

IDENTIFICAÇÃO APROXIMADA DA DINÂMICA DE TROCADOR DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBOS EMPREGANDO TÉCNICAS NÃO PARAMÉTRICAS PARA A IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

R. Gedraite¹; P. A. Martin¹, L. Kunigk²; A. C. Esteves³

¹-Departamento de Engenharia Elétrica – Instituto Mauá de Tecnologia
Campus São Caetano do Sul – CEP: 09580-000 – São Caetano do Sul – SP – Brasil
rgedraite@maua.br

²Departamento de Engenharia Química – Instituto Mauá de Tecnologia
Campus São Caetano do Sul – CEP: 09580-000 – São Caetano do Sul – SP – Brasil
kunigk@maua.br

³Coordenadoria Pós-Graduação – Instituto Mauá de Tecnologia
Campus São Caetano do Sul – CEP: 09580-000 – São Caetano do Sul – SP – Brasil
andrea.esteves@siemens.com

Resumo: *Este trabalho teve por finalidade obter um modelo matemático de um trocador de calor do tipo casco e tubos usando o método da identificação não paramétrica para encontrar a função de transferência do sistema estudado. O trocador de calor foi perturbado por meio da aplicação de um degrau de amplitude conhecida na vazão de vapor de água, tendo as suas temperaturas terminais registradas. Com base nas mesmas, foram determinados os parâmetros de relevância para a obtenção do modelo matemático. O modelo obtido sugere boa representatividade do comportamento real do trocador de calor, adequada para o desenvolvimento de estudos complementares na área de controle de processos. O modelo matemático aqui obtido será migrado para uma plataforma tipicamente empregada em sistemas de controle industriais baseada em linguagem de programação orientada a objeto.*

Palavras-chave: *modelo matemático; trocador de calor; programação orientada a objeto*

1 INTRODUÇÃO

A principal justificativa para a realização deste trabalho foi a necessidade de se readequar o sistema de controle do trocador de calor feixe tubular às atividades didáticas desenvolvidas nas aulas práticas das diversas disciplinas do curso de graduação em Engenharia Química

O projeto do sistema de automação originalmente desenvolvido para este equipamento previa o emprego de um controlador e registrador pneumático de temperatura, do tipo “caixa grande”, que recebia o sinal de processo por meio de um elemento sensor de temperatura do tipo sistema termal. O controlador/registrador de temperatura era responsável por determinar o desvio entre a temperatura medida e a temperatura desejada e, em função deste, calcular a ação corretiva que se fizesse necessária. Este sinal de correção era, então, enviado a um elemento final de controle, que é uma válvula pneumaticamente operada, montado na tubulação de alimentação do vapor de água. Este vapor de água aquece a água contida no sistema intermediário de aquecimento, que por sua vez, cederá o calor necessário para se aquecer o produto alimentício, como mostrado na Figura 1.



Figura 1 – trocador de calor feixe tubular estudado

Considerando a obsolescência do equipamento de controle, originalmente instalado no trocador de calor, decidiu-se substituí-lo por um sistema de controle eletrônico que emprega tecnologia digital. Para a modernização do sistema de controle implantado foi escolhido um controlador PID que empregasse tecnologia digital e que recebesse o sinal de um elemento sensor de temperatura, do tipo Resistência Detectora de Temperatura (RTD) de Platina. O controlador foi configurado para trocar dados com um sistema de supervisão, composto por um microcomputador do tipo PC e um software supervisorio como mostrado na Figura 2.

