



COBENGE 2005

XXXIII - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia

"Promovendo e valorizando a engenharia em um cenário de constantes mudanças"

12 a 15 de setembro - Campina Grande Pb

Promoção/Organização: ABENGE/UFPG-UFPE

USO DE TROCADOR DE CALOR COMO FERRAMENTA DIDÁTICA PARA O ENSINO DE MODELAGEM E SISTEMAS DE CONTROLE

Paulo Alexandre Martin – pauloalexandre@maua.br

Escola de Engenharia Mauá, Engenharia Elétrica

Praça Mauá, 01

09580-900 – São Caetano do Sul – SP

Fuad Kassab Junior – fuad@lac.usp.br

Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle

Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, 158

05508-900 – São Paulo – SP

***Resumo:** Este artigo apresenta o uso de um trocador de calor feixe tubular como ferramenta didática para o ensino de modelagem e sistemas de controle. Este recurso pode ser usado nos cursos de engenharia mecânica, elétrica, química e alimentos. Um software didático foi desenvolvido para realizar uma interface amigável entre o aluno e o trocador de calor permitindo que a planta se torne uma ferramenta de ensino. O software permite testes da resposta ao degrau do trocador de calor em malha aberta e a implementação de um sistema de controle PID. A planta apresenta uma dinâmica com tempo morto, desta forma optou-se por adicionar ao software um algoritmo preditivo estrutura Preditor de Smith para o tratamento do tempo morto. Desta forma pode-se realizar testes utilizando o controle PID com e sem o algoritmo preditivo. Metodologias para o ensino de modelagem e sistemas de controle são apresentadas.*

***Palavras-chave:** Trocador de calor, Ensino de modelagem, Ensino de sistemas de controle, Controle PID, Preditor de Smith.*

1. INTRODUÇÃO

O uso de plantas reais em um curso de engenharia agrega muito valor na formação dos alunos, pois permite o contato dos mesmos com toda a instrumentação usada no controle e na supervisão do processo além de incentivar o uso da planta em trabalhos práticos envolvendo modelagem e projeto de sistemas de controle entre outros. Apesar dos resultados de simuladores em computadores serem parecidos com os resultados práticos obtidos em uma planta didática, nota-se um grande interesse e entusiasmo por parte dos alunos em realizar trabalhos em plantas reais do que em simuladores. O fator que contribui para isto é que em uma planta real, os alunos vêem na prática que seus projetos realizados em teoria realmente funcionam e os cálculos que levaram a estes são válidos.

O trocador de calor utilizado neste trabalho apresenta muitos recursos para o ensino de diversas disciplinas da engenharia. Dentre estes recursos podemos citar o uso do trocador de calor para o estudo de transferência de calor, o estudo de todo os sensores e atuadores

utilizados, levantamento da resposta ao degrau em malha aberta, trabalhos práticos envolvendo a sintonia de controladores PID e muitos outros.

Como ferramenta para o ensino de modelagem, é realizado um ensaio em malha aberta obtendo-se uma tabela de pontos que corresponde à resposta ao degrau do trocador de calor. Através desta tabela de pontos, o aluno irá aplicar métodos conhecidos de identificação de sistemas para obter o modelo matemático do trocador de calor.

Como ferramenta para o ensino de sistemas de controle, o aluno projeta um controlador PID com base no modelo matemático já obtido. Após isto, o controle PID projetado pelo aluno é testado na planta com e sem o uso do algoritmo preditivo para a verificação do desempenho do controle.

2. TROCADOR DE CALOR

O trocador de calor em questão é do tipo feixe tubular, o mesmo localiza-se na planta de engenharia de alimentos da Escola de Engenharia Mauá. A “Figura 1” mostra o trocador de calor em questão.



Figura 1 – Trocador de calor feixe tubular.

O funcionamento deste trocador de calor consiste na troca de calor entre dois fluídos que circulam em circuitos diferentes. O fluído de aquecimento (ou fluído quente) é composto por água e circula no lado do casco, este mesmo fluído é aquecido por vapor saturado a 294000 Pa que provém de uma caldeira à querosene. Este fluído de aquecimento permanece circulando em um circuito fechado, fornecendo calor para o fluído frio (lado dos tubos) através das placas do trocador de calor. O denominado fluído frio é o fluído que será aquecido.

Para manter a circulação do fluído de aquecimento, existe uma bomba liga/desliga em série com o circuito do fluído de aquecimento. O vapor é injetado através de uma válvula eletropneumática proporcional controlada por um sinal elétrico que corresponde a uma corrente elétrica de 4 a 20 mA. Como é injetado vapor no circuito, então existe uma válvula de alívio para eliminar o excesso de água que condensa no circuito do fluído de aquecimento (lado do casco). As temperaturas de entrada e saída do fluído de aquecimento e do fluído frio são medidas por termoresistores tipo PT100. Sendo que a temperatura de saída do fluído frio

é a variável controlada. Para manter a circulação do fluido frio, existe uma bomba comandada por um conversor de frequência que por sua vez é comandado por um sinal analógico que corresponde a uma tensão de 0 à 10 V. Desta forma, podemos realizar ensaios para diversos valores de vazão de água na parte dos tubos. O fluido frio provém de um tanque de água a temperatura ambiente, o mesmo entra pelo lado dos tubos à temperatura ambiente e sai na outra extremidade aquecido.

