

Balanço hídrico e energético de um sistema de resfriamento

A.M. AGUIAR¹, A.M. BARRA², J. R. D. FINZER³

^{1,2,3} Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química

RESUMO – *Em uma indústria de produtos químicos, as torres de resfriamento são equipamentos importantes no processo de troca de calor. Esse equipamento de operação contínua é utilizado para gerar a transferência de massa e energia no resfriamento da água. Trocadores de calor são os equipamentos usados para a troca de calor entre dois fluidos sujeitos a diferentes temperaturas. O objetivo deste trabalho foi realizar o balanço de massa e energia de um dos sistemas de resfriamento comparando os valores obtidos na prática com o valor de projeto e avaliar três trocadores de calor tipo casco e tubo que antecedem a torre deste sistema. Para cálculo do balanço de massa e energia da torre de resfriamento mediu-se e calculou-se todas as vazões de entrada do sistema e as perdas líquidas por evaporação, arrasto e purga. As medidas são de uma indústria química de fertilizantes, na região de Uberaba-MG. Em seguida, obteve-se a real situação do sistema quando comparado os valores com os dados de projeto. Analisando esses resultados verificou-se que um dos trocadores de calor do circuito apresentava vazão de água menor do que o projetado, trocador também apresentava incrustações no lado água externo aos tubos de troca de calor. Avaliou-se o histórico de análises químicas da água e os parâmetros de operação do sistema buscando compreender as possíveis causas para a incrustação do trocador. Por fim encontram-se os futuros objetivos de estudo para uma melhor avaliação e acompanhamento deste sistema de resfriamento, bem como as ações que devem ser tomadas para evitar futuros problemas no trocador crítico.*

1. INTRODUÇÃO

Em uma indústria química, geralmente, tem-se calor excedente proveniente de diversas operações unitárias. As torres de resfriamento são equipamentos importantes na etapa da dissipação desse calor, através de um processo contínuo de transferência de calor e massa.

Com as dificuldades para captação de água, opta-se por sistemas de resfriamento que reutilizam a água gerando ciclos de concentração de sais. Desta forma a água necessita de tratamentos químicos que evitem corrosão, deposição e incrustação nos equipamentos onde será circulada.

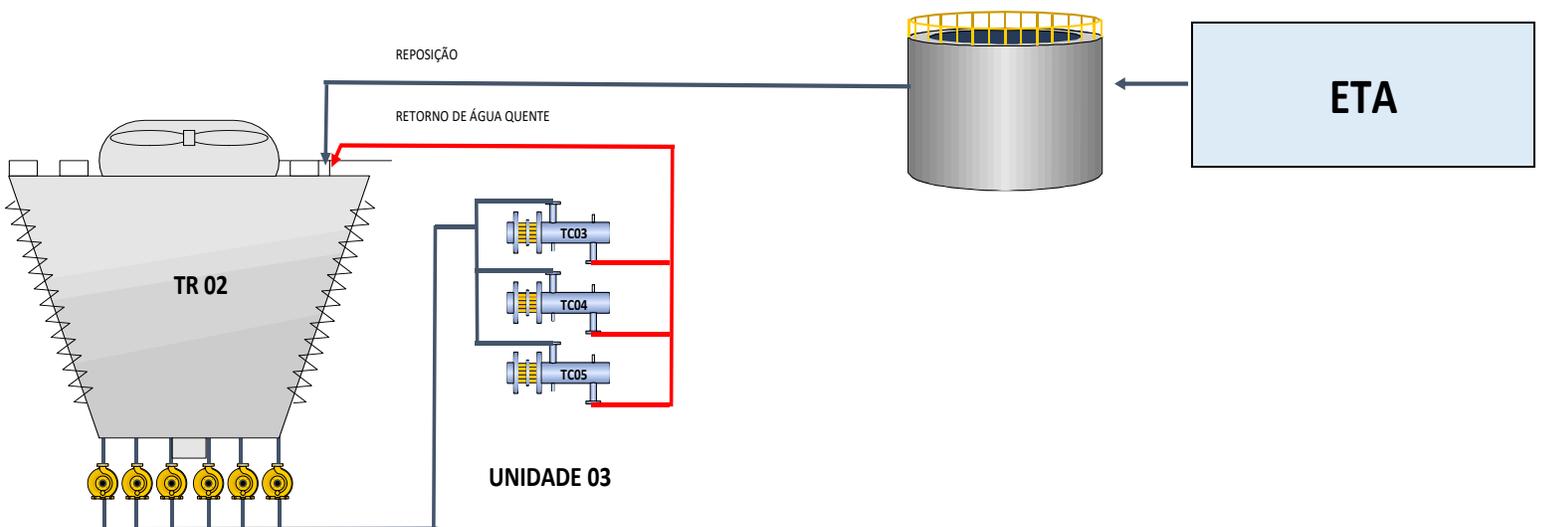
Este trabalho apresenta uma comparação entre os dados de projeto e operação atual de um sistema de resfriamento de uma indústria química de fertilizantes, na região de Uberaba-MG. Esta tem um papel fundamental na economia e é reconhecida como usuária intensiva de água. A água utilizada pertence a bacia hidrográfica do Rio Grande, na qual a outorga da empresa é de aproximadamente 1300m³/h.

