

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

Paulo Alexandre Martin^a

Fuad Kassab Junior^b

RESUMO

Este artigo apresenta o uso de um trocador de calor de 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 de 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. Optou-se por adicionar ao software um algoritmo preditivo baseado na estrutura Preditor de Smith para o tratamento do tempo morto. Desta forma, podem-se realizar testes utilizando o controle PID com e sem o algoritmo preditivo. Metodologias para o ensino da modelagem do trocador de calor e ensino de sistemas de controle são apresentadas.

Palavras-chave: Trocador de calor, ensino de modelagem, ensino de sistemas de controle, controle PID, Preditor de Smith.

ABSTRACT

This paper presents the use of a shell and a tube heat exchanger as a didactic tool for teaching modeling and control systems. This tool 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 decided to add a predictive algorithm with Smith Predictor structure in the software for the treatment of the dead time. Therefore, tests could be performed using the PID control with and without the predictive algorithm. Methodologies to teaching the heat exchanger modeling and control systems are presented.

Key-words: Heat exchanger, modeling teaching, control systems teaching, PID control, Smith Predictor.

INTRODUÇÃO

O uso de plantas reais num curso de engenharia agrega muito valor na formação dos alunos, pois permite o contato com toda a instrumentação usada no controle e na supervisão do processo, além de incentivar o uso da planta em trabalhos práticos envolvendo modelagem (no caso, a modelagem do trocador de calor) e projeto de sistemas de controle, entre outros. Apesar de os resultados de simuladores em computadores serem parecidos com os resultados práticos obtidos numa planta didática, nota-se um maior 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 numa planta real os alunos vêem na prática que seus projetos realizados em teoria realmente funcionam e que os cálculos que levaram a esses são válidos.

O trocador de calor utilizado neste trabalho apresenta muitos recursos para o ensino de diversas disciplinas da engenharia. Dentre esses podem-se citar o uso do trocador de calor para o estudo de transferência de calor, o estudo de todos 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 ferra-

^a Professor Auxiliar em Engenharia Elétrica da Escola de Engenharia Mauá – Praça Mauá, 01; 09580-900 - São Caetano do Sul - SP. E-mail: pauloalexandre@maua.br

^b Professor Doutor do Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle da Escola Politécnica da USP – Av. Prof. Luciano Gualberto, travessa 3, 158; 05508-900 - São Paulo - SP. E-mail: fuad@lac.usp.br

menta 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 (neste caso, a vazão de vapor sofre a variação em degrau). Por meio dessa 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. Posteriormente, 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.

Diversos trabalhos já publicados utilizaram sistemas térmicos para o ensino de modelagem e sistemas de controle. Dentre estes, podemos citar Gedraite (2001), em cujo trabalho um sistema de controle PID é implementado num trocador de calor para testes com valores de sintonia de PID. Outro trabalho relevante é apresentado em Koga (2000), no qual um sistema de controle PID controla um trocador de calor e, por meio deste controle, é possível levantar curvas do trocador de calor e realizar identificação não paramétrica do sistema. Em Galli (2003), um trocador de calor feixe tubular é utilizado num ensaio didático para o ensino de modelagem e testes com controle PID.

Este trabalho apresenta um diferencial em relação a trabalhos anteriores, porque, primeiramente, foi desenvolvido um software de aquisição de dados didático que permite uma melhor interação do aluno com a planta. Além disto, neste trabalho foram implementadas e testadas outras estruturas de controle, além do PID já utilizado em trabalhos anteriores, como, por exemplo, estruturas de controle com algoritmo preditivo que trata o tempo morto da planta.

TROCADOR DE CALOR

O trocador de calor em questão é do tipo feixe tubular e localiza-se na planta de engenharia de alimentos da Escola de Engenharia Mauá (Figura 1).