3. SOFTWARE DIDÁTICO

O software didático desenvolvido para este trabalho apresenta uma ótima interface gráfica a qual permite a visualização de diversos gráficos das grandezas envolvidas no teste, como por exemplo as quatro temperaturas medidas no trocador de calor (temperatura de entrada do fluido frio – TEFF, temperatura de saída do fluido frio – TSFF, temperatura de entrada do fluido de aquecimento – TEFA e temperatura de saída do fluido de aquecimento – TSFA), fluxo de massa na parte dos tubos, setpoint e outros. No canto direito superior, existe a opção de mudar o tipo de controle para Manual, PID, PI-D ou I-PD, onde PI-D e I-PD são variações do controle PID que são apresentados em OGATA (2003). Também é possível mudar os parâmetros do controle PID, PI-D ou I-PD e utilizar o Preditor de Smith com os parâmetros configuráveis para o tratamento do tempo morto. O software permite a utilização de filtros digitais IIR para a atenuação do ruído existente nos sinais coletados. Estes filtros digitais aplicados nas temperaturas podem ter sua frequência de corte e número de pólos alterados pelo usuário. As temperaturas e o sinal de controle da válvula eletropneumática podem ser visualizados por gráficos de barra no canto direito inferior da tela do software. Os controles manuais do conversor de frequência e da válvula de vapor ficam no canto esquerdo inferior da tela do software. A “Figura 2” mostra a tela gráfica do software durante um ensaio em malha aberta do trocador de calor para o levantamento da resposta ao degrau.

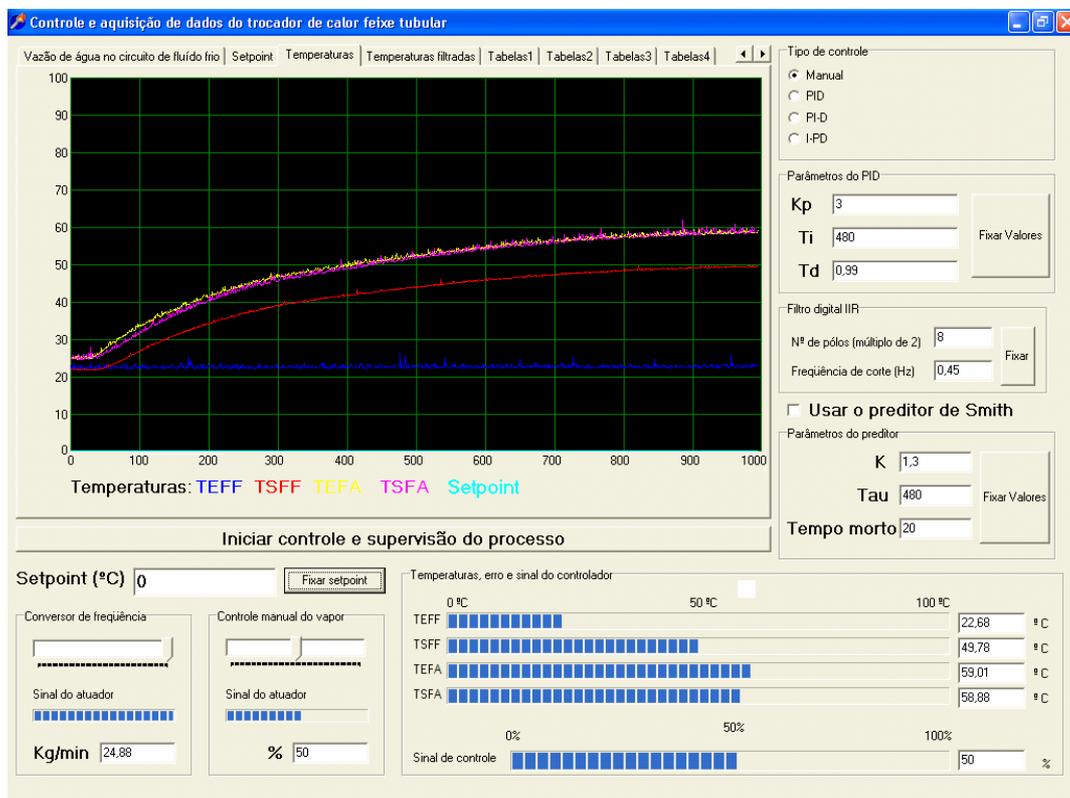


Figura 2 – Tela gráfica do software.

4. METODOLOGIA DIDÁTICA PARA MODELAGEM

Como metodologia do ensino de modelagem propõem-se o levantamento da resposta ao degrau do trocador de calor para a elaboração de um modelo para diversos valores de vazão de água na parte dos tubos. Esta com certeza é uma oportunidade importante para o ensino de modelagem para os alunos, pois além dos mesmos pesquisarem e utilizarem diversos métodos conhecidos de identificação de sistemas, aprende-se a preparar a planta e planejar o ensaio antes da execução do mesmo. Muitos dos erros existentes na elaboração de um modelo são devidos ao fato de que a planta não foi devidamente preparada para o ensaio. No caso do trocador de calor, antes de cada ensaio deve-se encher o lado do casco com água pois no final de cada ensaio, o vapor que permanece no interior do casco condensa gerando um vácuo que é preenchido com ar. Sem este procedimento o ensaio irá apresentar resultados não coerentes (o ar no interior no casco afeta a troca de calor). Outro detalhe importante que deve ser observado é esperar o trocador de calor atingir a situação de regime no resfriamento antes de iniciar outro ensaio. Isto deve ser observado quando vários ensaios são feitos em um mesmo dia. Resultados não coerentes podem ocorrer devido ao problema da inércia térmica. A “Figura 3” apresenta o fluxograma da metodologia de ensino proposta para o ensino de modelagem.

