

SOLUÇÕES HILS BASEADAS EM FOSS PARA TREINAMENTO E SUPERVISÃO EM CONTROLE DE PROCESSOS INDUSTRIAIS

Flávio P. Queiroz, Vinicius A. Gama, Francisco J. Gomes e A. A. R. Coelho¹

Fac. Engenharia – UFJF- Campus Universitário - Juiz de Fora – MG

¹Dept. Automação e Sistemas - CTC – UFSC – Florianópolis - SC

E-mails: flavio.queiroz@engenharia.ufjf.br, vngama@gmail.com, chico.gomes@ufjf.edu.br, aarc@das.ufsc.br

Abstract- This work demonstrates a simulation environment, based on Hardware-in-the-Loop (HIL) technique, designed for utilization as an operator training tool and with potentiality, at a supervisory level, for analyzing security and optimization techniques. The environment, based on Java language and Eclipse compiler, a Free Open Source Software - FOSS, has no restrictions to their utilization. The digital environment simulates an industrial plant, but utilizes a built-in system composed of a command unite, in this case an analogical PID, and an industrial inverter, produced by WEG. It was necessary to design a specific communication board, whose main component is a PIC 16F877A, to connect the PID controller and the industrial inverter to the computer environment. The system simulates a real control plant belonging to the Laboratory of Industrial Process Control of the Engineering College of UFJF. Incorporating the nonlinearities and complexities of the real plant, and running with the same time constants, the HIL developed, totally FOSS based, allows the training of operators, optimization and safety analysis of the industrial plant.

I. INTRODUÇÃO

As malhas de um processo industrial, quando adequadamente controladas, garantem vantagens comparativas como aumentos da estabilidade e da margem de ganho do processo, diminuição dos consumos energéticos, resposta e estabilização mais rápidas, maximização das taxas de produção e minimização de impactos ambientais, entre outros aspectos. Na realidade atual dos processos industriais, altamente competitiva e baseada em inovações, pequenos detalhes fazem a diferença. Nesta situação, a utilização de estratégias adequadas de controle dos processos industriais constitui procedimento eficiente para otimizar a operação de uma planta industrial, sua produtividade, a eficiência da produção e a qualidade dos produtos; adicionalmente, mesmo melhorias marginais no controle e operação dos processos podem impactar profundamente aspectos associados às questões econômicas e ambientais.

Contudo, é fato conhecido que, na prática, muitas malhas industriais operam com estratégias inadequadas, modos desabilitados ou estruturas indevidas. Mesmo para o conhecido e onipresente controlador PID, relatos revelam que, no jargão dos operadores, o modo derivativo, D, está associado aos termos “Desligado”, “Desastre” ou “Definitivamente... não utilizar” [1]. Considerando-se as

análises conceituais, teóricas e o grande número de referências encontradas na literatura sobre a referida estratégia de controle [2,3,4,5] fica clara a existência, em algumas situações, de desconhecimentos entre a potencialidade desta estratégia, o conhecimento teórico acumulado sobre ela e sua utilização prática, pelo menos como vista por alguns operadores. Uma das razões que podem justificar este desconhecimento pode talvez residir em conhecimento insuficiente das funcionalidades dos módulos do PID, desconhecimento das complexidades associadas às dinâmicas dos processos industriais e posturas inadequadas, ou mesmo conservadoras, de procedimentos para sintonia do PID, em distintas situações.

Pode-se contrapor, à esta situação, outra realidade: a engenharia é uma profissão prática, “hands-on”, e desde os primórdios da educação em engenharia, laboratórios didáticos, quer para estudantes, quer para operadores, têm constituído um dos fundamentos da educação na área de controle. No caso da formação acadêmica, pode-se mesmo afirmar que, anteriormente à ênfase na componente científica, a maior parte da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios [6]. A razão para a afirmação é óbvia: a atividade laboratorial, dentro do processo educacional, segundo Peterson, [7] possui características e objetivos explícitos como, p.ex., 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.

