

MÓDULO LABORATORIAL DE BAIXO CUSTO, BASEADO EM FOSS, PARA EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Francisco J. Gomes – chico.gomes@ufjf.edu.br

Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia

Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Campus Universitário Bairro São Pedro

CEP: 36036-900 – Juiz de Fora - MG

Flávio P. Queiroz – flavio.queiroz@engenharia.ufjf.br

Vinicius A. Gama – vngama@gmail.com

Hugo R. Baldioti – hugo.baldioti@engenharia.ufjf.br

***Resumo:** Este trabalho trata do desenvolvimento de um módulo laboratorial de baixo custo projetado e montado para utilização como ferramenta didática na área de educação de engenharia de controle. Ele permite a simulação, identificação, controle e análise de uma malha de controle industrial e a dinâmica de controladores pertencentes às operações de chão de fábrica. O módulo desenvolvido, baseado em Java, através da IDE NetBeans e do editor de gráficos vetorial Inkscape, que são ferramentas de software livre, inclui um ambiente digital e um módulo físico interagindo com duas malhas comumente encontradas nas indústrias: nível e temperatura. Sendo o FOSS (free and open source software) sua base de desenvolvimento, não existem restrições para sua utilização. A interface entre o hardware e o ambiente digital é realizada através do microcontrolador ATMEGA8 em uma placa de desenvolvimento livre ARDUINO, modelo SEVERINO. A plataforma desenvolvida, baseada em FOSS, pode reforçar as práticas laboratoriais com o intuito de melhorar a educação em engenharia, especialmente as relacionadas com o controle, supervisão e otimização de processos industriais.*

***Palavras-chave:** Educação em engenharia, Engenharia de controle, Controle laboratorial, Controle PID, FOSS*

1 INTRODUÇÃO

Malhas de controle de processos em geral, se forem adequadamente controladas, podem garantir vantagens comparativas como o aumento das margens de ganho e estabilidade, diminuição no consumo de energia, respostas mais rápidas e tempo de estabilização menor, minimização de impactos ambientais entre outras. Considerando um ambiente extremamente inovador enfrentado pelos complexos processos industriais na atualidade, é fácil entender que até mesmo pequenos detalhes podem fazer toda diferença nos resultados obtidos pelos operadores. Em tal situação, as estratégias de controle de processos adequada, tais como identificação correta das malhas e o ajuste dos parâmetros de controle apropriadamente, tornam-se meios eficazes para otimizar os resultados econômicos do processo. Isso também pode evitar a interferência da malha de controle, melhorar o tempo de estabilidade e minimizar as interferências entre as malhas; é um fato bem conhecido que até mesmo

melhorias marginais podem ter um impacto extremamente profundo e positivo nas formas de obtenção de resultados e na difusão de conhecimento no meio acadêmico e industrial.

É sabido, porém, que na realidade do ambiente industrial um número significativo de malhas de controle operam com estratégias inadequadas, estruturas incorretas e procedimentos de sintonia inapropriados. Mesmo para o onipresente controlador PID, foi relatado que, no jargão dos operadores o modo derivativo, D, está associado com palavras como “desastre”... (COOPER, 2010). Se considerarmos a quantidade de análises conceituais e referências que podem ser encontradas na literatura sobre a estratégia de controle PID (ASTRÖM 1995; ASTRÖM, 2006; VISIOLI, 2006; NORMEY-RICO, 2007; SUNG, 2009) torna-se claro que, em um grande número de situações o repositório de conhecimentos teóricos e sua utilização prática pelos operadores industriais, não corresponde. Uma possível explicação para tal situação pode ser encontrada na falta de compreensão das funcionalidades dos módulos PID, a incompreensão da complexidade associada com a dinâmica de processos ou até mesmo o não entendimento dos processos de sintonia do PID. Essa situação pode explicar a atitude temerosa dos operadores sobre a utilização adequada e ajustes dos controladores PID.

