



## **AMPLIANDO O ESPAÇO LABORATORIAL: EDUCAÇÃO EM CONTROLE ATRAVÉS DE AMBIENTE HILS BASEADO EM FOSS**

**Flávio P. Queiroz** – flavio.queiroz@engenharia.ufjf.br  
Universidade Federal de Juiz de Fora, Engenharia Elétrica  
Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Campus Universitário  
36036-900 – Juiz de Fora - MG

**Vinicius A. Gama** – vngama@gmail.com  
Universidade Federal de Juiz de Fora, Engenharia Elétrica  
Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Campus Universitário  
36036-900 – Juiz de Fora - MG

**Francisco José Gomes** – chico.gomes@ufjf.edu.br  
Universidade Federal de Juiz de Fora, Engenharia Elétrica  
Rua José Lourenço Kelmer, s/n – Campus Universitário  
36036-900 – Juiz de Fora - MG

**Antonio Augusto Rodrigues Coelho** – aarc@das.ufsc.br  
Universidade Federal de Santa Catarina, CTC, Engenharia de Controle e Automação  
Campus Universitário  
36036-900 – Florianópolis - SC

**Resumo:** O trabalho apresenta um ambiente de simulação, totalmente baseado nas técnicas de ‘Hardware in the Loop Simulation – HILS’, desenvolvido para utilização como uma ferramenta para educação em engenharia de controle, podendo ser utilizado para simulações do “chão de fábrica” e com potencialidade para operar como nível supervisor, para análise de procedimentos de segurança e técnicas de otimização. O ambiente, baseado na linguagem Java e no compilador Eclipse, ferramentas FOSS, não tem restrições para sua utilização. O ambiente digital simula uma planta industrial, mas opera com controladores externos, físicos, mais especificamente um controlador PID e um inversor WEG. Foi projetado um sistema de interface baseado no PIC 16F877A para conexão do “hardware” ao ambiente digital. O sistema reproduz uma planta real, pertencente ao Laboratório de Processos Industriais da Faculdade de Engenharia da UFJF. Incorporando as não-linearidades e complexidades da planta real, e operando com as mesmas constantes de tempo, o HILS, baseado em FOSS, permite maior disseminação das práticas laboratoriais para educação em controle, otimização e supervisão de processos.

**Palavras-chave:** FOSS, Educação em Laboratório, Controle de Processos, HILS, Ambientes Didáticos



## 1 INTRODUÇÃO

As malhas de um processo industrial, adequadamente controladas, garantem vantagens comparativas como aumentos da estabilidade e margem de ganho, redução do consumo energético, resposta e estabilização mais rápidas, maximização das taxas de produção e minimização de impactos ambientais. Na realidade atual da indústria, 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” (COOPER, 2010). Considerando-se as análises conceituais, teóricas e o grande número de referências encontradas na literatura sobre a referida estratégia de controle (ASTRÖM,1995,2006;VISIOLI,2006;NORMEY-RICO,2007) evidencia-se, em algumas situações, descompassos entre a potencialidade desta estratégia, o conhecimento teórico acumulado sobre ela e sua utilização prática, pelo menos para alguns operadores. Uma das razões deste descompasso 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 sua sintonia.

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 têm constituído um dos fundamentos da educação na área de controle. Pode-se mesmo afirmar que, anteriormente à ênfase na componente científica, a maior parte da formação do engenheiro ocorre nos laboratórios (FEISEL,2005). A razão é óbvia: a atividade laboratorial, dentro do processo educacional, segundo Peterson, (PETERSON,2002) 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, esbarram em problemas que variam desde visões conceituais distorcidas 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.

Em resposta à esta situação, e 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 sistemas



físicos reais, mas efetuando sua interação com o 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 (BORGES,1995).

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 dos envolvidos. 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 (Gu,2007). 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<sup>®</sup>, utilizadas em diferentes etapas do desenvolvimento da arquitetura de seus veículos e unidades elétricas de controle (KING 2004).

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 U\$ 20.000,00. Outro exemplo: simuladores educacionais, como o “ITS PLC Professional Edition<sup>®</sup>”, da Nova Didacta, possui custos na faixa de R\$ 6.800,00 por estação de simulação, sem o hardware (NOVA DIDACTA,2009).

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 (FOSS, 2010) 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

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<sup>®</sup>, 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<sup>®</sup>, uma IDE de código aberto.

