

DETERMINAÇÃO DE VARIÁVEL INDICADORA DO TEMPO DE CAMPANHA DE REFERVEDOR CASCO E TUBO NUMA PLANTA INDUSTRIAL DE BUTADIENO

C.A.C. Oliveira, cris.acoliveira@gmail.com¹

R.C. Mirre, reinaldomirre@hotmail.com²

R.L.L. Fialho, rosanafialho@ufba.br^{1,3}

¹Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Rua Professor Aristides Novis, 2, Federação, CEP: 40210-630, Salvador - BA, Brasil

²Universidade Federal da Bahia, Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Campus Universitário de Ondina, CEP: 40170-115, Salvador - BA, Brasil

³Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, Rua Professor Aristides Novis, 2, Federação, CEP: 40210-630, Salvador - BA, Brasil

Resumo: O monitoramento do desempenho térmico de trocadores de calor é de suma importância para a operação de plantas industriais. O surgimento de *fouling* (incrustações) nas paredes internas de trocadores é o principal fator que afeta a troca térmica, elevando o consumo energético da planta. Por essa razão, conhecer o momento ideal para realizar a limpeza do trocador melhora a eficiência do processo e pode trazer grande economia para a empresa. Neste sentido, o presente trabalho visa determinar uma variável capaz de indicar o tempo de campanha de um trocador de calor. Para isso, adotou-se como modelo um refeedor de uma coluna de destilação de uma planta de produção de Butadieno de uma indústria petroquímica. A partir dos dados de planta disponibilizados, criou-se uma variável indicadora denominada “Índice de Eficiência de Troca Térmica” (IE). Esta variável está baseada no Coeficiente Global de Troca Térmica, cujo comportamento foi relacionado com os Coeficientes Globais de Troca Térmica Limpo e Sujo de projeto. A qualidade de indicação do Índice de Eficiência foi analisada para um determinado período, o que permitiu avaliar como se deu a tomada de decisão para a limpeza do trocador. Foi possível observar nas campanhas que o refeedor operou por alguns meses abaixo de sua faixa de eficiência mínima, de modo que o custo de operação do equipamento não compensaria mantê-lo funcionando. Neste estudo, constatou-se que o critério de análise pelo Índice de Eficiência torna-se importante alternativa na tomada de decisão quanto à limpeza do trocador de calor.

Palavras-chave: Tempo de campanha, Trocador de calor, Monitoramento, *fouling*

1. INTRODUÇÃO

A busca pelo aumento da eficiência energética nos processos industriais constitui uma das tarefas mais importantes na engenharia. De acordo com Worrell et al. (2003), muitas tecnologias são criadas com o intuito de aumentar a produtividade industrial; dentre elas, estão aplicações que visam a redução do consumo energético.

Uma das alternativas para diminuição do consumo de energia na indústria do petróleo é a operação otimizada de trocadores de calor (Tonin, 2003). A eficiência destes equipamentos está diretamente ligada ao processo de deposição e acúmulo contínuo de material nas suas paredes internas, as quais estão em contato com um fluido que contém tais partículas (“sujeira”). Este fenômeno é chamado de *fouling*, e caracteriza-se por incrustações que se formam gradualmente e que geram uma camada resistente à troca térmica, afetando o seu desempenho. Este tipo de problema provoca o aumento de custos de operação e manutenção, uma vez que requer um planejamento que considere paradas periódicas para limpeza dos equipamentos. Dentre as ações de remediação envolvidas, tem-se o uso de trocadores reserva (stand by) durante o procedimento de limpeza, que atuam como substitutos da operação. Por essa razão, torna-se relevante que um acompanhamento desse fenômeno seja realizado no sentido de preservar a eficiência dos trocadores de calor no processo industrial e determinar o momento mais adequado, ou o período ótimo, de parada de limpeza.

Neste sentido, diversos estudos têm sido propostos para prever a formação de incrustações. Markowski et al. (2013) propuseram um método de detecção em tempo real (*online*) do *fouling* por meio da modelagem matemática de um trocador de calor, incorporando um algoritmo capaz de estimar a evolução de incrustações. Outras referências adotam redes neurais artificiais para a predição de *fouling*, como no trabalho de Lalot e Pálsson (2010), que utilizaram uma rede neural para identificar o processo de operação do trocador por meio de um modelo matemático e cujo *fouling* foi diagnosticado a

partir de testes estatísticos. Davoudi e Vaferi (2018) criaram e treinaram uma rede neural para reproduzir a formação de *fouling* em uma amostra de tubo aquecido e em trocadores de calor de tubo único.