Outro ponto importante que também pode ser levado em consideração: A engenharia é uma profissão prática, “*hands-on*” e, portanto, desde os primórdios da educação em engenharia, laboratórios didáticos têm constituído um dos fundamentos da graduação e, em muitos casos, da pós-graduação. Pode-se afirmar que, anteriormente à ênfase na componente científica, a maior parte da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios (FEISEL, 2005). Por isto, sua utilização deve se associar a uma visão clara dos objetivos educacionais pretendidos em seu emprego e na formação propiciada pelo curso. Dentre estes objetivos destacam-se pontos que explicitam a importância da atividade laboratorial como, por exemplo, entender e utilizar modelos conceituais; coletar, analisar e interpretar dados; executar projetos sob demanda; aprender com falhas e erros; desenvolver a criatividade; comunicar, de forma oral e por escrito, os resultados e conclusões obtidos e trabalhar em equipe (PETERSON, 2007). A utilização intensiva de laboratórios, contudo, esbarra em problemas que variam desde visões conceituais distorcidas dos educadores até questões operacionais práticas, como custos envolvidos com aquisição, manutenção, operação e atualização dos equipamentos, realidades estas comuns à nossa realidade e que remetem à busca de soluções alternativas ou complementares às atividades laboratoriais, sem perda ou alteração de seus conteúdos e objetivos.

Como consequência desta situação, algumas alternativas para reforçar as práticas de ensino de laboratório foram realizadas. Entre elas, o desenvolvimento de um módulo educacional de baixo custo, com um sistema supervisorio, vem se mostrando como uma possível solução para análise e avaliação de sistemas complexos. Com a ajuda do conhecimento envolvido nessa técnica, é possível controlar processos complexos, com várias malhas, utilizando uma simples interface que permite o total controle de um sistema específico. Essa técnica utiliza uma interface gráfica que simula o sistema real e todas as atividades de controle que serão utilizadas. Através deste ambiente é possível gerenciar o sistema alterando suas características através dos parâmetros de controle. O sistema de supervisorio tem sido utilizado em quase todos os ambientes industriais pela sua capacidade de administrar sistemas complexos facilmente. Assim, pode-se considerar o quão importante é para os alunos de engenharia que tenham contato com essa ferramenta, o sistema supervisorio, com múltiplos *loops* de controle interagindo.

Uma utilização mais intensa das práticas laboratoriais dentro do processo educativo, no entanto, enfrenta problemas que variam de um equívoco do processo educacional até situações operacionais, como os custos associados com a aquisição, operação, manutenção e

atualização dos equipamentos de laboratório. Essa situação impõe a necessidade de encontrar meios alternativos, ou complementares, e novas posturas para um melhor e mais intenso aproveitamento das práticas laboratoriais no processo de ensino em engenharia.

Uma possível estratégia para ampliar a utilização dos supervisórios na área educacional pode ser vislumbrada através de soluções alternativas com módulos de baixo custo e uma alternativa para o *software* utilizado para o desenvolvimento da interface digital. O impacto dos custos de *software* sobre o preço final de um supervisório pode ser exemplificado com o bem conhecido ambiente digital *LabView*®. Este *software*, amplamente utilizado nas instituições acadêmicas, bem como na indústria, para simulação, design e análise, incluindo estratégias de controle protótipos, tem seu custo em torno de U\$20.000,00, até mesmo para sua versão educacional, com as respectivas ferramentas. Outro exemplo: simuladores educacionais como o *ITS PLC Professional Edition*®, que custa cerca de U\$5.000,00 para cada licença de desktop, só para o ambiente digital, sem os custos associados com os componentes de hardware (NOVA DIDACTA, 2009).

