

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM TROCADOR DE CALOR INDUSTRIAL CONSIDERANDO A INCERTEZA DE MEDIÇÃO

E. A. COSTA¹, M. A. F. MARTINS², J. K. O. FERNANDES², R. A. KALID².

¹ Universidade Federal da Bahia, Colegiado do Curso de Engenharia Química.

² Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial da Universidade Federal da Bahia.

Email para contato: marciomartins@ufba.br

RESUMO – Este trabalho visa avaliar o desempenho de troca térmica de um condensador de metanol numa unidade industrial de Camaçari-Ba. A análise centra-se em determinar o coeficiente global de troca térmica do equipamento durante dois meses antes de sua parada programada para limpeza. De modo a obter uma estimativa do coeficiente global no período em questão, foram utilizados os modelos UNIQUAQ e VIRIAL para modelagem termodinâmica da condensação, acompanhada de simulações de Monte Carlo para avaliar a incerteza associada à estimativa desse parâmetro.

1. INTRODUÇÃO

A deposição e a incrustação de material orgânico, inorgânico ou biológico em equipamentos industriais podem acarretar uma série de problemas associados à operação dos mesmos, posto que o acúmulo de materiais nos internos dos equipamentos influencia diretamente algumas características operacionais do processo, tais como perda de carga e, principalmente, troca térmica. Em geral, o aumento da resistência à transferência de calor, assim como os danos às partes internas dos equipamentos industriais é causado por diversos fatores que variam em função do tipo de processo e das condições de operação, dentre outras podem-se destacar (Müller-Steinhagen, 2000):

- Cristalização: precipitação de sais dissolvidos por variação da solubilidade e solidificação de componentes de mistura;
- Partículas suspensas: deposição de pequenas partículas de óxidos metálicos.
- Reações: formação de camada de maior resistência devido às reações indesejadas, como por exemplo, polimerização.
- Deposição biológica: aumento da quantidade de algas ou microrganismos, que nas correntes aquosas na faixa de (15 a 50)°C se proliferam caso não haja adição de bactericidas.

Apesar da distinção entre cada tipo de fator contribuinte apresentado anteriormente, a ocorrência deles em uma unidade industrial não é necessariamente isolada, mas de forma concomitante.

Estudos mostram que os coeficientes globais de troca térmica de trocadores de calor em refinarias podem ser reduzidos em até 70% durante a campanha, ver, por exemplo, o trabalho de Requião et al. (2012). Aliado a essa realidade, os custos operacionais e a perda de produtividade são patentes (Wang et al., 2007), de tal forma que sua minimização deve ser uma tarefa ininterrupta da engenharia de processo.

Com intuito de avaliar o desempenho operacional de um trocador de calor industrial, este trabalho tem por finalidade estimar o calor trocado, a efetividade e o coeficiente global de troca térmica do equipamento, considerando os dados de processo e suas incertezas associadas, pois a ciência de tais parâmetros permite determinar se as condições internas do equipamento estão ou não satisfatórias para uma adequada operação.

2. METODOLOGIA

2.1. Descrição do processo

O sistema estudado consiste em um trocador de calor do tipo casco-tubo, construído com um passe no casco e um nos tubos, que visa condensar parcialmente uma mistura gasosa efluente de um reator de síntese de metanol, instalado na unidade industrial da Copenor, a qual está localizada no polo petroquímico de Camaçari-Ba. A corrente de alimentação do trocador é composta basicamente de oito componentes – água, metanol e os demais são gases não reagidos –, cuja descarga estará em equilíbrio líquido-vapor e alimenta um vaso separador. A parte gasosa efluente do vaso retorna ao processo, enquanto que a parte líquida é direcionada a um tanque de estocagem. Esta mistura deve ser resfriada a partir da temperatura de saída do reator até uma temperatura mais baixa possível, pois quanto menor for tal temperatura maior a condensação da água e do metanol. O resfriamento no equipamento é realizado com água de refrigeração (AGR).

