

ESTUDO DE SISTEMA DE CONTROLE DE VAZÃO DE ÁGUA DE ENXÁGUE COM SET-POINT VARIÁVEL SOBRE A CINÉTICA DE REMOÇÃO DE RESÍDUOS DE SOLUÇÃO DETERGENTE ALCALINA EM TROCADOR DE CALOR FEIXE TUBULAR

V. G. SOUSA¹, L. dos R. A. CARNEIRO¹, L. KUNIGK², V. L. CARDOSO¹ e
R. GEDRAITE¹

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química

² Centro Universitário do IMT, Departamento de Engenharia Química e de Alimentos

RESUMO – Este artigo apresenta uma contribuição acerca da investigação sobre o emprego de vazões variáveis de água de enxágue na cinética de remoção de resíduos de solução detergente alcalina em trocador de calor feixe tubular. O estudo foi baseado na técnica de limpeza tradicionalmente empregada em sistemas de limpeza CIP da indústria. O modelo do processo foi implementado no aplicativo simulink® do matlab®. O emprego de vazões variáveis se mostrou eficaz na remoção dos resíduos, além de economizar água de enxágue contribuindo para minimizar o volume total de água utilizado no processo. Foi constatada uma economia da ordem de 3% no volume de água gasto.

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 de problemas específicos associados com a limpeza de equipamentos de processo, incluindo trocadores de calor (Georgiadis *et al.*, 1998). Presentemente, o procedimento de limpeza envolve a lavagem do maquinário com solução detergente diluída, 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.

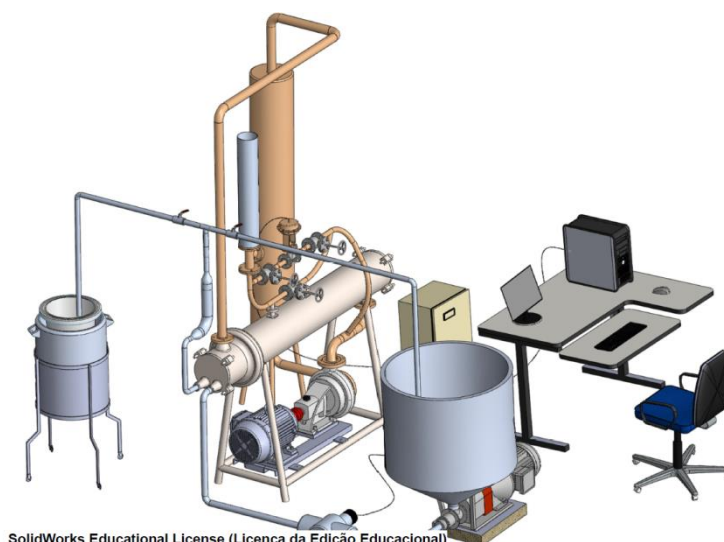
Este trabalho apresenta uma contribuição ao tema, estudando a economia de água na etapa de remoção de resíduos de solução de detergente alcalino utilizado em processo CIP aplicado a protótipo de trocador de calor feixe tubular, durante a etapa de enxágue posterior à etapa de limpeza alcalina. Importante ressaltar que Bicalho, Kunigk e Gedraite (2015)

estudaram esse mesmo processo, avaliando o efeito do emprego de vazões variáveis de água de enxágue sobre a cinética de remoção de resíduos de solução detergente alcalina.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Na Figura 1 é apresentada a planta-piloto utilizada neste trabalho, a qual foi operada em regime descontínuo, e formada basicamente pelos seguintes elementos: (i)- tanque principal em aço inox com capacidade de aproximadamente 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, reservatório cilíndrico vertical para armazenamento da água de aquecimento (Salvagnini e Gedraite, 2001).

Figura 1 - Planta piloto utilizada



SolidWorks Educational License (Licença da Edição Educacional)