Diante dessa situação, a presente proposta foi a concepção e montagem de baixo custo, tecnicamente consistente, de um supervisório para educação em engenharia utilizando FOSS (*Free and Open Source Software*) e componentes de baixo custo. Embora a característica mais conhecida associada com FOSS seja o seu baixo custo, praticamente nula para os usuários, outras características não tão conhecidas, e também importantes, devem ser levadas em consideração e podem explicar seu poder de crescimento e utilização, em todo mundo, e sua aceitação nos meios acadêmicos e industriais. Elas incluem a confiabilidade, segurança e estabilidade, padrões abertos e independência dos fornecedores, redução da dependência de importação e o reforço da capacidade tecnológica local (OPENSOURCE, 2010).

Dentro desse contexto, esse trabalho discute o desenvolvimento de um módulo laboratorial de baixo custo, baseado em FOSS, para utilização como ferramenta no ensino à engenharia na área de controle de processos industriais. Esse módulo permite a análise e controle de malhas associadas a duas das principais variáveis encontradas na área de processos industriais: temperatura e nível. O módulo permite a identificação das funções de transferência das malhas, análise das interações entre elas, procedimentos de utilização e sintonia de um controlador PID em *software*, para cada *loop*, estabelecimento de prioridades e alguns procedimentos de otimização. Todo o desenvolvimento foi baseado em Java, com a utilização da IDE *NetBeans* e o programa *Blender*, todos ambientes FOSS.

O artigo detalha as características do ambiente, o desenvolvimento do ambiente virtual e a interface com os equipamentos de hardware, os resultados obtidos e, finalmente, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

2.1 O módulo laboratorial

O módulo laboratorial desenvolvido consiste de dois tanques (um com a função de reservatório e o outro controlável), duas bombas automotivas de baixo custo, duas válvulas (que compõe a válvula seletora de fluxo), um radiador, uma resistência (aquecedor), um computador e a estrutura de hardware desenvolvida para a comunicação entre o computador e o sistema físico (Figura 1)

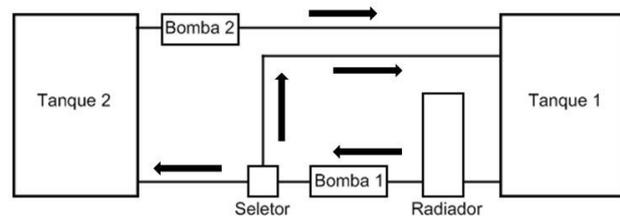


Figura 1 – Sistema com supervisor (esquerda) e diagrama dos fluxos (direita).

Para sua implementação foram utilizados materiais convencionais e de baixo custo disponíveis no mercado. Assim, os tanques são latas de alumínio, as bombas são automotivas e o sistema de refrigeração utiliza um radiador convencional com uma resistência de cozinha.

2.2 O sistema mecânico

O sistema mecânico da planta é constituído por bombas e uma válvula seletora de fluxo. O nível do tanque é controlado pelas bombas, sendo uma delas responsável por encher o tanque e a outra por esvaziar. A planta completa incorpora dois fluxos independentes de líquido, um associado com o controle de nível e o outro com o controle de temperatura; essas malhas de controle podem trabalhar de forma simultânea ou independente. O diagrama na Figura 1 mostra os *loops* de controle de processos. Vale dizer que o tanque 2 é o reservatório e o tanque 1 é o controlável, para ambas as variáveis controladas, nível e temperatura. O tanque 1 é esvaziado através da bomba 1, que é controlada pelo sistema. A temperatura pode ser controlada de duas formas: fazendo o líquido passar pelo radiador ou ativando a ventoinha associada ao mesmo.

2.3 A comunicação de hardware

Para realizar o controle do sistema foi necessário desenvolver uma placa de comunicação para o interfaceamento entre o computador e o módulo laboratorial (*shield*). Para tal desenvolvimento o microcontrolador ATMEGA8, em uma placa de desenvolvimento livre ARDUINO, modelo SEVERINO (ARDUINO, 2010), foi utilizado, com um *shield* desenvolvido pelos autores. A comunicação com o computador foi feita através da porta serial RS-232, que é um padrão para a troca serial de dados binários. A escolha de kit de desenvolvimento ARDUINO foi feita com base no fato de que a conversão analógico/digital de sinais e a comunicação com a porta serial já é realizada por este *hardware*.

