

# INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL DA CINÉTICA DE REMOÇÃO DE DEPÓSITOS DE PROTEÍNA DE LEITE USANDO REATOR TIPO TANQUE AGITADO

J. S. VIEIRA<sup>1</sup>, G. A. P. SILVA<sup>1</sup>, B. H. O. PINHEIRO<sup>1</sup>, C. A. ALVARES<sup>1</sup> e R. GEDRAITE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química  
E-mail para contato: [jessica\\_silva\\_viera@hotmail.com](mailto:jessica_silva_viera@hotmail.com)

**RESUMO** – Este trabalho teve como objetivo avaliar a cinética de remoção de depósitos à base de proteínas de leite, considerando o emprego de reator tipo tanque agitado. O estudo foi baseado na técnica de limpeza tradicionalmente empregada em sistemas de limpeza CIP da indústria, envolvendo o emprego de solução detergente alcalina. O modelo identificado ajustado representou de maneira coerente o comportamento do sistema estudado. O fato dos valores da absorvância não terem sido coletados de maneira automática não interferiu de maneira significativa no ajuste do modelo matemático, haja vista o erro quadrático integrado calculado entre o resultado fornecido pelo modelo e aqueles obtidos no experimento ter sido inferior a 0,02227. Quando comparado com o processo de remoção envolvendo o escoamento da solução detergente em contato direto com a superfície incrustada o método usado neste trabalho se mostrou mais lento.

## 1. INTRODUÇÃO

A técnica de limpeza Clean-in-Place (CIP) é amplamente utilizada na indústria de alimentos e na indústria farmacêutica, dentre outras, visando evitar a parada de produção e a desmontagem parcial ou total dos equipamentos de processamento. Sabe-se que diversas pesquisas têm sido realizadas nos últimos anos para procurar formas de melhorar o procedimento (Bansal e Chen, 2006; Bremer *et al.*, 2006). Tanto a tensão de cisalhamento aplicada quanto as reações químicas entre o fluido em escoamento e os depósitos formados são importantes na remoção de incrustações. A indústria de laticínios sofre com problemas específicos associados com a limpeza de equipamentos de processo, incluindo trocadores de calor (Georgiadis *et al.*, 1998). Atualmente, o procedimento de limpeza envolve a lavagem do equipamento com solução detergente alcalina a fim de remover adequadamente os resíduos e incrustações que tendem a favorecer a contaminação. Depois de terminada a limpeza, o equipamento de processo deve ser enxaguado criteriosamente para remover todos os vestígios dos agentes de limpeza.

Este trabalho apresenta o resultado experimental da cinética de remoção de resíduos de leite em seção de testes, conduzida em reator de mistura com agitação, e respectivo modelo matemático, representativo da etapa de limpeza alcalina tipicamente utilizada em sistemas de limpeza CIP na indústria alimentícia.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os experimentos foram conduzidos usando o sistema apresentado na Figura 1, consistindo de um béquer de 1L e respectivo sistema de agitação com rotação ajustável. Para este trabalho foi utilizada a rotação de 400 rpm. Esse motor é o responsável por aplicar um sinal no sistema, nesse caso, um degrau unitário, quando acionado a partir do repouso. A partir das respostas obtidas com esse sinal, foram identificados modelos aproximados, de baixa ordem, que descrevem o comportamento dinâmico do processo de remoção dos resíduos.

A superfície usada para os testes de remoção de resíduos foi uma placa em aço inoxidável, de dimensões aproximadas de 8 x 8 cm. O processo de incrustação foi realizado a partir do aquecimento da placa submersa em leite de vaca comprado em supermercado. Pegou-se a placa de inox inicialmente limpa e mergulhou-se a mesma em 200 mL de leite puro em um Becker de 2 litros. Levou-se este mesmo Becker já com a placa e o leite em banho-maria a uma temperatura de 60°C por 40 minutos. Ao fim do aquecimento, observou-se visualmente que uma camada de leite incrustado havia sido formada nas faces da placa. Feito isto, retirou-se a placa cuidadosamente do béquer e levou-se a mesma à estufa, por aproximadamente 24 horas.

O passo seguinte consistiu na limpeza da placa incrustada, a partir do processo CIP proposto neste trabalho, denominado CIP estático. A solução detergente alcalina utilizada foi obtida pela dissolução de hidróxido de sódio em água, na concentração de 0,5% em massa. Foi preparado 1L da mesma no dia em que os testes foram realizados. A placa foi submersa no interior do béquer, na temperatura ambiente, e ajustada à rotação constante de 400 rpm no agitador. Iniciado o processo de remoção dos resíduos de leite, foram retiradas amostras de aproximadamente 3 a 4 mL da solução, de minuto em minuto, para que as mesmas pudessem ser analisadas no espectrofotômetro UV, utilizando o comprimento de onda de 500 nm.