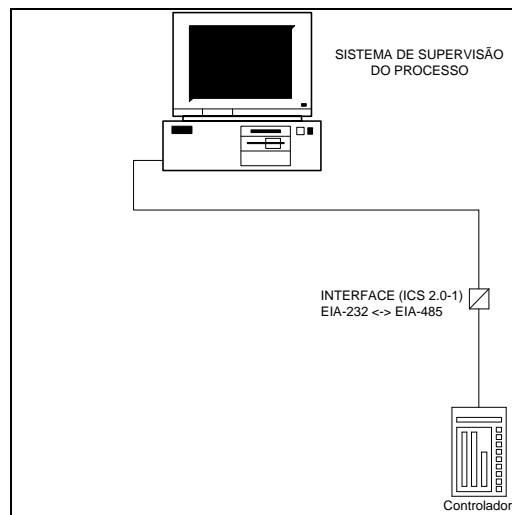


Figura 2 – Arquitetura do sistema de controle digital de temperatura.

A Interface Homem-Máquina (IHM) do novo sistema de controle de temperatura é baseada num software supervisorio desenvolvido pelos autores no aplicativo LABVIEW. Este software supervisorio permite que se opere o trocador de calor a partir do microcomputador, facultando tanto a leitura e armazenamento de dados do processo como a definição de parâmetros de sintonia para o controlador de temperatura (**GEDRAITE et al., 2001**).

O sinal de saída do controlador eletrônico de temperatura será convertido num sinal de pressão, que é enviado à válvula de controle instalada na linha de vapor de água.

2 ENSINO OU APRENDIZAGEM? O CONFLITO SEMPRE PRESENTE NO PROCESSO EDUCATIVO.

Tradicionalmente, no processo de transmissão do conhecimento teórico e/ou científico, as escolas de engenharia dão ênfase ao procedimento de ensino. Dito de outra forma, isto quer dizer que o professor é o ponto central deste processo, uma vez que ele detém o conhecimento e julga-se, portanto, capaz de incentivar o aluno a ir em busca do mesmo.

Contudo, tem-se notado cada vez mais que o aluno precisa participar de forma significativa do processo de assimilação dos conhecimentos. Este fato nos conduz a uma revisão do processo de ensino, procurando considerar cada vez mais o envolvimento do aluno no estudo de situações e/ou de casos relacionados ao cotidiano de um engenheiro químico. Tal comportamento pedagógico caracteriza uma ênfase no procedimento de aprendizagem (MASETTO, 1992).

Aprender significa modificar o comportamento, isto é, incorporar valores e conhecimentos que permitam a tomada de decisões conscientes. O ensino portanto constitui-se na atividade que mobiliza as condições necessárias para que a aprendizagem ocorra.

Os recentes avanços observados na área da Educação falam-nos das condições necessárias para que o processo de aprendizagem aconteça, sendo que entre as principais encontra-se o ensino mediado por experiências significativas. (GEDRAITE, 1998). Pode-se justificar tais afirmativas tomando-se como referência estudos desenvolvidos na área da Neurobiologia. De acordo com os mesmos, as células nervosas possuem a capacidade de modificar sua estrutura em função dos estímulos recebidos (BEATTY, 1995). No entanto, para que uma experiência seja capaz de provocar modificações plásticas nos neurônios, essa experiência precisa ser “significativa” entendendo-se por significativa a situação que se encontra inserida no campo perceptual do aluno, mobilizando seu interesse, sua atenção e seu potencial emocional. Do ponto de vista neurológico, “aprender” significa portanto, desenvolver modificações neurais que garantam as bases biológicas para as mudanças comportamentais decorrentes do processo de aprendizagem.

Sendo assim, o grande desafio pedagógico está em tornar as experiências educacionais capazes de mobilizar o potencial de aprendizagem humano. Quando o aluno percebe as relações estabelecidas entre o conteúdo ensinado e as experiências vividas, no caso as experiências pré-profissionais, estabelecem-se importantes vínculos emocionais, plenos de sentido que tornam as situações de aprendizagem dinâmicas, interessantes e profundamente significativas o que contribui de forma consistente para a consolidação da aprendizagem.

Dessa forma, a proposta de um cenário integrado em que se estabelecem vínculos significativos entre as diversas disciplinas que compõem o programa está de acordo com os mais recentes avanços da Pedagogia e tende a se constituir num importante passo para a modernização do ensino da Engenharia.