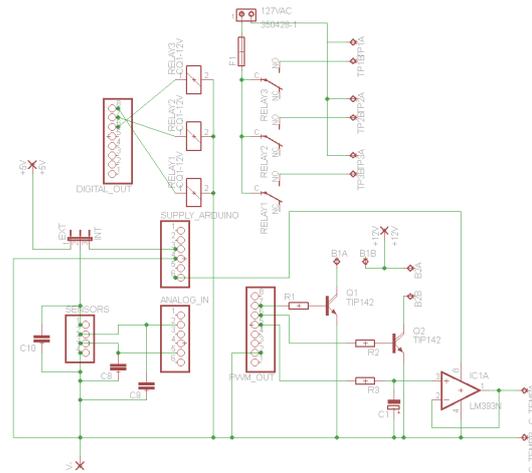
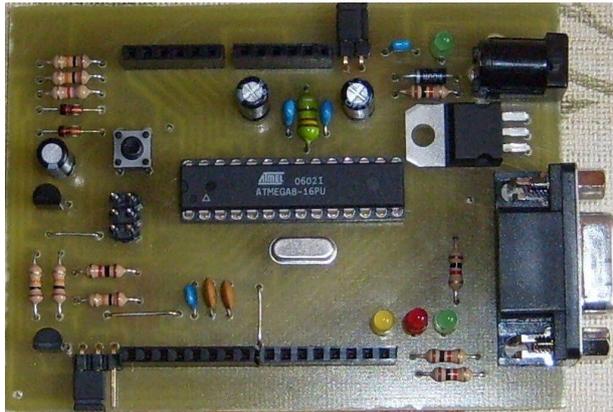


Figura 2 – Arduino Severino (esquerda) e esquemático do *Shield* (direita).

Para fechar a malha dois sensores foram utilizados: um sensor de distância infravermelho modelo GP2Y0A21YK, cujos dados analógicos de saída dependendo da distância refletida são mostrados na Figura 3, observa-se que seu comportamento é totalmente não-linear, o que introduz complexidades adicionais para a implementação da estratégia do sistema de controle de malha fechada; e um sensor de temperatura LM35Dz, modelo que apresenta uma característica linear para relação tensão x temperatura. O microcontrolador é responsável pela aquisição dos dados analógicos, realiza sua digitalização e envia para o computador onde são processados e, em seguida, a resposta é enviada de volta para os atuadores através do *shield* desenvolvido (Figura 2). Os atuadores utilizados no circuito de controle de nível são duas válvulas, 127 VAC, e duas bombas de automóvel (limpadores de para-brisa) de 12 VDC. O controle do fluxo das bombas é realizado por meio de uma estratégia PWM (Pulse Width Modulation), uma das maneiras mais simples de controlar um motor. O atuador de controle de temperatura é um aquecedor de resistência de 127 VAC, e um radiador com uma ventoinha também de 127 VAC. A técnica PWM também é utilizada para controlar a potência fornecida para a resistência, cuja interface é um relé da Contemp modelo AFC-1 trabalhando com um padrão industrial de controle AC de 4-20 mA para o aquecedor, com uma estratégia de sinal também PWM.