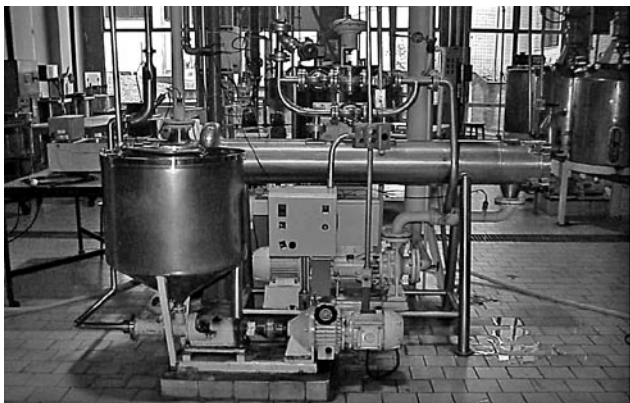


Figura 1 - Trocador de calor feixe tubular.

O funcionamento do trocador de calor consiste na troca de calor entre dois fluidos que circulam em circuitos diferentes. O fluido de aquecimento (ou fluido quente) é composto por água e circula no lado do casco e é aquecido por vapor saturado a 294 000 Pa, que provém de uma caldeira a querosene; permanece circulando num circuito fechado, fornecendo calor para o fluido frio (lado dos tubos) pelo contato entre a água aquecida e os tubos do trocador de calor. O denominado fluido frio é o que será aquecido.

Para manter a circulação do fluido de aquecimento existe uma bomba liga/desliga em série com o circuito do fluido 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, existe uma válvula de alívio para eliminar o excesso de água que se condensa no circuito do fluido de aquecimento (lado do casco). As temperaturas de entrada e saída do fluido de aquecimento e do fluido frio são medidas por termorresistores tipo PT100, sendo a temperatura de saída do fluido frio 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 a 10 V. Dessa forma, podem ser realizados ensaios para diversos valores de vazão de água na parte dos tubos. O fluido frio provém de um tanque de água à temperatura ambiente, entra pelo lado dos tubos à temperatura ambiente e sai na outra extremidade aquecido.

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), o 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, apresentadas por 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. Esses 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.

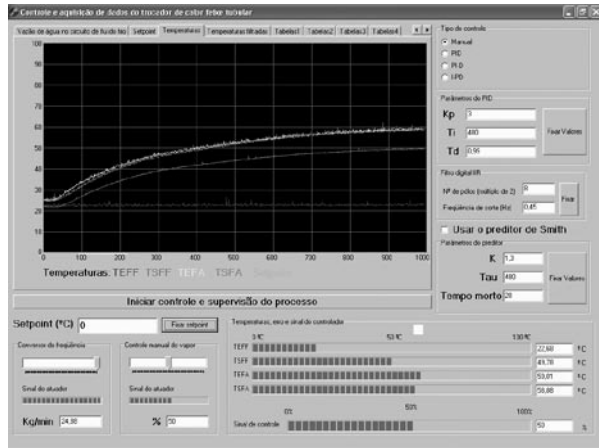


Figura 2 - Tela gráfica do software.

METODOLOGIA DIDÁTICA PARA MODELAGEM

Como metodologia do ensino de modelagem propõe-se o levantamento da resposta ao degrau do trocador de calor para a elaboração de um modelo do trocador de calor para diversos valores de vazão de água na parte dos tubos. Neste trabalho, a variável que sofre a variação em degrau é a vazão de vapor.

Esta, com certeza, é uma oportunidade importante para o ensino de modelagem para os alunos, pois, além de pesquisarem e utilizarem diversos métodos conhecidos de identificação de sistemas, aprendem a preparar a planta e planejar o ensaio antes da sua execução. Muitos dos erros existentes na elaboração de um modelo devem-se ao fato de a planta não ter sido 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-se, gerando um vácuo que é preenchido com ar. Sem esse procedimento o ensaio irá apresentar resultados não coerentes (o ar no interior no casco afeta a troca de calor). Outro detalhe importante a ser observado é esperar o trocador de calor atingir a situação de regime no resfriamento antes de iniciar outro ensaio, o que deve ser observado quando vários ensaios são feitos em um mesmo dia. Resultados não coerentes podem ocorrer em razão do problema da inércia térmica.