O objetivo deste estudo foi calcular os balanços hídricos e energéticos comparando os valores entre operação e projeto, visando maior eficiência de troca térmica, menor consumo de água e maior campanha dos equipamentos do sistema de resfriamento. Buscou-se apresentar um breve estudo de causa sobre perda de eficiência que ocorreu em um trocador de calor deste sistema.

2. TORRE DE RESFRIAMENTO

O equipamento mais utilizado para resfriar a água, são as torres de resfriamento. Abaixo, na Figura 1 está um esquema do sistema de resfriamento avaliado:

Figura 1: Esquema do sistema de resfriamento

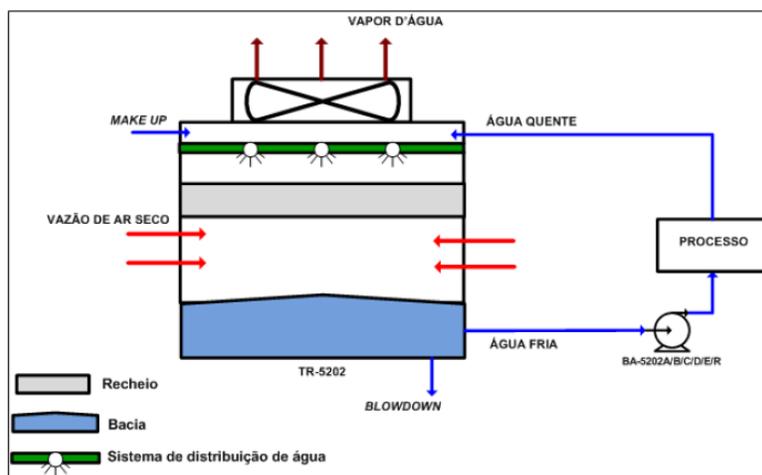


Fonte: Acervo da autora

A torre de resfriamento está associada a fatores de redução de custos operacionais e ecológicos. Uma característica importante desse equipamento é o não desperdício de água, pois há reposição apenas para suprir as perdas de água devido à evaporação, arrasto e

purgas. Sendo assim, tornam-se necessária uma reposição de água para manter o nível operacional e adequar os parâmetros físico-químicos da água. Esta reposição é conhecida como *make-up*. Um esquema da torre analisada é apresentado na Figura 2:

Figura 2: Esquema de torre de resfriamento



Fonte: A empresa

A torre de resfriamento em estudo é do tipo tiragem mecânica forçada, em contra fluxo entre ar e água. Os sistemas de distribuição de água quente são em tubos PVC. A capacidade total de cada célula (um ventilador é acoplado à cada célula, no estudo existem cinco células) é de 1875 m³/h e a temperatura da água quente é 40°C, já a temperatura de água fria é 30°C. A capacidade térmica da torre é de 18750 Mcal/h. As perdas por arraste são de 0,01% da vazão da torre e as perdas por evaporação 1,51% da vazão da torre. A torre em estudo pode ser vista na Figura 3.

Figura 3: Torre de resfriamento 02



Fonte: Acervo da autora

3. TROCADOR DE CALOR

Trocadores de calor são equipamentos em que dois fluidos a diferentes temperaturas trocam calor separados por uma superfície metálica, podendo ou não ocorrer mudança de fase dos fluidos (SOUZA, 2013). Esses equipamentos são largamente empregados em indústrias em geral, servindo como um básico componente para muitos processos de engenharia (BICCA, 2006).