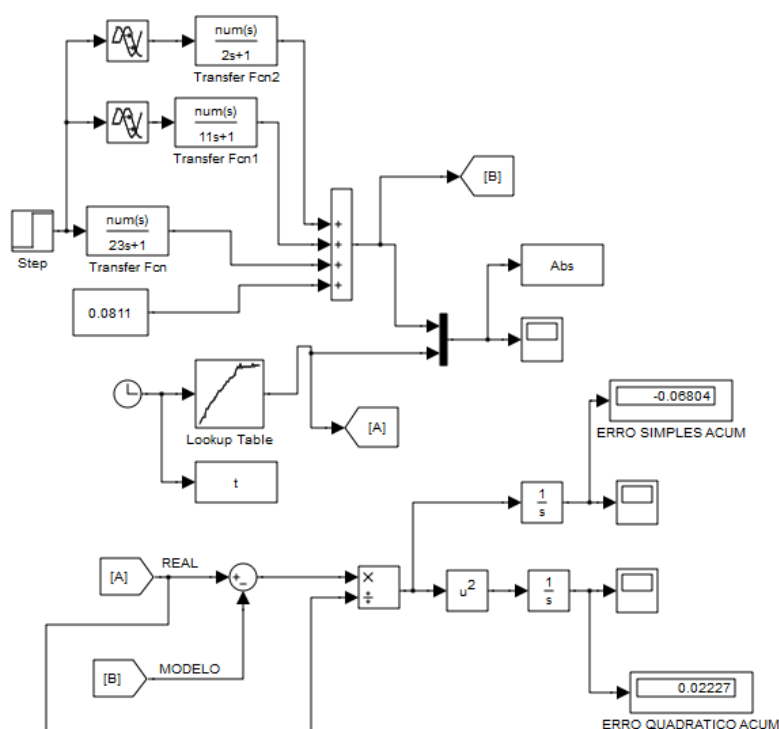
Figura 1 – Protótipo de sistema CIP estudado



Os modelos semi-empíricos identificados (Gormezano, 2007; Reis *et al*, 2012) foram utilizados como ponto de partida para a análise dos dados experimentais obtidos. Neste trabalho os modelos identificados levaram também em consideração o comportamento de variação contínua e gradual de aumento da concentração de resíduo solubilizado ao longo do tempo, para o processo conduzido com o escoamento da solução detergente através dos tubos de trocador de calor de feixe tubular.

O sistema foi modelado com base em função de transferência do tipo primeira ordem com tempo morto (FOPDT, em inglês). Eles foram simulados no ambiente Simulink® do aplicativo Matlab® e os resultados obtidos comparados com os dados experimentais coletados. A Figura 2 apresenta um diagrama de simulação típico utilizado nas análises desenvolvidas neste trabalho.

Figura 2 – Diagrama de simulação do processo estudado



### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

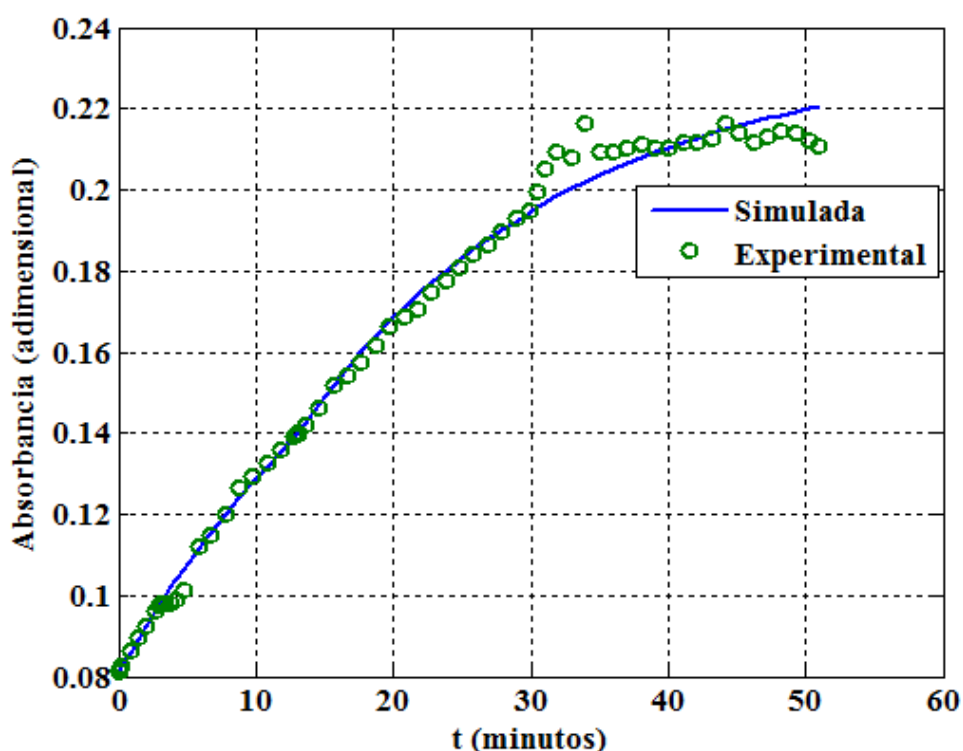
Na Figura 3 são apresentados os comportamentos experimental e simulado no aplicativo Matlab/Simulink® para o experimento realizado. Os parâmetros dos modelos identificados do

