

MONITORAMENTO DA PERFORMANCE TÉRMICA DE TROCADORES E REDES DE TROCADORES DE CALOR

Paulo César Tonin, Cezar Otaviano Ribeiro Negrão

Laboratório de Ciências Térmicas - LACIT, Depto Acadêmico de Mecânica – DAMEC,
Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná – CEFET-PR,
Av. Sete de Setembro, 3165, CEP 80230-901 – Curitiba-PR, negrao@cefetpr.br

Resumo – No refino de petróleo, redes de trocadores de calor são empregadas com o propósito de recuperar calor e portanto reduzir o consumo de energia da planta. Muitos destes trocadores de calor na rede de pré-aquecimento do cru estão sujeitos a um alto risco de incrustação. Com o crescimento da incrustação, os trocadores de calor vão perdendo seu desempenho térmico e o monitoramento da sua performance passa a ser uma tarefa de grande importância. O grande número de trocadores de calor presentes em redes de pré-aquecimento do cru, a variação nas condições operacionais e na carga de petróleo processada dificultam o monitoramento térmico diário destas redes. Neste artigo, uma metodologia proposta na literatura (Jerónimo et al., 1997) é aplicada no monitoramento térmico de trocadores de calor e é estendida para o monitoramento de redes de trocadores de calor. O custo do combustível adicional consumido nos fornos, devido ao problema da incrustação, é mostrado. Os resultados obtidos demonstram a facilidade na aplicação da metodologia e sua eficácia no monitoramento térmico destas redes.

Palavras-Chave: monitoramento de desempenho térmico, trocadores de calor, incrustação.

Abstract – In oil refining, heat exchangers networks are employed to recover heat and therefore save energy of the plant. However, many heat exchangers in the crude oil pre-heat trains are under high risk of fouling. Under fouling conditions, the thermal performance of heat exchangers is continuously reduced and the monitoring becomes a important task. The large number of heat exchangers in the pre-heat train, the change in the operational conditions and in the crude composition make the daily monitoring a difficult task. This work applies an approach for monitoring the performance of heat exchangers (Jerónimo, et al. 1997) and extends it to the monitoring of the whole train. The expenses with additional fuel consumed by the furnaces, due to the heat exchanger performance reduction, are estimated. The obtained results show the approach feasibility and efficiency on the monitoring of heat exchanger networks.

Keywords: monitoring of thermal performance, heat exchangers, fouling.

1. Introdução

No processo de refino do petróleo, a quantidade de energia envolvida é muito grande. Trocadores de calor são usados com o propósito de recuperar energia do processo e portanto, reduzir o consumo da planta. A presença da incrustação em trocadores de calor, utilizados no pré-aquecimento do cru, representa uma resistência à transferência de calor e, com o passar do tempo, reduz a performance térmica destes equipamentos. A capacidade de monitorar o desempenho térmico dos trocadores de calor e de suas redes é de fundamental importância para o sucesso econômico de uma refinaria. Métodos de monitoramento simples e seguros permitem que a performance atual dos equipamentos sejam conhecidas e o momento ideal para limpeza do trocadores de calor seja estabelecido.

Na literatura, poucos trabalhos nesta área são encontrados. Leach & Factor (1981) avaliam a eficácia de aditivos químicos no controle da incrustação em três trocadores de calor localizados no final da rede de pré-aquecimento de petróleo. Os resultados mostram um período de operação maior do trocador que usou aditivos químicos, indicando que o procedimento é eficaz. Jerónimo et al. (1997) propuseram uma metodologia para o monitoramento térmico diário da performance de trocadores de calor, baseada na avaliação do número de unidades de transferência (NTU) e na efetividade (ε), onde as variações nas condições operacionais, principalmente nas vazões dos fluidos, são levadas em consideração.

Esta metodologia desenvolvida para avaliar o desempenho de um único trocador de calor foi estendida para quantificar a performance de uma rede de trocadores de calor. Um estudo de casos é apresentado para demonstrar o potencial do método.