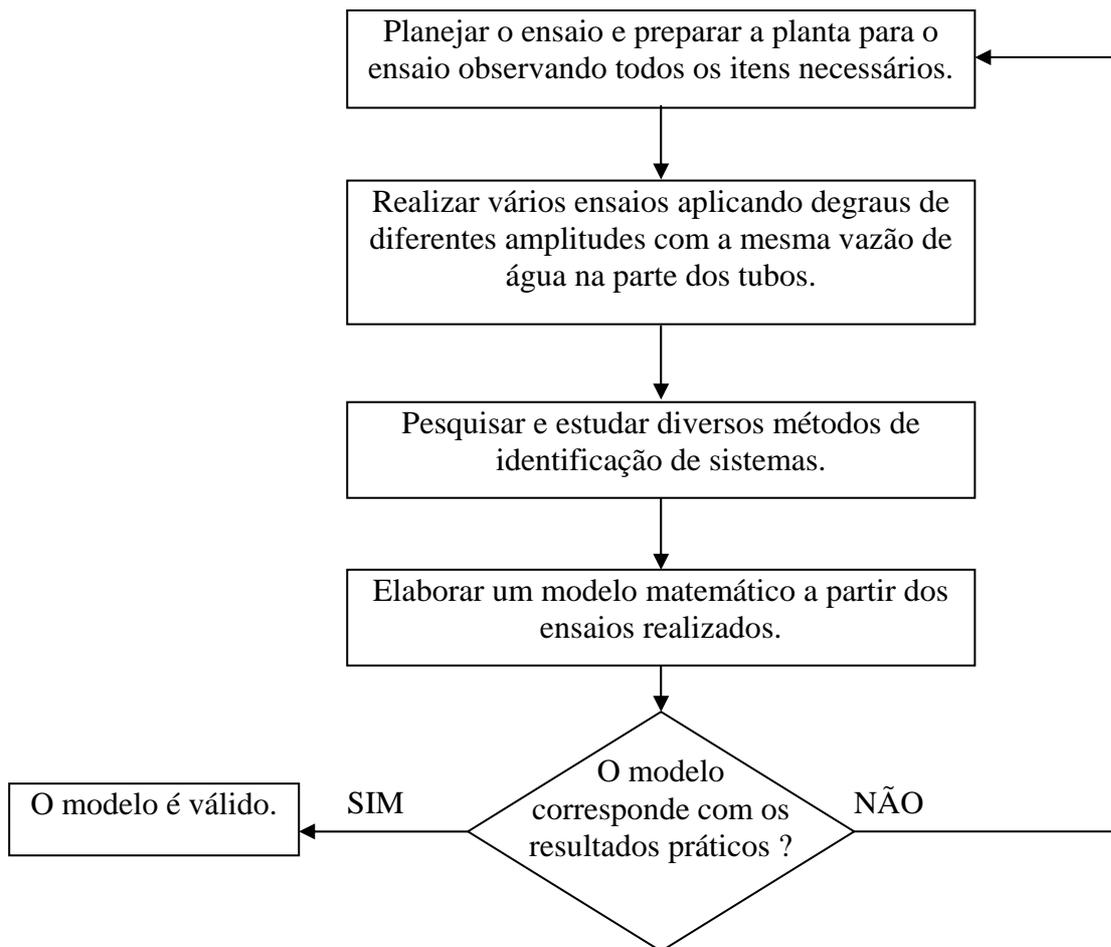


Figura 3 – Metodologia proposta para o ensino de modelagem.

Através de ensaios experimentais, verificou-se que a função de transferência do trocador de calor, a qual relaciona a temperatura de saída do fluido frio (saída) com o sinal elétrico aplicado na válvula eletropneumática de vapor (entrada), é uma função de transferência de primeira ordem com tempo morto. Portanto a função de transferência do trocador de calor pode ser escrita como:

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

Sendo que os parâmetros K , τ e θ variam de acordo com o valor do fluxo de massa na parte dos tubos. Como é possível mudar o valor do sinal do conversor de frequência através do software, pode-se trabalhar com vários valores de fluxo de massa no circuito do fluido frio. Isto contribui de uma forma significativa para o ensino de modelagem, pois é possível propor trabalhos de identificação de sistemas, cada um para um valor diferente de fluxo de massa na parte dos tubos e levantar as curvas de K , τ e θ em função do fluxo de massa na parte dos tubos.

Os ensaios para o levantamento do modelo do trocador de calor consistiram em realizar ensaios de resposta ao degrau para seis valores diferentes de fluxo de massa na parte dos tubos (realizando, portanto, o procedimento da “Figura 3” seis vezes). Esta resposta ao degrau consistiu em se aplicar, através do controle manual do software, um sinal na válvula eletropneumática de vapor e estudar a evolução temporal da temperatura de saída do fluido frio após a aplicação do degrau. A “Figura 4” mostra o comparativo da resposta ao degrau da planta e do modelo matemático para um fluxo de massa de 0,2075 kg/s na parte dos tubos.

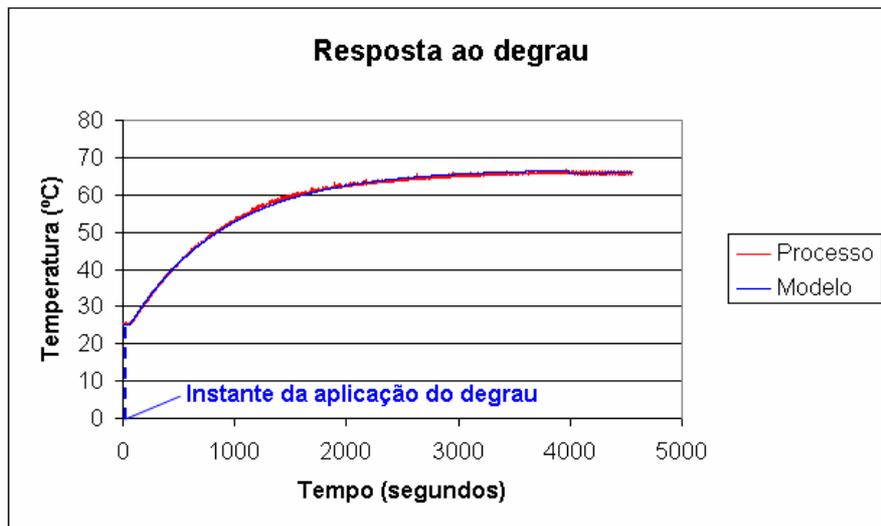


Figura 4 – Comparativo do resultado experimental e modelo matemático para um fluxo de massa de água de 0,2075 kg/s na parte dos tubos.