A utilização intensiva de laboratórios para educação e treinamento, contudo, esbarra em problemas que variam desde visões conceituais distorcidas dos educadores e treinadores até questões operacionais práticas, como custos envolvidos com aquisição, manutenção, operação e atualização dos equipamentos, situações 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.

Em resposta à esta situação, e inclusive buscando expandir a utilização laboratorial, a técnica de simulação conhecida como “Hardware-In-The-Loop” – HIL vem sendo amplamente utilizada para criação e teste de sistemas complexos, simulando-os em tempo real, em condições as mais próximas possíveis das atividades laboratoriais. A técnica consiste em simular, em ambientes tridimensionais, ambientes que tentam reproduzir, da forma mais exata

possível, sistemas físicos reais, mas efetuando sua interação com o usuário, ou operador, através de “hardwares” físicos, que interagem com o ambiente real simulado. O ambiente computacional busca, a partir da emulação de sensores, atuadores e modelagens dinâmicas de ordem completa, simular os sistemas da melhor forma possível [8].

A técnica HIL, devido ao seu baixo custo de aplicação, está se tornando padrão nas áreas de desenvolvimento e treinamento - pois dispensa componentes físicos, de custos elevados-, nas etapas iniciais de projetos, em treinamento de operadores, avaliação de projetos e em educação. Ao possibilitar, nas etapas primárias de desenvolvimento e treinamento, a previsão de situações de risco, ao sistema e usuários, amplia a segurança das partes envolvidas. Sua facilidade de aplicação e utilização constitui fator adicional que reforça esta técnica como poderosa ferramenta de treinamento em sistemas de controle e desenvolvimento de produtos industriais e sistemas fabris [9]. Tome-se, como exemplo, a indústria automobilística, extremamente competitiva e que demanda desenvolvimentos cada vez mais rápidos e, naturalmente, da forma mais econômica possível. Os veículos modernos embarcam, crescentemente, sistemas e unidades de controle complexas, o que exige sistemas mais eficientes de desenvolvimento e testes. Exemplos de HIL em novos desenvolvimentos automobilísticos podem ser encontrados na Jaguar[®], utilizadas em diferentes etapas do desenvolvimento da arquitetura de seus veículos e unidades elétricas de controle [10].

Outro aspecto a destacar é que a proposta de utilização de HIL conta, de maneira simbiótica, com a técnica de simulação denominada “Control Prototyping”, que mescla componentes físicos e componentes simulados em tempo real, possibilitando desenvolvimento rápido de controladores. Esta técnica substitui partes da planta, ou até mesmo a planta integral, sendo o componente físico apenas o controlador PID e a interface computacional, onde o PID executa a interface de controle do usuário da planta virtual [11].

Uma utilização mais ampla do HIL, contudo, esbarra em problemas de custos associados aos softwares necessários ao desenvolvimento dos ambientes de simulação. Tome-se, como exemplo, o caso do conhecido ambiente LabView, utilizado no meio acadêmico e industrial, inclusive” para Control Prototyping” com HIL. Representantes contatados informaram que a “versão educacional”, com as “toolboxes” completas, tem custos da ordem de US\$ 20.000,00. Outro exemplo: simuladores educacionais, como o “ITS PLC Professional Edition[®]”, da Nova Didacta, possui custos na faixa de R\$ 6.800,00 por estação de simulação, sem o hardware [12].

Nesta situação, buscou-se uma solução tecnicamente consistente, porém de baixo custo, com o emprego de “Free Open Source Software – FOSS”, ou seja, o software livre. Talvez a mais conhecida característica do FOSS seja o seu baixo custo, praticamente nulo, para os usuários. Contudo, outras características, mais importantes e por vezes não tão perceptíveis de imediato, explicam sua crescente força, utilização e disseminação nos mais diversos ambientes, com

destaque para os acadêmicos, industriais e nas organizações públicas e privadas [13] e incluem:

1. Segurança
2. Confiabilidade/Estabilidade
3. Padrões abertos e independência dos fornecedores
4. Dependência reduzida de importação
5. Desenvolvimento da capacidade local
6. Pirataria, Direitos de Propriedade Intelectual e Regras do Comércio Internacional.
7. Localização