Artorga-Zaragoza et al. (2007) utilizaram conceitos de sistemas dinâmicos denominados observadores adaptativos, os quais respondem a variações do sistema a partir de suas entradas e saídas, fornecendo estimativas assintóticas de seu estado atual. O coeficiente global de troca térmica foi utilizado como parâmetro para avaliar o desempenho de trocadores de calor. Mohanty e Singru (2011) adotaram o fator de limpeza (*Cleanliness Factor*) para determinação *online* do desempenho de trocadores de calor, a partir de medições de perda de carga e vazão da corrente. Baraldi (2011) propôs um índice que relaciona o calor que está sendo trocado durante a operação com o calor que o equipamento deveria, por projeto, estar trocando.

Em vista disso, este trabalho propõe uma forma de monitoramento da operação de trocadores de calor por meio de uma relação denominada Índice de Eficiência de Troca Térmica (IE), capaz de expressar o desempenho térmico do trocador e auxiliar na tomada de decisão quanto à limpeza do equipamento. Essa relação tem como principal característica a sua praticidade para o meio industrial, pois requer pouco esforço computacional com um modelo que se baseia no Coeficiente Global de Troca Térmica e necessita de informações de fácil obtenção, como temperatura e vazão das correntes de processo.

2. METODOLOGIA

A eficiência de troca térmica é um parâmetro importante para acompanhar o desempenho de um trocador de calor. A relação do calor trocado durante a operação com o calor que deveria ser trocado pode ser dada pela Eq. (1) (Baraldi, 2011).

$$i = \frac{Q_{\text{sujo}}}{Q_{\text{limpo}}} = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T}{U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{ml}}} \quad (1)$$

em que Q é a taxa de calor transferida, m é a vazão da corrente, C_p é o calor específico do fluido, ΔT a diferença de temperatura do fluido na entrada e saída do trocador, U o coeficiente de troca térmica global, A a superfície de troca térmica e ΔT_{ml} a média logarítmica das temperaturas dos fluidos quente e frio.

Com base no índice apresentado por Baraldi (2011), pode-se estabelecer um parâmetro de ajuste de acordo com a disponibilidade dos dados da planta. Este parâmetro, denominado Índice de Eficiência de Troca Térmica (IE), é dado pela Eq. (2).

$$IE = \frac{U_{\text{real}}}{U_{\text{limpo}}} = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{\text{ml}}} \quad (2)$$

O IE se baseia no cálculo do coeficiente de troca térmica real (U_{real}) do trocador comparado com o coeficiente global de troca térmica quando o trocador está limpo (U_{limpo}), o qual pode ser encontrado na folha de dados do equipamento. O U_{real} , neste caso, é calculado continuamente à medida que os dados de processo são obtidos, ou seja, com a utilização do IE, pode-se obter informações instantâneas da eficiência do trocador de calor em questão.

Para se obter uma referência quanto ao valor mínimo que o IE deve atingir e, assim, tomar a decisão de se efetuar a limpeza do trocador, utiliza-se o coeficiente de troca térmica quando o trocador está sujo (U_{sujo}). O parâmetro U_{sujo} é calculado de acordo com um valor de *fouling*, assumido no projeto do trocador de calor, que se encontra disponível na folha de dados do equipamento. Deste modo, $IE_{\text{mínimo}}$ é definido conforme a Eq. (3).

$$IE_{\text{mínimo}} = \frac{U_{\text{sujo}}}{U_{\text{limpo}}} \quad (3)$$

Neste estudo, a representação do trocador de calor corresponde a dois refeedores casco e tubo de uma coluna de destilação: um principal e um reserva. No lado do casco, utiliza-se vapor d'água de 15 kgf/cm² ou de 3,5 kgf/cm² como utilidade quente. Os refeedores são operados por um sistema de controle automático, com ajuste de vazão do vapor d'água para manutenção do fluido de processo na temperatura determinada pela operação.

A Figura 1 relaciona as etapas para a avaliação do tempo de campanha incorporando o critério do Índice de Eficiência, proposto neste trabalho.

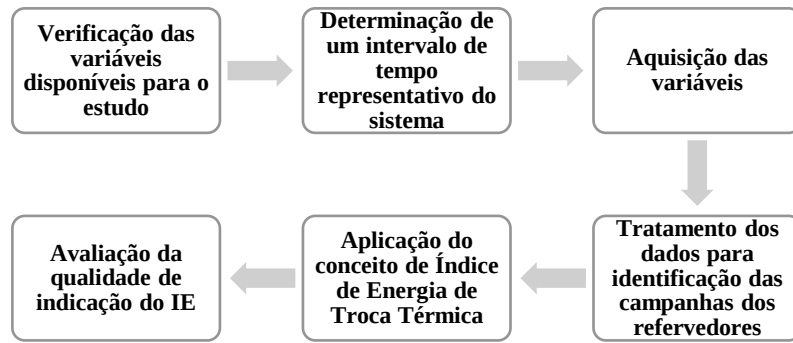


Figura 1. Etapas para a avaliação de campanha pelo Índice de Eficiência de Troca Térmica.