3 METODOLOGIA DE ANÁLISE E DESIGN ORIENTADA A OBJETOS PARA SISTEMAS DE AUTOMAÇÃO

A linguagem orientada a objeto não é um tema novo na área de engenharia de processo, em modelamento e simulação já se adota este tipo de linguagem a vários anos, mesmo porque quando fala-se em reações químicas, a simulação em laboratório é essencial para prever possíveis erros de projeto. Utilizando-se modelos OO (orientados a objetos) o usuário seleciona módulos de elementos padrão, que estão armazenados em uma biblioteca, fornece os detalhes e os parâmetros de operação e os conecta através de linhas ao correspondente material ou unidade, estabelece-se então o fluxo de informações como no processo real. Existem vários softwares comerciais sendo utilizados, principalmente na área de modelamento, que trazem estas bibliotecas prontas para serem utilizadas, mas nem sempre são padronizadas.

Muitos programadores desejavam descobrir uma linguagem orientada a objetos que se tornasse popular e pudesse ser utilizada em ambientes industriais. A maioria deles tinha a certeza que este tipo de linguagem ajudaria na compreensão dos modelos que estavam sendo desenvolvidos (**FOWLER, 2003**).

De um modo geral, orientação a objetos é um termo que significa organizar o software como uma coleção de objetos discretos que incorporam tanto estrutura de dados como comportamento. É um grande contraste em relação à programação atual em que as estruturas de dados e o comportamento são fracamente conectados.

A abordagem orientada a objetos propõe a decomposição do projeto em partes autônomas que colaboram entre si, os objetos. Já na Grécia antiga constatou-se que existem duas percepções diferentes do mundo real: a perspectiva de processo e a perspectiva de objetos (**BOOCH, 1994**). Os estudos de Descartes no século dezessete mostraram que a visão baseada em objetos seria mais natural do que a baseada em processo. Várias áreas como engenharia de processos, inteligência artificial e teoria do conhecimento, engenharia de sistemas e linguagens de programação passaram a referir-se ao tema e usar o novo conceito de decomposição do processo em objetos.

Diz-se que uma linguagem é orientada a objetos quando esta dispõe de mecanismos para implementar adequadamente os conceitos de objeto, classe e herança. Estes conceitos serão abordados mais a frente.

De um modo geral, pode-se dizer que um objeto é algo tangível que pode ser entendido intelectualmente, ou ainda, algo para o qual pode ser direcionado o pensamento ou a ação. Um objeto é caracterizado por seu estado, comportamento e identidade. Detalhando esta conceituação, tem-se que o estado de um objeto agrega suas propriedades estáticas aos valores correntes de suas propriedades dinâmicas, entendendo como propriedade de um objeto uma característica que lhe seja inerente e distinta e que o difere dos outros objetos. O comportamento de um objeto é definido pelo conjunto de operações e serviços que ele se candidata a prestar no domínio que está sendo descrito. O estado de um objeto representa os resultados cumulativos de seu comportamento. E a identidade é a propriedade que distingue cada objeto dos outros, sendo a partir dela que objetos podem conter ou se referir aos outros objetos.

Tem-se ainda que um objeto é uma entidade concreta que existe no tempo e se comunica com outros objetos através do envio de mensagens de um para o outro. A entrega de uma mensagem a um objeto é concretizada através de uma chamada a um método. Uma mensagem envolve três componentes: o objeto a que se destina a mensagem, o nome da operação a ser executada (método) e os parâmetros necessários para executar a operação.

Os objetos do mundo real possuem duas características: todos eles têm um estado e um comportamento.

Os conceitos de classe e instância são também fundamentais. Uma classe representa o conjunto de objetos que compartilham estrutura e comportamento comuns. É uma abstração que representa a idéia, ou noção geral, de um conjunto de objetos similares. Adicionalmente sabe-se que, instância é a materialização de uma classe.