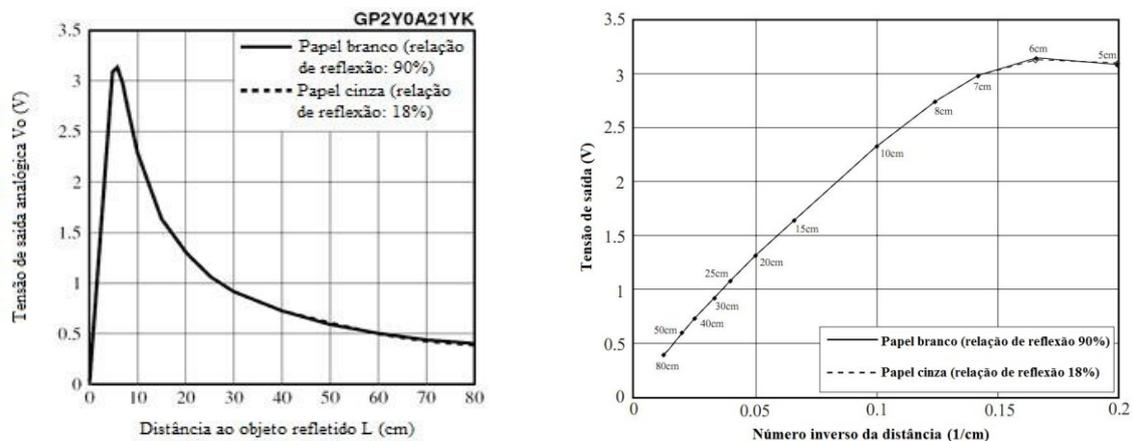


Figura 3 – Característica do sensor (esquerda) e curva linearizada (direita).

2.4 Sensores

O sensor de distância utilizado nesse trabalho foi escolhido por suas características: ele possui uma distância de operação segura, quando situada entre 10 e 80 cm do objeto refletido, e gera tensões de saída analógicas associadas com a distância (Figura 3). Esse sensor é um infravermelho, uma alternativa mais barata e mais eficiente do que sonares e outros sensores de nível. A relação matemática entre a tensão de saída do sensor versus a distância ao objeto refletido (Figura 3) é claramente não-linear, mas esta dificuldade pode ser atenuada, utilizando a relação entre a tensão de saída e o inverso da medida da distância, o que gera uma curva praticamente linear em uma grande parte da nova relação a ser utilizada (Figura 3). De acordo com o fabricante, a relação linear mostra que a distância do objeto refletido é, aproximadamente, igual a um fator de escala constante ($\sim 27 \text{ V} \cdot \text{cm}$) dividido pela tensão de saída do sensor.

A escolha do sensor de temperatura foi baseado em suas características. Esse sensor, que detecta temperaturas entre $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ e $150 \text{ }^\circ\text{C}$, é utilizado para uma leitura mais precisa da temperatura em graus Celsius. O valor em graus Celsius é obtido usando um filtro RC no circuito físico e um tratamento interno do microcontrolador ao sinal recebido que consiste em multiplicar o valor lido por uma constante. Esses métodos foram utilizados com base no *datasheet* do fabricante do componente.

2.5 O Sistema de controle

Será abordado, inicialmente, o ambiente digital utilizado para o desenvolvimento do módulo laboratorial. Dentro do contexto educacional, que é o enfoque principal desse trabalho, e lembrando a importância do desenvolvimento do conhecimento e da criação de uma biblioteca FOSS, que podem ser utilizados para o ensino na engenharia, todos os programas utilizados para a criação do ambiente (Figura 4) são *open-source*, dessa forma os custos envolvidos no desenvolvimento desse projeto são muito baixos e, sendo assim, permitem sua utilização em todos os tipos de ambientes, tanto educacionais quanto industriais, para fins de ensino ou de formação profissional.