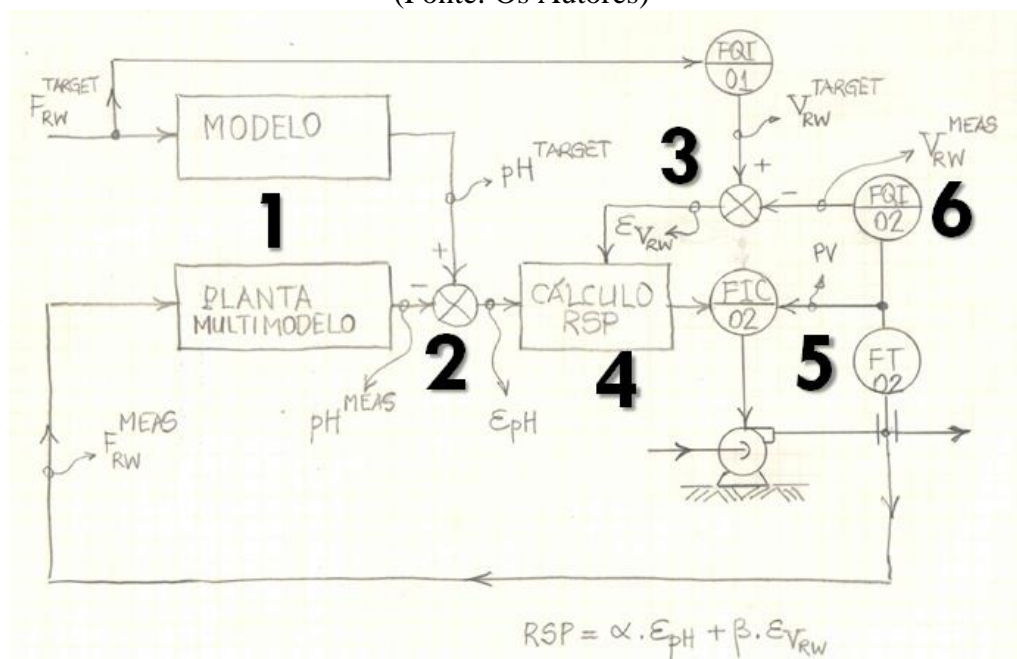
Foram empregados os resultados experimentais obtidos por Melero Jr. (2011) para a análise do funcionamento do sistema de controle de vazão estudado neste trabalho. De maneira análoga, foi utilizado o mesmo modelo da planta desenvolvido por Bicalho, Kunigk e Gedraite (2015) para representar o comportamento da cinética de remoção dos resíduos.

O modelo da planta em estudo foi desenvolvido no ambiente Simulink® do aplicativo Matlab® e contemplou todo o sistema estudado, bem como o cenário de flutuações no valor da vazão de água de enxágue, que tipicamente são verificadas nas instalações industriais. O modelo contemplou todo o sistema estudado e é composto por 06 subsistemas, como apresentado no diagrama de blocos da Figura 2.

No **subsistema “1”**, são apresentados o modelo de referencia e a planta multimodelo, responsáveis por gerar os sinais de pH^{target} e pH^{meas} respectivamente. Estes sinais são enviados para o **subsistema “2”**, responsável por calcular o sinal de erro de pH (ϵ_{pH}). Simultaneamente, o **subsistema “3”** calcula o erro devido ao volume de água de lavagem gasto no processo (ϵ_V). Os sinais gerados pelos **subsistemas “2”** e **“3”** são empregados para calcular o valor do *set-point* remoto a ser usado pelo controlador de vazão. Isto é feito no

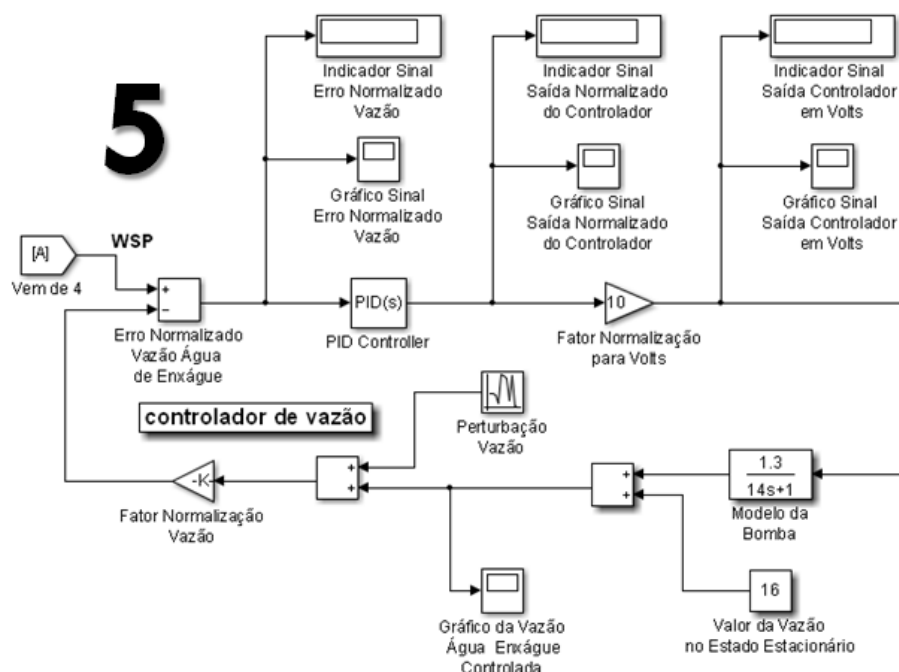
subsistema “4”. O **subsistema “5”** modela matematicamente o comportamento da malha de controle de vazão de água de enxágue e o **subsistema “6”** modela matematicamente o comportamento do totalizador e integrador de vazão.

