



## PRÁTICAS DE APRENDIZAGEM PARA SISTEMAS DE CONTROLE DE PROCESSOS: IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS UTILIZANDO UMA PLANTA DIDÁTICA INDUSTRIAL

**Lyvia Regina Biagi Silva**<sup>1</sup> – lybiagi@hotmail.com  
**Wagner Endo**<sup>1</sup> – wendo@utfpr.edu.br  
**Paulo Rogério Scalassara**<sup>1</sup> – prscalassara@utfpr.edu.br  
**Bruno Augusto Angélico**<sup>1</sup> – bangelico@utfpr.edu.br

<sup>1</sup> Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Avenida Alberto Carazzai, 1640.  
CEP 86300-000 – Cornélio Procópio – Paraná

**Resumo:** Neste trabalho, apresentam-se aplicações de instrumentação e controle de processos utilizando como objeto de aprendizagem uma Planta Didática Industrial. A planta possibilita o desenvolvimento de estratégias de controle através da operação de um sistema automatizado. Este sistema é baseado em um CLP e uma rede industrial Profibus-PA. A principal característica das práticas de aprendizagem desenvolvidas é a utilização da mesma instrumentação destinada a aplicações industriais em larga escala. Esta abordagem coloca uma vantagem em relação a processos industriais simulados, pois, proporciona ao estudante de engenharia o contato, ainda na graduação, com tecnologias presentes em indústrias. Desta forma, é apresentada uma metodologia de identificação, modelagem e ajuste dos controladores do sistema, a qual é implementada pelos estudantes na Planta Didática Industrial.

**Palavras-chave:** Planta Didática Industrial, Práticas de Aprendizagem, Instrumentação, Controle de Processos, Identificação.

### 1. INTRODUÇÃO

Com o aparecimento de novos equipamentos industriais, é de vital importância que o estudante de graduação tenha contato com essa instrumentação e aprenda a realizar ensaios de laboratórios; isto lhe conferirá maior versatilidade, o que será de grande valia na sua vida profissional (BAZZO e PEREIRA (2000) *apud* SILVA *et al.* (2011)).

Segundo Bernstein (1998, *apud* Coelho *et al.*, 2001) A educação em engenharia prática deve ser realizada com equipamentos técnicos e computadores. Somente experimentos por simulação não são suficientes. Os exercícios práticos devem estar organizados e sincronizados com as aulas e exercícios teóricos.

Realização:



Organização:





Diante de tais fatos, a utilização de recursos didáticos complementares mostra-se essencial para a consolidação do conhecimento. A Planta Didática Industrial é uma planta de controle de processos industriais que tem como objetivo demonstrar didaticamente a operação de suas diversas malhas de controle usando dos mesmos equipamentos e ferramentas de automação industrial (SILVA *et al*, 2011).

Este trabalho tem como objetivo propor uma metodologia para a formação de engenheiros capacitados na área de controle de processos. Para isso, utiliza-se como Objeto de Aprendizagem em Engenharia (OAE) uma Planta Didática Industrial.

Para o desenvolvimento do trabalho, propõe-se um procedimento de identificação das características do sistema de controle estudado. As topologias de controle desenvolvidas na Planta Didática são: controle por Antecipação, controle por Realimentação e controle em Cascata. Para cada uma dessas topologias utiliza-se um controlador do tipo PID.

Na Fundamentação Teórica, realiza-se uma revisão sobre alguns conceitos utilizados na execução do trabalho e um estudo sobre as topologias de controle da Planta Didática. Na Proposta Metodológica, apresentam-se os modelos de identificação e controle implementados na Planta Didática.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Nesta seção, são revisados alguns conceitos abordados na execução e aplicação das técnicas de aprendizagem abordadas nesse trabalho.

### **2.1. Planta Didática Industrial**

O controle automático tem como objetivo manter as variáveis de processo como temperatura, pressão, vazão ou nível em um ponto de operação desejado (SMITH e CORRIPIO, 1997). De acordo com Wolovich (1994) e Stefani (1994), sistemas automatizados têm um papel importante no controle de processos. Como por exemplo, no controle de velocidade de motores, máquinas, veículos e outros dispositivos que requerem aumento de produtividade.