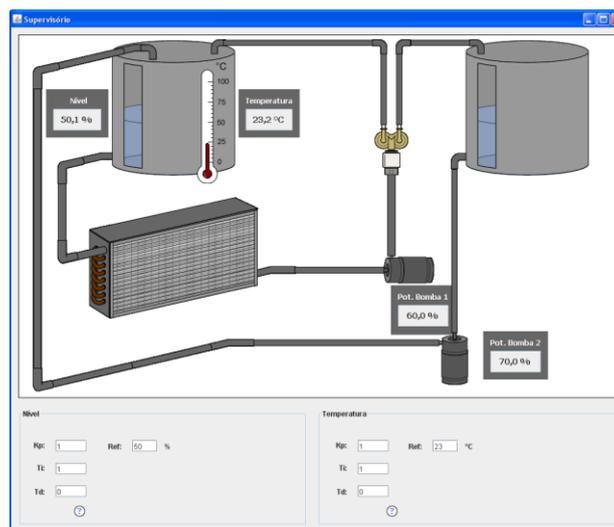


Figura 4 – Interface do ambiente computacional.

A linguagem de programação utilizada para desenvolver a interface de controle do supervisor foi JAVA, através de um ambiente de desenvolvimento integrado (*Integrated Development Environment* ou IDE) chamado *NetBeans*, as imagens foram criadas no *Inkscape*, um editor de gráficos vetoriais.

Para controle das malhas foi utilizado um controlador PID de velocidade,

$$u(t_k) = u(t_{k-1}) + K_p \left[\left(1 + \frac{\Delta t}{T_i} + \frac{T_d}{\Delta t} \right) e(t_k) + \left(-1 - \frac{2T_d}{\Delta t} \right) e(t_{k-1}) + \frac{T_d}{\Delta t} e(t_{k-2}) \right] \quad (1)$$

Onde:

- K_p : ganho proporcional,
- T_i : tempo integral;
- T_d : tempo derivativo;
- $e(t_{k-n})$: erro no tempo n ;
- Δt : amostragem intervalo e
- $u(t_k)$, é a ação de controle.

Sendo um módulo de controle didático, os parâmetros do controlador PID são definidos pelo usuário, de tal forma que ele pode encontrar ou testar os valores de ajuste que melhor atendam às suas necessidades em aplicações específicas, incluindo o reconhecimento da função de transferência e análise da interferência entre as malhas de controle.

3 RESULTADOS OBTIDOS

O supervisor desenvolvido foi planejado para a utilização na área de educação em engenharia, mais especificamente na área de controle de processos industriais, como um instrumento didático para a melhoria das condições de ensino laboratorial. Assim, espera-se que os alunos possam enfrentar características importantes na área de controle de processos industriais, especialmente as dinâmicas das malhas associadas com o controle das variáveis, como nível e temperatura (CAMPOS & TEIXEIRA, 2007). Para ilustrar a potencialidade e a flexibilidade desse módulo didático algumas situações que podem ser trabalhadas pelos alunos serão discutidas a seguir.

O foco do trabalho, ao selecionar esses exemplos, foi apenas para apontar a aplicabilidade do supervisor para a criação, nas atividades de laboratório, de algumas das várias complexidades do controle de processos industriais. Para a primeira situação foi utilizado o método de Ziegler/Nichols – ZN para sintonia do controlador de nível, embora este método seja muito utilizado no meio industrial ele não é recomendado para a sintonia de controladores PID referentes à nível, devido a sua dinâmica e as não linearidades do processo (CAMPOS, 2007). A cargo de exemplo esse método foi utilizado e, a partir dele, foram encontrados os seguintes resultados: $K_p = 6$; $T_i = 1,5$; $T_d = 0,4$ (Figura 5).

