

Redução da emissão de poluentes líquidos por reutilização de água em processos industriais

Aparecido Nivaldo Módenes^{1*}, Ricardo Menon¹ e Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani²

¹Núcleo de Biotecnologia e Desenvolvimento de Processos Químicos, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Rua da Faculdade, 2550, 85903-000, Toledo, Paraná, Brasil. ²Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: modenes@unioeste.br

RESUMO. Neste trabalho, apresenta-se uma metodologia para a redução de emissões de poluentes em processos industriais por reutilização da água, utilizando a Análise *Pinch*. Essa redução é alcançada por meio da síntese de redes de equipamentos de transferência de massa (RETM). A metodologia proposta para a síntese da rede define inicialmente os seus objetivos com relação ao custo mínimo, ao número mínimo de equipamentos e à vazão mínima de água. Depois de sintetizada, a rede é evoluída, identificando e quebrando os possíveis laços de transferência de massa, sem que as quantidades de água utilizadas sejam alteradas. Após a evolução, a viabilidade econômica da rede é estudada. Um caso industrial apresentado na literatura foi utilizado para mostrar a consistência da metodologia empregada. Os resultados obtidos refletem a importância da análise da viabilidade econômica na síntese de RETM.

Palavras-chave: Análise *Pinch*, síntese de RETM, reuso de água.

ABSTRACT. Pollutant emissions reduction by water reuse in industrial processes. In this work a methodology to reduce pollutant emissions in industrial processes by water reuse is proposed. The pollutant emission reduction is achieved by the synthesis of mass exchange equipment (MEN). Pinch Analysis is used. The proposed methodology to the MEN synthesis initially sets the targets relative to the minimum global cost, the minimum number of mass exchange equipment and the minimum water flowrate. After the synthesis step, the MEN is evolved, by identifying and breaking mass exchange loops, without water flowrate changes. After the evolution step, an economical analysis is achieved. An industrial case published in the literature was used to show the efficiency of the proposed methodology. Results reflect the importance of economical analysis jointly with the MEN synthesis.

Key words: Pinch Analysis, synthesis of MEN, water reuse.

Introdução

A utilização da água em processos industriais resulta em dois grandes problemas para a indústria: o custo com o tratamento da água de alimentação e o custo com o tratamento do efluente gerado. Geralmente, nem todos os processos que utilizam água necessitam de que a mesma seja completamente limpa. Assim, em vez de usar água limpa em cada processo, pode-se reutilizá-la. O reuso da água pode ser pensado sintetizando-se Redes de Equipamentos de Transferência de Massa (RETM), em analogia à síntese de Redes de Trocadores de Calor (RTC).

Conforme Menon (2003), não são muitos os trabalhos que enfocam a reutilização de água em

processos industriais. Um dos trabalhos mais importantes abordando o assunto foi apresentado por Wang e Smith (1994), que desenvolveram uma metodologia simples, baseada na Análise *Pinch*, que garante a máxima reutilização da água, além de fornecer dois métodos importantes para o projeto de RETM.

De acordo com Módenes (1999), para a síntese de RETM, duas grandes escolas se desenvolveram ao longo dos últimos anos: a que se utiliza dos métodos de programação matemáticos, como programação linear e não-linear, e a Análise *Pinch*, baseada em regras heurísticas e em conceitos da Termodinâmica. No presente trabalho, a Análise *Pinch* foi o caminho escolhido para o desenvolvimento de uma

metodologia para a síntese de RETM, com a finalidade de minimizar a geração de poluentes líquidos por meio do reuso da água. Essa escolha foi baseada na simplicidade para aplicação e fácil interação com o usuário.