A Figura 3 apresenta o fluxograma da metodologia de ensino proposta para o ensino de modelagem.

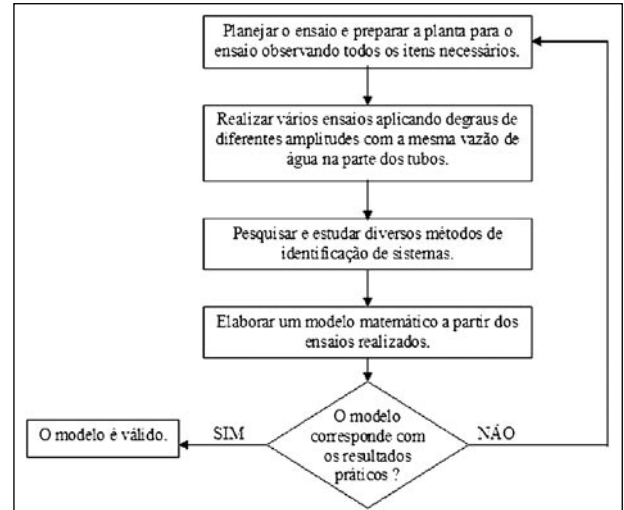


Figura 3 - Metodologia proposta para o ensino de modelagem.

Por meio 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:

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

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 por meio do software, pode-se trabalhar com vários valores de fluxo de massa no circuito do fluido frio. Isso contribui de 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). Essa resposta ao degrau consistiu em se aplicar, por meio 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.

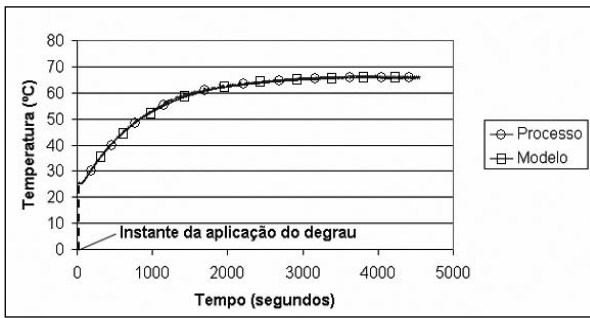


Figura 4 - Comparativo do resultado experimental e modelo matemático para um fluxo de massa de água de 0,2075 kg/s na parte dos tubos.

O sistema de aquisição de dados utilizado foi calibrado, apresentando um erro de medida inferior a 0,1%. Como o erro de medida, neste caso, é muito pequeno, as barras de erro foram suprimidas em todos os gráficos deste trabalho. O sistema de aquisição de dados utiliza um hardware que possui um conversor AD de 12 bits; por ser de 12 bits, o erro relativo à quantização da temperatura é de 0,024 °C. Esse erro devido à quantização é obtido calculando-se a diferença entre a máxima e a mínima temperatura que podem ser lidas (diferença que equivale a 100 °C), dividida pela quantidade de níveis que o conversor AD consegue identificar (2 elevado ao número de bits, que equivale a 4.096), resultando, dessa forma, num erro de quantização de 0,024 °C. O conversor AD foi projetado para digitalizar tensões que equivalem a uma faixa de temperaturas de 0 °C a 100 °C. Erros em razão da tolerância dos termorresistores são inferiores a 0,05%; desta forma, o erro do sistema de aquisição de dados é inferior a 0,1%.

O valor de K é obtido utilizando-se a seguinte expressão:

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

onde ΔT é a diferença entre a máxima 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 por meio de dois métodos propostos. A resposta ao degrau no domínio do tempo pode ser modelada como um sistema de primeira ordem mostrado na equação (3); uma explicação mais detalhada sobre esta expressão é encontrada em Garcia (1997).

