



## X Congresso Brasileiro de Engenharia Química Iniciação Científica

*"Influência da pesquisa em Engenharia Química no desenvolvimento tecnológico e industrial brasileiro"*

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro  
Universidade Severino Sombra  
Vassouras – RJ – Brasil

### CONTRIBUIÇÃO AO PROJETO DE CONTROLE DE UM TROCADOR DE CALOR FEIXE TUBULAR APLICADO EM UM PROCESSO DE LIMPEZA CIP

BICALHO<sup>\*1</sup>, B. P.; TANNER<sup>\*2</sup>, S. P.; GEDRAITE<sup>3</sup>, R.

<sup>1,2</sup>Aluno da FEQ/UFU    <sup>3</sup>Professor da FEQ/UFU

Faculdade de Engenharia Química - Universidade Federal de Uberlândia  
Endereço – UFU, Av. João Naves de Ávila, 212, Uberlândia, CEP .38.408-100, MG,  
email: rgedraite@feq.ufu.br

**RESUMO** - A indústria de alimentos realiza a limpeza de seus equipamentos utilizando procedimentos automatizados, também conhecidos como higienização *clean-in-place* ou simplesmente CIP. É um sistema que requer maior conhecimento do processo através da utilização de sensores e válvulas para avaliar e controlar vazão, temperatura, concentração e a presença de resíduos, tanto do produto processado, como dos agentes de higienização que circulam pelo interior dos equipamentos. Caso o processo de higienização pelo sistema CIP seja bem conduzido, consegue-se também reduzir o consumo de água e de energia térmica utilizada para aquecer as soluções de limpeza e o enxágue. Neste trabalho foi estudado o trocador de calor usado por Melero Jr. (2011), contemplando o desenvolvimento de modelo matemático simplificado a parâmetros concentrados para representar o comportamento da temperatura do trocador durante a remoção dos resíduos de detergente ao longo da etapa de enxágue. O modelo matemático considerado foi empregado para testar o sistema de controle de temperatura do equipamento, permitindo o ajuste dos parâmetros de sintonia do controlador de temperatura mais adequados para o processo.

**Palavras chave:** trocador de calor, identificação de processos, sintonia de controladores.

### INTRODUÇÃO

O processo de limpeza de equipamentos da indústria química vem recebendo maior atenção a cada dia que passa. Uma das principais razões para este comportamento reside no fato de que significativa quantidade de insumos, tais como água de enxágue, energia elétrica e produtos químicos são gastos nestes processos (Bansal & Chen, 2006).

O sistema de limpeza CIP, Cleaning in Place, possibilita a higienização das partes e peças de uma instalação de produção em uma indústria, sem a necessidade de desmontagem destes equipamentos e tubulações, por meio da solução química em circulação. Os sistemas CIP são compostos basicamente por bombas e tubulações de avanço e retorno, além dos dispositivos aspersores de solução química. O dimensionamento do sistema é amparado nas equações e teorias da mecânica dos fluidos e a

\*Bolsista CNPq/UFU

seleção de materiais dos componentes do sistema é realizada através de características desejadas, sobretudo da corrosão desses materiais (Bird & Barlett, 2005).

A busca pelo aumento de produtividade e redução de custos com a higienização possibilitou o desenvolvimento da higienização CIP.

O CIP geralmente é aplicado em locais onde a limpeza manual não pode ser realizada facilmente. Em determinados casos a desmontagem dos equipamentos se torna inviável, pois se necessita de um tempo maior para higienização, ou seja, parada de produção.

Os principais equipamentos higienizados pelo CIP são: silos, tanques, tubulações, equipamentos de processamento de bebidas e alimentos, engarrafadoras de bebidas, cozinhadores, trocadores de calor, centrífugas, concentradores, entre outros.

O primeiro passo de uma higienização CIP é a preparação das soluções de produtos de limpeza que são armazenadas em tanques adequados. Estes produtos são colocados para circular através de bomba centrífuga. A bomba induz o escoamento do fluido pelo interior das tubulações e dos equipamentos do processo em consideração. Os contatos dos produtos tipicamente empregados em sistemas CIP com os resíduos, e mesmo com eventual produto de contaminação, somados aos fatores mecânicos e térmicos causam degradação das substâncias indesejadas em um determinado período de tempo de atuação.