Segundo Carmo (2006), o controlador PID (Proporcional, Integrativo e Derivativo) é amplamente utilizado na indústria, devido a sua robustez e facilidade de implementação. Este controlador proporciona soluções eficientes para a maioria dos processos relacionados a controle (ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T., 1995) (LI et al, 2006).

Vários métodos de sintonia para controladores PID são baseados no modelo do sistema. Um dos métodos mais clássicos para a obtenção do modelo dinâmico de um sistema é o da resposta ao degrau, que conduz a um modelo de primeira ordem a três parâmetros (Carmo, 2006).

Conforme Coelho e Coelho (2004), no caso de alguns processos industriais, o modelo pode ser obtido a partir do tratamento das medidas (através de aproximações estatísticas, identificação de modelos paramétricos e outros) coletadas a partir de uma realização experimental. Para a identificação de sistemas de controle, supõe-se que estejam disponíveis os sinais de entrada e saída do processo, esta identificação 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 (Aguirre, 2007).

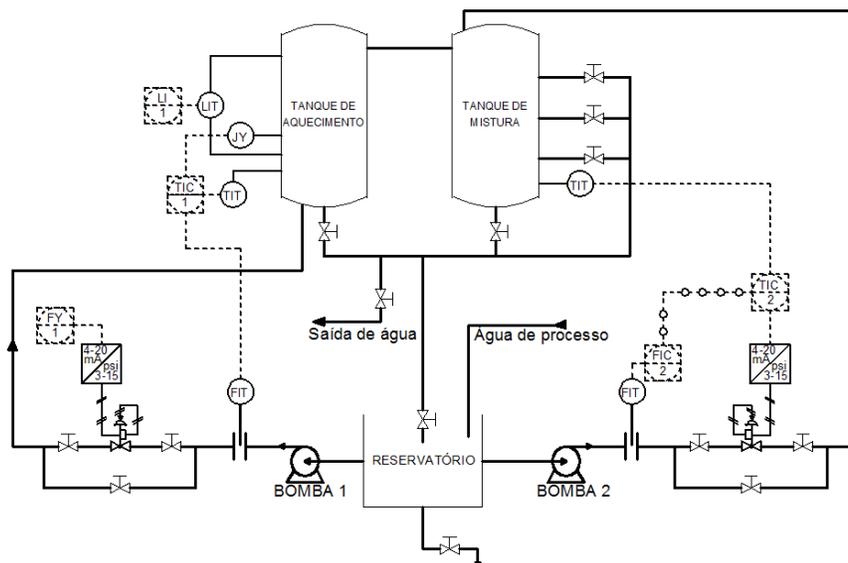
Um exemplo de sistema de controle de processos que possibilita o treinamento e aplicação de conceitos sobre controle de processos é a Planta Didática Industrial.



A Planta Didática utilizada neste trabalho apresenta uma arquitetura baseada em um sistema de controle que utiliza uma rede de comunicação industrial, um Controlador Lógico Programável (CLP) e um controlador Profibus-PA (SILVA, *et al.*, 2011). É uma aplicação de um sistema físico real em escala reduzida. As aplicações, nela desenvolvidas, simulam processos industriais reais. Sua utilização como ferramenta de modelagem de um processo, permite a simulação de algumas topologias de controle. A Planta está localizada no Laboratório de Instrumentação e Controle da UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio. A Figura 1 apresenta a Planta Didática Industrial.



(a)



(b)

Figura 1 – (a) Planta Didática Industrial – Laboratório de Instrumentação e Controle – UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio; (b) Diagrama de tubulação e instrumentação da Planta Didática.



A Planta é composta por dois processos industriais emulados: um sistema de aquecimento e um de mistura de líquidos. Estes processos são controlados e instrumentados por equipamentos de uso industrial baseados no protocolo de comunicação Profibus-PA (SILVA, 2011). As topologias de controle implementadas no CLP Planta Didática são: controle por antecipação, controle por realimentação e controle em cascata, estas utilizam, cada uma, um controlador PID. Na Planta Didática, é possível alterar o tipo de controlador PID entre PID convencional, PI-D (ação derivativa somente na saída) e I-PD (set point aplicado somente no integrador) e também o tipo de algoritmo utilizado. Neste trabalho o controlador aplicado é do tipo PI-D com algoritmo em paralelo.