O sistema de resfriamento em estudo é composto por três trocadores de calor tipo casco e tubo. Quanto ao tipo de escoamento, os trocadores deste sistema, TC 03 e 04 são contracorrente enquanto o trocador 05 é concorrente.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Realizou-se o balanço hídrico do sistema de resfriamento utilizando os dados de projeto e processo. Utilizaram-se os dados da operação de vazão de reposição da torre de resfriamento, calculou-se as perdas por arrasto, evaporação e purga.

Os cálculos para balanço hídrico e energético dos trocadores de calor foram feitos a partir da vazão de ácido circulante e sua troca térmica. Desta forma calculou-se a vazão de água.

Os dados foram coletados em um intervalo mensal entre abril a outubro de 2018, sendo que a temperatura foi mensurada através de um termômetro infravermelho e através de dados de controle no painel de operação.

Todos os cálculos utilizados foram com base no livro (Treybal, 1980) onde para a torre de resfriamento calculou-se os valores para make up e purga contínua usando a Equação (1)

$$M = B + E + W \quad (1)$$

Sendo,

E = perda por evaporação (kg/h)

W = Perda por arrasto (kg/h)

B = perda por purga (kg/h)

M = *make-up* (kg/h)

Em seguida realizou-se a dedução da Equação (1) para o cálculo de purga e obteve-se a Equação (2):

$$B = \frac{E}{x_c - x_m} \cdot x_m - W \quad (2)$$

Sendo,

x_c = fração de circulação da água (200 ppm)

x_m = fração de circulação de *make-up* (20ppm)

Utilizou-se valores de acordo com a folha de dados da torre de resfriamento, carta psicrométrica, e a tabela de propriedades termodinâmicas de acordo com ASHRAE, 1990.

Os resultados encontrados do balanço hídrico da torre de resfriamento comparando os dados de projeto e de operação estão dispostos na Tabela 1.

Tabela 1: Dados de projeto e operação da torre de resfriamento

	PROJETO (m ³ /h)	OPERAÇÃO(m ³ /h)
W	0,8375	0,938
E	126,463	158,14
M	163,5	174,78
B	21	17

Fonte: Cálculo da autora (2018).

Os resultados encontrados no balanço energético da torre de resfriamento, comparando os dados de projeto e operação estão disponíveis na Tabela 2.

Tabela 2: Condições de operação da torre de resfriamento

VARIÁVEL DE PROCESSO	CONDIÇÕES DE PROJETO	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO
Temperatura de entrada (água)	40 °C	46 °C
Temperatura de saída (água)	30°C	38 °C
ΔT (água)	10 °C	8 °C
Vazão de água	9375 m ³ /h	8200 m ³ /h
Calor trocado	91875 kcal/h	64288 kcal/h

Fonte: Cálculo da autora (2018).

Para os cálculos de vazão de água nos trocadores de calor do sistema, utilizou-se a Equação (6), de acordo com Incropera 2008. Com esta equação, através da vazão, diferença de temperatura do ácido e da água de resfriamento, calcula-se a vazão de água:

$$Q = \dot{m} \times C_p \times \Delta T \quad (6)$$

Sendo:

Q = quantidade de calor (Kcal/h)
 \dot{m} = vazão mássica (Kg/h)
 Cp = capacidade calorífica (kcal/g °C)
 ΔT = Diferença de temperatura (°C)

Para os cálculos, usou-se o calor específico médio do ácido em 0,38 kcal/g °C e da água em 0,98 kcal/g °C.

No quadro 1 apresenta-se os valores de vazão de água, ácido sulfúrico e quantidade de calor trocado comparando os dados de projeto e operacional.