O valor de K é obtido utilizando a seguinte expressão.

$$K = \frac{\Delta T}{\Delta D} \quad (2)$$

Onde ΔT é a diferença entre a máxima temperatura e a mínima temperatura na resposta ao degrau e ΔD é o delta de degrau aplicado. Na resposta ao degrau da “Figura 4” o valor mínimo de temperatura é a própria temperatura ambiente (25,5 °C). O valor de τ pode ser obtido através de dois métodos propostos. A resposta ao degrau no domínio do tempo pode ser modelada como um sistema de primeira ordem:

$$T(t) = \Delta D.K.(1 - e^{-(t-\theta)/\tau}).h(t - \theta) + T_{ambiente} \quad (3)$$

Onde $h(t)$ é o degrau unitário e $T_{ambiente}$ é 25,5 °C. No primeiro método, estima-se τ através do valor da temperatura que corresponde a 63,2 % do valor de ΔT somada a temperatura ambiente, isto equivale a $t=\tau$. Observando a função em (3) para tempos onde t é maior que θ , podemos encontrar o valor de τ , pois a função em (3) assume valor $0,632.\Delta D.K+T_{ambiente}$ quando o argumento da mesma é unitário ($t=\tau$). Desta forma, encontrando o valor de t que satisfaz a condição $T(t)=0,632.\Delta T+T_{ambiente}$, encontramos o valor de τ . O segundo método de identificação consiste em encontrar um valor de τ que minimize o seguinte erro quadrático que é apresentado por AGUIRRE (2000).

$$\varepsilon = \sum_{n=1}^N (K.\Delta D.(1 - e^{-(nDT^*-\theta)/\tau}).h(nDT^* - \theta) + T_{ambiente} - T(nDT^*)_{experimental})^2 \quad (4)$$

Sendo que n é o índice da amostra obtida pelo software, N é o número total de amostras e DT^* é o intervalo de tempo entre as amostras. O erro quadrático é obtido fazendo a somatória dos quadrados da diferença entre o valor teórico e o valor experimental. Para isto o aluno deverá elaborar um software que encontre o valor de τ que minimize ε . Observou-se que o segundo método apresenta melhores resultados que o primeiro. O modelo na “Figura 4” foi obtido utilizando-se o segundo método para a determinação de τ . A determinação do tempo morto θ pode ser feita graficamente, encontrando a diferença entre o instante da aplicação do degrau e o momento em que a temperatura de saída no lado dos tubos começa a subir. Com esta ferramenta de ensino, aluno é incentivado a pesquisar e comparar diversos métodos para a identificação de sistemas e projetar softwares que realizem a estimação dos parâmetros da função de transferência. Estas são contribuições que seriam impossíveis de serem conseguidas sem a utilização de uma planta real.

Foram realizados ensaios para seis valores diferentes de fluxo de massa no circuito de fluido frio, através destes ensaios foi elaborado um modelo matemático para cada um. A “Figura 5”, a “Figura 6” e a “Figura 7” mostram a variação do ganho (K), da constante de tempo (τ) e do tempo morto (θ) em função do fluxo de massa na parte dos tubos respectivamente.

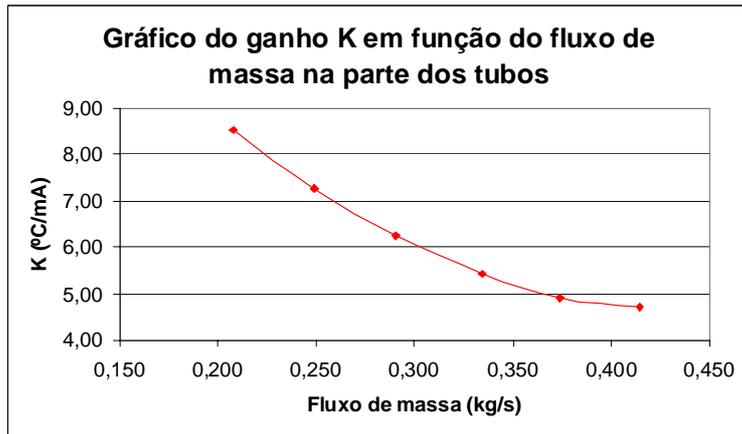


Figura 5 – Curva do ganho K em função do fluxo de massa na parte dos tubos.