Figura 2 – Diagrama de blocos do modelo estudado
(Fonte: Os Autores)



O diagrama de simulação correspondente ao controlador de vazão (**subsistema “5”**), implementado no aplicativo simulink®/matlab®, é apresentado na Figura 3.

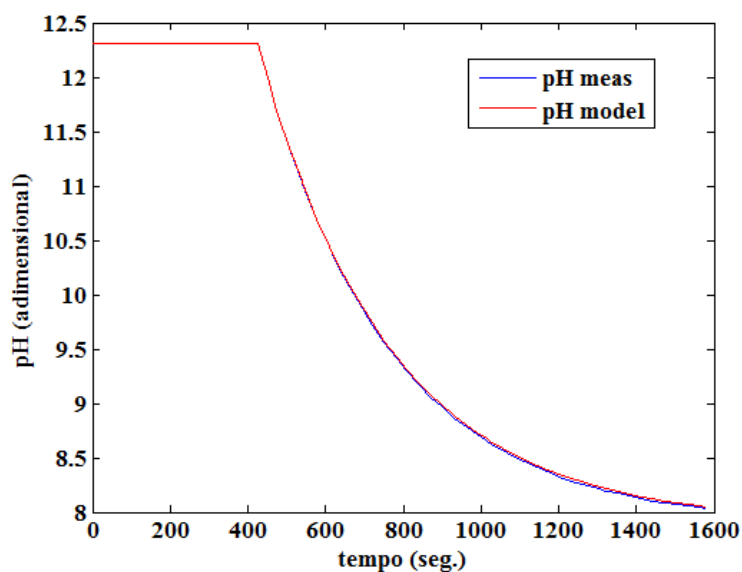
Figura 3 – Diagrama de simulação do subsistema “5”



3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos resultados experimentais obtidos por Melero Jr. (2011) para a vazão de 9 L/min e nos resultados das simulações realizadas com o emprego do modelo desenvolvido neste trabalho, é apresentado na Figura 4 o comportamento da trajetória desejada para o comportamento do *set-point* do pH (pH^{target}) e do pH medido (pH^{meas}).

Figura 4 – Comportamento temporal do valor do pH^{target} e do pH^{meas}



Como pode ser observado a partir do gráfico, o comportamento do valor medido (pH^{meas}) e o valor desejado para o (pH^{target}) – ambos simulados pelo **subsistema “1”** – é possível verificar que o afastamento entre os valores apresentados é muito pequeno, levando

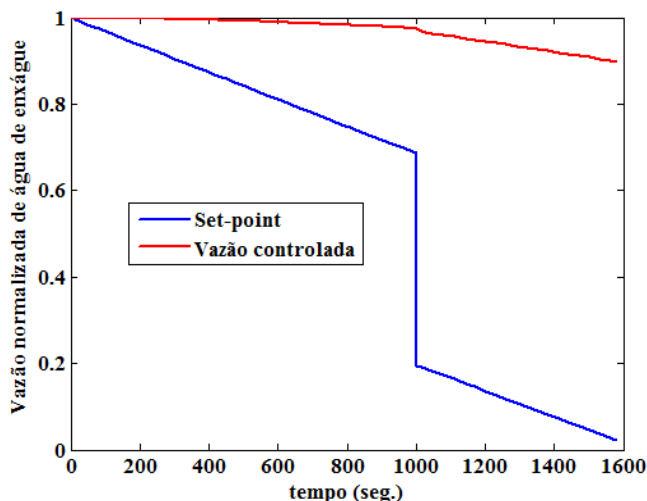
à conclusão de que o modelo representa de maneira adequada e coerente o comportamento do sistema em estudo.

O comportamento temporal do valor do *set-point* remoto normalizado e do valor medido – também normalizado – da vazão de água de enxágue é apresentado na Figura 5. Cumpre salientar que a trajetória deste valor é definida pelos **subsistemas “2”, “3” e “4”** do modelo desenvolvido neste trabalho. O valor temporal do *set-point* remoto da vazão de água de enxágue é afetado por fatores de ponderação (X, Y) previamente escolhidos com base em análise de sensibilidade realizada. Os valores mais adequados foram $X = 0,5$ e $Y = 0,5$. Eles representam o peso a ser usado no cálculo do valor do erro do pH e no erro do Volume, respectivamente.