O trabalho está estruturado como segue: a seção 02 descreve a metodologia e 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.

## 2 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 (GOMES,2008) : 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, com Supervisório, interativo com um CLP, que executa os algoritmos de controle; adicionalmente existem malhas individuais operadas por PIDs analógicos. Sua característica diferencial é a utilização de sensores e atuadores que replicam uma ambiência industrial com seus problemas e não linearidades, mas também permitindo seu ajuste e calibração.

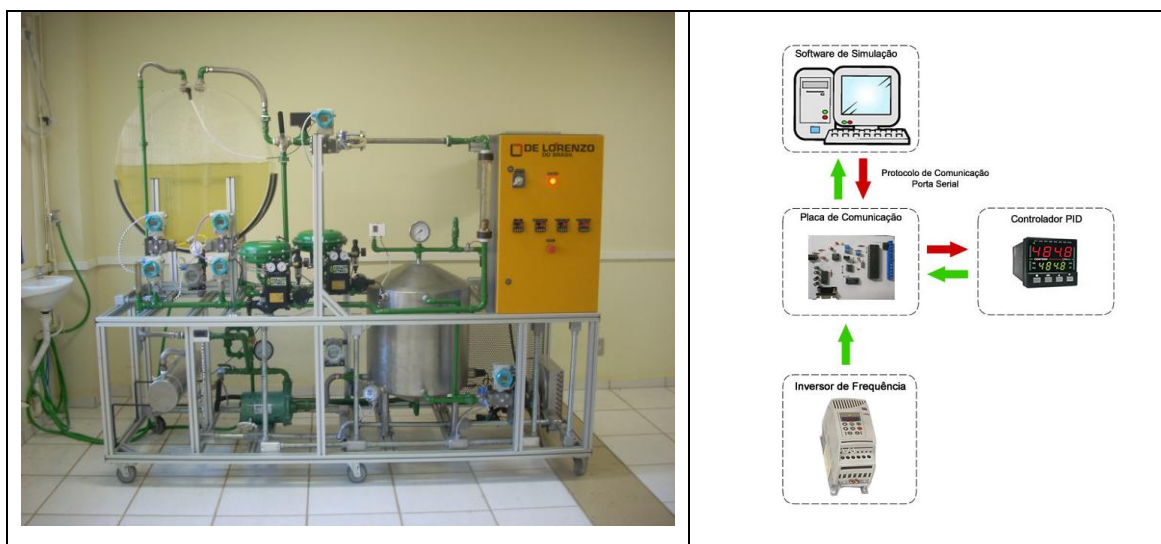


Figura 1. Vista da planta de controle real e estrutura do HILS

Buscando reproduzir esta realidade, a arquitetura do sistema HIL proposta é constituída por 3 sistemas dependentes, interligados (Figura 1): um ambiente computacional digital tridimensional, que reproduz a dinâmica entre os dois tanques,



uma interface computacional entre o computador e o terceiro componente do sistema, um controlador PID analógico, industrial, da CONTEMP<sup>®</sup>, bem como um inversor WEG<sup>®</sup> através dos quais o aluno interage com o sistema industrial modelado no computador; a interface de comunicação opera via porta serial .

### 3 DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

#### 3.1 Modelagem Matemática e Interface

Foram utilizadas as 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 velocidades nos pontos superior e inferior do líquido,  $S_1$  e  $S_2$ , as áreas superior e inferior da válvula,  $\rho$  a viscosidade do líquido,  $g$  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 (WADE, 2004):

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

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

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  $\beta$  relaciona a máxima e a mínima queda de pressão na válvula, ou seja, suas características operacionais – “*installed characteristics*” (WADE, 2004).

O desenvolvimento da interface tridimensional utilizou o Blender (BLENDER,2010) 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<sup>®</sup> e a válvula eletro-pneumática de controle de nível, acionada pelo PID externo da CONTEMP<sup>®</sup>. 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<sup>®</sup>; a vazão pode ser controlada, manualmente, pelo inversor WEG<sup>®</sup>. A interface, mostrada na Figura 3, pode ser comparada com a malha de controle de nível da Figura 1, na planta real.