Vale enfatizar aqui que a coleta de dados desse sistema foi realizada em um período de três meses, de junho a agosto de 2013. A unidade industrial não possui um sistema automatizado para aquisição das variáveis utilizadas neste trabalho, e por isso foi necessário o acompanhamento por parte do pessoal da operação, que, a cada duas horas, registravam os dados diretamente do campo.

2.2. Estimativa do coeficiente global de troca térmica

Existem diversos métodos para o cálculo do coeficiente global de troca térmica em um trocador calor, entre eles o método de Kern, método da efetividade e método ΔT_{ml} .

O método de Kern (Kern, 1980) é mais utilizado para projetos de novos permutadores de calor, sendo o mais detalhado. O método da efetividade-NUT baseia-se no acompanhamento da efetividade do trocador de calor e permite o cálculo do coeficiente global

quando existem apenas informações sobre as temperaturas do processo, todavia é limitado quando se trata de misturas gasosas, assim como não leva em consideração as informações sobre as vazões, quando passíveis de medição. O método mais comum é aquele baseado na diferença logarítmica da temperatura (Kern, 1980), que fornece o valor do coeficiente global combinando a área de troca térmica e a taxa de calor trocado através da seguinte expressão:

$$U = \frac{\dot{Q}}{FA\Delta T_{ml}}, \quad (1)$$

em que \dot{Q} é taxa de calor trocado entre os fluidos, F é um fator utilizado para corrigir a diferença logarítmica de temperatura em trocadores de calor que possuem arranjos diferentes do caso padrão: que é um passe no casco, um passe nos tubos e fluxo contracorrente. Quando o trocador tem essas características, como no caso estudado, utiliza-se $F = 1$. Na equação anterior a diferença logarítmica de temperatura (ΔT_{ml}) é calculada pela expressão:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \left(\frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} \right)}. \quad (2)$$

Na Equação 2, ΔT_1 e ΔT_2 são as diferenças entre as temperaturas de alimentação e descarga dos fluidos que trocam calor. No presente estudo de caso, o método a ser utilizado para calcular a taxa de calor trocado é baseado na variação da entalpia das fases líquida e vapor no intervalo de temperaturas do processo (Kern, 1980) e, assim, tanto o calor sensível quanto o latente é considerado no cálculo, o que exige a modelagem das fases por meio de equações de estado. Entretanto, as condições de temperatura e pressão do processo em análise impedem que sejam utilizadas algumas aproximações durante a modelagem termodinâmica, e.g. a lei de Raoult, a qual é limitada para baixas pressões, e a mistura deve ser formada por poucos e semelhantes componentes (Smith et al., 2007).

No condensador de metanol estudado, a taxa de calor foi calculada utilizando o software HYSYS 7.3 e os modelos termodinâmicos selecionados foram UNIQUAQ, para a fase líquida, e Virial, para a fase vapor, pois são equações de estado que se mostraram robustas para atender às condições do processo. Uma vez que o HYSYS já possui as propriedades e constantes dos modelos termodinâmicos das substâncias e soluções, bastou então substituir as condições de processo em um condensador simulado e obteve-se diretamente o calor trocado durante a condensação.

As variáveis de processo utilizadas para cálculo da taxa de calor foram:

1. Vazão mássica de alimentação da mistura gasosa;
2. Temperatura de alimentação da mistura gasosa;
3. Temperatura de alimentação da água de refrigeração;
4. Temperatura de descarga do condensado;
5. Temperatura de descarga da água de refrigeração.

Adicionalmente, as seguintes hipóteses foram assumidas:

1. Concentração das correntes invariante no tempo;
2. Temperatura de alimentação da água de refrigeração é a mesma que a da descarga da torre de refrigeração;
3. Temperatura de descarga da mistura gasosa é a mesma que a temperatura de alimentação do vaso separador;
4. Área de troca térmica constante.

2.3. Avaliação da incerteza

Considerando as informações de processo, temperaturas e vazão, dividiram-se os dados coletados em quatro conjuntos separados de acordo com a Tabela 1. Como critério de divisão, usou-se a mudança de ponto de operação, e selecionaram-se pontos onde havia alteração em vazões ou temperaturas do processo, ou interrupção da operação.