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

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 à temperatura ambiente, o que equivale a $t = \tau$. Observando a função em (3) para tempos

nos quais t é maior que θ , pode-se encontrar o valor de τ , pois a função em (3) assume valor $0,632.\Delta D.K + T_{ambiente}$ quando o seu argumento é unitário ($t=\tau$). Dessa forma, encontrando o valor de t que satisfaz a condição $T(t) = 0,632.\Delta T + T_{ambiente}$, encontra-se o valor de τ . O segundo método de identificação consiste em encontrar um valor de τ que minimize o seguinte erro quadrático 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 n o índice da amostra obtida pelo software, N é o número total de amostras e DT^* , o intervalo de tempo entre as amostras. O erro quadrático é obtido fazendo-se a somatória dos quadrados da diferença entre o valor teórico e o valor experimental; para isso, 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 da 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-se 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, o 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, por meio dos quais 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.

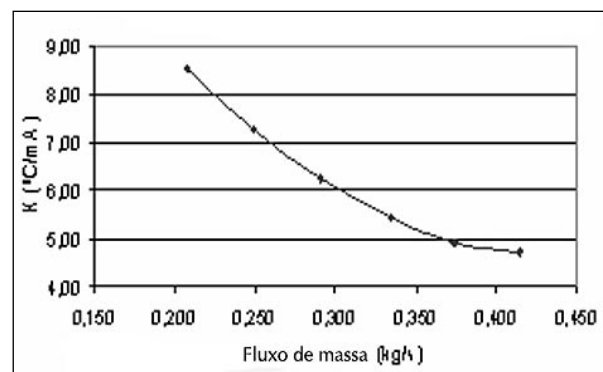


Figura 5 - Curva do ganho K em função do fluxo de massa na parte dos tubos.

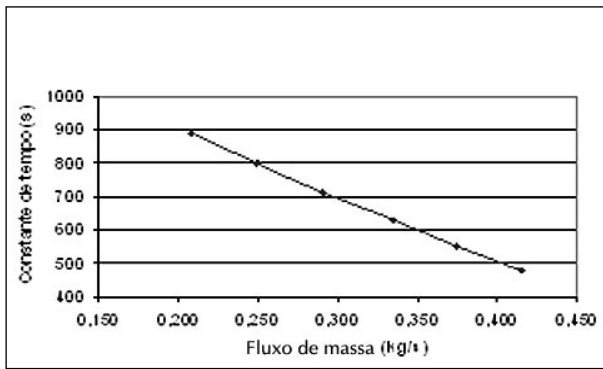


Figura 6 - Curva constante de tempo em função do fluxo de massa na parte dos tubos.

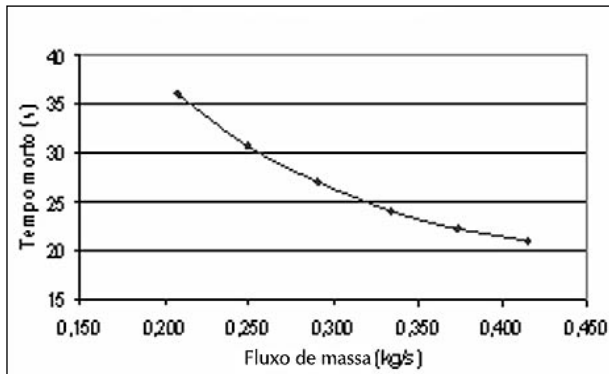


Figura 7 - Curva tempo morto em função do fluxo de massa na parte dos tubos.

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

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). Essa função de transferência para controle PID é proposta por Ogata (2003).

$$G_{PID}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{\alpha T_d s + 1} \right) \quad (5)$$

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

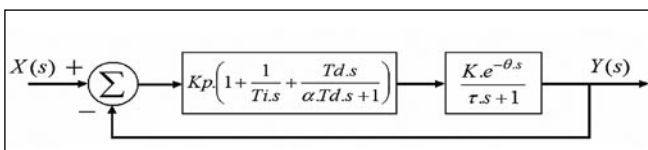


Figura 8 - Diagrama de blocos da planta com o controle PID.