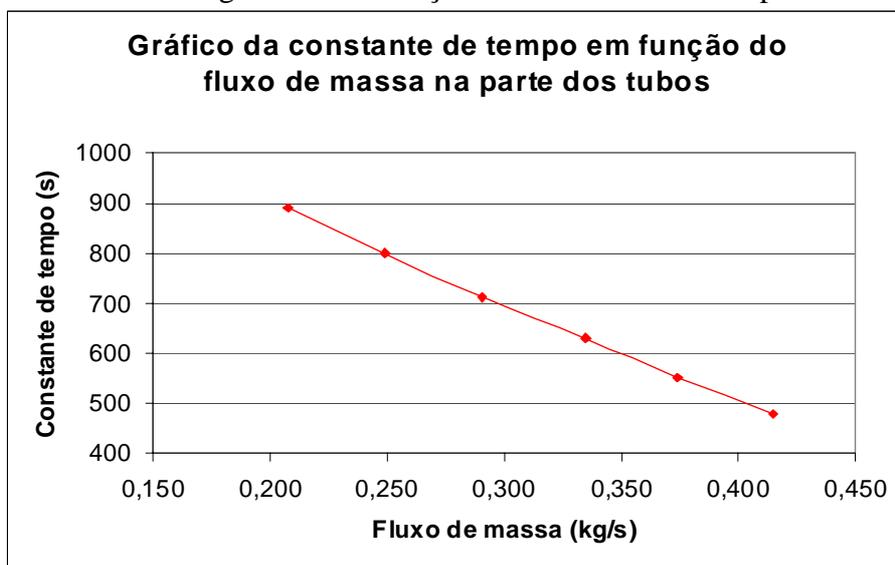


Figura 6 – Curva constante de tempo em função do fluxo de massa na parte dos tubos.

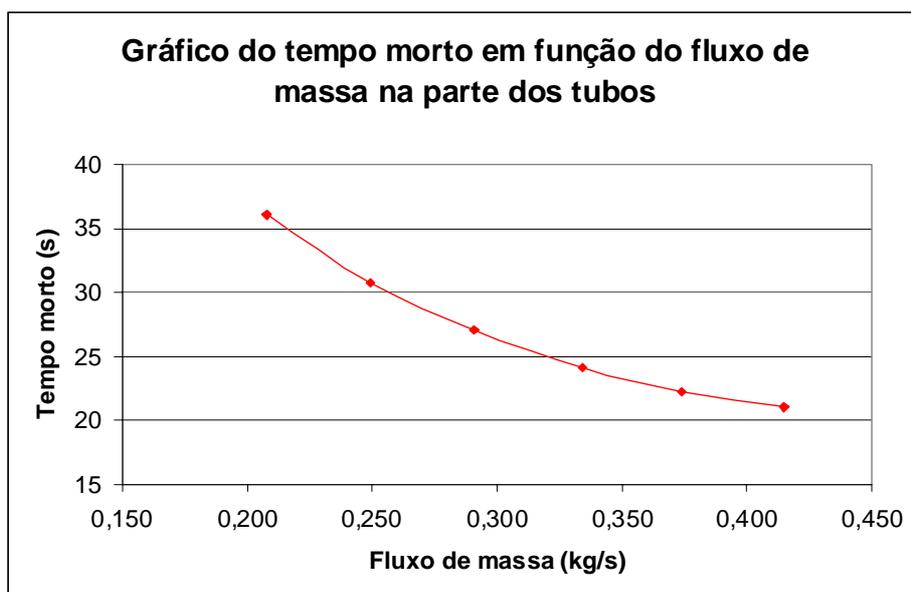


Figura 7 – Curva tempo morto em função do fluxo de massa na parte dos tubos.

Pode-se construir um modelo do trocador de calor baseado em equações diferenciais obtidas através das equações de balanço de energia do trocador de calor, conforme proposto por GARCIA (1997) desde que sejam conhecidos os parâmetros necessários para isto.

5. SISTEMA DE CONTROLE PID COM O PREDITOR DE SMITH

O software implementa a seguinte função de transferência para o controlador PID onde o valor de α localiza-se no intervalo (0,1).

$$G_{PID}(s) = Kp \cdot \left(1 + \frac{1}{Ti \cdot s} + \frac{Td \cdot s}{\alpha Td \cdot s + 1} \right) \quad (5)$$

O diagrama de blocos da planta controlada pelo controle PID é mostrado na “Figura 8”.

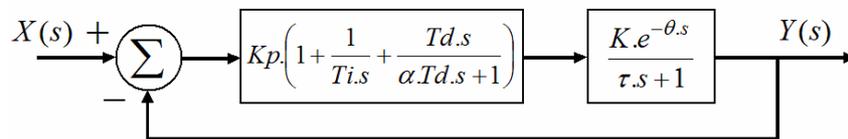
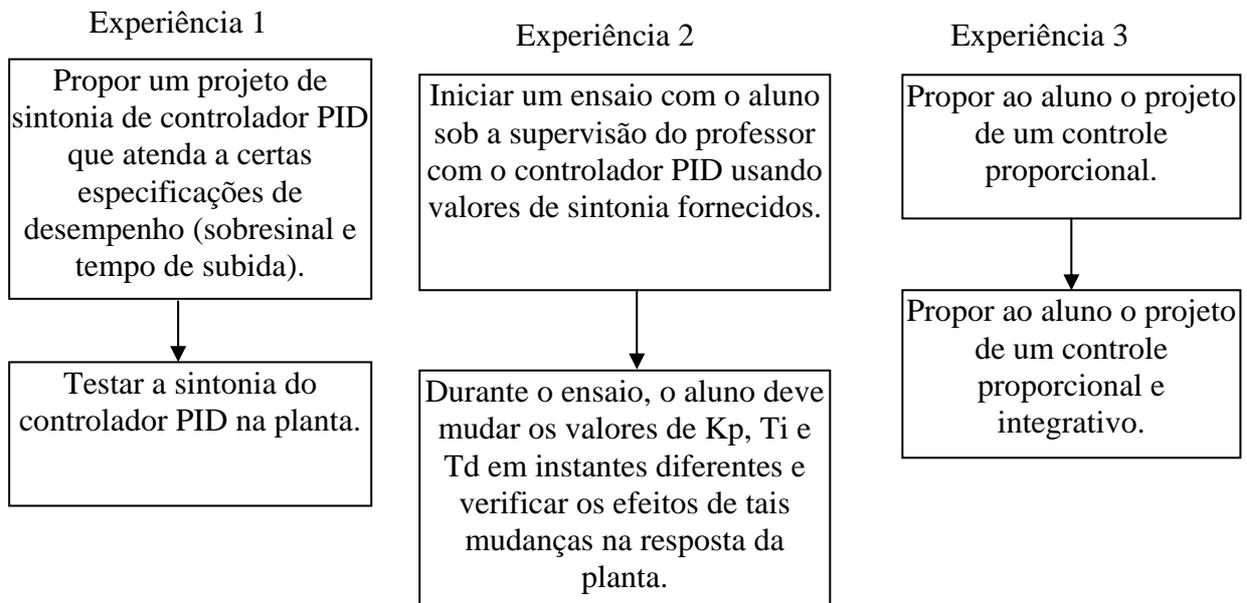