2. Equações Fundamentais

A efetividade de um trocador de calor é definida como a razão entre a taxa real de transferência de calor e a máxima taxa de transferência de calor possível em um trocador de calor contra-corrente. A máxima taxa de transferência de calor é dada por:

$$Q_{\max} = (\dot{m}c_p)_{\min} \Delta T_{\max} \quad (1)$$

onde $(\dot{m}c_p)_{\min}$ é o menor valor do produto vazão por calor específico entre as duas correntes de fluidos. ΔT_{\max} é a máxima diferença de temperatura no trocador de calor ($= T_{q1} - T_{f1}$). T_{q1} é temperatura de entrada do fluido quente e T_{f1} , a temperatura de entrada do fluido frio. A taxa real de transferência de calor é o produto da vazão, calor específico e variação de temperatura de qualquer uma das correntes:

$$\dot{Q}_{\text{real}} = (\dot{m}c_p)_q (T_{q1} - T_{q2}) = (\dot{m}c_p)_f (T_{f2} - T_{f1}) \quad (2)$$

onde T_f e T_q são as temperaturas das correntes fria e quente, respectivamente. Os subscritos 1 e 2 indicam, respectivamente, a entrada e a saída do fluido no trocador de calor. $(\dot{m}c_p)_q$ e $(\dot{m}c_p)_f$ são os produtos da vazão pelo calor específico das correntes quente e fria, respectivamente.

A efetividade pode então ser escrita como:

$$\varepsilon = \frac{\dot{Q}_{\text{real}}}{\dot{Q}_{\max}} = \frac{(\dot{m}c_p)_q (T_{q2} - T_{q1})}{(\dot{m}c_p)_q (T_{q1} - T_{f1})} = \frac{T_{q1} - T_{q2}}{T_{q1} - T_{f1}} \quad (3)$$

Foi admitido que a capacidade térmica do fluido frio é maior do que a capacidade térmica do fluido quente. Através da equação (2), pode-se concluir que a razão entre as capacidades térmicas das correntes será:

$$R = \frac{(\dot{m}c_p)_q}{(\dot{m}c_p)_f} = \frac{T_{f2} - T_{f1}}{T_{q1} - T_{q2}} \quad (4)$$

Sendo a corrente fria a de menor produto vazão por calor específico, o número de unidades de transferência será:

$$NTU = \frac{UA}{(\dot{m}c_p)_f} \quad (5)$$

Considerando que a quantidade total de calor pode ser calculada pela multiplicação da quantidade máxima de calor em um determinado trocador pela sua respectiva efetividade, a efetividade global da rede limpa ou suja será:

$$\varepsilon_{c,t} = \frac{\sum_{j=1}^n (\dot{Q}_{\max} \varepsilon_c)_j}{\dot{Q}_{\max,t}} = \frac{\sum_{j=1}^n \left\{ (\dot{m}c_p)_{\min} (T_{q1} - T_{f1}) \right\} (\varepsilon_c)_j}{\sum_{j=1}^n \left\{ (\dot{m}c_p)_{\min} (T_{q1} - T_{f1}) \right\}_j} \times 100 \quad (12)$$

onde $\varepsilon_{c,j}$ é a efetividade de cada trocador na condição limpa (ou suja). $\varepsilon_{c,t}$ é a efetividade global da rede na condição limpa ou suja. O índice “c” representa tanto a condição limpa (l) como suja (s). Jerônimo et al. (1997) definem ainda um índice de incrustação como sendo:

$$IF_j = \frac{(\varepsilon_{l,j} - \varepsilon_{m,j})}{(\varepsilon_{l,j} - \varepsilon_{s,j})} \quad (13)$$