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. Com o software didático o aluno pode projetar um controlador PID utilizando métodos de sintonia diferentes e realizando uma posterior comparação entre eles. O desempenho do controle pode ser observado por meio da tela gráfica do software ou das tabelas geradas que podem ser copiadas para uma planilha eletrônica. Durante o ensaio, o aluno pode alterar os valores de K_p , T_i e T_d , mudando a resposta do controlador em tempo real, e visualizar o efeito da mudança (por exemplo, aumentar o valor de T_i se a resposta ao degrau do sistema controlado apresentar um sobre-sinal relativamente elevado). Isto é de grande valor porque ajuda a entender os efeitos de cada parcela (proporcional, integrativo e derivativo) do controle PID. Na maior parte dos simuladores não é possível mudar os valores de K_p , T_i e T_d durante a execução da simulação. Os fluxogramas da Figura 9 mostram a metodologia de ensino para sistemas de controle PID.

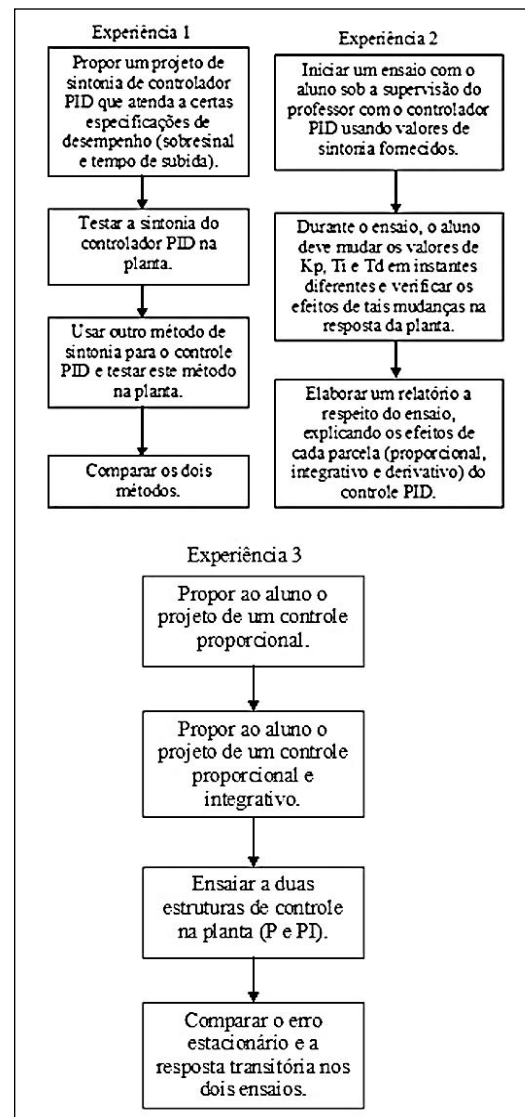


Figura 9 - Fluxogramas de metodologia de ensino para sistemas de controle PID.

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, utilizando 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. Esse algoritmo preditivo é apresentado com mais detalhes em Deshpand (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.

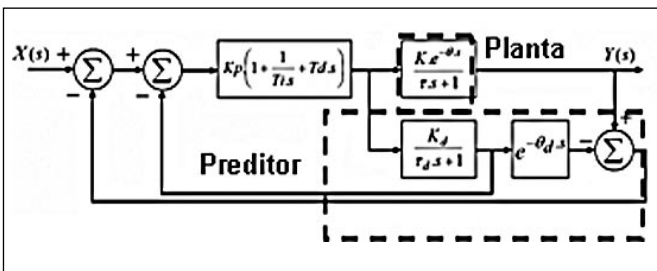


Figura 10 - Sistema de controle PID com o Preditor de Smith.

O Preditor de Smith tem a função de minimizar alguns efeitos indesejados em razão do tempo morto comum na planta. Como o sinal da variável controlada $Y(s)$ chega com um certo atraso ao somador, a resposta transitória da planta controlada pode apresentar resultados indesejados, como, por exemplo, um sobre-sinal elevado. O Preditor de Smith é um modelo matemático da planta no software cuja função é prever o valor da temperatura antes que 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, desse modo, o efeito preditivo. Neste trabalho, o Preditor de Smith é uma função de transferência do tipo:

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

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, o que é feito para compensar eventuais diferenças entre os parâmetros do Pre-

ditor 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 utilizados os parâmetros $K = 4,7 \text{ }^\circ\text{C}/\text{mA}$, $\tau = 480 \text{ s}$ 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.