Na primeira etapa, em que se verificam os dados de operação disponíveis para a realização do estudo, foram levantadas as seguintes informações:

- Temperaturas de entrada e saída nos dois lados do processo (no casco e no tubo);
- Calor trocado, utilizado pelo sistema de controle da coluna;
- Área de troca térmica do refeedor;
- Coeficiente global de troca térmica de projeto.

Por conseguinte, procurou-se determinar um intervalo de tempo para amostragem das variáveis que pudesse exibir as campanhas dos refeedores. Sendo o sistema composto por um refeedor principal e um refeedor reserva, cujas campanhas são de aproximadamente seis meses cada, decidiu-se coletar dados de 2012 até 2017, para se ter informação suficiente das campanhas dos refeedores e realizar uma considerável avaliação da qualidade de indicação do IE.

Com a finalidade de se conhecer ao longo dos anos qual refeedor estava em operação e, assim, determinar seu tempo de campanha, foi necessário realizar um tratamento dos dados. Inicialmente, foram gerados perfis anuais, de modo a se observar o comportamento das variáveis. Como resultado, identificou-se por meio da indicação de temperatura do vapor d'água na saída dos refeedores, qual trocador estava em operação. Ou seja, quando na saída do refeedor se iniciava uma indicação de temperatura, assumia-se ali o início da campanha. Quando essa indicação cessava, dizia-se que naquele instante o refeedor havia sido retirado de operação. Dessa forma, foi possível organizar os dados de operação de acordo com a campanha de cada refeedor para a aplicação do Índice de Eficiência, cujos resultados são exibidos na próxima seção.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O tempo de campanha de cada refeedor é identificado a partir de informações obtidas como na Fig. 2, em que são mostrados o perfil de temperatura do vapor d'água na saída do trocador de calor principal, representado pelos pontos mais escuros, e o perfil de temperatura do vapor d'água na saída do trocador de calor reserva, representado pelos pontos mais claros.

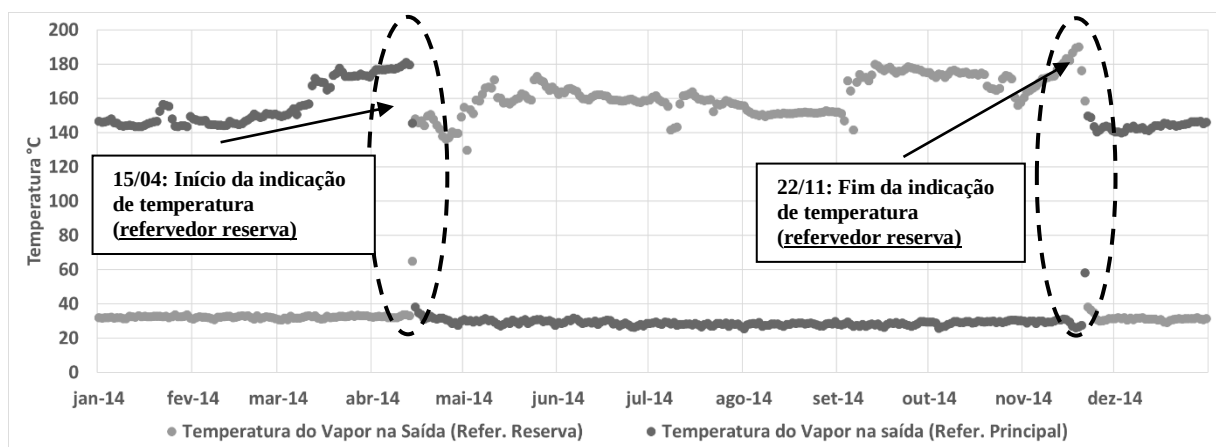


Figura 2. Perfil de temperatura do vapor d'água na saída dos refeedores em 2014.

Na Figura 2, a indicação no trocador principal pode ser vista inicialmente de janeiro até 15/04, quando então seu valor cai para um patamar em torno de 30°C. Neste instante, inicia-se a indicação no trocador reserva, que já se encontrava no mesmo patamar de 30°C, evidenciando que o refeedor reserva entrou em operação e o principal foi retirado para

limpeza. Posteriormente, em 22/11, ocorre o inverso: a indicação no trocador reserva cessa, ao passo que a indicação no trocador principal se inicia. Deste modo, a campanha do refeedor reserva compreende o intervalo de 15/04 a 22/11.

Com a aquisição dos dados de operação no período de 2012 a 2017, foi possível observar o comportamento do IE em cinco campanhas para cada refeedor. Nas Figuras 3 e 4, pode-se verificar o perfil do IE em duas dessas campanhas. O valor do IEmínimo foi calculado por meio da Eq. (3), e resultou no valor de aproximadamente 0,57, que também está indicado nas figuras mencionadas.