Portanto, métodos orientados a objetos enfatizam a construção de modelos do mundo real numa perspectiva orientada a objetos. Um método de projeto é orientado a objeto quando envolve a aplicação da decomposição orientada a objeto e o uso de notações específicas para a representação de modelos lógicos (**BOOCH, 1994**).

A aplicação de métodos orientados a objeto é chamada de Modelo de Objetos (BOOCH, 1994) e é baseada em quatro princípios fundamentais: abstração, encapsulamento, modularidade e hierarquia.

A abstração é a capacidade de focalizar o essencial, denotando as características essenciais de um objeto, características estas que permitem distingui-lo de todos os outros tipos de objetos e possibilitam, do ponto de vista do observador, estabelecer limites conceituais rígidas.

O encapsulamento é o processo de ocultar do observador todas os detalhes do objeto que não contribuam para o entendimento de suas características essenciais e tem por finalidade separar sua interface contratual da implementação.

A modularidade é o agrupamento físico de classes e objetos, que formam um conjunto independente e de fácil compreensão, reduzindo a complexidade na manutenção e podendo ser utilizado em outras partes do projeto.

A hierarquia é uma forma de ordenação de abstrações. A hierarquia organiza classes e objetos numa estrutura tipo árvore, na qual existe uma classe principal, chamada superclasse, a partir da qual outras classes, subclasses, são criadas. Estas subclasses possuem todas as características da superclasse e mais as que lhe são peculiares.

A decomposição estrutural de um processo químico é feita em três dimensões. Primeiro descreve-se o modelo do processo (diagramas de fluxo); em segundo lugar, considerando-se as informações e requisitos do modelo de processo, desenha-se o modelo físico (equipamentos elementares e unidades) e por último, baseado nos modelos de processo e físico, cria-se o modelo de procedimento, que são as receitas para execução do processo.

O **modelo de processo**, ou diagramas de fluxo, descreve na visão do engenheiro químico, o processo como um todo, indicando as diferentes subdivisões

O **modelo físico** é responsável por descrever quais entidades físicas serão necessárias para a produção e como estas estarão fisicamente interligadas.

As células de processamento são responsáveis por processar todas as informações de um ou mais processos batelada e contêm várias unidades. Dependendo da complexidade de uma unidade, esta também pode ser decomposta em outras unidades e sub-unidades. Os módulos de equipamentos de uma unidade podem ser reutilizados em outras unidades e é esta a vantagem de fazer o modelamento através de módulos de equipamentos elementares.

Os módulos de equipamentos são interligados através de portas. Uma **porta** é um local ou um equipamento físico por onde entra ou sai energia, material ou informação. Todas as conexões entre os elementos são feitos por portas.

4 CONSIDERAÇÕES SOBRE A IDENTIFICAÇÃO DE SISTEMAS

Apesar do fato da aplicabilidade do conceito da **função de transferência** ser limitada a equações diferenciais lineares invariantes no tempo, o método do modelamento matemático de sistemas industriais por meio do emprego de funções de transferência, é amplamente usado na análise e no projeto de sistemas de controle.

Pode-se afirmar que a função de transferência de um sistema é um modelo matemático do mesmo, no sentido de que constitui um método operacional de expressar a equação diferencial que relaciona a variável de saída à variável de entrada. Adicionalmente, pode-se afirmar que a função de transferência é uma propriedade intrínseca do sistema que independe da magnitude e da natureza do sinal de entrada ou função de excitação.

A função de transferência pode incluir as unidades de engenharia necessárias para relacionar o sinal de entrada ao sinal de saída; no entanto, ela não fornece qualquer informação concernente à estrutura física do sistema. Deve ser ressaltado o fato de que as funções de transferência de muitos sistemas fisicamente diferentes podem ser idênticas.

Se a função de transferência de um sistema for conhecida, a saída ou resposta pode ser estudada para várias formas de entradas com vistas ao entendimento da natureza do sistema.