Tabela 1 – Divisão do conjunto de dados amostrais.

Conjunto	Data Início	Data fim
1	24/06/2013	28/06/2013
2	28/06/2013	31/07/2013
3	31/07/2013	20/08/2013
4	20/08/2013	22/08/2013

Para avaliar as incertezas associadas ao calor trocado e o coeficiente global, foi utilizado um dos métodos reconhecidos internacionalmente para tal tarefa, qual seja o Suplemento 1 do GUM (da sigla em inglês, Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) (BIPM et al., 2008). Este método consiste em avaliar, mediante simulações de Monte Carlo, as incertezas das grandezas de saída pela propagação de funções de densidade de probabilidade (PDF – Probability Density Function) das grandezas de entrada através do modelo (de medição). Dentro deste contexto, de modo a construir PDFs para as grandezas de entrada, adotou-se uma posição mais conservadora e atribuíram-se distribuições uniformes, cujos limites são iguais aos valores de mínimo e máximo dos respectivos conjuntos de dados do processo. Portanto, considerou-se a fonte de incerteza como sendo apenas a variabilidade do processo, desconsiderando as fontes de incerteza do tipo B, bem como as correções sistemáticas associadas aos instrumentos de medição.

Na aplicação do método de avaliação de incerteza, foram amostrados das distribuições uniformes cem mil pontos para cada um dos conjuntos de dados, tal que uma PDF conjunta para as grandezas de saída pudesse ser obtida. Conhecida tal PDF conjunta, pode-se estimar seus momentos estatísticos, tais como média, incerteza (desvio padrão),

assim como intervalos de abrangência das PDFs marginais, para uma dada probabilidade de abrangência.

A execução desse procedimento exigiu a comunicação entre HYSYS com outro software de tal forma que os valores das grandezas de entrada fossem modificados e, posteriormente, se armazenassem os valores referentes à grandeza de saída – calor trocado, e consequentemente, o coeficiente global de troca térmica, via Equação 1. Essa comunicação foi realizada com o uso de um programa desenvolvido em Visual C# (C Sharp), linguagem de programação orientada a objetos desenvolvida pela Microsoft, em conjunto com o MySQL, Sistema Gerenciador de Banco de Dados da Oracle; ambas as ferramentas foram utilizadas em suas versões gratuitas.

3. RESULTADOS

A taxa de calor trocado durante a condensação foi calculada e comparada com a taxa de calor de projeto, a qual possui um valor de $3,908 \cdot 10^7 \text{ kJ} \cdot \text{h}^{-1}$. Na Figura 1 observam-se os valores das taxas de calor para cada um dos quatro pontos de processo e seus respectivos intervalos de abrangência, admitindo uma probabilidade de abrangência de 90%. Quando comparados à taxa de calor do projeto, situação na qual a resistência devido à corrosão e deposição é nula, apenas os conjuntos 3 e 4 podem ser considerados diferentes, pois o valor de projeto não está contido nos intervalos de abrangência. Quando comparados entre si, há sobreposição dos três primeiros resultados (1, 2 e 3), de modo que não se pode afirmar que eles são estatisticamente diferentes, porém o último conjunto pode ser considerado diferente dos outros anteriores.

Devido à falta de um histórico de operação maior, não é possível observar a forma como os parâmetros aqui calculados variam durante o ciclo de operação do condensador. O ideal é que estes cálculos sejam realizados de forma paralela à operação e em todo o período da campanha.