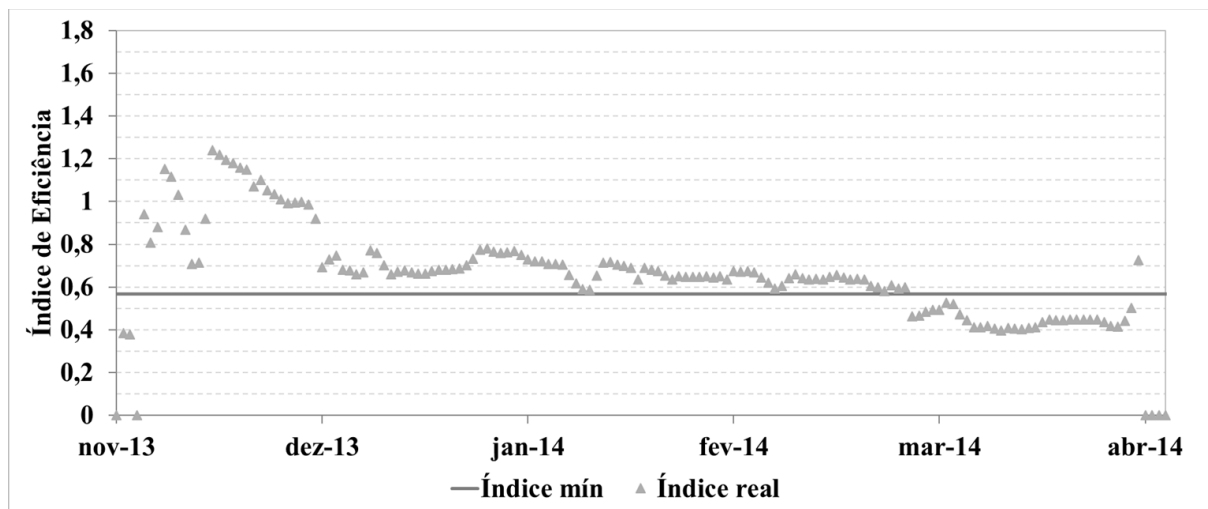


Figura 3. Comportamento do Índice de Eficiência na campanha do refeedor principal.

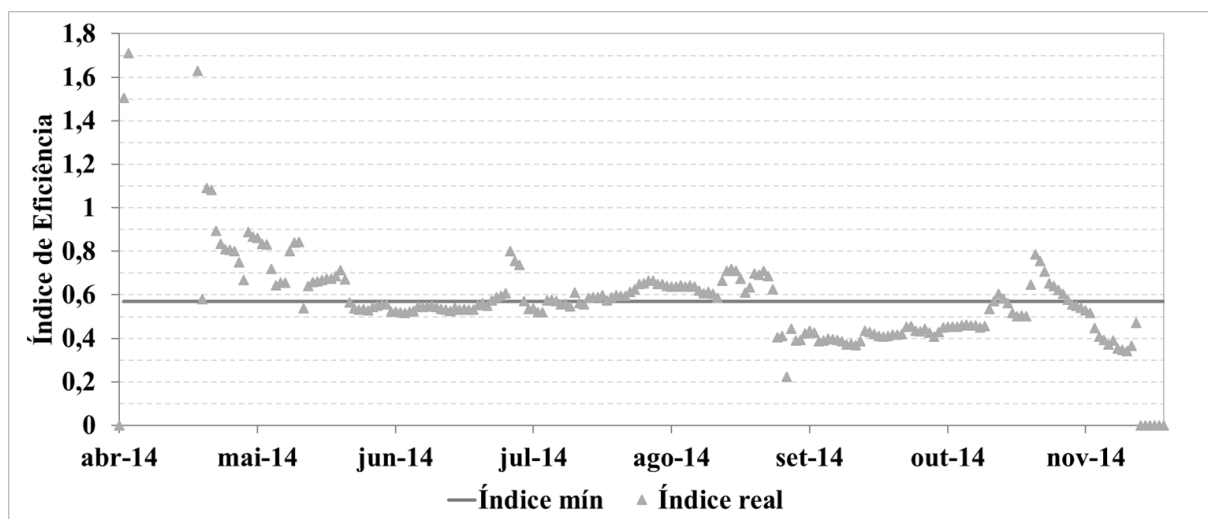


Figura 4. Comportamento do Índice de Eficiência na campanha do refeedor reserva.