Se a função de transferência de um sistema for desconhecida, ela pode ser estabelecida experimentalmente introduzindo-se sinais de entrada conhecidos e estudando-se o sinal de saída do sistema. Uma vez estabelecida a função de transferência, esta fornece uma descrição completa das características dinâmicas do sistema, tão precisas quanto aquelas obtidas a partir de sua descrição física.

GARCIA (2005) afirma que muitos dos processos podem ser representados de forma aproximada, pela combinação de quatro elementos tipicamente encontrados em processos industriais, a saber: **(i)**- ganho, **(ii)**- atraso de transporte, **(iii)**- atraso de transferência e **(iv)**- elemento integrador.

O trocador de calor estudado neste trabalho apresenta um comportamento dinâmico que sugere ser semelhante a um sistema super-amortecido de ordem 2 ou superior, que pode ser aproximado por um sistema de 1ª ordem mais tempo morto representado pela função de transferência apresentada na equação (1).

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

Na equação (1), K representa o ganho do processo, θ o atraso de transporte e τ a atraso de transferência. O atraso de transporte é incluído para considerar os elementos de ordem mais alta que são desprezados. Na Figura 3 é mostrada a curva de reação típica de processos super-amortecidos de 2ª ordem ou superior (curva com formato em “S”).

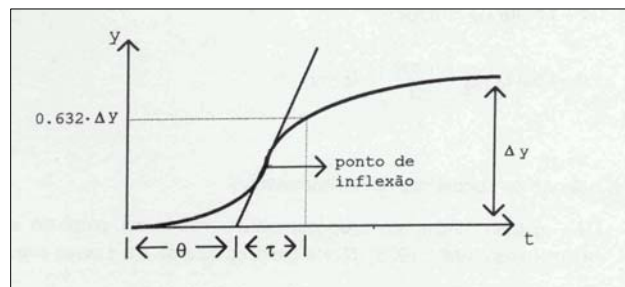


Figura 3 – Obtenção experimental dos parâmetros θ e τ a partir da curva de reação do processo

O valor do ganho K pode ser obtido dividindo-se a amplitude Δy da variação da saída do processo pela amplitude A do degrau aplicado, como apresentado na equação (2).

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{y_{\infty}}{A} \quad (2)$$

Na equação (2), Δx representa a variação da entrada do processo e y_∞ a amplitude da variação do sinal na saída quando $t \rightarrow \infty$ $\left[y_\infty = \lim_{t \rightarrow \infty} y(t) \right]$.

Existem diversos métodos de se determinar os parâmetros θ e τ do modelo representado por um sistema de 1ª ordem mais tempo morto. A teoria clássica de controle propõe traçar uma tangente através do ponto de inflexão da curva de resposta do processo. Essa tangente deveria ser traçada desde o valor estacionário do processo antes de ocorrer a perturbação até o novo valor estacionário.

O atraso de transporte θ corresponde ao tempo entre o instante de aplicação do degrau até o ponto em que a tangente traçada encontra com o valor original do regime estacionário do processo antes da perturbação em degrau.

O instante de tempo em que a tangente cruza com a linha que representa o valor estacionário da resposta após a aplicação do degrau representa o valor $\theta + \tau$. A constante de tempo τ corresponde ao intervalo de tempo entre os instantes em que a tangente traçada se encontra tanto com o valor original do regime estacionário do processo quanto com o novo valor do regime estacionário do mesmo.

Contudo, a linha tangente é difícil de ser traçada com precisão na maioria dos casos práticos. Uma alternativa, que é proposta neste trabalho consiste em determinar θ e τ a partir de dois pontos na curva de reação do processo. A solução analítica para a resposta ao degrau de amplitude A de um sistema de 1ª ordem + atraso de transporte é apresentada na equação (3).

$$y(t) = A \left[1 - e^{-\frac{t-\theta}{\tau}} \right] \quad (t > 0) \quad (3)$$

Assumindo que se calcule $y(t)$ em dois instantes de tempo, por exemplo $t = \theta + \tau/3$ e $t = \theta + \tau$ obtém-se os valores apresentados na equações (4) e (5).

$$y\left(\theta + \frac{\tau}{3}\right) = 0,284 \cdot \Delta y \quad (4)$$

$$y(\theta + \tau) = 0,632 \cdot \Delta y \quad (5)$$

Esse dois pontos foram selecionados arbitrariamente e outros poderiam certamente ter sido usados.