Caso estudado

Para apresentar a metodologia desenvolvida na reutilização da água, um caso industrial apresentado por Takama *et al.* (1980) foi utilizado. Esse caso foi escolhido porque envolve vários contaminantes e permite que seja feita a análise de viabilidade econômica. Além disso, os autores utilizaram técnicas de programação matemática para otimização do processo. Trata-se de uma refinaria de petróleo. São considerados 3 processos que mais consomem água, com cerca de 85% do total da água da refinaria, excluindo-se a água utilizada no resfriamento e na geração de vapor. Essas correntes não são consideradas, nesse caso, porque já são comumente reutilizadas, com ou sem tratamento prévio. O primeiro processo é composto por várias operações que utilizam vapor de água. O segundo processo trata-se da hidrodessulfurização, o qual necessita de injeção de água. O terceiro processo é composto por um dessalinizador, incluindo uma unidade de destilação bruta. Os três maiores contaminantes considerados são sólidos suspensos (**a**), H₂S (**b**) e óleo (**c**). Após a entrada de água contaminada dentro dos limites máximos permitidos, os equipamentos continuam operando com a mesma eficiência, não necessitando de mudanças.

Os dados de processo (perfil limite de água) são apresentados na Tabela 1 e as informações para os cálculos de custo encontram-se no Quadro 1. As concentrações inicial e final são representadas pelas variáveis C_{ent} e C_{sai} .

Tabela 1. Perfil limite de água.

Processo	Vazão (t/h)	Contaminante	C_{ent} (ppm)	C_{sai} (ppm)
1	45,8	Sólidos suspensos	0	25
		H ₂ S	0	390
		óleo	0	10
2	32,7	Sólidos suspensos	50	65
		H ₂ S	500	16890
		óleo	20	120
3	56,5	Sólidos suspensos	50	85
		H ₂ S	20	43
		óleo	120	220

A água contaminada é tratada em um sistema composto por um *stripper* (processo 4), um separador de óleo (processo 5) e uma unidade de coagulação, sedimentação e filtração (processo 6). As condições de operação para cada um desses processos são

apresentadas na Tabela 2.

O custo da água limpa é US\$ 0,30/tonelada de água;
Taxa de atratividade 13,15%;
O sistema opera 8000 horas por ano;
O custo fixo é dado por:

$$\text{Para o processo 4: } \text{custo} = 16800 \cdot f^{0,7};$$

$$\text{Para o processo 5: } \text{custo} = 4800 \cdot f^{0,7};$$

$$\text{Para o processo 6: } \text{custo} = 12600 \cdot f^{0,7};$$

O custo operacional é dado por:

$$\text{Para o processo 4: } \text{custo} = 10 \cdot f;$$

$$\text{Para o processo 5: } \text{custo} = 0;$$

$$\text{Para o processo 6: } \text{custo} = 0,0067 \cdot f^{0,7};$$

Onde f é a vazão do despejo em t/h.

Quadro 1. Dados econômicos.

Tabela 2. Condições de operação para o sistema de tratamento.

Processo	Vazão (t/h)	Taxa de remoção (%)			Concentração máxima permitida (ppm)		
		a	b	c	a	b	c
4	★	0	99,9	0	--	--	--
5	★	20	0,0	95	--	--	--
6	★	97	90,0	90	--	--	--

A concentração máxima de saída permitida para cada poluente após o sistema de tratamento é 5 ppm para o contaminante **a**, 2 ppm para o contaminante **b** e 2 ppm para o contaminante **c**. O fluxograma do processo sem a reutilização da água e com o sistema de tratamento convencional está representado na Figura 1 e o processo otimizado por Takama *et al.* (1980), na Figura 2.

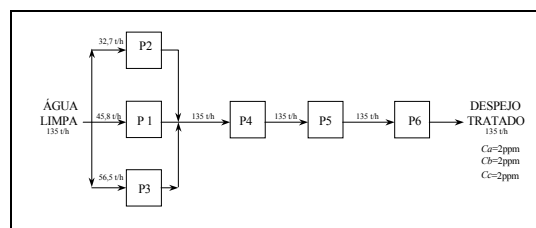


Figura 1. Fluxograma para o caso convencional.

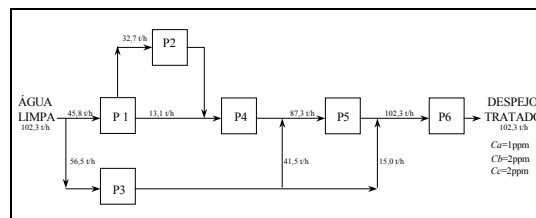


Figura 2. Fluxograma apresentado por Takama et al. (1980).