## 2.2. Controle por Antecipação

Na Planta Didática, o controle por antecipação é realizado no tanque de aquecimento e tem com objetivo manter a temperatura desse tanque em um valor fixo. O elemento final de controle é um conversor de potência, ele é responsável por enviar energia para o aquecimento das resistências desse tanque. A malha de temperatura é a malha principal, esta recebe um ganho proveniente da vazão de água fria, para acelerar a demanda de potência necessária para manter a temperatura constante. Esta estratégia garante respostas rápidas às variações de vazão na entrada de água no tanque de aquecimento. A Figura 2 mostra o diagrama de blocos dessa topologia de controle.

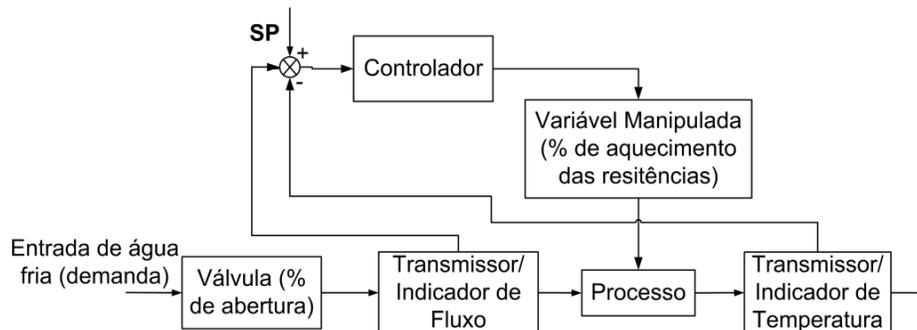


Figura 2 – Diagrama de blocos da topologia de controle por antecipação no tanque de aquecimento.

## 2.3. Controle por Realimentação

Essa estratégia de controle é implementada no tanque de mistura da planta, onde o objetivo é manter a temperatura constante em um determinado valor estabelecido (*set point*) através do controle da vazão de água fria que entra nesse tanque. O controlador atua no erro (diferença entre o valor da saída com o valor de *set point*). O diagrama de blocos desta topologia de controle é mostrado na Figura 3.

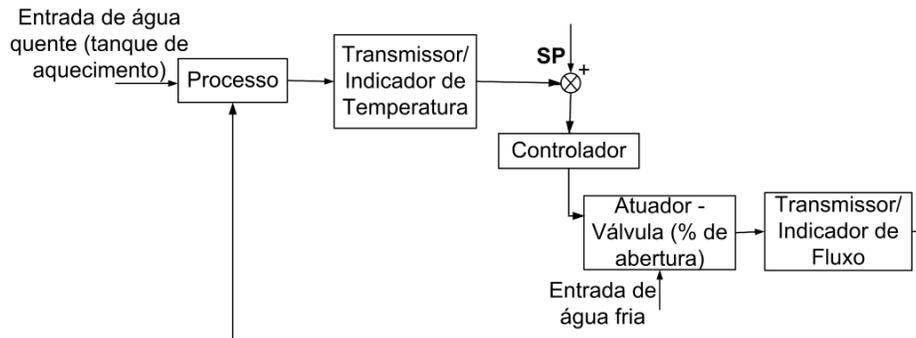


Figura 3 – Diagrama de blocos da topologia de controle por realimentação no tanque de mistura.

## 2.4. Controle em Cascata

O controle em cascata toma uma ação corretiva no sistema antes que a variável de controle primária seja afetada, mas depois que uma perturbação já atingiu o processo. Trata-se de duas variáveis controladas atuando em uma mesma variável manipulada, no qual o *set point* do controlador da malha interna (controlador escravo) é dado pela saída do controlador da malha externa (controlador mestre) (SMITH e CORRIPIO, 1997).