Na Figura 3, tem-se o comportamento do IE no refeedor principal ao longo de sua campanha, denominada Campanha A. Pode-se observar que, no início, seu IE possui valores altos e vai decaindo ao longo do tempo, chegando a ficar abaixo do IEmínimo por alguns dias, quando então o refeedor é retirado de operação. Este é o comportamento esperado para o índice, pois, inicialmente, quando o trocador está limpo, espera-se que o IE esteja em seu valor máximo, ou seja, um. Valores que ficaram acima da unidade, neste caso chegando pouco acima de 1,2, podem ser explicados pela superestimação no projeto do trocador, na qual se assume um coeficiente de segurança nos cálculos para se garantir que as especificações de projeto sejam atendidas. A perda de eficiência na troca térmica do refeedor pode ser notada com a queda do IE ao longo do tempo, o que pode ser explicado pelo acúmulo de incrustações em suas paredes internas.

No caso do refeedor reserva, a mesma tendência pode ser observada, conforme a Fig. 4. Contudo, observa-se que o trocador operou boa parte de seu tempo abaixo do IEmínimo, além de ter alcançado valores de IE de até 1,7 no início de sua campanha.

De modo a compreender com mais detalhe o comportamento do IE em cada uma das campanhas, foi realizado um levantamento de variáveis que influenciam no desempenho dos trocadores de calor e que, por sua vez, são detectadas pelo Índice. Para a realização desse levantamento, é necessário conhecer as características da planta de Butadieno.

A unidade corresponde a uma planta para a produção do 1,3-Butadieno, um dieno conjugado utilizado para a produção de borrachas e resinas sintéticas. O processo de produção se dá por destilação extrativa, uma técnica que utiliza um

solvente para alterar a volatilidade relativa dos componentes presentes na corrente, frente ao componente de interesse, neste caso, o Butadieno. Assim, o Butadieno pode ser removido da mistura com alto teor de pureza. Este procedimento é conveniente quando o processo de destilação simples não permite obter a separação esperada.

Em termos operacionais, a planta apresenta facilidade para formação de *fouling* nas paredes internas dos refeedores, por onde o fluido de processo escoa. Estas incrustações surgem da polimerização indesejada das diolefinas presentes na corrente de processo, causada pelas elevadas temperaturas nas quais a planta deve operar. Para minimizar esse efeito, algumas medidas podem ser tomadas, como a adição de antipolimerizantes, o controle da temperatura de fundo da coluna e a manutenção de um regime estável da coluna com o mínimo de variações possíveis nas correntes de processo. Diante disso, as seguintes variáveis para estudo foram selecionadas:

- Vazão da corrente de Alimentação da coluna de destilação;
- Vazão da corrente de Refluxo da coluna de destilação.

Para a apresentação da influência de cada variável no IE, seus dados de operação foram adquiridos e organizados juntos aos perfis gráficos do Índice de Eficiência, cujos valores devem ser lidos no eixo esquerdo e estão representados pelos pontos verdes. No eixo direito, estão os valores das variáveis Vazão de Alimentação (pontos azuis) e Vazão de Refluxo (pontos vermelhos).

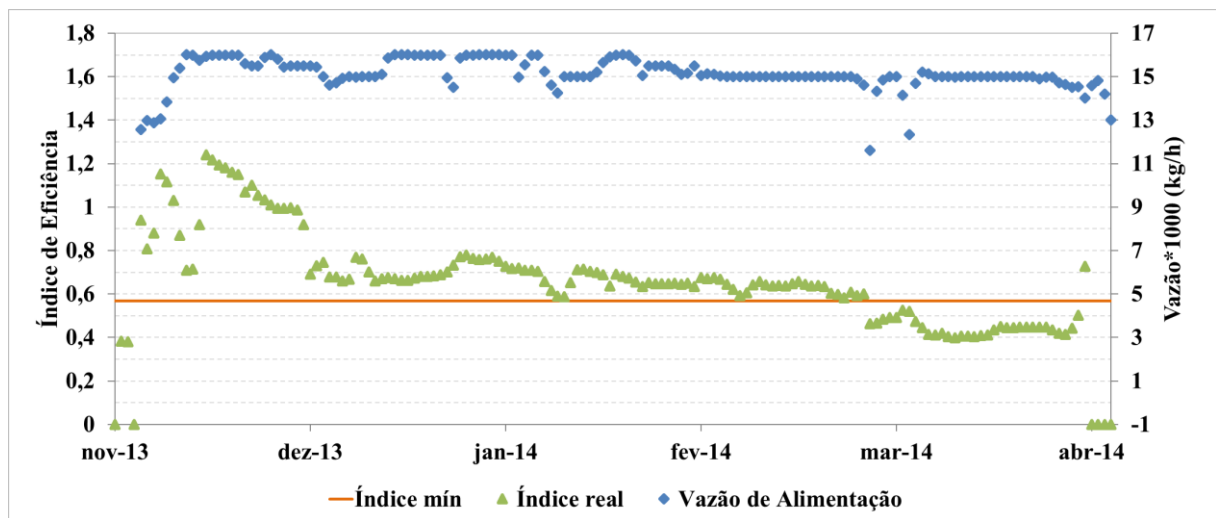


Figura 5. Influência da Vazão de Alimentação no comportamento do Índice de Eficiência na campanha do refeedor principal.