A partir do quadro colocado, o trabalho propõe o desenvolvimento de um sistema HILS para uso laboratorial, na área de treinamento em engenharia de controle de processos, desenvolvido a partir de uma planta física real, existente no Laboratório de Controle de Processos Industriais da Faculdade de Engenharia da UFJF. Buscou-se reproduzir as dinâmicas associadas ao controle de nível em um tanque não linear, com as válvulas pneumáticas associadas, com controle através de um controlador analógico real PID; as complexidades integrantes das bombas hidráulicas são reproduzidas em simulação tridimensional, com o controle sendo efetuado diretamente através de um inversor real, da WEG. O desenvolvimento foi efetuado em Java[®], uma linguagem orientada a objeto, livre, que engloba uma linguagem de programação e uma máquina virtual ou “Virtual Machine”, totalmente livre. A compilação ocorreu no Eclipse[®], uma IDE de código aberto.

O trabalho está estruturado como segue: a seção 03 descreve as características do ambiente, a seção 3 o desenvolvimento do trabalho e a 4 os resultados alcançados. As conclusões, na seção 5, encerram o trabalho.

II. METODOLOGIA

O HIL foi concebido baseando-se em uma planta real, do Laboratório de Controle de Processos Industriais, do curso de Engenharia Elétrica da UFJF [13] : um sistema de tanques duplos, com aquecimento e resfriamento e controle das variáveis de processo - vazão, nível, temperatura e pressão - em circuito único, configurado segundo topologias distintas (Figura 1). Opera baseada na padronização de sinais de 4 a 20 mA, adicionalmente ao protocolo digital Profibus PA., e possui um Sistema Supervisório que possibilita a configuração e operação de um Controlador Lógico Programável – CLP, que executa os algoritmos de controle; adicionalmente existem malhas individuais das variáveis de processo operadas por PIDs analógicos. Sua característica diferencial é a utilização de sensores e atuadores que replicam uma ambiência industrial e permitem não só o contato com equipamentos e componentes utilizados rotineiramente na indústria, com seus problemas e não linearidades, mas também seu ajuste e calibração. Os mais importantes são: transmissor inteligente de pressão diferencial capacitivo, configuração via programador, protocolos de comunicação Profibus – PA ou 4 a 20 mA a 2 fios, linear, indicador digital local; sensor de temperatura tipo PT-100, a 3 fios para o tanque e o reservatório; transmissor inteligente de

temperatura, sinal de saída 4 a 20 ma, ligação à 2 fios, indicador digital, protocolo de comunicação HART; transmissor inteligente de pressão manométrica capacitivo, configuração via programador, comunicação Profibus – PA ou 4 a 20 mA 2 fios, linear, indicador digital local.



Figura 1. Vista da planta de controle real

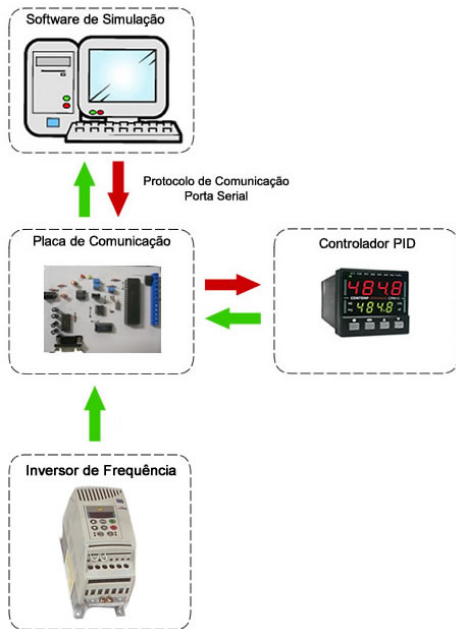


Figura 2. Arquitetura do Sistema HIL

Buscando reproduzir esta realidade, a arquitetura do sistema HIL proposta é constituída por 3 sistemas dependentes, interligados (Figura 2). O primeiro sistema é o ambiente computacional digital tridimensional, que reproduz a dinâmica entre os dois tanques, com foco inicial no controle de nível. O segundo componente é a interface computacional entre o computador e o terceiro componente do sistema, um controlador PID analógico, industrial, da CONTEMP[®], bem como um inversor WEG[®] através dos quais o usuário interage

com o sistema industrial modelado no computador; a interface de comunicação opera via porta serial.

III. DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

A. Modelagem Matemática e Interface

Foi utilizada uma modelagem matemática rigorosa, com base nas equações de escoamento dos fluidos, para descrição da dinâmica do tanque, através das equações de continuidade de Bernoulli:

$$v_1 S_1 = v_2 S_2 \quad (1)$$

$$\rho g h + \frac{1}{2} \rho v_1^2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 \quad (2)$$

onde, v_1 e v_2 representam a velocidade de um ponto no fluido na parte superior e da válvula inferior respectivamente, S_1 e S_2 , as áreas superiores e da válvula, ρ a viscosidade do liquido, no caso a água, g a força da gravidade e h a altura do nível da água em relação à cavidade inferior da válvula:

$$v_1 = S_2 \sqrt{\frac{2gh}{S_2^2 - S_1^2}} \quad (3)$$

S_2 é determinada pelo PID, que atua no fechamento/ abertura da válvula pneumática. A modelagem da válvula pneumática baseou-se nas equações 4 e 5 [15]:

$$\frac{C_v}{C_{v \max}} = \frac{m}{100} \quad (4)$$

$$\frac{f}{f_{\max}} = \frac{\frac{m}{100}}{\sqrt{(1-\beta)(\frac{m}{100})^2 + \beta}} \quad (5)$$

A expressão reproduz a vazão de uma válvula cuja característica inerente – “*inherent characteristic*” é linear. O coeficiente C_v , na equação 4, varia com a posição da válvula, de um mínimo a um máximo, $C_{v \max}$, situação esta da válvula totalmente aberta; m representa, percentualmente, o nível de abertura. Na equação 5, f representa a vazão que circula pela válvula e f_{\max} , a vazão máxima com a válvula completamente aberta. O coeficiente β expressa a relação entre a máxima e a mínima queda de pressão na válvula, o que determina suas características operacionais – “*installed characteristics*” [15].

O desenvolvimento da interface tridimensional utilizou o Blender [16] outro aplicativo FOSS. Sua utilização permitiu o desenvolvimento do ambiente tridimensional (Figura 3) que reproduz os dois tanques interligados, uma válvula que regula a entrada da vazão para o tanque superior, a bomba hidráulica, acionada pelo inversor da WEG[®] e a válvula eletro-pneumática de controle de nível, acionada pelo PID externo da CONTEMP[®]. O

ambiente também disponibiliza a variável de controle, no caso a ação do controlador PID, e a dinâmica da variável controlada, no caso o nível do tanque superior, e a vazão da bomba, acionada pelo inversor. A interface computacional tridimensional disponibiliza não somente a dinâmica do processo com as constantes de tempo iguais às da Planta real, mas opera também com características sonoras, reproduzindo os ruídos associados à bomba, vazão do líquido e o ruído da válvula pneumática. O usuário, portanto, possui uma sensação visual e auditiva do processo, que reproduzem as condições operacionais de uma planta física real. São disponibilizados, pela interface gráfica, o aumento e a diminuição do nível do tanque, a queda da água, a abertura e o fechamento das válvulas, que são executadas por procedimentos distintos: a manual que controla a vazão na tubulação superior para enchimento do tanque, através de um potenciômetro externo, a válvula pneumática pela ação do PID CONTEMP[®]; a vazão pode ser controlada, manualmente, pelo inversor WEG[®]. A interface, mostrada na Figura 3, pode ser comparada com a malha de controle de nível da Figura 1, na planta real.