Cálculo da meta da vazão mínima de despejo

Escolhendo os sólidos suspensos (**a**) como

contaminante de referência, constrói-se o diagrama **concentração em função da massa transferida**, como apresentado na Figura 3. Os números entre colchetes referem-se às concentrações do contaminante **b** (H_2S) e os números entre parênteses referem-se às concentrações do contaminante **c** (óleo).

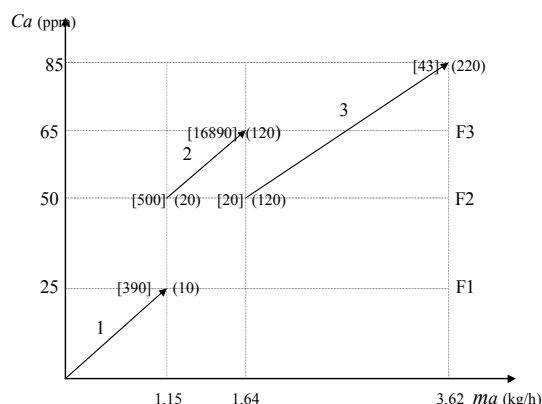


Figura 3. Início da construção da Curva Composta.

Conforme apresentado na Figura 3, as concentrações do contaminante **a**, **b** e **c** não são iguais nas fronteiras F1, F2 e F3. Para que a reutilização se torne possível, essas concentrações têm que ser iguais em cada fronteira. Dessa forma, será necessário aplicar uma mudança de concentração, como demonstrado abaixo.

Para o processo 3:

Como a concentração de entrada do contaminante **b** no processo 2 é menor que a sua concentração de saída no processo 1, a concentração do contaminante **a** equivalente a $C_b = 20$ ppm pode ser encontrada conforme apresentado a seguir:

$$\frac{20 - 0}{390 - 0} = \frac{Ca - 0}{25 - 0} \Rightarrow Ca = 1,28 \text{ ppm}$$

A mudança de concentração necessária para esse processo é de 48,72 ppm. Assim, os novos valores para as concentrações de entrada e de saída são 1,28 ppm e 36,28 ppm, respectivamente.

Para o processo 2:

Nesse processo, existe força motriz excedente, pois as concentrações de entrada do processo 2 são maiores que as concentrações de saída do processo 1 para todos os contaminantes. No entanto, para explorar totalmente a força motriz existente, precisa ser introduzida uma mudança de concentração de 25 ppm no processo 2. Isso garantirá que, na fronteira F1, a concentração do contaminante **b** seja igual a 390 ppm. Dessa forma, os novos valores para as

concentrações de entrada e de saída do processo 2 devem ser, respectivamente, 25 ppm e 40 ppm.

O diagrama concentração em função da massa transferida após a mudança de concentração é apresentado na Figura 4.

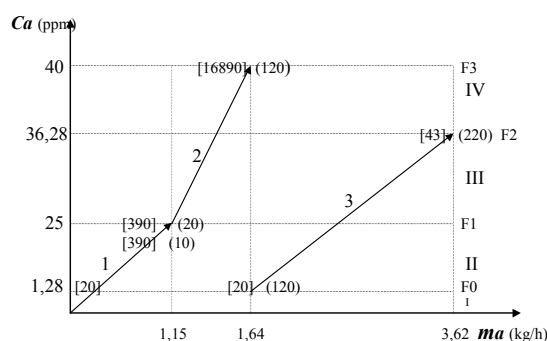


Figura 4. Curva Composta após mudança de concentração.

Como apresentado na Figura 4, verifica-se que, na fronteira F1, apesar das concentrações do contaminante **b** serem iguais para os processos 1 e 2, no processo 3, isso não ocorre, pois sua concentração final de 43 ppm encontra-se na fronteira F2. Portanto, a massa transferida no intervalo III terá que ser mudada para o intervalo II. Para que isso aconteça, terá que ser feita uma “compressão” na linha do processo 3, no gráfico, até que o valor da concentração do contaminante **b**, no processo 3, seja igual ao do processo 1, nesse caso, 390 ppm. O diagrama concentração em função da massa transferida, após a mudança de massa, é apresentado na Figura 5.