O controle em cascata é implementado no tanque de mistura da planta, e por apresentar uma resposta mais rápida, pode ser visto como uma alternativa para o controle por realimentação no tanque. São duas malhas de controle: malha principal (controle de temperatura) e malha secundária (controle de vazão), conforme pode ser observado no diagrama de blocos da Figura 4.

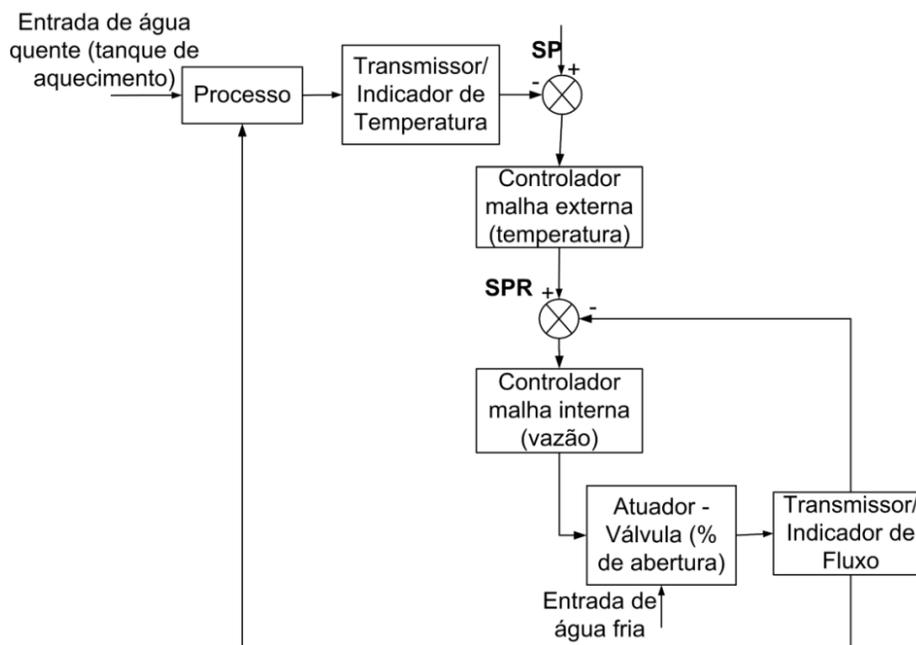


Figura 4 – Diagrama de blocos da topologia de controle em cascata no tanque de mistura.



### **3. PROPOSTA METODOLÓGICA**

Nesta seção apresenta-se uma proposta de metodologia a ser desenvolvida em um curso de graduação em engenharia elétrica nas disciplinas de Controle. A planta é utilizada como um recurso complementar para aplicação do conhecimento teórico adquirido nas disciplinas de Controle.

#### **3.1. A Planta Didática como um Objeto de Aprendizagem**

O uso de objetos educacionais como facilitadores do processo de aprendizagem é muito comum. Entende-se como Objeto de Aprendizagem (OA) ou Objeto Educacional (OE) como qualquer recurso, ou conjunto de recursos agregados, que possa ser facilmente armazenado, referenciado ou localizado (ENDO *et al*, 2011). Neste trabalho, foi denominado o objeto de aprendizagem de engenharia (OAE) como sendo a Planta Didática Industrial.

#### **3.2. Metodologia de Identificação e Modelagem do Sistema**

A proposta tem como objetivos: estudar e analisar as topologias de controle da planta; coletar e analisar dados e características de transferência dos processos da planta; identificar as características de um modelo que represente os processos de aquecimento e mistura da planta; aplicar técnicas de ajuste dos controladores PID a partir dos modelos obtidos.

Inicialmente, as malhas de aquecimento e mistura da planta são abordadas individualmente. Assim, procura-se identificar um modelo que represente, de forma satisfatória, os processos da planta, para que a partir disso seja possível aplicar as estratégias de controle no sistema.

Após apresentado o tema central da proposta (sistemas de controle de processos), buscou-se explorar o conhecimento pré-existente dos alunos. Esses conhecimentos foram resgatados de unidades curriculares já cursadas pelos alunos, entre elas: princípios de controle, sistemas de controle, automação e instrumentação industrial. Foi apresentado o objeto de aprendizagem: a Planta Didática Industrial. A partir daqui, as questões de aprendizagem devem ser claramente mostradas aos alunos, pois é um passo importante para que os estudantes estabeleçam seus objetivos de aprendizagem e tomem consciência dos conceitos que deverão dominar ao final deste processo.

### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

São apresentados alguns resultados do problema proposto, considerando as especificidades do OA utilizado. Realiza-se algumas discussões sobre as práticas realizadas.

#### ***Implementação dos Modelos de Identificação e Controle da Planta Didática***

A proposta prática segue o seguinte roteiro: análise das topologias de controle implementadas na planta, identificação de modelos matemáticos que representem os sistemas implementados, obtenção de parâmetros de sintonia para os controladores PID, simulação a malha fechada com os valores de sintonia obtidos, aplicação desses valores no sistema físico real, e análise dos resultados.



Foram coletados os valores das variáveis das malhas de controle da planta para diversas aplicações e pontos de operação. Para isso, levou-se em consideração os parâmetros de entrada, como condições iniciais de operação e valores de distúrbio adotados.

Para a malha de aquecimento, coletou-se a curva de resposta para o sistema em malha aberta, e a partir dos métodos de identificação propostos em Coelho e Coelho (2004), o estudante é capaz de verificar qual modelo matemático descreve melhor o comportamento do sistema. A Figura 5 ilustra a curva de resposta em malha aberta para o tanque de aquecimento juntamente com as curvas dos modelos identificados para a mesma.

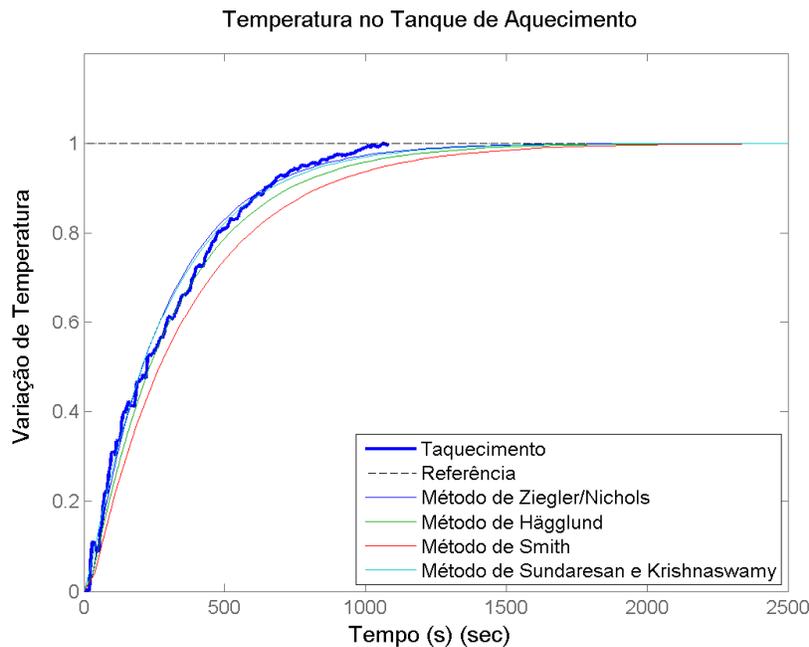


Figura 5 – Modelos Identificados para o Sistema de Aquecimento.

Considerando os três parâmetros da Equação (1) (onde  $K$  é o ganho estático,  $\tau$  a constante de tempo e  $\theta$  o atraso de tempo) da curva de resposta que represente melhor o sistema de aquecimento, e utilizando os métodos de sintonia para controladores PI mostrados em Carmo (2006), é possível obter os parâmetros a ser implementados no sistema a malha fechada.

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

De maneira similar, obtém-se a curva de resposta em malha aberta para o sistema de mistura, identificam-se os modelos referentes ao sistema, e os parâmetros de sintonia para os controladores.