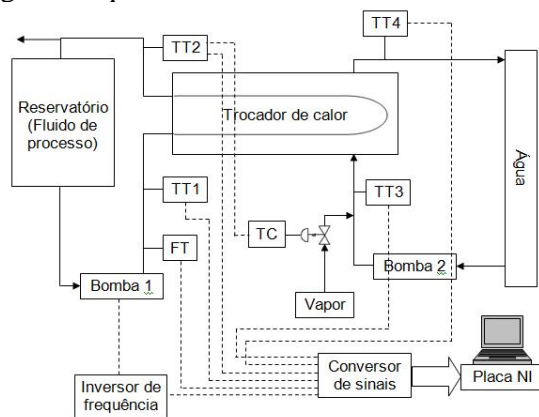
A principal vantagem do sistema CIP é que não há desmontagem dos equipamentos de uma linha produtiva, permitindo assim a minimização do tempo de inatividade de produção, operação mais segura e, também, diminuição do consumo de água potável para limpeza dos equipamentos industriais. Foi constatado que o uso de sistemas de limpeza CIP (*cleaning in place*) permitiu uma redução de quase 70% do volume de água necessário (Carlotti Filho, 2008; Gedraite *et al*, 2010).

As principais desvantagens são: a presença de áreas mortas sem agitação da solução, interrupção total em caso de mau funcionamento, dificuldade de diagnosticar problema, necessidade de mão de obra qualificada.

Neste trabalho foi estudado o trocador de calor usado em trabalho experimental desenvolvido por Melero Jr. (2011), contemplando a determinação da propriedade de transporte de calor, coeficiente global de transporte de calor, com base nos dados experimentais coletados e também com base nos dados disponíveis na literatura. Adicionalmente, foi desenvolvido o modelo matemático simplificado a parâmetros concentrados para representar o comportamento da temperatura do trocador.

## MATERIAIS & MÉTODOS

O sistema utilizado para os testes experimentais desenvolvidos por Melero Jr. (2011) é apresentado no fluxograma da Figura 1. Ele é composto basicamente pelos seguintes elementos: (i)- tanque principal em aço inox com capacidade para 250 L, (ii)- trocador de calor do tipo casco e tubos em aço inox, (iii)- bomba de deslocamento positivo para movimentação do produto alimentício, (iv)- bomba centrífuga para a movimentação do agente de aquecimento e (v)- reservatório cilíndrico vertical para armazenamento da água de aquecimento.



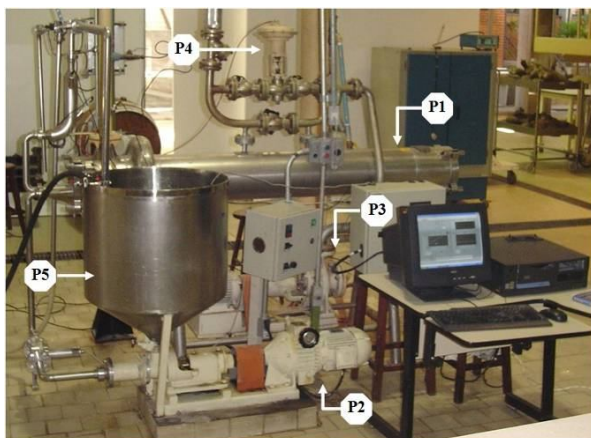
**Figura 1 – Fluxograma de processo e instrumentação do sistema estudado**

Melero Jr. (2011) submeteu o trocador de calor à operação com leite e posteriormente efetuou a limpeza do mesmo por meio do emprego de solução de hidróxido de sódio a 0,5% em massa, o qual atua como detergente neste processo. Na sequência, o trocador de calor foi lavado com água de enxágue para remoção dos resíduos de soda cáustica.