tipo FOPDT são apresentados na Tabela 1, e foram obtidos com base no método proposto por Sundaresan e Krishnaswamy (1978).

Tabela 1 – Parâmetros dos modelos FOPDT identificados

Ganho (absorbância/rpm)	Atraso de Transferência (min.)	Atraso de Transporte (min.)
3,3867825E-04	23	0
4,648525E-05	11	13
1,6601875E-06	2	30

Figura 3 - Comportamentos experimental e simulado para o experimento



O critério utilizado para avaliar o grau de ajuste dos modelos empíricos aos dados experimentais correspondentes foi o ISE – Integrated Square Error (Erro Quadrático Integrado), tipicamente empregado para avaliar o desempenho de malhas de controle industriais, o qual apresenta a característica de penalizar mais fortemente os grandes erros (Garcia, 2005; Ogata, 2000).

O valor correspondente ao erro quadrático integrado entre os valores experimentais e os respectivos valores simulados, obtido de maneira iterativa, usado como critério para o ajuste do modelo identificado neste trabalho foi igual a 0,02227 ou 2,23%.

#### **4. CONCLUSÕES**

Considerando os resultados obtidos no experimento, pode-se concluir que o emprego da remoção dos resíduos em reator do tipo tanque agitado apresentou atraso de transferência significativamente maior do que aquele verificado em sistemas com escoamento da solução através da superfície a ser limpa.

O atraso de transferência para o sistema estudado neste trabalho foi aproximadamente igual a 780 segundos, ao passo que em sistemas envolvendo escoamento da solução de detergente alcalino, este valor é reduzido para aproximadamente 60 segundos. Esta constatação confirma a importância da turbulência provocada pelo fluido em escoamento na remoção da camada de resíduos depositada sobre a superfície.

#### **4. AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à UFU e à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelos recursos concedidos e apoio em pesquisas nos projeto N° TEC-APQ-02100-12 (Estudo da Otimização de Sistema de Limpeza CIP).

#### **5. REFERÊNCIAS**

- BANSAL, B., CHEN, X. D. 2006. *A Critical Review of Milk Fouling in Heat Exchangers. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Institute of Food Technologists. (5): p. 27 – 33, 2006.
- BREMER, P.J., FILLERY, S. & McQUILLAN, A. J. Laboratory scale Clean-In-Place (CIP) studies on the effectiveness of different caustic and acid wash steps on the removal of dairy biofilms. *International Journal of Food Microbiology*, v.106 , p. 254 – 262, 2006.
- CHEN, X. D., ÖZKAN, N., QIN, F., XIN, H. & LIN, L. *An Effective CIP Procedure for Removing Dairy Protein Based Deposit – A Laboratory Investigation*. 2003 ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications. New Mexico, USA.
- GARCIA, C. *Modelagem e Simulação de Processos Industriais e de Sistemas Dinâmicos*. 2005. EDUSP, São Paulo.
- GEORGIADIS, M. C., ROTSTEIN, G. E. & MACCHIETTO, S. 1998. Modeling and Simulation of Shell and Tube Heat Exchangers under Milk Fouling. *AIChE Journal*. Vol. 44, No. 4: 959 – 971.
- GORMEZANO, L. 2007. *Desenvolvimento e implementação de sistema para avaliar a cinética de remoção de resíduos presentes nos tubos de trocador de calor feixe tubular*.

Dissertação (Mestrado). São Caetano do Sul. Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia.

OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 3ª edição, 2000.

REIS, A. P. P., NEIRO, S. M. da S., COUTINHO FILHO, U., KUNIGK, L. E GEDRAITE, R. ” Contribuição ao estudo da cinética da remoção de resíduos na etapa de enxágue do processo de limpeza CIP visando a minimização de gastos com insumos: Ajuste de modelos aos dados experimentais relacionados à variação de pH com a vazão”. In: Anais do XVII Jornada em Engenharia Química, Uberlândia/MG, 2012.

SUNDARESAN, K.R. e KRISHNASWAMY, P.R. Estimation of time delay, time constant parameters in time, frequency and Laplace domains. The Canadian Journal of Chemical Engineering. 1978, Vol. 56, 2, pp. 257-62