Tendo em mãos o modelo identificado em malha aberta, e os parâmetros dos controladores de PID baseados em diversos métodos, o estudante procede com a simulação a malha fechada. Com base na simulação, verifica-se então qual dos métodos de sintonia apresentou a melhor resposta, e pode-se então utilizar esses parâmetros de sintonia no sistema real, e comparando a resposta obtida na simulação, com a resposta obtida no sistema real. A



Figura 6 mostra o modelo identificado em malha aberta para o sistema de mistura, juntamente com as respostas a malha fechada para cada método de sintonia aplicado.

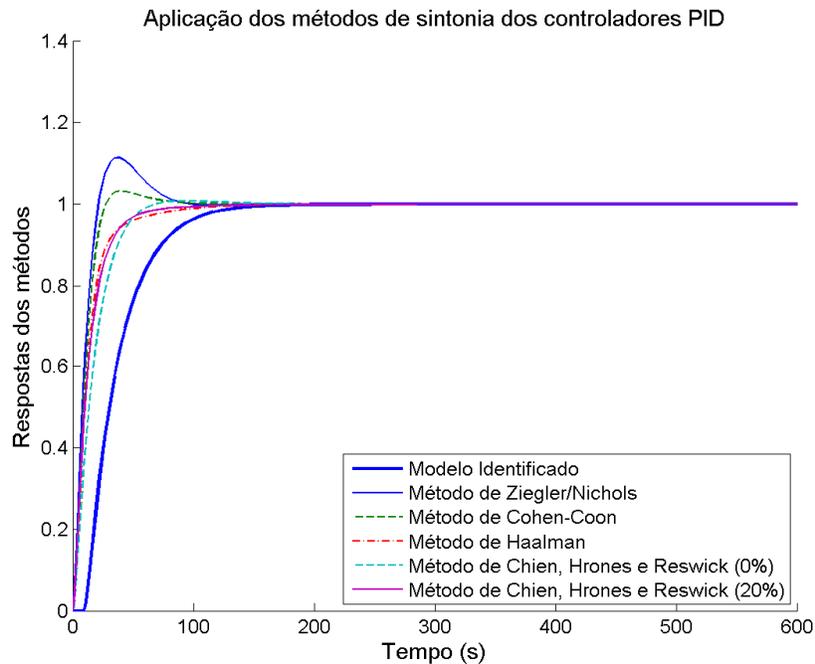


Figura 6 – Modelo identificado a malha aberta para o tanque de mistura e respostas dos métodos de sintonia PID para o sistema a malha fechada.

Os métodos de Chien, Hrones e Reswick (20%) e Haalman apresentam os parâmetros de sintonia mostrados na Tabela 1

Tabela 1 – Parâmetros de sintonia para os controladores baseados nos métodos de Chien, Hrones e Reswick (20%) e Haalman.

Método de Sintonia	Parâmetros de Sintonia		
	Kp	Ti	Td
Chien, Hrones e Reswick (20%)	3,1673	0,7863	0,0783
Haalman	2,2467	0,5617	

A resposta a malha fechada implementada para os métodos da Tabela 1 são mostradas nas Figuras 7 e 8.