A concentração residual de hidróxido de sódio presente na água de enxágue usada foi medida experimentalmente por meio de um medidor de pH de laboratório, adaptado para medição em tempo real. As temperaturas terminais do trocador de calor foram medidas por meio de elementos sensores de temperatura do tipo resistência de Platina (Pt 100) e a vazão foi determinada por meio de um medidor de vazão de engrenagens ovais.

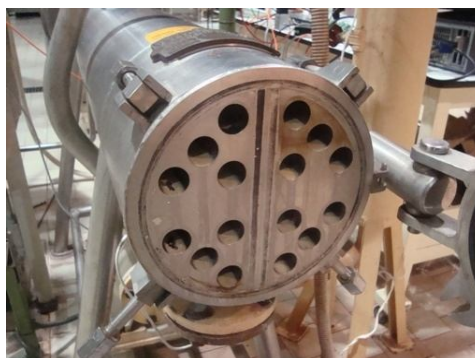
Os resultados obtidos com a medição do pH, das temperaturas terminais do trocador de calor e da vazão de produto ao longo do tempo foram coletados eletronicamente por meio de um sistema de aquisição de dados utilizando o aplicativo Labview®.

A Figura 2 mostra a facilidade experimental utilizada por Melero Jr (2011). O funcionamento do trocador de calor (P1) consiste no escoamento do fluido de processo, alimentado no estado líquido, feita a partir do tanque intermediário (P5). O fluido de processo é introduzido no lado dos tubos do trocador de calor, conforme apresentado na Figura 3.

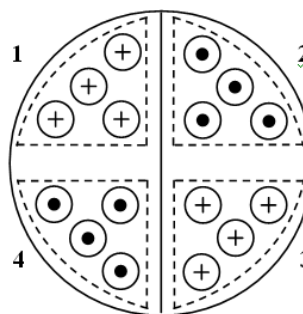


**Figura 2 - Trocador de calor tipo feixe tubular estudado**

O feixe tubular contempla 4 passagens pelo lado dos tubos, conforme esquematizado na Figura 4. Nos tubos, o fluido de processo escoar inicialmente pela seção 1, em seguida segue pela seção 2 e assim sucessivamente pelas seções 3 e 4. Por meio do emprego de válvulas manuais, o fluxo do fluido de processo na saída do feixe tubular do trocador de calor pode ser desviado para o reservatório de entrada ou para duas saídas de descarte.



**Figura 3 – Espelho do trocador de calor estudado**



**Figura 4 – Representação do número de passagens do fluido pelo lado dos tubos**

O deslocamento do fluido de processo nos tubos internos do trocador de calor é promovido por uma bomba de deslocamento positivo (P2) mostrada na Figura 2. A vazão do fluido através da bomba é ajustada por meio de um inversor de frequência.

O aquecimento do trocador de calor é realizado com água quente que circula por sua carcaça. A água de aquecimento é aquecida por meio de vapor de água saturado, alimentado diretamente no circuito fechado de aquecimento. A água quente é feita escoar pela bomba centrífuga (P3) mostrada na Figura 2, com acionamento tipo liga/desliga.

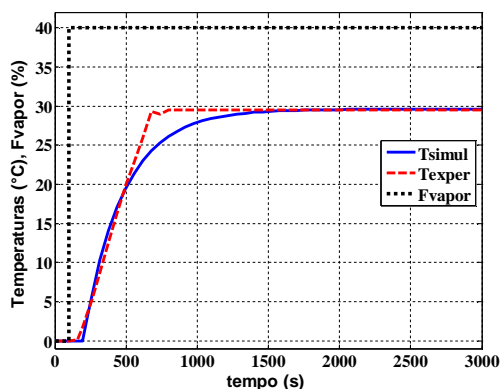
O controle da temperatura de saída do fluido de processo, do lado dos tubos, é feito por meio do ajuste da vazão de vapor de aquecimento, utilizando-se a válvula de controle pneumática (P4). Na Figura 5 é apresentada a válvula de controle utilizada.

Melero Jr. (2011) realizou ensaios para a obtenção dos parâmetros do processo referentes à resposta da planta às alterações na temperatura de operação do equipamento.