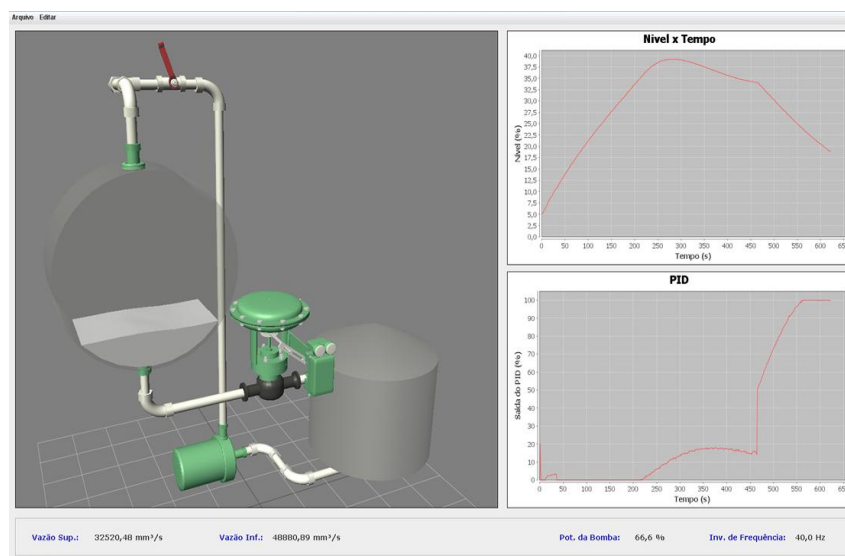


Figura 2. Interface Gráfica da Planta Modelada

### 3.2 Interface de Comunicação

Desenvolveu-se, inicialmente, uma interface de comunicação entre o computador e o PID CONTEMP, para exercer o controle da malha, bem como com o inversor WEG<sup>®</sup>. Os diagramas de circuito da placa são mostrados nas Figuras 3 (a), (b) e 4 (a), (b). Pode-se observar que a placa de comunicação entre o PID e o PC foi separada em módulos, com funções distintas. Neste 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.

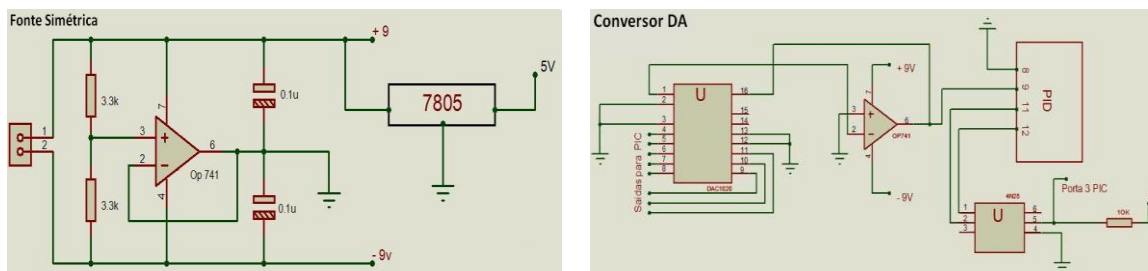


Figura 3. (a) Esquema de Ligação: Fonte Simétrica (b) Conversor e PID

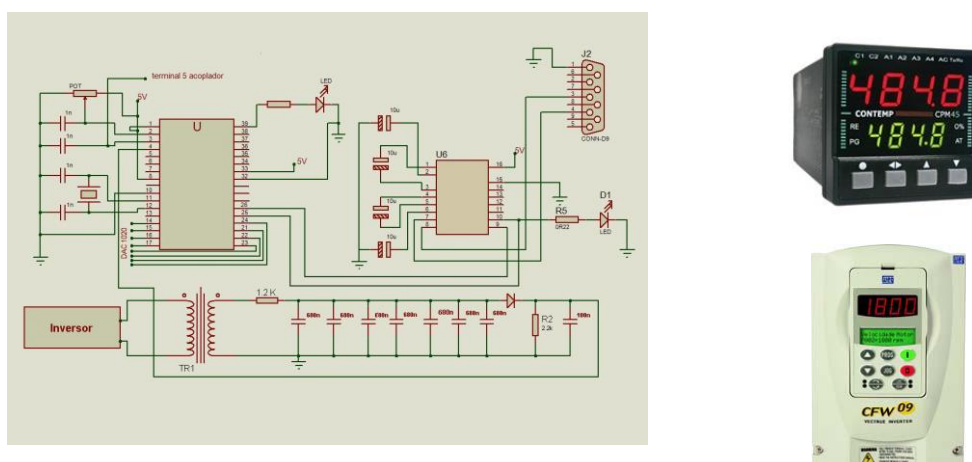


Figura 4. (a) Ligação do Inversor (b) CONTEMP<sup>®</sup> - CPM-45 e Inversor WEG CFW09

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 tensão e ou corrente, bem como com o inversor, conforme Figura 4 (a).