Em diversos casos a efetividade de troca térmica é um parâmetro que fornece informações valiosas à avaliação da troca térmica em condensadores ou permutadores de calor. Todavia, por ser um parâmetro que pode ser calculado apenas como relação entre as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, desconsiderando, por exemplo, informações das vazões mássicas em certos sistemas, podem induzir ao erro. No caso estudado não há limitação sobre a vazão de AGR utilizada para condensação, como nos processos de recuperação de calor onde duas corrente de processo trocam calor entre si. Desta forma, considerando a incerteza existente no processo, a efetividade não pode ser considerada diferente da condição de projeto, porém há uma compensação na vazão da água, ou seja, para que o produto seja especificado e a temperatura de descarga seja atingida, há um aumento gradativo do volume de água utilizado. A Figura 2 mostra os valores da efetividade e seus respectivos intervalos de abrangência. É possível observar que durante todo o período estudado, a efetividade do trocador limpo está dentro dos intervalos de abrangência dos valores de efetividade calculados para a situação atual.

O coeficiente global de troca térmica é muito dependente das condições de processo.

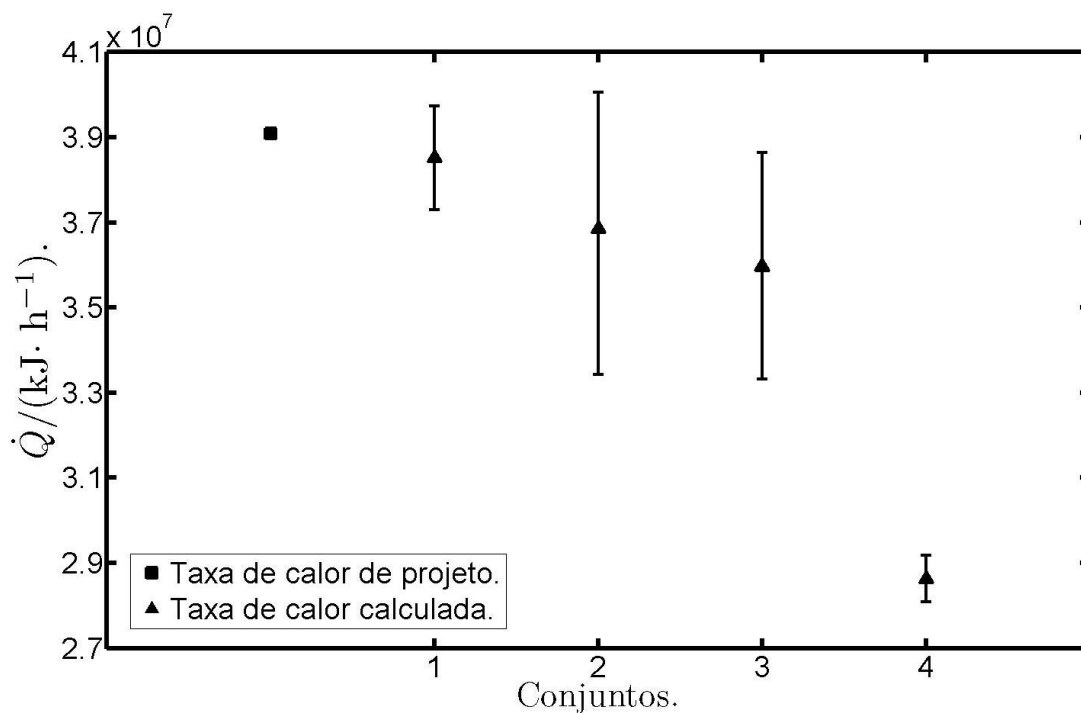


Figura 1 – Taxa de calor trocado, considerando quatro pontos de operação.