**Figura 5 – Válvula de controle pneumática**

No ensaio realizado, cuja resposta temporal é ilustrada na Figura 6, Melero Jr. (2011) utilizou a vazão constante de 9,0 L/min. Partiu-se da condição em que a temperatura de saída da água de enxágue era igual a 50 °C, aplicou-se uma variação brusca do tipo degrau no sinal de saída do controlador de temperatura – em modo manual – o que provocou a abertura da válvula de vapor em 40 % no instante 100 s. As análises para obtenção dos parâmetros do processo foram realizadas tomando-se por base o degrau aplicado. A resposta do processo ao degrau aplicado na vazão de vapor de água saturado apresentada na Figura 6 está expressa na forma de variáveis-desvio.



**Figura 6 – Degrau na vazão de vapor e resposta da temperatura sem controle**

Os parâmetros do processo,  $K_p$  (ganho),  $\tau_p$  (constante de tempo) e  $\theta_p$  (atraso de transporte), foram calculados segundo o método proposto por Smith (1972) e por Garcia (2005). A função de transferência obtida é apresentada na Equação (1).

$$G(s) = \frac{0,74 \cdot e^{-200s}}{280 \cdot s + 1} \quad (1)$$

Utilizando os parâmetros do processo obtidos ( $K_p$ ,  $\tau_p$  e  $\theta_p$ ), foram empregados vários métodos para sintonia de controladores propostos em Campos e Teixeira (2007), sendo eles: ZN - Ziegler & Nichols, CC - Cohen & Coon e ITAE - Integral do Módulo do Erro vezes o Tempo por Lopez (Miller *et al*, 1967). Os parâmetros de sintonia do controlador de temperatura com modos de controle PID foram calculados e são apresentados na Tabela 1. Foi considerado que  $K_c$  é o ganho proporcional e  $T_i$  o tempo integral e  $T_d$  o tempo derivativo. O algoritmo do PID considerado foi o ideal, cuja função de transferência é apresentada na Equação (2).

$$G_c(s) = \left( K_c + \frac{K_c}{T_i} \cdot \frac{1}{s} + s \cdot T_d \right) \cdot e(s) \quad (2)$$

O critério utilizado para escolher os valores mais adequados dos parâmetros de sintonia foi o ISE – *Integrated Square Error*. Neste critério, o desvio entre o valor medido e o *set-point* é elevado ao quadrado e integrado ao longo do tempo (McMillan, 1994).

**Tabela 1 – Valores dos parâmetros de sintonia do controlador de temperatura**

Método	$K_c$	$T_i$	$T_d$
ZN	4,54	200	50
CC	5,45	218,78	3473,94
ITAE-Lopez	4,86	155,54	38,30

## RESULTADOS OBTIDOS & DISCUSSÃO

A partir dos parâmetros de sintonia ajustados para o controlador de temperatura considerado, foram executadas simulações computacionais, usando o aplicativo Simulink®.

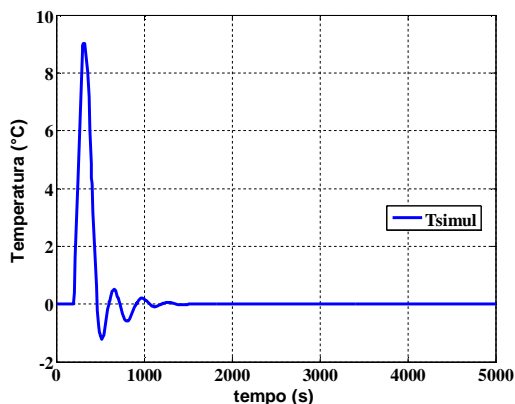
Os valores de ISE calculados com base no aplicativo Simulink® são apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2 – Valores calculados para ISE**

Método	ISE
ZN	-1,476E77
CC	9.46E155
ITAE-Lopez	1,682E-9



Na Figura 7 é apresentada a resposta do controlador ao degrau imposto na abertura da válvula de vapor. O melhor ajuste para os parâmetros de sintonia do controlador de temperatura foi obtido com o emprego do método ITAE-Lopez, o qual apresentou o menor valor de *ISE*.