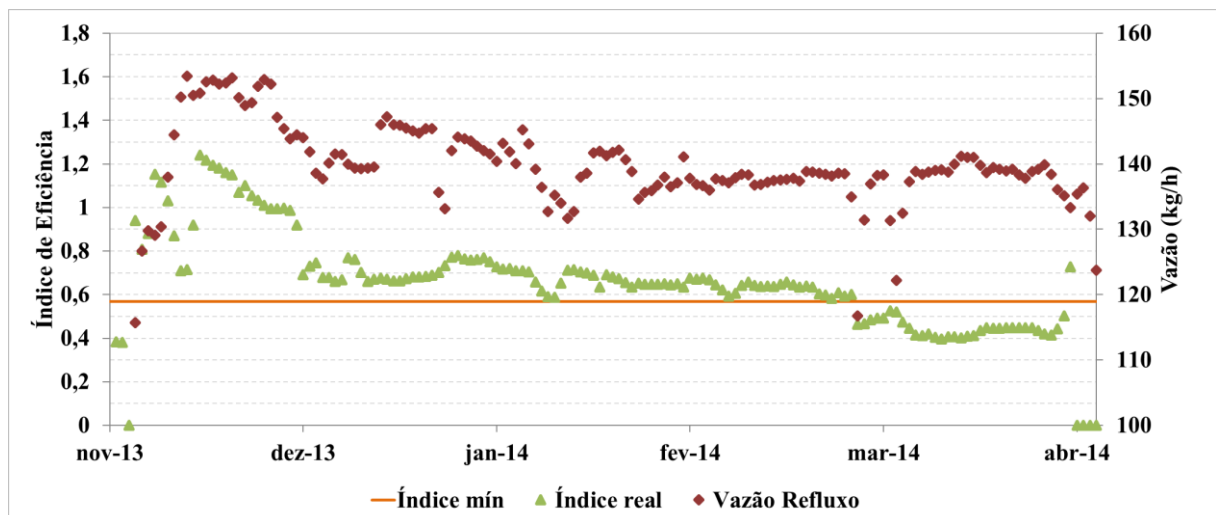


Figura 6. Influência da Vazão de Refluxo no comportamento do Índice de Eficiência na campanha do refeedor principal.

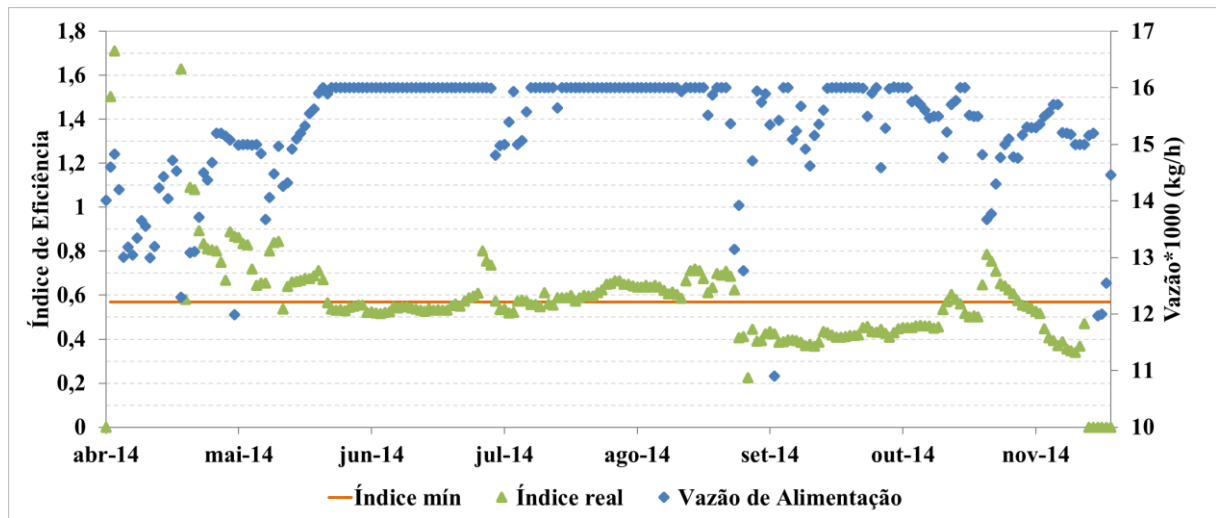


Figura 7. Influência da Vazão de Alimentação no comportamento do Índice de Eficiência na campanha do refeedor reserva.