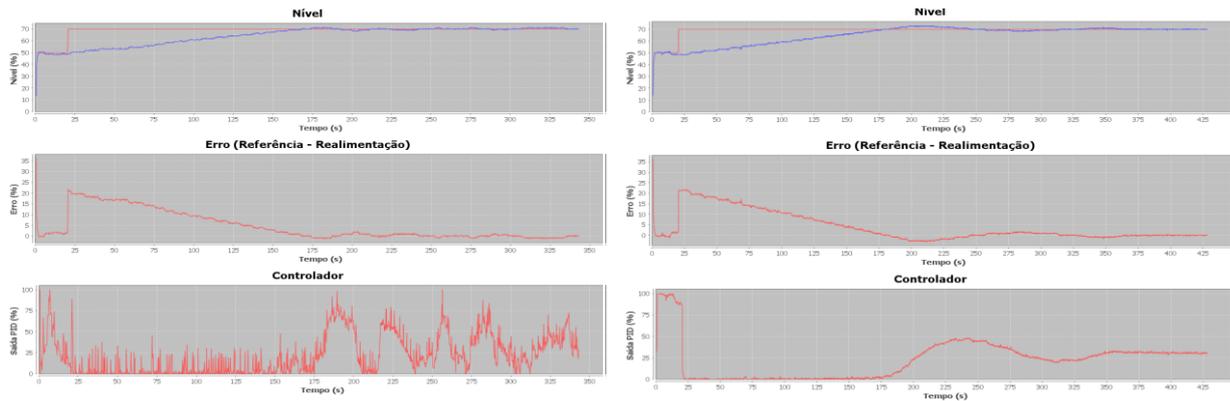


Figura 5 – PID sintonizado pelo método ZN (esquerda) e curva da reação (direita).

Como efeito de comparação, tendo em vista que o método ZN não é o mais aconselhável para controle de nível, utilizamos outro método de sintonia conhecido como método da curva de reação, que consiste em encontrar a curva S do sistema e a partir dela medir as grandezas referentes ao valor máximo, o tempo morto e taxa de variação, ou seja, a inclinação da curva de reação $\Delta u/\Delta t$ (LOURENÇO, 1997). Para esse método foi escolhido uma sintonia PI e a calibragem dos parâmetros do controlador ficaram em $K_p = 3,8$, $T_i = 9,9$ e $T_d = 0$ (Figura 5).

Outra aplicabilidade ao se encontrar a curva S devido à resposta ao degrau, é a possibilidade de se calcular a função de transferência do sistema. Para tal, considerando uma modelagem do sistema de primeira ordem, foi utilizado o método de Smith (COELHO, 2004) e, a partir dele, foi encontrada a seguinte função de transferência:

$$G_p = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{2,375}{498,75s - 1} e^{-121,25s} \quad (2)$$

Devido à funcionalidade da planta industrial construída podem-se aplicar diversas técnicas para o estudo de controle de processos industriais. Nesse sistema a malha de temperatura funciona em paralelo com a de nível e é igualmente funcional, permitindo, inclusive, estudos de interatividade entre as malhas de controle.

4 CONCLUSÃO

A plataforma didática discutida, planejada e desenvolvida como ferramenta educacional para o ensino de engenharia de controle, totalmente baseado em FOSS, permite a modelagem e controle da dinâmica de um processo didático industrial, mais especificamente um sistema de dois tanques, com controle de nível e temperatura. Foi apresentado neste trabalho a potencialidade de tal módulo de baixo custo como um poderoso ambiente laboratorial para o ensino de engenharia de controle e treinamento, embora, por razões de espaço, apenas algumas situações de aplicabilidade foram ilustradas. Se esse módulo laboratorial pode, por um lado, reproduzir algumas das complexidades e não linearidades de uma planta industrial real, sem altos custos associados à aquisição de uma planta industrial/laboratorial real, por outro permite que os estudantes e operadores possam enfrentar dificuldades, complexidades e especificidades relacionadas com a compreensão, utilização e a sintonia de controladores.

Uma característica diferencial desse trabalho é o fato de que é totalmente baseado em FOSS, resultando em um ambiente educacional que, embora reproduzindo a complexidade da dinâmica de uma planta industrial real, pode ser projetado e montado com custos muito

baixos. Ao utilizar esses módulos, os alunos podem lidar com as variáveis de controle do processo principal, ampliando seus conhecimentos e habilidades para atuação na área de controle de processos.