Figura 8 – Diagrama de blocos da planta com o controle PID.

Neste sistema de controle, a variável manipulada é vazão de vapor no lado do casco e a variável controlada é a temperatura de saída no lado dos tubos. Através do software didático, o aluno pode projetar um controlador PID usando métodos de sintonia diferentes e realizando uma posterior comparação entre eles. O desempenho do controle pode ser observado através da tela gráfica do software ou através das tabelas geradas que podem ser copiadas para uma planilha eletrônica. Durante o ensaio, o aluno pode mudar os valores de Kp , Ti e Td , mudando a resposta do controlador em tempo real e visualizar o efeito da mudança (por exemplo, aumentar o valor de Ti se a resposta ao degrau do sistema controlado apresentar um sobresinal relativamente elevado). Isto é de grande valor, pois ajuda a entender os efeitos de cada parcela (proporcional, integrativo e derivativo) do controle PID. Na maioria dos simuladores, não é possível mudar os valores de Kp , Ti e Td durante a execução da simulação. Os fluxogramas da “Figura 9” mostram a metodologia de ensino para sistemas de controle PID.



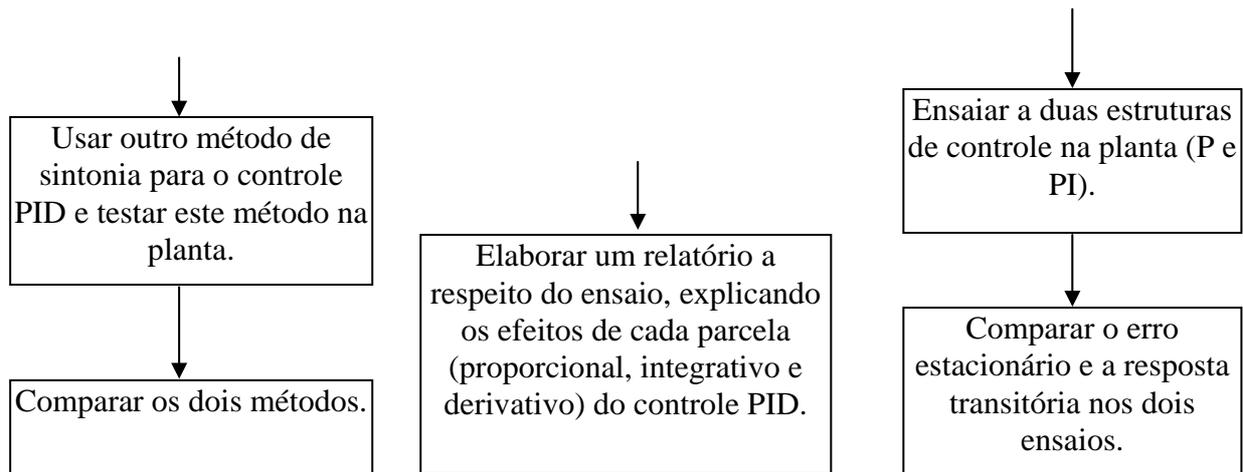


Figura 9 – Fluxograma de metodologia de ensino para sistemas de controle PID.

A experiência 1 tem a função de introduzir métodos de sintonia de controladores PID e testar tais sintonias na planta para uma posterior verificação dos cálculos realizados. As experiências 2 e 3 têm a função de esclarecer ao aluno os efeitos de cada parcela (proporcional, integrativo e derivativo) do controlador PID na ação de controle. Após estas experiências, o aluno terá entendido os efeitos de cada parcela do controle PID e estará apto a realizar a sintonia de controladores PID usando métodos conhecidos. Além de permitir o ensaio com diferentes sintonias de controle PID, pode-se realizar um ensaio utilizando o controle PID com ou sem o uso do Preditor de Smith para uma posterior comparação das duas estruturas de controle, este algoritmo preditivo é apresentado com mais detalhes em DESHPAND *et al* (1987). Para o entendimento dos efeitos do uso do Preditor de Smith, o aluno deverá realizar as experiências do fluxograma da “Figura 9” com e sem o uso do preditor e comparar seus resultados. O diagrama de blocos do sistema de controle com o Preditor de Smith é mostrado na “Figura 10”.