O modelo apresenta um comportamento bastante agressivo para a variação do valor do *set-point* de vazão normalizada de água de enxágue. Contudo, o valor controlado apresenta comportamento mais suave para o valor da mesma em razão da sintonia do controlador ter sido realizada com o emprego de valores para os parâmetros ganho e tempo integral mais suaves.

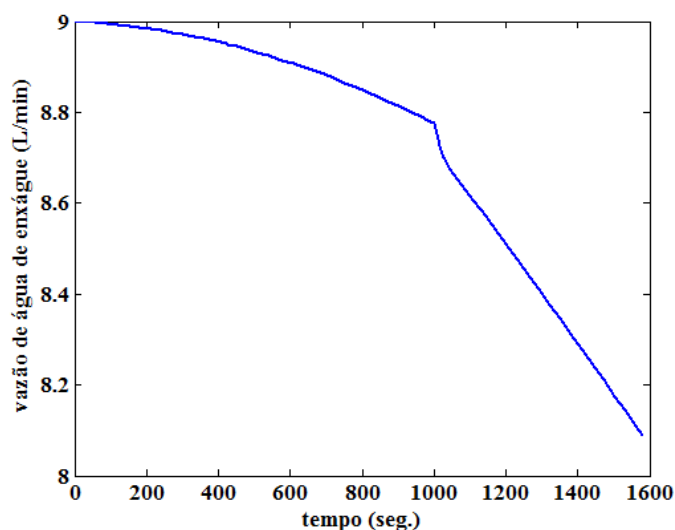
Os valores para os parâmetros ganho e tempo integral do controlador de vazão foram escolhidos com base em análise de sensibilidade realizada com o **subsistema “5”**, resultando nos seguintes valores: ganho ($K_P = 0,01$) e tempo integral ($\tau_I = 0,01min.$).

Figura 5 – Comportamento do valor do *set-point* remoto da vazão



O comportamento da variação do valor simulado da vazão de água de enxágue é apresentado na Figura 6 ressaltando-se o fato de que o valor controlado apresenta comportamento mais suave para o valor da mesma em razão da sintonia do controlador ter sido realizada com o emprego de valores para os parâmetros de sintonia do controlador de vazão como citado anteriormente.

Figura 6 – Comportamento temporal do valor da vazão de água de enxágue



A economia de água obtida com a proposta apresentada neste trabalho foi de aproximadamente 7 L, reduzindo o consumo na etapa de enxágue alcalino de 236,7 L para 229,7 L.

4. CONCLUSÃO

Os modelos desenvolvidos se mostraram bastante simples e adequados, se ajustando bem aos dados experimentais referentes ao comportamento temporal do pH, além do fato de permitir fácil implementação na base de dados de sistemas digitais de controle.

O controlador de vazão foi efetivo na correção do valor desta variável do processo com o tempo, permitindo a redução gradual de seu valor de forma suave.

Com base nos resultados obtidos e nos modelos implementados, pode-se verificar a redução no consumo de água de lavagem da ordem de 3% e com isso uma economia de energia elétrica correspondente.

5. REFERÊNCIAS

- BANSAL, B., CHEN, X. D. *A Critical Review of Milk Fouling in Heat Exchangers. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. Institute of Food Technologists. v.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. *Int. J. Food Microbiol.*, v.106 , p. 254 – 262, 2006.
- BICALHO, B. P.; KUNIGK, L.; GEDRAITE, R. (2015). Influência do emprego de vazões variáveis de água de enxágue sobre a cinética de remoção de resíduos de solução detergente alcalina em trocador de calor feixe tubular. *In: Proc. of XI Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, 19 a 22 de julho de 2015, Campinas – SP.

GEORGIADIS, M. C., ROTSTEIN, G. E. & MACCHIETTO, S. Modeling and Simulation of Shell and Tube Heat Exchangers under Milk Fouling. *AIChE Journal*. v. 44, No. 4, p. 959 – 971, 1998.

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).

SALVAGNINI, W.; GEDRAITE, R. (2001). Rotina de Experimento para trocador de calor feixe tubular. São Caetano do Sul, SP: CEUN-IMT.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UFU, ao IMT e à Fapemig (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio em pesquisas no projeto N° TEC-APQ-02100-12 (Estudo da Otimização de Sistema de Limpeza CIP).