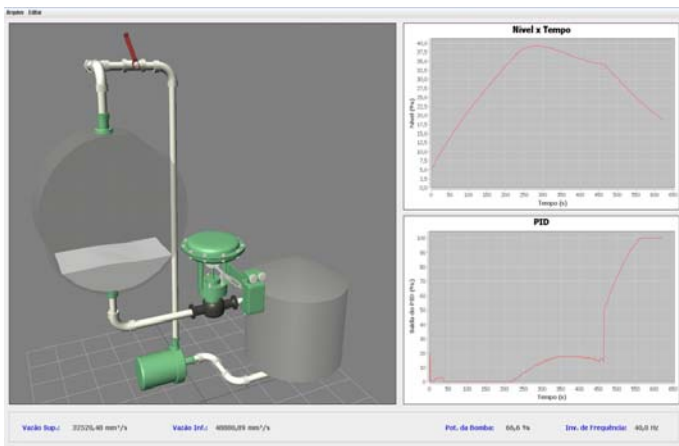


Figura 3. Interface Gráfica da Planta Modelada

B. Interface de Comunicação

A primeira etapa foi o desenvolvimento de uma interface de comunicação entre o computador e o PID CONTEMP, para que este pudesse exercer o controle da malha, bem como com o inversor WEG[®]. Os diagramas de circuito da placa são mostrados nas Figuras 4, 5 e 6. Pode-se observar que a placa de comunicação entre o PID e o PC foi separada em módulos, com funções distintas.

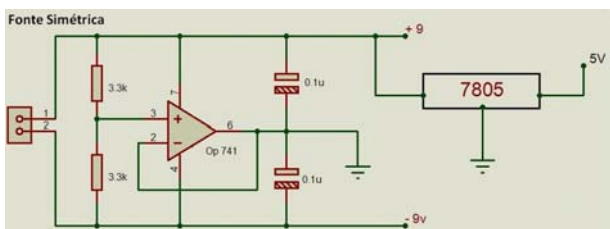


Figura 4. Esquema de Ligação: Fonte Simétrica

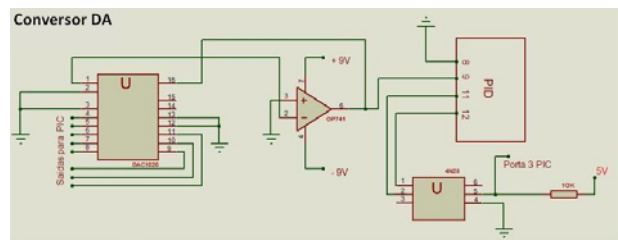


Figura 5: Ligação: Conversor DA e Ligação PID

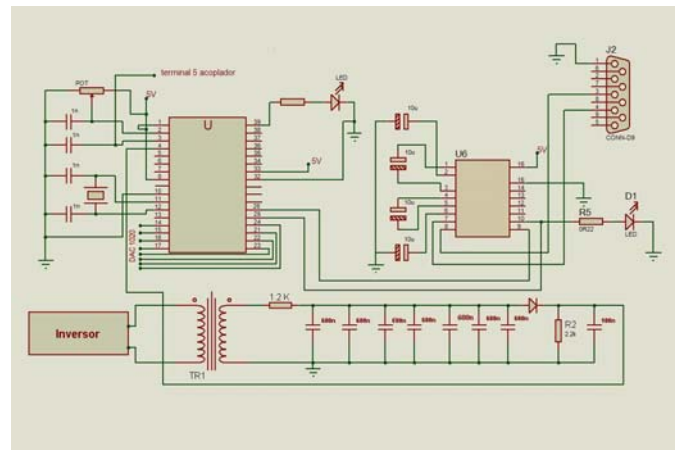


Figura 6. Ligação do Inversor

Neste segundo módulo ocorre a conversão digital/analógico/digital; a parte de conversão A/D é feita pelo próprio PIC, tendo apenas que utilizar o CI MAX232 para possibilitar a comunicação serial do PIC com o computador. A placa de comunicação foi desenvolvida de forma a poder trabalhar com qualquer controlador P + I + D com configuração de entrada – saída dentro dos padrões industriais, em termos de tensão e ou corrente, bem como com o inversor, conforme mostrado na Figura 7.



Figura 7. CONTEMP[®] - CPM-45 e Inversor WEG CFW09

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Serão apresentados, nesta seção, resultados obtidos em simulações executadas no sistema HIL, com algumas situações de controle, dentre diversas outras possíveis. Para

melhor visualização dos resultados serão apresentados somente os gráficos, sem a figura tridimensional.