Os resultados obtidos e discutidos aqui, embora limitados por razões de espaço, mostram que as condições, procedimentos, soluções e complexidades associadas às malhas de controle de processos industriais podem ser trabalhadas com esse módulo. Esses recursos utilizados incluem pontos como escolher o valor dos controladores adequadamente para as malhas específicas, utilizar o ajuste automático, identificando os parâmetros do modelo para os *loops*, causar um distúrbio no sistema etc.

Praticamente sem custos, esse módulo, baseado em FOSS, pode ser utilizado para otimização e reforço das atividades laboratoriais no ensino à engenharia de controle e também pode ajudar os alunos a melhorar seus conhecimentos em controle de processos industriais.

Finalmente, vale a pena dizer que, esta plataforma já está sendo utilizada em alguns cursos de extensão e treinamento na respectiva área, dentro das atividades do curso de Engenharia Elétrica da UFJF, dentro do contexto das atividades do Programa de Educação Tutorial (PET/MEC).

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Programa de Educação Tutorial PET/MEC pelo apoio à realização desse trabalho

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARDUINO. Disponível em: <<http://www.arduino.cc>> Acesso em: 08 dez. 2010

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. “*Advanced PID Control*”, ISA *Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, NC, USA, 2006.*

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. “*PID Controllers: Theory, Design and Tuning*”, ISA *Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, NC, USA, 1995.*

CAMPOS, M. C. M.M; TEIXEIRA, H. C. G. “*Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*”, Editora Edgar Blücher, São Paulo, 2007.

COELHO, Antonio Augusto R.; COELHO, Leandro dos S. “*Identificação de sistemas dinâmicos lineares*”, Editora da UFSC, 2004

COOPER, D. “*Practical process control: proven methods and best practices for automatic process control*”. Disponível em: <<http://controlguru.com>> Acesso em: 12 jun. 2010

LOURENÇO, João; “*Sintonia de controladores PID*”, Escola superior de tecnologia, 1997

FEISEL, L.D.; ROSA, A. J. “*The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education*”, *Journal of Engineering Education*, pp. 121-130, Janeiro 2005.

NOVA DIDACTA, “Sistemas Didáticos de Medição”, Catálogo Técnico, São Paulo, 2009.

NORMEY-RICO, J. E.; CAMACHO, E. F. “Control of Dead-time Processes”, Springer Verlag, London Limited, London, UK, 2007.

OPEN SOURCE INITIATIVE. Disponível em: <<http://opensource.org/history>> Acesso em: 06 dez. 2010

PETERSON, G. D.; FEISEL L. D. “A Colloquy on Learning Objectives For Engineering Education Laboratories”, Proc. American Society for Engineering Education, Annual Conference & Exposition, 2007.

SUNG, W. S.; LEE, J.; LEE, I. “Process Identification and PID Control”, John Wiley & Sons, Pte Ltd., Asia, 2009.

VISIOLI, A. “Practical PID Control”, Springer Verlag, London Limited, London, UK, 2006.

A LOW-COST FOSS MODULE FOR INDUSTRIAL PROCESS CONTROL ENGINEERING EDUCATION

Abstract: *This work deals with the development of a low cost laboratory module designed and assembled for utilization as a didactic tool in the control engineering education area. It allows simulation, identification, control and analysis of industrial control loop and controllers dynamics belonging to the shop floor operations, but with potentiality for incorporating safety and optimization techniques. The developed module, Java based, through IDE NetBeans and a vector graphics editor Inkscape, that are FOSS tools, encompasses digital environment and a physical module with two interacting loops that resemble the industrial ones: level and a temperature loops. Being an FOSS based development this module has no restriction for its utilization. The interface between the hardware and the digital environment is based upon the microcontroller ATMEGA8 on an open source ARDUINO development board, SEVERINO model. The developed platform, FOSS based, can reinforce the educational laboratory practices for improving engineering education especially that related with industrial process control, supervision and optimization.*

Key-words: Engineering education, Control engineering, Laboratory Control, PID control, FOSS.