Os tempos em que a resposta atinge 28,4% e 63,2% de seu valor final podem ser obtidos a partir da curva de reação do processo e são apresentados nas equações (6) e (7).

$$t_{0,284} = \theta + \frac{\tau}{3} \quad (6)$$

$$t_{0,632} = \theta + \tau \quad (7)$$

A solução desse sistema de duas equações fornece os valores de θ e de τ , conforme apresentado nas equações (8) e (9).

$$\tau = 1,5 \cdot (t_{0,632} - t_{0,284}) \quad (8)$$

$$\theta = 1,5 \cdot \left(t_{0,284} - \frac{t_{0,632}}{3} \right) = t_{0,632} - \tau \quad (9)$$

5 MATERIAIS & MÉTODOS

5.1 Materiais utilizados

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais e equipamentos:

- trocador de calor casco e tubos existente na instalação piloto da Escola;
- controlador-indicador microprocessado de temperatura, com capacidade de comunicação com microcomputador do tipo PC;
- elemento sensor de temperatura do tipo Pt 100Ω;
- transdutor de sinal de corrente contínua para pressão;
- microcomputador PENTIUM 166MR, equipado com 128 kB de memória RAM; e
- software supervisor LABVIEW para a coleta de dados e posterior apresentação do valor de temperatura lida na tela do microcomputador.

5.2 Metodologia empregada

Inicialmente o trocador de calor foi posto em operação, esperando-se o tempo necessário para que as temperaturas terminais não apresentassem variações significativas. Para atingir esta meta a malha de controle de temperatura foi colocada em modo automático. A partir do momento que foi estabelecida a condição de regime permanente, o controlador foi colocado no modo de operação manual e foi aplicado um degrau na vazão de vapor de água de aquecimento, de amplitude igual a 50%, como mostrado na figura 4.

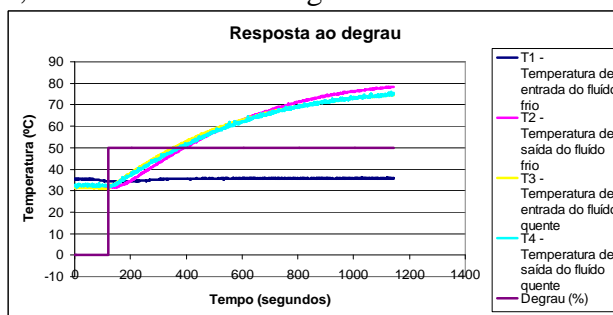


Figura 4 – Resposta das temperaturas terminais do trocador ao degrau aplicado à vazão de vapor de aquecimento.

A figura 4 apresenta, também, a evolução temporal das temperaturas terminais do trocador de calor em resposta ao degrau aplicado.

Com base na metodologia proposta neste trabalho e também nas respostas das temperaturas terminais ao degrau aplicado, o comportamento do trocador de calor em estudo foi definido como apresentando uma dinâmica de um sistema de 2ª ordem ou superior e aproximado por modelo de 1ª ordem com atraso de transporte. Os três parâmetros fundamentais para a caracterização do modelo – ganho, atraso de transferência e atraso de transporte – foram obtidos com base no método proposto.

6 RESULTADOS OBTIDOS

O resultado final deste trabalho encontra-se apresentado na figura 5, onde são mostradas as temperaturas real e calculada com base no modelo proposto, para o bocal de saída do fluido frio.