onde $\varepsilon_{m,j}$ é a efetividade medida de um certo trocador j baseada nas condições de operação do momento. O índice de incrustação igual a 0 representa o trocador na condição limpa e o índice de incrustação igual a 1 representa o trocador na condição suja, ou seja, com o nível de incrustação máximo estimado em projeto. Este índice de incrustação pode ainda ser estendido para a rede:

$$IF = \frac{(\varepsilon_{l,t} - \varepsilon_{m,t})}{(\varepsilon_{l,t} - \varepsilon_{s,t})} \quad (14)$$

onde $\varepsilon_{l,t}$ e $\varepsilon_{s,t}$ são respectivamente as efetividades da rede limpa e suja. A diminuição na efetividade da rede, associada ao problema da incrustação, reduz a temperatura de saída do cru da bateria de pré-aquecimento. Este efeito é compensado pelo aumento do consumo de combustível nos fornos. Isto, porém, representa um custo adicional para a refinaria e pode ser quantificado por:

$$CAC = CGC \cdot \dot{Q}_{\max,t} (\varepsilon_{l,t} - \varepsilon_{m,t}) \quad (15)$$

onde CGC é o custo do combustível queimado nos fornos por unidade de calor produzido.

4. Resultados

A Figura 1 mostra a evolução das efetividades medida, limpa e suja de projeto de um trocador de calor por um período de 2 anos e 6 meses. Pode-se observar que todas as três efetividades apresentam frequências de oscilação muito similares, indicando que as correlações representam bem o comportamento da efetividade e que as variações das propriedades termofísicas do cru e dos produtos não influenciam significativamente no valor das efetividades calculadas. Note que logo após o início da operação do trocador, a efetividade medida apresenta valores superiores aos respectivos valores limpos e sujos de projeto. Isto indica que os valores de projeto dos coeficientes de troca de calor não representam adequadamente a sua condição limpa de funcionamento. Em dezembro de 1999, por outro lado, os valores da efetividade medida se reduzem e alcança a efetividade do trocador limpo. Em outubro de 2000, a efetividade medida já está próxima da efetividade suja de projeto. Esta perda de desempenho do trocador indica que um processo de incrustação se instaurou no trocador. A Figura 2 confirma as observações da Figura 1, mostrando que valores de IF menor do que 1 indicam que o trocador está limpo numa condição mais favorável do que a condição de projeto. IF igual a zero indica que o trocador está na condição limpa e IF igual a 1 mostra que o trocador atingiu seu limite de incrustação estabelecido em projeto.

A Figura 3, por sua vez, mostra a variação temporal da efetividade global medida e calculada da rede na condição limpa e suja. Pode-se notar quatro períodos muito bem definidos. No primeiro, a efetividade medida está muito próxima do seu valor calculado na condição limpa. No segundo período, a efetividade medida da rede afasta-se da condição limpa indicando um aumento no nível de incrustação. No terceiro período, após a parada para limpeza de dois trocadores, a performance da rede retorna próxima da condição de melhor desempenho. Observa-se que no início do quarto período, dois meses após a limpeza dos trocadores citados anteriormente, a efetividade da rede começa a diminuir novamente.

A Figura 4 mostra o resultado da despesa adicional de combustível nos fornos, CAC , considerando a perda da efetividade da rede ocorrida apenas no quarto período da Figura 3. Segundo Polley et al. (2002), o custo médio de geração de calor em uma refinaria de petróleo é de US\$ 3,28/(MBTU). Pode-se ainda notar que a despesa com

combustível adicional consumido nos fornos cresce no período analisado. Isto se deve ao aumento do nível de incrustação nos trocadores de calor da rede. No primeiro período (15/06/02 a 15/07/02), a despesa média está em torno de US\$ 830/dia. No segundo período (15/07/02 a 15/08/02), a despesa média está em US\$ 984/dia e no terceiro período (15/08/02 a 15/09/02), a despesa média está por volta de US\$ 1644/dia. Os resultados mostram que os custos associados com o problema da incrustação na rede de pré-aquecimento de petróleo são significativos. Este custo representa somente um de muitos outros custos relacionados com este problema. Para que a performance térmica da rede se restabeleça é necessário que os trocadores mais suscetíveis à incrustação sejam limpos.