A cada 100ms um evento é disparado e o computador executa um trecho de código que começa com a leitura de dados através da porta serial. Tais dados, provenientes da placa de aquisição, são referentes ao potenciômetro, que representa a válvula manual, que insere perturbações no sistema, e a resposta de controle enviada pelo PID. É importante frisar que essa discretização do tempo (100 ms) quando comparada com as constantes de tempo do sistema gera a ilusão de perfeita continuidade. O pseudocódigo simplificado pode ser analisado abaixo:

```

Enquanto (verdadeiro) {
  dadoPotenciometro = lerDadoPotenciometro(); //Válvula
  manual
  dadoPID = lerDadoPID();
  fluxo = calculaFluxo(dadoPotenciometro, dadoPID);
  nível = calculaNivel(fluxo);
  atualizaUniversoVirtual(nível);
  enviaDadoPID(nível); //Envia o valor do nível para a placa
  que transfere para o PID
  aguarda (100); //Aguarda 100ms antes de executar o novo
  ciclo
}

```

O primeiro exemplo foi obtido configurando-se o PID para utilizar seu modo de auto-sintonia, ou seja, buscar automaticamente os parâmetros ótimos para sua operação. Efetuou-se então uma perturbação em degrau na referência do nível, alterada para 40% e o resultado é mostrado na Figura 8, onde constam a ação do controle e a variável controlada:

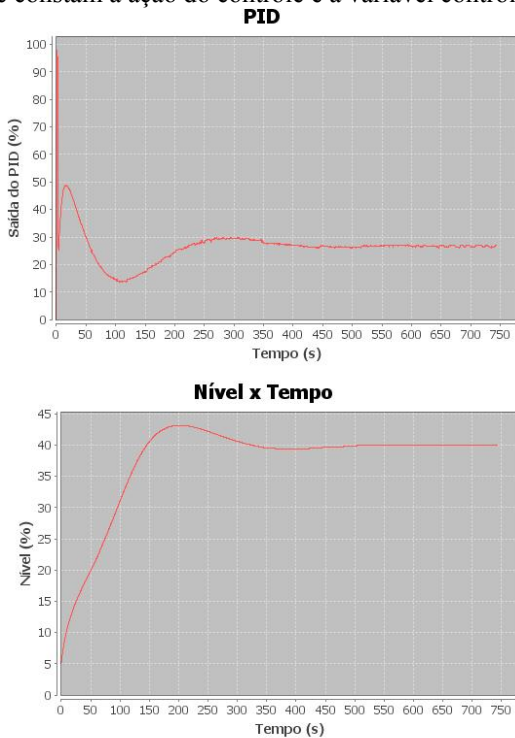


Figura 8. Resposta do PID para auto-sintonia

Um segundo teste mostra a rejeição de carga ocasionada por abertura adicional da válvula superior, efetuada a partir do potenciômetro externo (Figura 9). É possível verificar a capacidade de rejeição de carga do PID; esta perturbação foi um aumento da vazão, no intervalo de tempo entre 200 e 300s, quando o sistema estava estabilizado em 40% do nível.