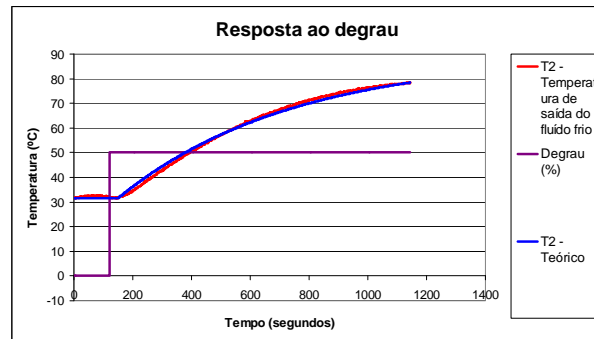


Figura 5 – Resposta do modelo ajustado para as temperaturas terminais do trocador ao degrau aplicado à vazão de vapor de aquecimento.

O modelo aproximado deste processo apresenta os seguintes valores de parâmetros a serem usados na função de transferência: $K = 1,15^{\circ}\text{C}/\%$, $\tau = 590 \text{ s}$ e $\theta = 30 \text{ s}$. A função de transferência do modelo é apresentada na equação (10).

$$\frac{T_{saída}(s)}{Q_{vapor}(s)} = \frac{Kp * e^{-\theta * s}}{1 + \tau * s} = \frac{1,15 * e^{-590 * s}}{1 + 30 * s} \frac{^{\circ}\text{C}}{\%} \quad (10)$$

7 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, pode-se perceber que a resposta temporal da temperatura simulada com o modelo obtido apresentou comportamento bastante próximo daquele medido experimentalmente.

O modelo desenvolvido segundo esta metodologia pode ser utilizado para aplicações na área de controle de processo pois as diferenças verificadas entre o valor real e o valor calculado por simulação computacional podem ser consideradas desprezíveis.

O modelo simplificado obtido é adequado para uso em sistemas de controle que envolvam a linguagem de programação orientada a objeto em função da sua simplicidade e facilidade de implementação. Este trabalho poderá ser complementado realizando-se o desenvolvimento do modelo analítico, a parâmetros concentrados, e comparando-se os resultados obtidos na simulação com este contra aqueles obtidos com o modelo proposto neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BEATTY, J. **Principles of behavioral neuroscience**. California, Brown & Benchmark publishers: 1995.

BOOCH, Grady, **Object-Oriented Analysis and Design with Applications**, Addison Wesley, 1994

FOWLER, Martin. **UML Distilled: A Brief Guide to the Standard Object Modeling Language**. 3.ed. Addison Wesley Professional, 2003

GARCIA, C. **Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Dinâmicos**. 2005. EDUSP, São Paulo.

GARCIA, C. **Controle Processos Industriais I**. Notas de Aula. São Caetano do Sul: IMT, 2005.

GEDRAITE, M.C.S. **Neurociência aplicada à educação**. Faculdade de Educação da Universidade de São Paulo, 1998, mimeografado.

GEDRAITE, R.; NAVARRO, A.; COSTA, A. L. G.; GENARO, F.; KOGA, F.; OLIVEIRA, M. T.; QUATO, R. **Desenvolvimento de controlador de temperatura PID aplicado a trocador de calor casco e tubos**. *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica*: Ouro Preto, 2001

MASETTO, M. T. **Aulas Vivas**. MG Editores Associados Ltda. São Paulo, 1992. 2ª Edição.

APPROXIMATELY IDENTIFICATION OF SHELL AND TUBES HEAT EXCHANGER DYNAMICS USING NON PARAMETRIC TECHNIQUES FOR SYSTEM IDENTIFICATION

***Abstract:** This paper presents a shell and tube heat exchanger mathematical model using the non parametric method of system identification to find the transfer function of the studied system. The heat exchanger was disturbed with the application of a step change in the steam flow rate and the terminal temperatures were recorded. All of the model parameters were determined from those process responses. The obtained model adequately represents the real dynamics of the heat exchanger for process control purposes.*

***Key-words:** mathematical model, heat exchanger, object oriented programming*