Por limitação de espaço, os resultados são restritos e maiores detalhes são encontrados em Tonin (2003).

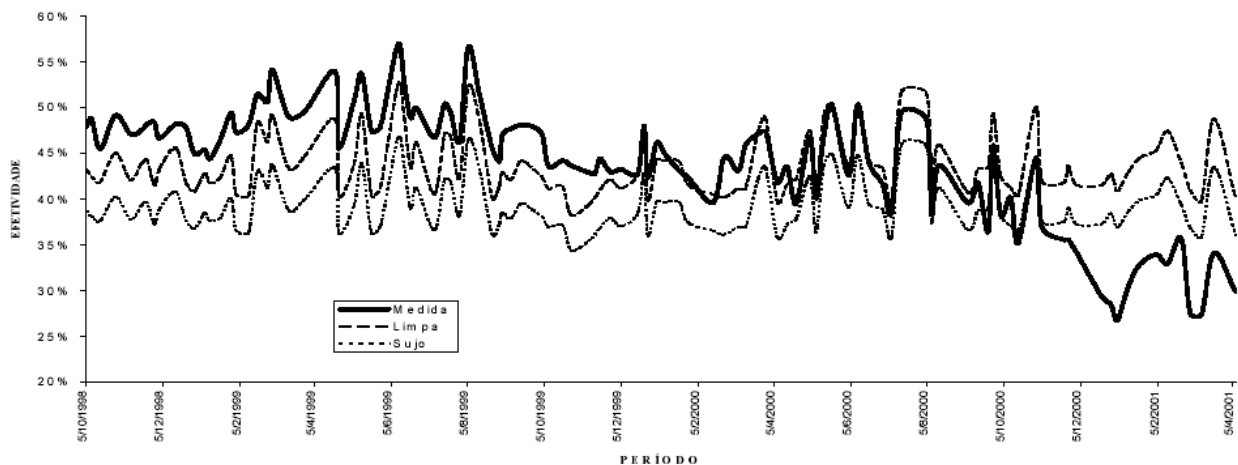


Figura 1 - Efetividade de um trocador de calor em função do tempo.

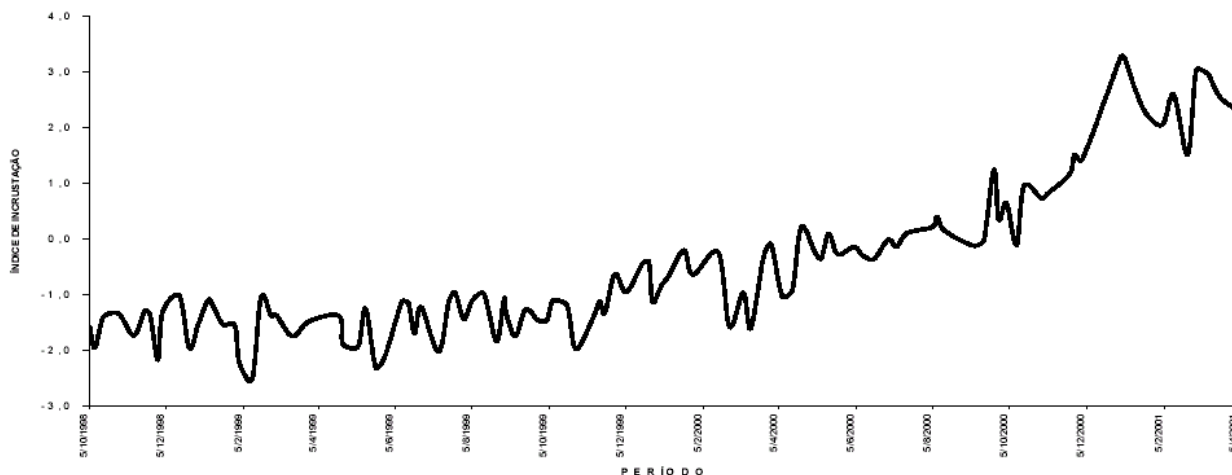


Figura 2 - Índice de incrustação de um trocador em função do tempo.