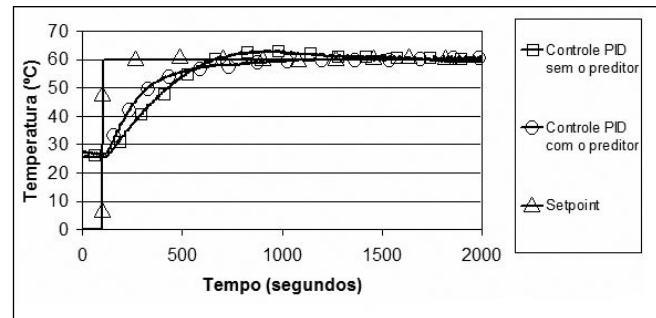


Figura 11 - Resposta ao degrau da planta controlada.

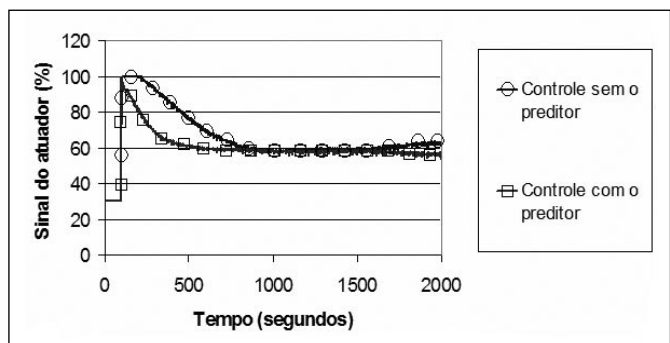


Figura 12 - Sinal no atuador.

Percebe-se uma saturação no sinal do atuador para o controle sem o preditor, ao passo 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 no sinal de referência pelo sinal do preditor sem o tempo morto, conforme a Figura 10. Com a utilização do preditor obtém-se um sobre-sinal menor na resposta ao degrau do que no 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 no qual 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 em que 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).

CONCLUSÕES

O uso de plantas reais para o ensino de engenharia permite a realização de trabalhos que não seriam possíveis somente pela teoria e simuladores. Além de comprovar a validação dos cálculos e das simulações num 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.
- GALLI, M.; MENDES, P. P. C.; VARELLA, S. A didactic test rig to analyze the shell and tube heat exchange and stability of control system. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2003. *Anais...*
- GARCIA, C. *Modelagem e simulação*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1997.
- GEDRAITE, R. Desenvolvimento de controlador de temperatura PID aplicado a trocador de calor casco e tubos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA, 2001. *Anais...*
- KOGA, F. Controlador PID. Trabalho de conclusão de curso, Escola de Engenharia Mauá, São Caetano do Sul, 2000.
- LEVINE, W. S. *The control handbook*. New York: CRC Press, 1996.
- MARTIN, P. A.; KASSAB, F. Uso de trocador de calor como ferramenta didática para o ensino de modelagem e sistemas de controle. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 2005. *Anais...*
- OGATA, K. *Engenharia de controle moderno*. São Paulo: Prentice Hall, 2003.

DADOS BIOGRÁFICOS DOS AUTORES



Paulo Alexandre Martin

Formado em Engenharia Elétrica pela Escola de Engenharia Mauá; mestre em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP. Atualmente é professor da Escola de Engenharia Mauá, atuando no ensino de eletrônica digital. Recebeu o prêmio CREA de formação profissional e o prêmio do Instituto de Engenharia do Estado de São Paulo. Suas áreas de atuação são sistemas digitais, microcontroladores e sistemas de controle.



Fuad Kassab Junior

Formado em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP, onde realizou o mestrado e o doutorado. É professor do Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle (PTC) da EPUSP. Áreas de interesse: sistemas digitais em controle de processos, controle de processos, modelagem e otimização de processos.

controlado de processos, controle de processos, modelagem e otimização de processos.