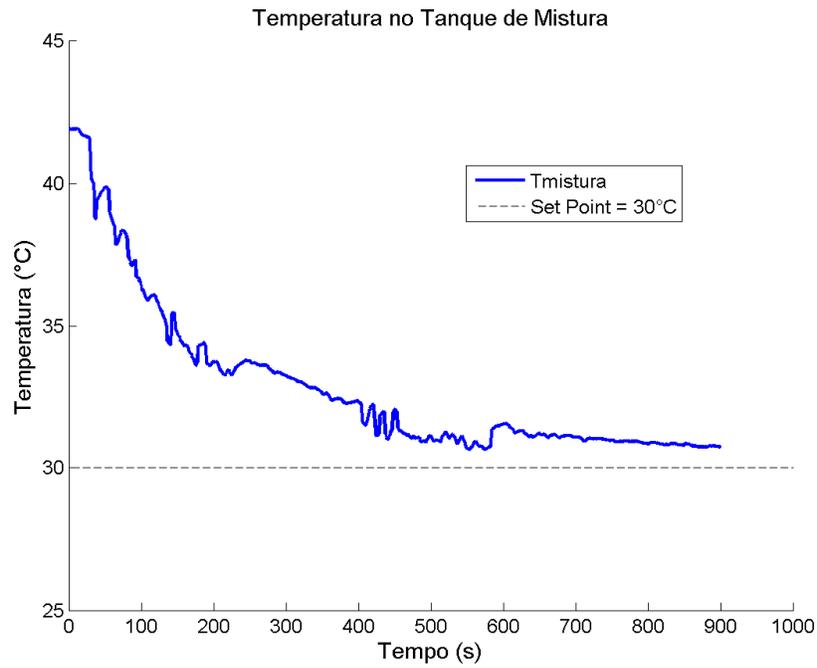


Figura 7 – Temperatura no tanque de mistura para um *set point* de 30°C utilizando o método de sintonia de Chien, Hrones e Reswick (20%).

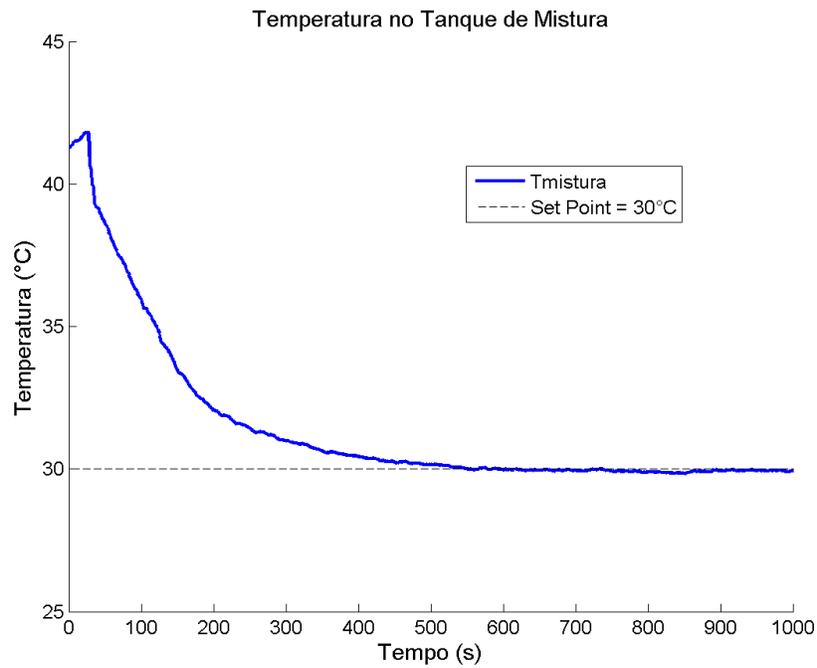


Figura 8 – Temperatura no tanque de mistura para um *set point* de 30°C utilizando o método de sintonia de Haalman.



A análise dos métodos de sintonia aplicados no sistema real permite verificar a diferença entre eles, visto que na simulação (Figura 6), os métodos de Chien, Hrones e Reswick (20%) e Haalman apresentam comportamento similar. O estudante deve analisar o tempo de estabilização para cada um dos métodos, se houve ou não erro estacionário, e determinar qual dos métodos apresentou uma resposta mais satisfatória.

No caso do controle em cascata, por exemplo, como este é uma alternativa para o controle por realimentação no tanque de mistura, o estudante pode verificar o comportamento dos métodos de sintonia aplicados para o controlador por realimentação, e aplicar o método que apresentou a resposta mais satisfatória no tanque de mistura.

Baseado nesse cenário industrial, buscou-se nas experimentações didáticas, a troca de experiência e adequações a cada topologia de controle proposta.

#### ***Aplicando o conhecimento em diferentes cenários***

O mesmo procedimento pode ser aplicado para as outras topologias de controle e pontos de operação da planta. Esses pontos de operação são especificados pelo próprio estudante, que pode variar a vazão de entrada de água fria para o processo de aquecimento, ou modificar a porcentagem de aquecimento das resistências do tanque de aquecimento, ou até mesmo modificar a quantidade de água a ser misturada no processo de mistura. Cada um desses cenários irá resultar uma curva em malha aberta diferente, que implicará em uma função de transferência diferente, que resultará em parâmetros de sintonia para os controladores diferentes para cada situação.