Quadro 1: Vazões comparadas com dados do projeto e operacional

	TC-1303					
	ÁGUA (m3/h)		ÁCIDO (m3/h)		Calor trocado (kcal/h)	
	PROJETO	OPERAÇÃO	PROJETO	OPERAÇÃO	PROJETO	OPERAÇÃO
abr/18	1754	1330	503	387	17051596	14266291
mai/18	1754	744	503	387	17051596	6544170
jun/18	1754	1403	503	393	17051596	14141901
jul/18	1754	1047	503	436	17051596	16167762
ago/18	1754	1314	503	399	17051596	13672561
set/18	1754	1275	503	388	17051596	12392037
out/18	1754	1275	503	388	17051596	12392037
	TC-1304					
	ÁGUA (m3/h)		ÁCIDO (m3/h)		Calor trocado (kcal/h)	
	PROJETO	OPERAÇÃO	PROJETO	OPERAÇÃO	PROJETO	OPERAÇÃO
abr/18	2876	1535	1591	2173	31255281	28433407
mai/18	2876	1535	1591	1871	31255281	23082470
jun/18	2876	970	1591	1437	31255281	17569882
jul/18	2876	1593	1591	2077	31255281	28964431
ago/18	2876	1554	1591	1854	31255281	24659280
set/18	2876	1526	1591	1860	31255281	24830603
out/18	2876	1526	1591	1860	31255281	24830603
	TC-1305					
	ÁGUA (m3/h)		ÁCIDO (m3/h)		Calor trocado (kcal/h)	
	PROJETO	OPERAÇÃO	PROJETO	OPERAÇÃO	PROJETO	OPERAÇÃO
abr/18	140	135	57	55	762389	650369
mai/18	140	163	57	55	762389	488717
jun/18	140	177	57	54	762389	626487
jul/18	140	205	57	56	762389	704099
ago/18	140	253	57	107	762389	1331946
set/18	140	103	57	53	762389	737149
out/18	140	103	57	53	762389	737149

Fonte: Cálculo da autora (2018).

Buscou-se apresentar também os cálculos de coeficiente global de troca térmica “U” apresentado na Equação (7).

$$U = \frac{Q}{F_c \cdot A \cdot \Delta T_{DTML}} \quad (7)$$

Sendo,

Q= quantidade de calor trocado (Kcal/h)

A= área (m²)

ΔT_{DTML} = Diferença de temperatura média logarítmica (°C)

Fc= Fator de correção do ΔT_{DTML}

O fator de correção para o ΔT_{DTML} foi calculado através do site ChemicalEngineeringCalculation para cálculos de engenharia. Como o fator de correção foi próximo a 1, geralmente considera-se 1 para cálculos. Obteve-se os seguintes resultados de coeficiente global de troca térmica com dados de projeto, apresentados na Tabela 4:

Tabela 3: Cálculos de coeficiente global de troca térmica com dados de projeto

		PROJETO					
	Q(Kcal/h)	T _{ent.} H ₂ O (°C)	T _{saíd.} aH ₂ O (°C)	T _{entrada} ácido (°C)	T _{saída} á cido (°C)	ΔT_{DTML}	U (Kcal/ h·m ² ·°C)
03	18756755	30	41	110,7	60	42,66	1317,92818
04	31255281	30	41	110,7	80	57,35	1045,23699
05	763549	30	41	60	45	16,92	913,988328

Fonte: Dados coletados pelas autoras(2018).

Para os valores encontrados de coeficiente global de troca térmica com dados de operação foi feita uma média referente aos meses analisados, encontrando assim os valores de 1036,14 kcal/h.m².°C para o trocador 03; 867,67kcal/h.m².°C para o trocador 04 e 1223,65 kcal/h.m².°C do trocador 05.

Pode-se observar que comparando os dados de projeto com os resultados de operação da torre, a operação apresentou maior perda de água por evaporação, arrasto, conseqüente maior reposição de água.

Observa-se também que a vazão de recirculação da torre está diferente da vazão de projeto. A vazão de projeto é de 9375 m³/h e a de operação quando estão todos os equipamentos em operação chega a 8200m³/h. Observa-se ainda que há alguma falha na distribuição dos fluxos dos trocadores de calor visto que o TC 04 está com a vazão de água na média dos dados coletados, quase 50% abaixo da vazão de projeto. O mesmo acontece com o trocador TC 03, porém em menor diferença, na média dos dados coletados, a vazão está 31% abaixo da vazão projetada. No trocador TC 05 acontece totalmente o inverso, a vazão de água de resfriamento é maior do que a de projeto aproximadamente 16%.



Nota-se ainda que as vazões de ácido de projeto do trocador 04 na maioria dos resultados coletados estava muito próximo à vazão que foi projetada, enquanto a vazão de água foi basicamente a mesma vazão de ácido. O inverso aconteceu com os outros trocadores onde a vazão de ácido mesmo que esteja próximo da vazão projetada tinha em contrapartida quase o dobro de vazão de água circulando.

