supervisão e Aquisição de Dados. 2002.

FESTO DIDACTIC. Process Control System - Control of temperature, flow, pressure and filling level. Hauppauge, NY, 2006.

FRANKLIN, G. F.; POWELL, J. D.; WOKMAN, M. L. Digital control of dynamic systems. 3.ed. Half Moon Bay: Ellis-Kagle Press, 1998.

LATHI, B. P. Sinais e Sistemas Lineares. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2007.

MORARI, M.; ZAFIROU, E. Robust Process Control, Prentice-Hall, Englewood Clis, NJ, 1989.

NATIONAL INSTRUMENTS. **NI USB - 6221 Datasheet**. Disponível em: <<http://sine.ni.com/ds/app/doc/p/id/ds-10/lang/pt>>. Acesso em: 20 set. 2012.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2000.



DIGITAL CONTROL OF LEVEL LOOP OF AN INDUSTRIAL DIDACTIC PLANT

Abstract: *This paper presents the implementation of a signal conditioning hardware along with a graphical user interface GUI (Graphical User Interface) as well as the use of an analog and digital data acquisition module in order to perform the automation and control of an industrial didactic plant. The level control loop is particularly considered. It addresses the concept of system identification, modeling and controller tuning for providing to undergraduate students an experience with technologies often used in industries, aggregating theoretical knowledge and practical skills acquisition in Engineering teaching.*

Key-words: *Identification Systems, Automation, Control, GUI, MatLab.*