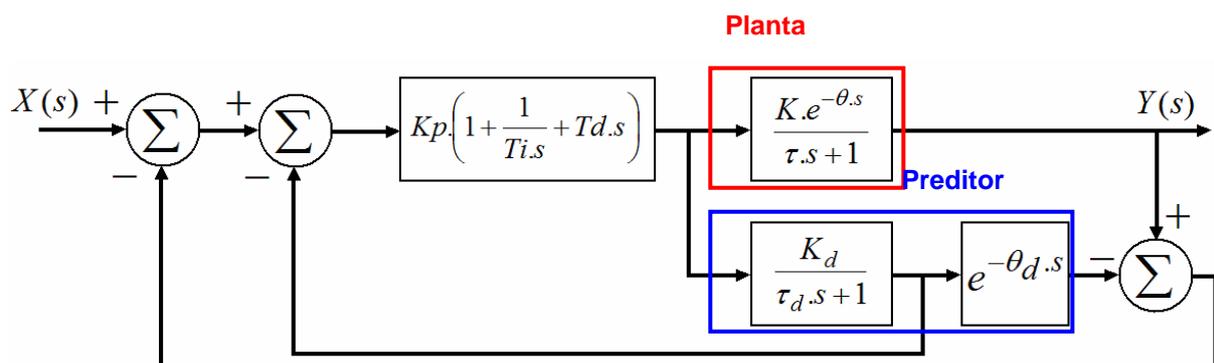


Figura 10 – Sistema de controle PID com o Preditor de Smith.

O Preditor de Smith tem a função de minimizar alguns efeitos indesejados devido ao tempo morto comum na planta. Como o sinal da variável controlada $Y(s)$ chega com um certo atraso no somador, a resposta transitória da planta controlada pode apresentar resultados indesejados como por exemplo um sobresinal elevado. O Preditor de Smith é um modelo matemático da planta no software que tem a função de prever o valor da temperatura antes que a mesma seja medida na saída da planta. No diagrama de blocos da “Figura 10”, a saída

do preditor sem o tempo morto é subtraída no somador, realizando deste modo o efeito preditivo. Neste trabalho, o Preditor de Smith é uma função de transferência do tipo:

$$P(s) = \frac{K_d \cdot e^{-\theta_d \cdot s}}{\tau_d \cdot s + 1} \quad (6)$$

Sendo que os parâmetros K_d , τ_d e θ_d podem ser alterados pelo usuário do software didático. A parte com o tempo morto é subtraída do sinal de saída da planta e por sua vez o sinal resultante é subtraído do sinal de referência, isto é feito para compensar eventuais diferenças entre os parâmetros do Preditor de Smith (que é um modelo da planta) e a própria planta.

A “Figura 11” mostra a resposta ao degrau do trocador de calor controlado pelo controle PID com e sem o uso do Preditor de Smith operando a um fluxo de massa de 0,4148 kg/s no lado dos tubos com os seguintes parâmetros de sintonia do PID: $K_p = 3 \text{ mA/}^\circ\text{C}$, $T_i = 480 \text{ s}$ e $T_d = 1 \text{ s}$. No preditor foram usados os parâmetros $K = 4,7 \text{ }^\circ\text{C/mA}$, $\tau = 480 \text{ s}$ e $\theta = 22 \text{ s}$. A “Figura 12” mostra o sinal do controlador com e sem o uso do Preditor de Smith para o mesmo ensaio da “Figura 11”.

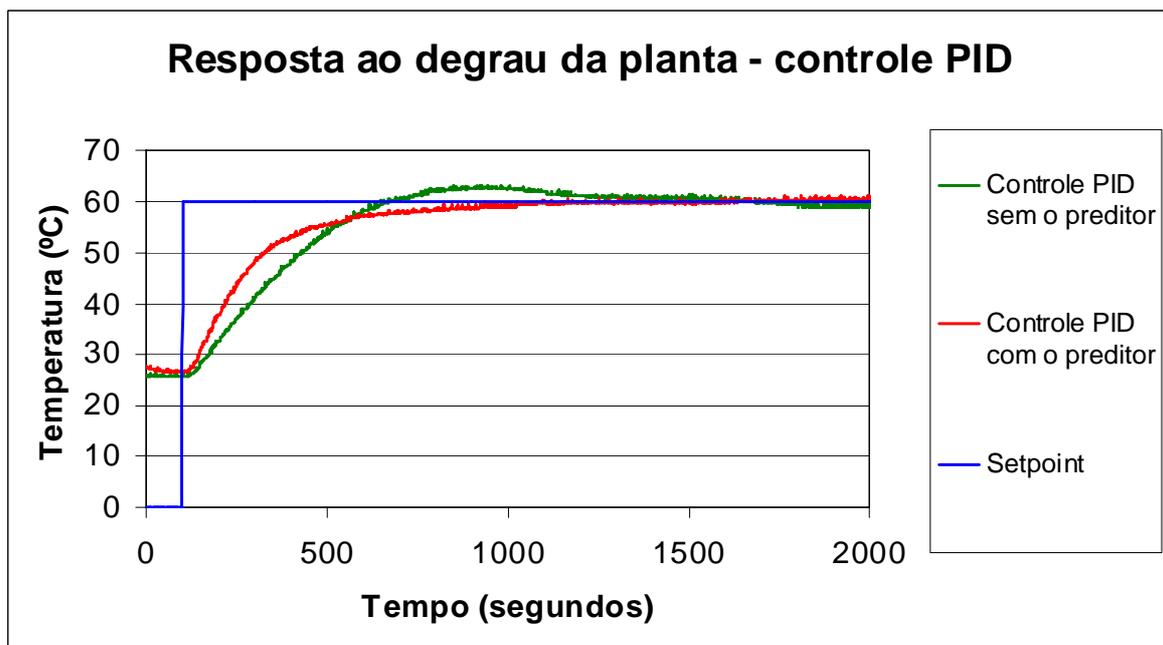


Figura 11 – Resposta ao degrau da planta controlada.