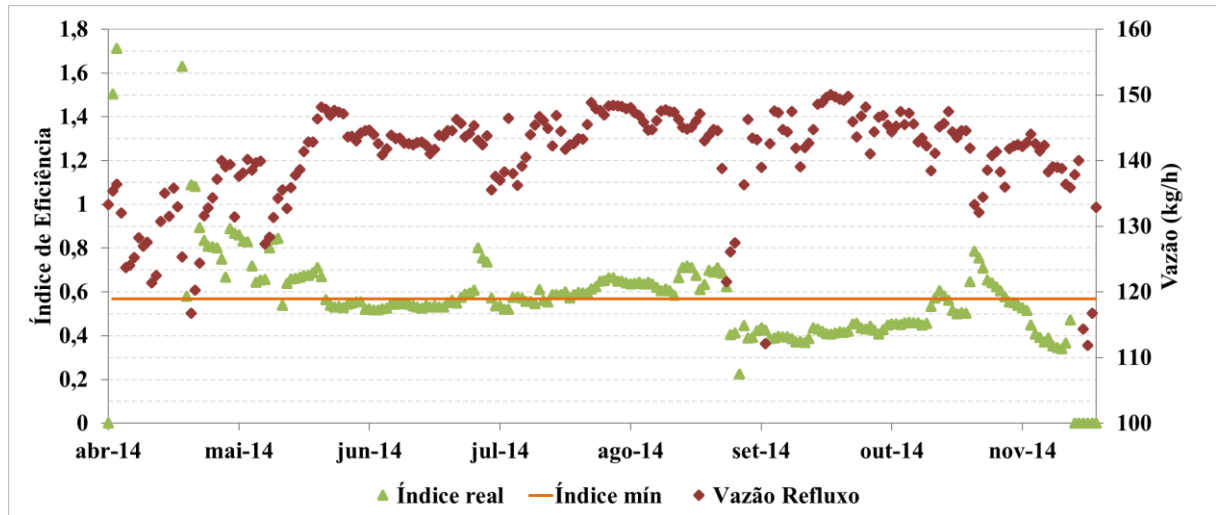


Figura 8. Influência da Vazão de Refluxo no comportamento do Índice de Eficiência na campanha do refeedor reserva.

A Figura 5 apresenta o comportamento da Vazão de Alimentação e da Vazão de Refluxo frente ao perfil do IE na campanha do refeedor principal. Nesta campanha, pode-se observar como essas vazões influenciam o Índice de Eficiência. Do início de novembro até meados deste mês, por exemplo, nota-se que a Vazão de Alimentação e a Vazão de Refluxo, Fig. 5 e Fig. 6 respectivamente, estão aumentando até atingirem um certo patamar de operação. Essa dinâmica na coluna refletiu diretamente no desenvolvimento do IE, cujos pontos oscilaram até a estabilização dessas correntes.

Nas Figuras 7 e 8 são apresentados os valores de IE e Vazão de alimentação, bem como IE e Vazão de Refluxo, respectivamente, para o intervalo de abril a novembro de 2014. É possível avaliar o comportamento das correntes na campanha do refeedor reserva e pode-se avaliar como as vazões de alimentação e de refluxo influenciam no desempenho do refeedor. Observa-se, então, que a coluna esteve operando de forma instável, com oscilação na Vazão de Alimentação de cerca 2000 kg/h, ao mesmo passo que a Vazão de Refluxo variou aproximadamente entre 120 kg/h e 145 kg/h, na mesma época. Isso se relaciona com o aspecto inconstante do IE no início da campanha, cujo perfil indicou que o refeedor acumulou depósitos em suas paredes internas no período de instabilidade da coluna, levando-o para o patamar do IEmínimo em apenas 1,5 mês de campanha. Uma vez com a operação aproximadamente estável da coluna, o IE também se estabiliza, contudo indica uma baixa eficiência de troca térmica por parte do refeedor.

O impacto das Vazões de Alimentação e Refluxo no desempenho dos trocadores de calor pode ainda ser visto na campanha do refeedor reserva. Em setembro de 2014, por exemplo, a coluna passou por um período de quase um mês de instabilidade, o que afetou negativamente o refeedor, justificado pelo IE abaixo do IEmínimo.

4. CONCLUSÃO

A determinação de uma forma de monitoramento do tempo de campanha de um refeedor foi realizada. A relação denominada “Índice de Eficiência de Troca Térmica” (IE), proposta neste trabalho, foi capaz de descrever a queda de eficiência térmica do trocador de calor ao longo do tempo por meio de um modelo matemático baseado no Coeficiente Global de Troca Térmica. O modelo foi calculado utilizando variáveis como temperatura, vazão e dados de projeto do equipamento, a exemplo de uma planta de Butadieno.