#### 4 RESULTADOS OBTIDOS

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 mostra o PID no modo de auto-sintonia; efetuou-se uma perturbação em degrau na referência do nível, alterada para 40% e o resultado é mostrado na Figura 5, onde constam a ação do controle e a variável controlada:

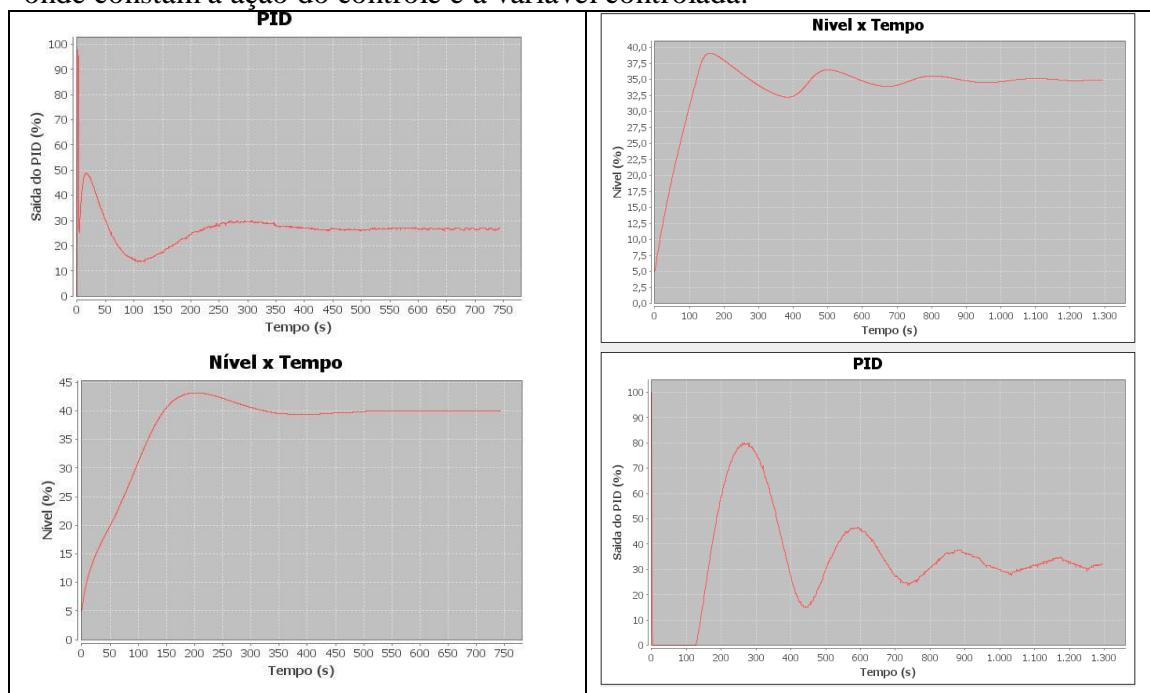


Figura 5. Resposta do PID para auto-sintonia (esquerda) e ajuste manual do PID

Um segundo teste mostra resultados adicionais para rejeição de carga por abertura da válvula superior, efetuada a partir do potenciômetro externo (Figura 6). Verifica-se a capacidade de rejeição de carga do PID; a perturbação foi um aumento da vazão, entre 200 e 300s, quando o sistema estava estabilizado em 40% do nível. 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 6b).

## 5 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 educação e treinamento. 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, 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, 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.