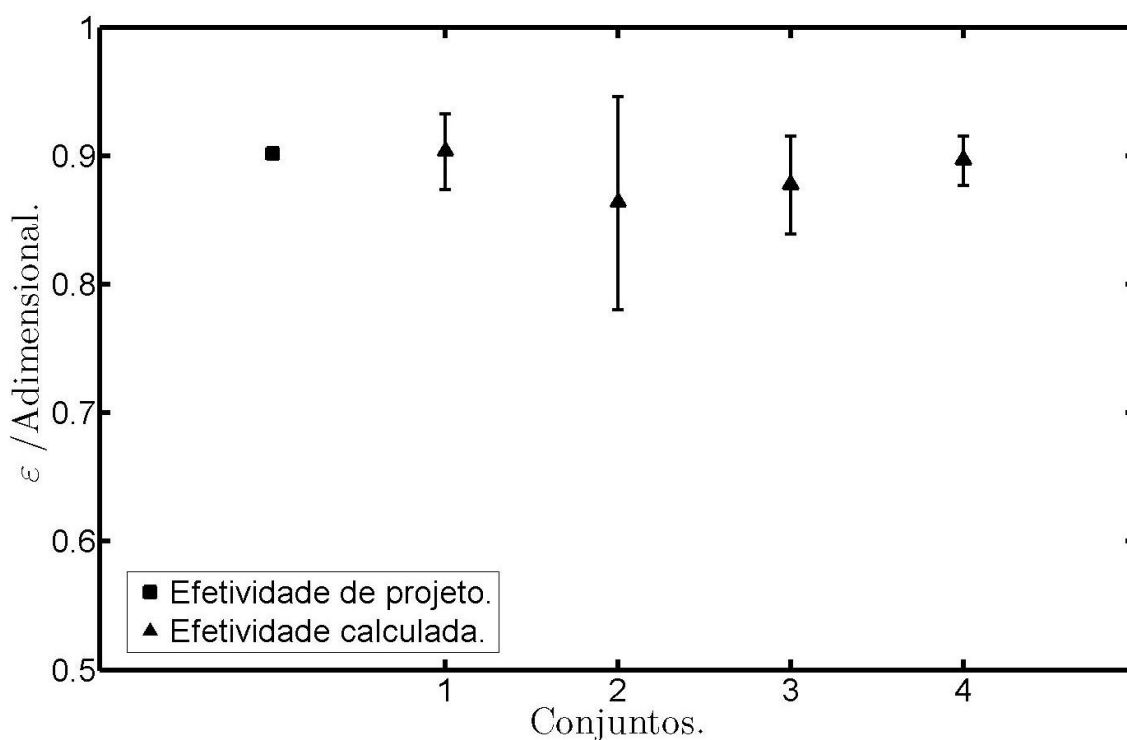


Figura 2 – Efetividade de troca térmica.

Como a incerteza das variáveis foi avaliada a partir da variabilidade do processo, as flutuações dos valores das vazões e temperaturas contribuíram para uma maior incerteza,

o que torna os intervalos de abrangência maiores. Na Figura 3 é possível observar que, para os dados industriais, o coeficiente global não pode ser considerado estatisticamente diferente, embora quando comparado à condição de projeto, Tabela 2, o quarto conjunto tem valor do coeficiente global igual a 46,4% do valor de projeto.