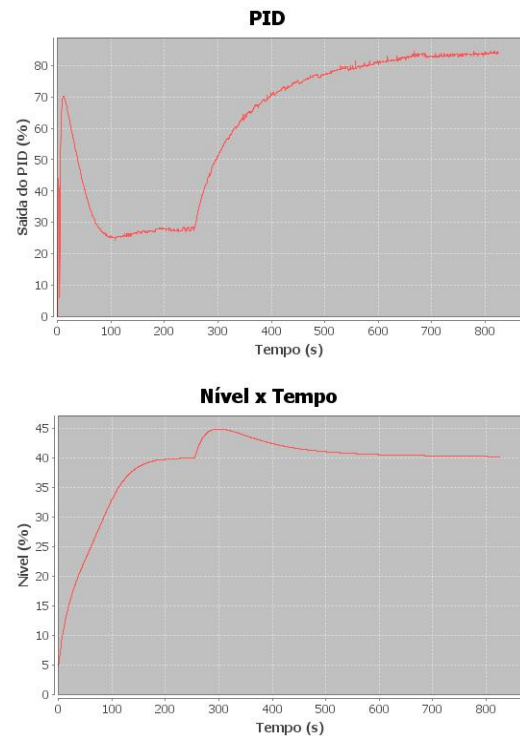


Figura 9. Resposta para uma perturbação de carga

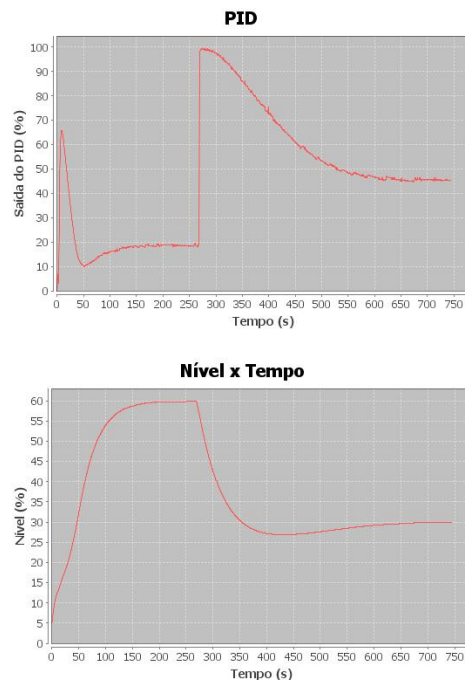


Figura 10. Resposta para mudança de referência

Um terceiro exemplo mostra o comportamento servo do controle, com a referência do sistema, no caso o nível, sendo alterado de 60% para 30%. É possível observar-se claramente a ação do PID no início do processo e na mudança de referência entre 250 e 300 s (Figura 10). Pode-se observar, pelas repostas, sua semelhança com a planta real, inclusive com constantes de tempo de mesma ordem de grandeza.

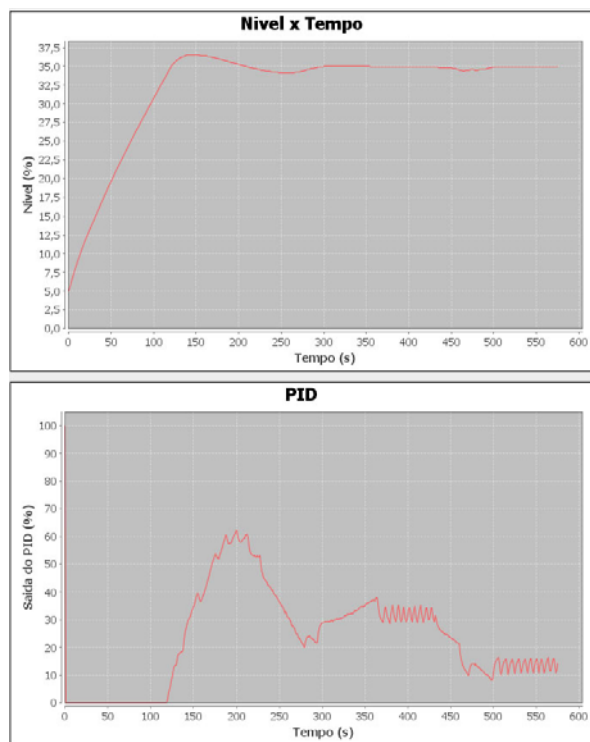


Figura 11. Resposta para mudança de referência - 2

A figura 11 mostra outro resultado de mudança de referência, porém com o PID sintonizado manualmente: $P = 50$, $I = 40$ e $D = 1$, com uma alteração da referência de 5% para 25% do volume do tanque. O comportamento mais oscilatório do PID, sem a sintonia automática, fica evidente.