5. Conclusões

Em uma refinaria de petróleo as variações diárias nas condições operacionais, principalmente das vazões e das cargas de petróleo processadas provocam alterações constantes no desempenho térmico de trocadores de calor.

No presente trabalho, é apresentada uma metodologia capaz de monitorar o desempenho térmico da bateria de pré-aquecimento do cru. Ao contrário do procedimento tradicional, a metodologia apresentada necessita de somente dois procedimentos: 1) determinação da efetividade baseada em dados medidos e 2) cálculo das efetividades baseada em correlações. A efetividade medida é comparada à efetividade na condição limpa e suja, mostrando que o desempenho dos trocadores de calor vai reduzindo com o tempo. Foi observado que as variações de vazão são importantes no cálculo da efetividade, mas as mudanças nas propriedades do petróleo e dos produtos não apresentam influência significativa na efetividade.

De acordo com os resultados experimentais obtidos, viu-se que as correlações propostas por Jerónimo et al. (1997) apresentaram bons resultados, não somente no monitoramento térmico individual de trocadores de calor como também na rede de trocadores de calor. Estas correlações são muito mais simples de serem usadas do que o cálculo das variações de $c U$ e podem tornar-se uma ferramenta fundamental no monitoramento de trocadores de calor e de suas redes. O monitoramento contínuo da rede pode ajudar a determinar o período adequado para limpeza dos trocadores de calor.

No emprego da metodologia, é necessária a medição das temperaturas de entrada e saída de cada corrente de fluido e uma das vazões em cada trocador de calor. Vale lembrar que uma rede de trocadores de calor utilizada no préaquecimento do petróleo tem em média 40 trocadores e que a confiabilidade dos resultados obtidos no emprego da metodologia é diretamente proporcional ao grau de instrumentação da rede. Além disso, são necessários certos cuidados para garantir a confiabilidade dos dados medidos.

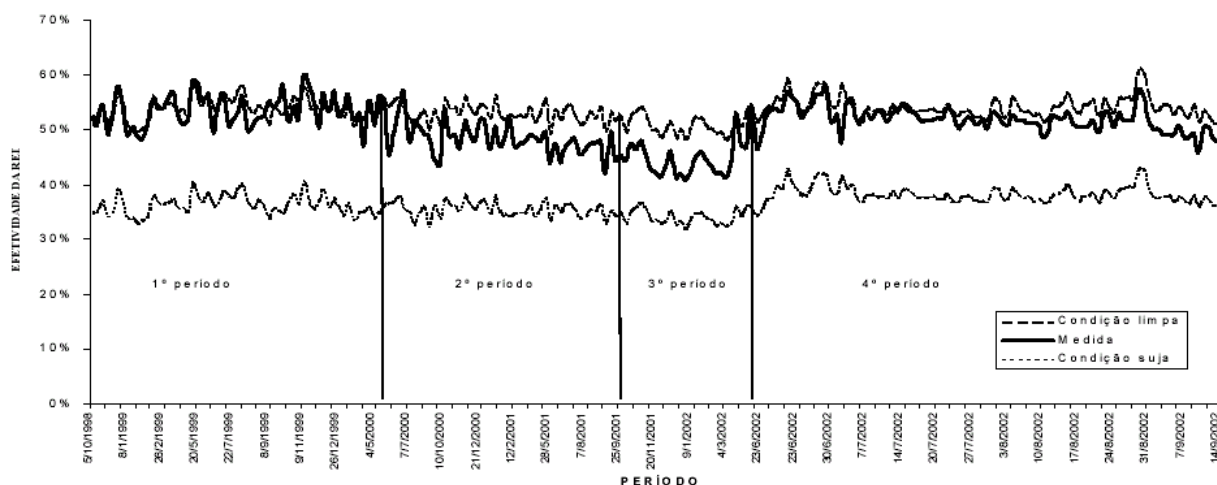


Figura 3 - Efetividade da rede em função do tempo.