O histórico de operação da unidade e o comportamento do IE nas campanhas dos refeedores mostraram que as variáveis Vazão de Alimentação e Vazão de Refluxo possuem influência na eficiência dos trocadores. A operação instável dessas correntes fez com que o Índice de Eficiência oscilasse, dificultando a sua interpretação e levando à formação de *fouling* nas paredes internas do refeedor. Logo, concluiu-se que a operação estável da planta é importante não só pela integridade operacional dos refeedores, como também facilita a utilização do IE como parâmetro para a tomada de decisão quanto à limpeza do trocador.

O estudo da planta de Butadieno permitiu identificar também outras variáveis que influenciam na eficiência dos refeedores e que podem ser incorporadas na análise das indicações do IE em trabalhos futuros. Além disso, a proposta do Índice de Eficiência pode ser comparada com outros métodos da literatura, utilizando os dados do histórico de operação já disponíveis no desenvolvimento deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- Astorga-Zaragoza, C.-M., Zavala-Río, A., Alvarado, V.M., Méndez, R.-M., Reyes-Reyes, J., 2007, “Performance monitoring of heat exchangers via adaptive observers”, *Measurement*, Vol. 40, pp. 392-405.
- Baraldi, A., 2011, “Monitoramento do Desempenho Térmico de Trocadores de Calor Duplo Tubo de uma Planta de Slurry”, Undergraduate project, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brazil.
- Davoudi, E., Vaferi, B., 2018, “Applying artificial neural networks for systematic estimation of degree of fouling in heat exchangers”, *Chemical Engineering Research and Design*, Vol. 130, pp. 138-153.
- Lalot, S., Pálsson, H., 2010, “Detection of fouling in a cross-flow heat exchanger using a neural network based technique”, *International Journal of Thermal Science*, Vol. 49, pp. 675-679.
- Markowski, M., Trafczynski, M., Urbaniec, K., 2013, “Validation of the method for determination of the thermal resistance of fouling in shell and tube heat exchangers”, *Energy Conversion and Management*, Vol. 76, pp. 307-313.
- Mohanty, K. D., Singru, P. M., 2011, “Use of C-factor for monitoring of fouling in a shell and tube heat exchanger”, *Energy*, Vol. 36, pp. 2899-2904.
- Tonin, P. C., 2003, “Metodologia para Monitoramento do Desempenho Térmico de Redes de Trocadores de Calor”, Master thesis, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba, Brazil.
- Worrell, E., Laitner, J. A., Ruth, M., Finman, H., 2003, “Productivity Benefits of Industrial Energy Efficiency Measures”, *Energy*, Vol. 28, pp. 1081-1098.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DETERMINATION OF CYCLIC CLEANING SCHEDULING INDICATOR VARIABLE OF A SHELL AND TUBE REBOILER FROM A BUTADIENE INDUSTRIAL SITE

C.A.C. Oliveira, cris.acoliveira@gmail.com¹

R.C. Mirre, reinaldomirre@hotmail.com²

R.L.L. Fialho, rosanafialho@ufba.br^{1,3}

¹Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Departamento de Engenharia Química, Rua Professor Aristides Novis, 2, Federação, CEP: 40210-630, Salvador - BA, Brazil

²Universidade Federal da Bahia, Centro Interdisciplinar de Energia e Ambiente, Rua Barão de Jeremoabo, s/n, Campus Universitário de Ondina, CEP: 40170-115, Salvador - BA, Brazil

³Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica, Programa de Pós-graduação em Engenharia Industrial, Rua Professor Aristides Novis, 2, Federação, CEP: 40210-630, Salvador - BA, Brazil

Abstract. *Performance monitoring of heat exchangers is very important for the operation of industrial plants. The buildup of fouling inside the heat exchangers walls is the main reason for reducing the thermal exchange, raising the plant energy consumption. Therefore, determining the best period to clean the heat exchanger improves the process efficiency and reduces the economic losses of the plant. Seeing that, the presenting paper aims to define a variable, which indicates the cyclic cleaning scheduling of a heat exchanger, adopting as a model a reboiler of a distillation column from a petrochemical plant of Butadiene production. Using the available process data, an indicator variable called “Heat Exchange Efficiency Index” (IE) was created. This variable is based on the Overall Heat Transfer Coefficient, whose behavior was associated to the Clean and Fouled Overall Heat Transfer Coefficient from the equipment project design. The indication quality of the Heat Exchange Efficiency Index was analyzed for a certain period, which has allowed to evaluate how the decision for cleaning the heat exchanger was made. It was possible to observe during the operating time, that the reboiler worked for a few months under its minimum efficiency, so that the equipment operating costs would not compensate to keep the exchanger running. In this paper, it was verified that the analysis criterium by the Efficiency Index is an important tool for scheduling the cleaning intervention of the heat exchanger.*

Keywords: *Cyclic cleaning scheduling, Heat exchanger, Monitoring, fouling.*

The authors are the only responsible for the content of this paper.