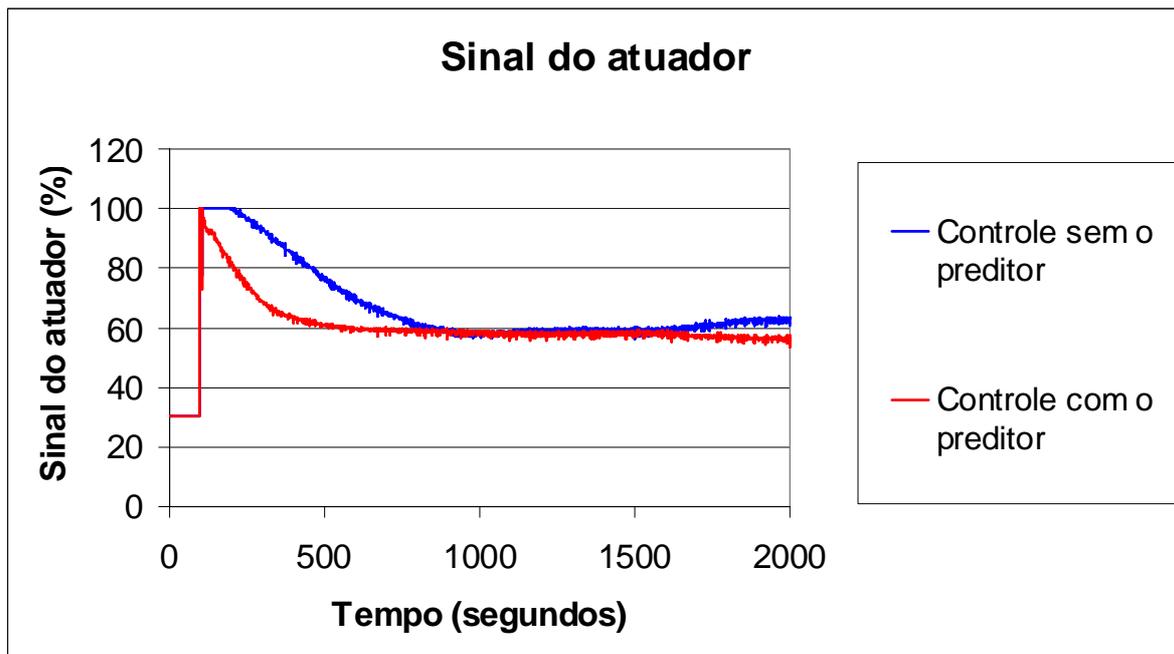


Figura 12 – Sinal no atuador.

Percebe-se uma saturação no sinal do atuador para o controle sem o preditor enquanto que para o controle com o preditor, o sinal do atuador não apresenta saturação nenhuma. Isto ocorre porque com a utilização do preditor, existe uma subtração feita no sinal de referência pelo sinal do preditor sem o tempo morto conforme pode ser visto na “Figura 10”. Com a utilização do preditor obtém-se um sobressinal menor na resposta ao degrau do que o caso em que não se utiliza o preditor. Em compensação, o tempo de subida do sistema controlado sem o preditor é menor que o tempo de subida do sistema onde se utiliza o preditor. O tempo de subida é definido como o tempo requerido para que a variável controlada passe da temperatura ambiente para o valor do setpoint a partir da aplicação do degrau.

Uma melhor resposta transitória pode ser obtida no sistema onde não se utiliza o Preditor de Smith, simplesmente ajustando os parâmetros K_p , T_i e T_d do controle PID conforme é apresentado em LEVINE (1996).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O uso de plantas reais para o ensino de engenharia permite a realização de trabalhos que não seriam possíveis através de somente teoria e simuladores. Além de comprovar a validação dos cálculos e das simulações em um experimento real, o uso de uma planta real incentiva muito os alunos a realizar trabalhos que venham a ser implementados na mesma. Ao realizar trabalhos e experimentos com o trocador de calor, o aluno passa a adquirir conhecimentos interdisciplinares que muitas vezes não são aplicados com muita ênfase em seu curso, como por exemplo o estudante de engenharia elétrica que aprende muito de termodinâmica ao modelar o trocador de calor.

Como visto, o software didático apresenta uma interface amigável que permite uma ótima interação entre o aluno e a planta. Além de permitir ensaios em malha aberta e ensaios com sistemas de controle com e sem o algoritmo preditivo, o software pode ser modificado futuramente para realizar testes com sistemas de controle fuzzy e sistemas de controle com redes neurais.

Por fim, vale lembrar que a planta didática apresentada neste trabalho apresenta um potencial muito grande a ser explorado futuramente com o objetivo do aperfeiçoamento do ensino da engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas**. Belo Horizonte: UFMG, 2000.

DESHPANDE, P.B.; ASH, R. H. **Elements of Computer Process Control**. New York: Instrument Society of America, 1981.

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1997.

LEVINE, W. S. **The Control Handbook**. New York: CRC Press, 1996.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

USE OF HEAT EXCHANGER AS DIDACTIC TOOL FOR THE MODELING AND CONTROL SYSTEMS TEACHING

***Abstract:** This paper presents the use of a shell and tube heat exchanger as a didactic tool for the modeling and control systems teaching. This resource can be used in the mechanical, electrical, chemical and food engineering courses. A didactic software was developed to perform a friendly interface between the student and the heat exchanger allowing the plant to become a teaching tool. The software allows step response tests of the heat exchanger in open loop and the implementation of a PID control system. The plant presents a dynamics with dead time, so it was opted to increase in the software a predictive algorithm Smith Predictor structure for the dead time treatment. Thus tests can be performed using the PID control with and without the predictive algorithm. Methodologies to the modeling and control systems teaching are presented.*

***Key-words:** Heat exchanger, Modeling teaching, Control systems teaching, PID control, Smith Predictor.*