V. CONCLUSÕES

O trabalho proposto, que utiliza a técnica HILs para modelagem de uma Planta Industrial, realizada integralmente em FOSS, permite vislumbrar as enormes potencialidades da técnica “Hardware in the Loop Simulation” como poderosa ferramenta de treinamento, apresentando potencialidades não só para finalidades educacionais mas também para a área industrial para utilização por operadores. Se, por um lado, permite reproduzir um sistema físico real com suas complexidades e não-linearidades, sem a necessidade dos investimentos para se possuir este sistema físico real, permite, por outro lados, que os operadores e usuários se defrontem com as dificuldades e especificidades de compreensão, utilização e sintonia dos controladores.

Característica de destaque no trabalho realizado é o fato de ter sido desenvolvido totalmente em FOSS, no caso a linguagem Java, associado ao Blender, que possibilitou um projeto totalmente tridimensional do sistema físico, no caso a Planta de Processos Industriais da UFJF. Esta característica possibilita que o trabalho possa ter continuidade com a realização da modelagem de mais malhas de controle existentes na planta, haja vista que permite trabalhos e desenvolvimentos com as quatro variáveis básicas de controle de processos – temperatura, pressão, vazão e nível.

Estas características do trabalho são totalmente complementares possibilitando otimização das atividades laboratoriais na área de controle de processos. Assim, podem ser disponibilizadas diversas estações de simulação anteriormente à ida ao laboratório ou à Planta Real, onde os usuários realizam as atividades de conhecimento da operação, sintonia e otimização dos procedimentos. A seguir, tentam reproduzir estes procedimentos na prática utilizando a Planta real. Desta forma, haverá mais disponibilidade, melhor interatividade e aproveitamento do processo educacional.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Programa de Educação Tutorial do SESu – MEC pelo suporte oferecido ao desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] Disponível em <http://controlguru.com.br>. Acessado em 12/06/2010.
- [2] Aström, K. J and T. Hägglund, “Advanced PID Control”, ISA – Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, NC, 2006.
- [3] Aström, K. J and T. Hägglund, “PID Controllers: Theory, Design and Tuning”, ISA – Instrumentation, Systems and Automation Society, Research Triangle Park, NC, 1995.
- [4] Visioli, Antonio. “Practical PID Control”, Springer – Verlag, London Limited, London, 2006.
- [5] Normey-Rico, J. E. and E. F. Camacho, “Control of Dead-time Processes”, Springer – Verlag, London Limited, London, 2007.
- [6] Feisel, L. D. and A. J. Rosa, “The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education”, *Journal of Engineering Education*, January, p. 121-130, 2005
- [7] Peterson, G. D, Feisel, L. D., “A Colloquy on Learning Objectives For Engineering Education Laboratories”, Proc.American Society for Engineering Education, Annual Conference&Exposition, 2002
- [8] Borges, E.L.; Borges, M.A.F. & Baranauskas, M.C.C. (1995). "Da simulação à Criação de Modelos — Um Contexto para a Aprendizagem na Empresa." Proceedings of the VI SBIE — Simpósio Brasileiro de Informática na Educação, Florianópolis, SC, Brasil.
- [9] Gu, F.; Harrison, W. S.; Tilbury, D. M. & Yuan. Hardware-In-The-Loop for Manufacturing Automation Control: Corrent Status and Identified Needs.2007
- [10] King, P. J. & Copp D. G. Hardware In The Loop For Automotive Vehicle Control Systems Development. UKACC Control 2004 Mini Sumpsoia (2004/11105), Bath, UK, pp. 75-78, 2004
- [11] National Instruments, Using LabVIEW for Rapid Control Prototyping and Hardware-in-the-Loop Simulation. 2006. Disponível em www.ni.com. Acessado em 12/06/2010.
- [12] Nova Didacta, Sistemas Didáticos de Medição, Catálogo Técnico, São Paulo, 2009.
- [13] Disponível em <http://opensource.org/history>. Acessado em 12/06/2010
- [14] Gomes, F. J. & Pinto, D. P. (2008). Laboratórios Integrados para Controle de Processos e Análise da Eficiência Energética de Sistemas Industriais.
- [15] Wade, H. L. Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application. ISA Publications, Research Triangle Park, NC(2004).
- [16] Disponível em <http://www.blender.org>. Acessado em 12/06/2010