**Figura 7 – Resposta da temperatura à ação do controlador com modos PID**

Os valores de  $K_c$  calculados pelos métodos de ZN e de ITAE-Lopez são significativamente próximos entre si, enquanto que aquele calculado por CC é aproximadamente 15 % maior do que os anteriores. Este fato pode levar o controlador a apresentar comportamento instável.

Os valores de  $T_i$  calculados pelos métodos de ZN e de CC são significativamente próximos entre si, enquanto que aquele calculado por ITAE-Lopez é aproximadamente 25 % menor do que os anteriores. Valores de  $T_i$  menores tendem a contribuir de maneira mais efetiva para o retorno da variável controlada ao *set-point*.

Os valores de  $T_d$  calculados pelos métodos de ZN e de ITAE-Lopez são significativamente próximos entre si, enquanto que aquele calculado por CC é aproximadamente 6.947 % maior do que os anteriores. Valores de  $T_d$  maiores tendem a contribuir de maneira mais efetiva para o retorno da variável controlada ao *set-point*.

A variação máxima da temperatura de saída do trocador de calor foi de aproximadamente 9 °C em relação ao valor

correspondente ao estado estacionário inicial e foi verificada entre os instantes 300 s e 350 s.

O tempo de acomodação da resposta do controlador foi de aproximadamente 1650 s, o qual pode ser considerado aceitável para um trocador de calor de uso semi-industrial, como o empregado neste trabalho.

## CONCLUSÕES

O trocador de calor estudado foi modelado matematicamente com sucesso, com base na identificação semi-empírica da sua função de transferência, a partir da curva de reação do processo. O modelo matemático simplificado obtido representou adequadamente o comportamento da temperatura do trocador durante a remoção dos resíduos de detergente ao longo da etapa de enxágue. O modelo matemático considerado foi empregado para testar o sistema de controle de temperatura do equipamento, permitindo o ajuste dos parâmetros de sintonia do controlador de temperatura mais adequados para o funcionamento satisfatório do processo.

## REFERÊNCIAS

- BANSAL, B.; CHEN, X. D. 2006. 'A critical review of milk fouling in heat exchangers'. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, v. 5, n. 2, p. 27-33.
- BIRD, M. R.; BARLETT, M. 2005. CIP optimization for the food industry: Relationships between detergent concentration, temperature and cleaning time. Institution of Chemical Engineers.
- CAMPOS, M. C. M. M; TEIXEIRA, H. C. G. 2007. *Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais*. Ed. Edgard Blücher, São Paulo.
- CARLOTTI FILHO, M. A. C. (2008), Estudo da cinética de remoção de resíduos de cálcio e de detergente alcalino nas etapas de pré-lavagem e de enxágue em um trocador de calor de placas. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul – (Dissertação de Mestrado).
- GARCIA, C. 2005. *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas*

- Eletromecânicos. EDUSP, São Paulo – SP, 678p.
- GEDRAITE, R.; KUNIGK, L.; RIBEIRO, S.; MELERO JR., V.; VASCONCELOS, F.; SISLIAN, R. (2010). Experimental investigation about the milk protein based deposit removal kinetics. World congress on communication and arts, WCCA, Guimarães – Portugal.
- McMILLAN, G. K. Tuning and control loop performance. 3<sup>rd</sup> ed., Research Triangle Park, NC, ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 1994.
- MELERO Jr., V. 2011. ‘Instrumentação e identificação de um processo de sanitização cinética CIP’. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia, São Caetano do Sul – (Dissertação de Mestrado).
- MILLER, J. R. MILLER, J. A.; LOPEZ, A. M.; SMITH, C. L.; MURRILL, P. W. 1967. A comparison of controller tuning techniques. Control Engineering, vol. 14, nº 12, pp. 72.
- SMITH, C. L. 1972. Modeling and simulation in the process industries. National computer conference and exposition Publisher. Department of Chemical Engineering. Louisiana State University, Baton Rouge. Louisiana.

### **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à UFU, CNPq e Fapemig (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelos recursos concedidos no projeto Fapemig Nº TEC-APQ-02100-12 (Estudo da Otimização de Sistema de Limpeza CIP).