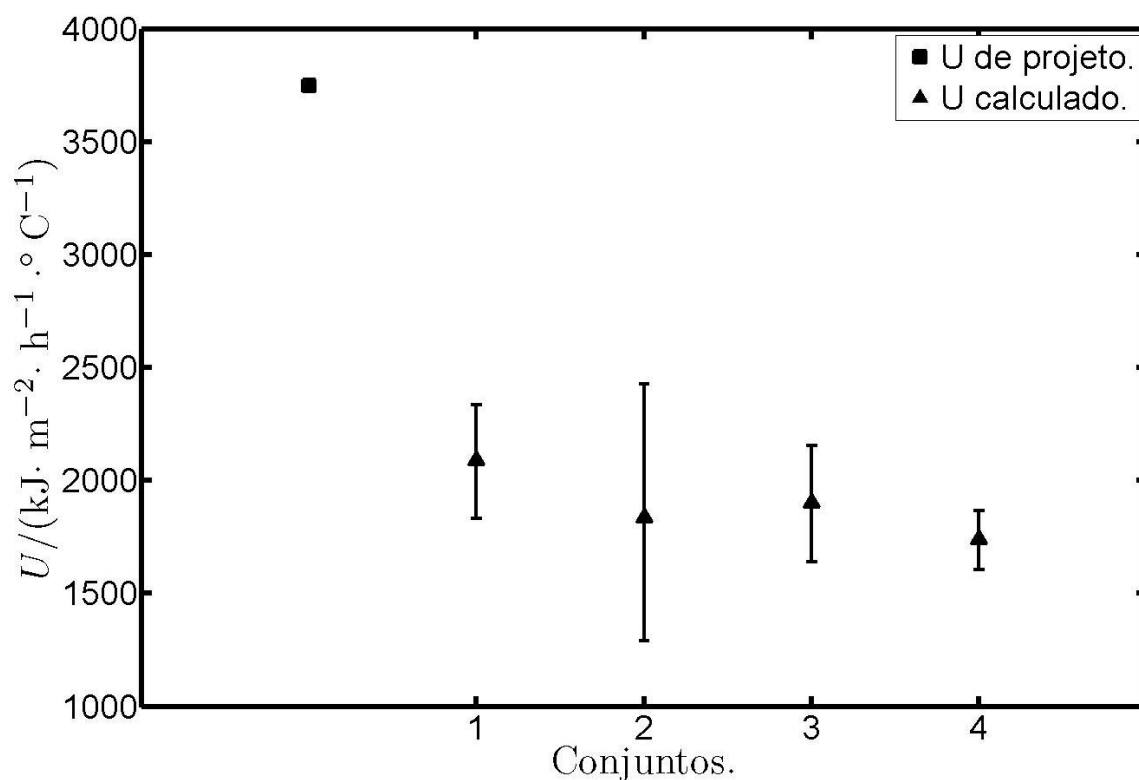


Figura 3 – Coeficiente global de troca térmica.

Tabela 2 – Razão entre valor calculado e de projeto.

Conjunto	Média/ (kJ· m ⁻² . h ⁻¹)	Porcenta- gem em relação ao projeto %
Projeto	3 749,23 -	-
1	2 089,73	56,0
2	1 833,66	48,9
3	1 901,01	50,7
4	1 739,91	46,4

4. CONCLUSÃO

Com as informações disponíveis do processo foi possível calcular o calor trocado, eficiência de troca térmica e o coeficiente global de troca térmica, assim como suas incertezas associadas. O coeficiente global está menor que o valor calculado para o condensador limpo, cerca de 50%, o que indica que há incrustação ou deposição de materiais que alteram a capacidade de troca térmica do equipamento, aumentando o custo do processo com aumento da vazão de água de refrigeração e elevando o custo de bombeamento e, portanto, existe a necessidade de limpeza. Além disso, o conhecimento da incerteza constata que o coeficiente global de troca térmica se mantém estável para o período estudado. Como trabalho futuro, esta metodologia pode ser aplicada para avaliar o tempo de campanha de trocadores de calor da unidade industrial.

REFERÊNCIAS

- BIPM; IEC; IFCC; ILAC; ISO; IUPAC; IUPAP; OIML. Evaluation of measurement data — Supplement 1 to the “Guide to the expression of uncertainty in measurement” — Propagation of distributions using a Monte Carlo method. Relatório técnico, JCGM 101:2008, 2008.
- KERN, D. Q. *Processos de transmissão de calor*. Guanabara dois, Rio de Janeiro, RJ, 1980.
- MÜLLER-STEINHAGEN, H. *Heat Exchanger Fouling: mitigation and cleaning technologies*. Institution of Chemical Engineers, illustrate edição, 2000.
- REQUIÃO, R.; KALID, R. A.; SOARES, R. D. P. Uso da Incerteza no acompanhamento de processo: Determinação do coeficiente global de transferência de calor. Em *XIX Congresso Brasileiro de Engenharia Química COBEQ*, no. 2000, p. 1–9. em publicação, 2012.
- SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. *Introdução à termodinâmica da engenharia química*. Rio de Janeiro, RJ, 2007.
- WANG, L.; SUNDÉN, B.; MANGLIK, R. M. *Plate Heat Exchangers: Design, Applications and performance*. WIT Press, Southampton, Great Britain, 2007.