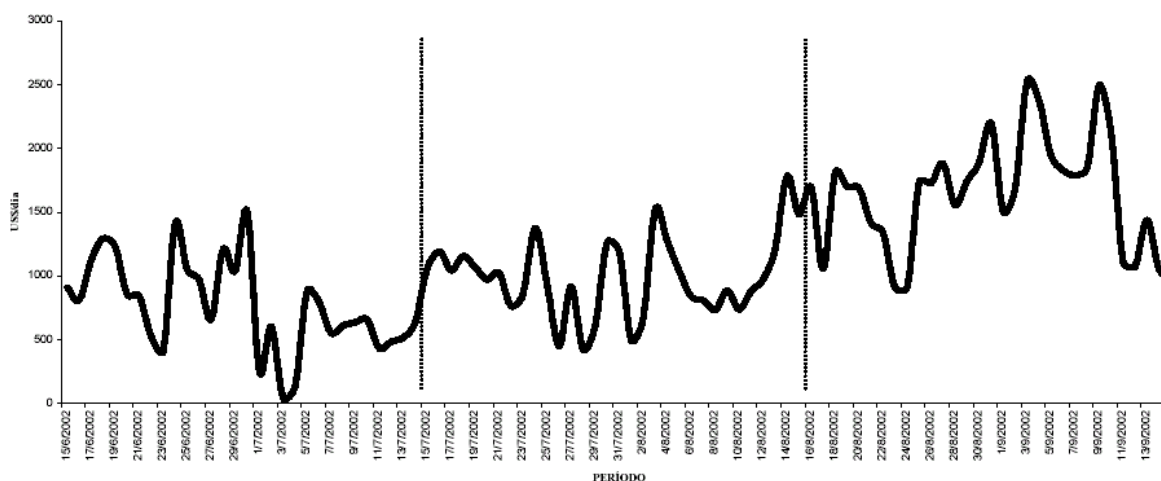


Figura 4 - Despesa adicional de combustível nos fornos.

6. Agradecimentos

Os autores apresentam seus agradecimentos: i) à Petrobras (Unidade de Negócios Refinaria Presidente Getúlio Vargas - REPAR, área de Otimização); ii) ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) e; iii) à Agência Nacional de Petróleo - ANP e à Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor de Petróleo e Gás – PRH-ANP/MCT (PRH10 – CEFET-PR), cujo apoio financeiro permitiu a realização deste trabalho.

7. Referências

- JERÓNIMO, M. A. S., MELO, L. F., BRAGA, A. S., FERREIRA, P. J. B. F., MARTINS, C., Monitoring the thermal efficiency of fouled heat exchang. – a simplified method. *Exper. Thermal and Fluid Science*, v.14, p.455–463, 1997.
- LEACH, S. H., FACTOR, S. A., Monitoring fouling in refinery and petrochemical plant heat exchange equipment. *20th National Heat Transfer Conference*. ASME, 1981.
- LIU, H, KAKAÇ, S., *Heat exchangers selection, rating and thermal design*, CRC Press, 1998.
- POLLEY, G. T., WILSON, D. I., YEAP, B. L., PUGH, S. J., Use of crude oil fouling data in heat exchanger design. *Applied Thermal Engineering*, v. 22, p.763-776, 2002.
- TONIN, P. C., *Metodologia para Monitoramento do Desempenho Térmico de Redes de Trocadores de Calor*, Dissertação de Mestrado, Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná, Curitiba-PR, 2003.