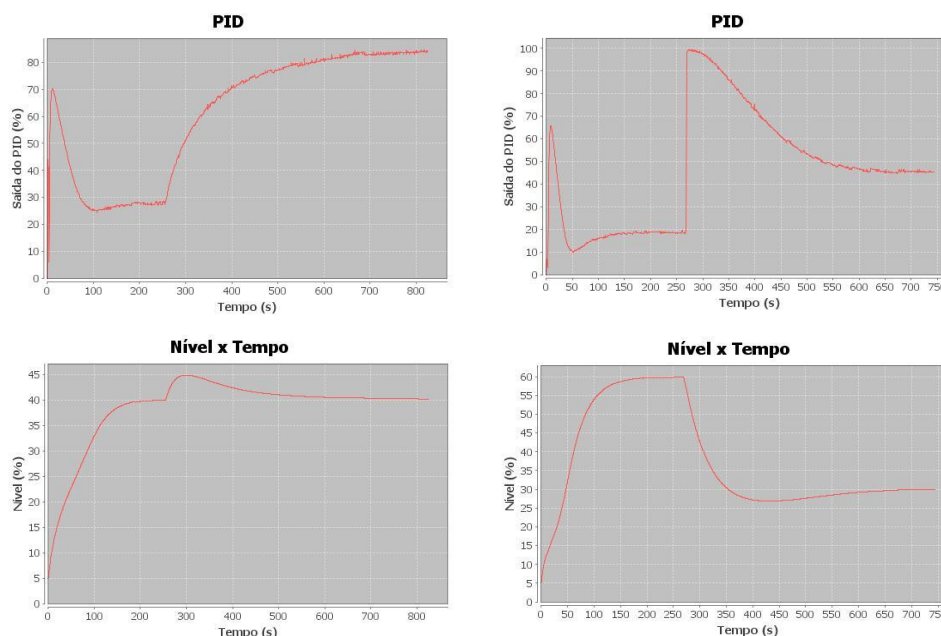


Figura 6. (a) Perturbação de carga (b) Mudança de referência

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

Ao Programa de Educação Tutorial do SESu – MEC pelo suporte oferecido.

#### REFERÊNCIAS

- ASTRÖM, K. J & T. HÄGGLUND, “ Advanced PID Control”, ISA – Instrumentation, Systems and Automation Society, RTP, NC, 2006.
- ASTRÖM, K. J & T. HÄGGLUND, “ PID Controllers: Theory, Design and Tuning”, ISA – Instrumentation, Systems and Automation Society, RTP, NC, 1995.
- Blender. Disponível em <http://www.blender.org>. Acessado em 12/06/2010
- BORGES, E.L, M.A.F. & BARANAUSKAS, M.C.C. (1995). "Da simulação à Criação de Modelos -Contexto para a Aprendizagem na Empresa." Proceedings of the VI SBIE — Simpósio Brasileiro de Informática na Educação, Florianópolis, SC, Brasil.
- COOPER, D. J. **Practical Process Control**. Disponível em <http://controlguru.com.br>. Acessado em 12/06/2010.



- FEISEL, L. D. & A. J. ROSA, “ *The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education*”, **Journal of Engineering Education**, January, p. 121-130, 2005
- FOSS. Disponível em <http://opensource.org/history>. Acessado em 12/06/2010
- GU, F.; HARRISON, W. S.; TILBURY, D. M. & YUAN. **Hardware-In-The-Loop for Manufacturing Automation Control: Corrent Status and Identified Needs**. 2007
- GOMES, F. J. & PINTO, D. P. Laboratórios Integrados para Controle de Processos e Análise da Eficiência Energética de Sistemas Industriais, COBENGE, 2008
- KING, P. J. & COPP D. G. Hardware In The Loop For Automotive Vehicle Control Systems Development. **UKACC Control 2004**, Bath, UK, pp. 75-78, 2004
- NORMEY-RICO, J. E. & E. F. CAMACHO, **Control of Dead-time Processes**, Springer – Verlag, London Limited, London, 2007.
- Nova Didacta, **Sistemas Didáticos de Medição**, Catálogo Técnico, São Paulo, 2009
- 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
- VISIOLI, A. **Practical PID Control**, Springer – Verlag, London Limited, London, 2006.
- WADE, H. L. **Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application**. ISA Publications, Research Triangle Park, NC(2004).

## **WIDENING THE LABORATORY SPACE: CONTROL EDUCATION THROUGH HILS FOSS BASED**

**Abstract:** *The work demonstrates a simulation environment, based on Hardware-in-the-Loop (HIL) technique, designed for utilization as an education training tool and with potentiality, at a supervisory level simulation, 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 simulation and training control techniques, optimization and safety analysis of the industrial plant.*

**Key-words:** *FOSS, Laboratory Education, Process Control, HILS, Didactic Environment*