A topologia do controlador e seu algoritmo também podem ser modificados, o que poderá determinar para cada ensaio desenvolvido um melhor tipo ou algoritmo de controlador a ser aplicado, o que fica a cargo do estudante realizar as devidas investigações.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste trabalho foi apresentada uma proposta de práticas de aprendizagem de instrumentação e controle de processos utilizando uma Planta Didática Industrial.

A utilização da Planta Didática como um objeto de aprendizagem em engenharia, permite ao aluno aplicar conhecimentos teóricos obtidos previamente num sistema real. Os procedimentos propostos para a identificação dos processos podem ser aplicados em diversos cenários. Isso permite ao aluno a realização de diversos ensaios muito próximos à realidade da indústria, o que faz com que a utilização da planta seja de grande contribuição nas disciplinas de controle, automação e instrumentação industrial.

#### ***Agradecimentos***

Os autores agradecem à Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Cornélio Procópio pelo apoio dado as este trabalho.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

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

ÅSTRÖM, K.; HÄGGLUND, T. PID controllers: theory, design and tuning. 2. ed. Instrument Society of America, 1995.



BAZZO, Walter Antonio; PEREIRA, Luiz Teixeira do Vale. Introdução à engenharia. 6. ed. Florianópolis: UFSC, 2000. 274 p.

BERNSTEIN, D. S.. Control Experiments and What I Learned From Them: A Personal Journey. **IEEE Control Systems**, 18, 1998, pp. 81-87.

CARMO, M. J. do. CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS – CEFET. Ambiente educacional multifuncional integrado para sintonia e avaliação do desempenho de malhas industriais de controle, 2006. Dissertação (Mestrado).

COELHO, *et al.* Experimentos práticos de controle adaptado na graduação COBENGE - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia. Florianópolis: UFSC, 2001.

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

ENDO, W.; VALLIM, M. B. R.; SCALASSARA, P. R.; BRITO, G.A.. Metodologia e Práticas de Aprendizagem para Sistemas de Gerenciamento de Energia: Aplicações em Laboratórios Didáticos de Graduação em Engenharia. **Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE**. Blumenau-SC: 2011.

LI, Y.; ANG, K.; CHONG, G. Pid control system analysis and design. **IEEE Control Systems Magazine**, IEEE, v.26, n.1, p. 32–41, February 2006.

SILVA, L. R. B. UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ. Estudo aplicado de topologias de controle de processos utilizando uma planta didática industrial, 2011. 115p. Trabalho de Conclusão de Curso, Cornélio Procópio – PR.

SILVA, L. R. B.; ENDO, W.; LISBÔA, A. R. B. S.. Expectativas da Utilização de uma Planta Didática Industrial como Objeto de Aprendizagem em um Curso de Graduação em Engenharia. **Anais: XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia - COBENGE**. Blumenau-SC: 2011.

SMITH, C. A.; CORRIPIO, A. B.. Principles and Practices of Automatic Process Control. Wiley, 1997.

STEFANI, R. T. *et al.*. Design of Feedback Control Systems. Boston: Saunders College Publishing, 1994.

WOLOVICH, W. A.. Automatic control systems: basic analysis and design. Fort Worth: Saunders College Publishing, 1994.



## **LEARNING PRACTICES FOR PROCESS CONTROL SYSTEMS: SYSTEMS IDENTIFICATION BASED ON A DIDACTIC INDUSTRIAL PLANT**

**Abstract:** *Applications for instrumentation and process control using a Didactic Industrial Plant as a learning object are developed. This plant allows the development of control strategies through the operation of an automatic system. The system is based on a PLC and a Profibus-PA industrial network. The main characteristic of the developed learning practices is the use of the same instrumentation designed to large-scale industrial applications. This approach has an advantage over simulated industrial processes because it provides the contact with industrial technologies for the undergraduate engineering student. Hence, we present a methodology for identification, modeling and tuning of the system controllers. That is implemented on the Didactic Industrial Plant by the students.*

**Key-words:** *Didactic Industrial Plant, Learning Practices, Instrumentation, Instrumentation, Process Control, Identification.*