O coeficiente global de troca térmica dos trocadores 03 e 04 apresentaram resultados de operação menores do que os coeficientes de projeto, indicando possíveis incrustações ou materiais depositados interferindo na troca térmica. O trocador 05 obteve o coeficiente global de operação satisfatório.

A eficiência dos trocadores, avaliada através do coeficiente global de troca térmica, pode ser afetada quando ocorrem oscilações na vazão dos fluidos e ocasionar corrosão e/ou incrustações nos equipamentos.

Observa-se que de todo o sistema o equipamento crítico que apresenta maiores desvios é o trocador 04 que por consequência também apresentou incrustação.

5. CONCLUSÃO

A incrustação é um dos problemas mais comuns encontrados em sistemas de água de resfriamento. A incrustação é a precipitação de minerais cristalinos que resultam quando a concentração de íons na solução excede a solubilidade.

Mudanças na temperatura de uma solução saturada aumentarão ou diminuirão a solubilidade, a incrustação tende a ser concentrada nas áreas onde a saturação é a mais alta, no caso da precipitação de fosfato de cálcio o aumento de temperatura na saída da água de resfriamento do trocador 04 (devido baixo fluxo de água de resfriamento), as concentrações de cálcio, ortofosfato e pH elevado aumentam a velocidade de incrustação.

Algumas incrustações possuem o que é descrito como “solubilidade inversa”, significando que elas são menos solúveis em temperaturas mais altas. Outras têm “solubilidade direta” significando que elas são mais solúveis em temperaturas mais altas.

De acordo com a empresa que trata a água de resfriamento deste sistema em estudo, o uso de fosfatos como inibidores de corrosão pode ser usado quando aplicado em conjunto com dispersantes específicos. Porém, em casos de variação de outros parâmetros como o pH elevado, baixo fluxo de água no trocador de calor enquanto há uma elevada demanda térmica do lado processo contribuirão para casos de precipitação.

Portanto pode-se concluir que após troca do equipamento houve maior vazão de água para o sistema e controle maior de pH e fosfato na água do sistema de resfriamento. Acredita-se

que mantendo estes parâmetros estáveis não teremos incrustações de mesma natureza neste equipamento.

Através dos estudos fica a ressalva que deve ser verificado a distribuição de água para os trocadores de calor, já que o sistema está operando com folga de aproximadamente mil metros cúbicos. Pode-se avaliar a possibilidade de ajustes em válvulas para aumentar o fluxo para o trocador 04 e/ou avaliar a viabilidade de instalação de um trocador de calor anterior ao 04, que seja projetado para uma operação com as condições atuais e com uma diferença de temperatura de entrada e saída do ácido menor do que a diferença requerida atualmente para o trocador 04, com finalidade de diminuir a carga térmica do equipamento. Há ainda a necessidade de estudo avançado dos dispersantes inorgânicos usados para este sistema de resfriamento e avaliação das fontes que contribuem para o aumento da concentração de fosfato na água, com a finalidade de adequar e/ou sugerir alterações no programa de tratamento da água do sistema.

A continuidade de avaliação dos parâmetros químicos e de processo - vazão de ácido, temperatura de entrada e saída do ácido - poderiam fechar um bom acompanhamento da campanha deste trocador crítico.

6. REFERÊNCIAS

ASHRAE Handbook – 1985. **Fundamentals**. Atlanta. ASHRAE, 1985/2009. Cap. 6.

BICCA, Gerson Balbueno. **MODELAGEM HIERÁRQUICA DE TROCADORES DE CALOR CASCO E TUBOS**. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp047393.pdf>> Acesso em 26 de Novembro de 2018.

INCROPERA, Frank P. Fundamentos de transferência de calor e de massa. 6 edição. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

SOUZA, Monique Silveira. **ANÁLISE TÉRMICA DE UM TROCADOR DE CALOR DO TIPO CASCO E TUBOS PARA RESFRIAMENTO DO RESÍDUO DE UMA UNIDADE DE DESTILAÇÃO ATMOSFÉRICA**. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10007837.pdf>> Acesso em 26 de Novembro de 2018.

TREYBAL, R.E. **Mass- Transfer Operation**. 3rd edition. Mc Graw – Hill, New York: 1980.