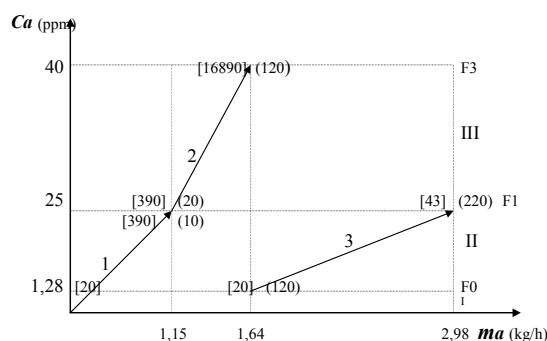


Figura 5. Diagrama concentração em função da massa transferida.

Após a mudança de carga de massa, utilizando os dados do diagrama concentração em função da massa transferida, chega-se à Curva Composta apresentada na Figura 6. Obteve-se um valor de 99,4 t/h para a vazão mínima de despejo gerado.

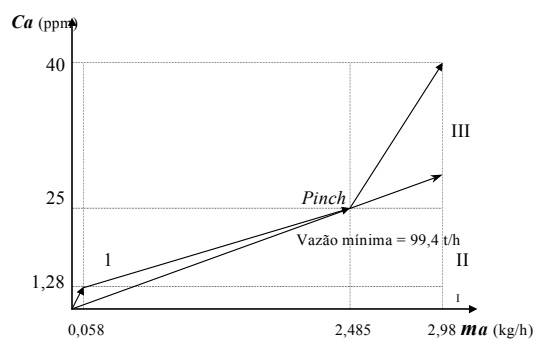


Figura 6. Meta da vazão mínima de despejo.

Síntese da rede

Encontrada a meta da vazão mínima de despejo, o próximo passo é a síntese da rede de transferência de massa, cuja representação gráfica é apresentada na Figura 7.

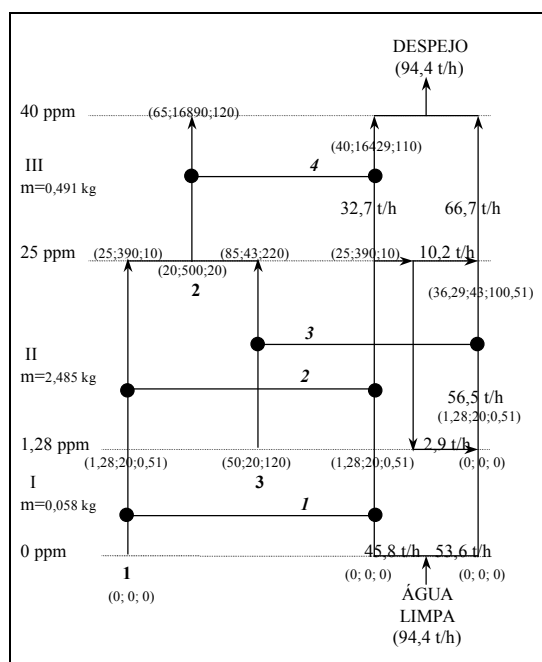


Figura 7. Projeto inicial da RETM.

Evolução da rede

Após a síntese, o número de laços de transferência de massa pode ser identificado de maneira análoga às redes de trocadores de calor. O número mínimo de equipamentos de transferência de massa é dado por:

$$U = N + L - 1 \quad (1)$$

em que U é o número mínimo de equipamentos, N é o número de processos mais a água de alimentação e L é o número de laços de transferência de massa.

Dessa forma, verifica-se a existência de 1 laço de transferência de massa entre as unidades 1 e 2. Esse laço pode ser quebrado retirando-se a unidade 2 e somando sua massa à unidade 1, como apresentado na Figura 8. Uma verificação nas concentrações mostra que nenhuma restrição foi violada.

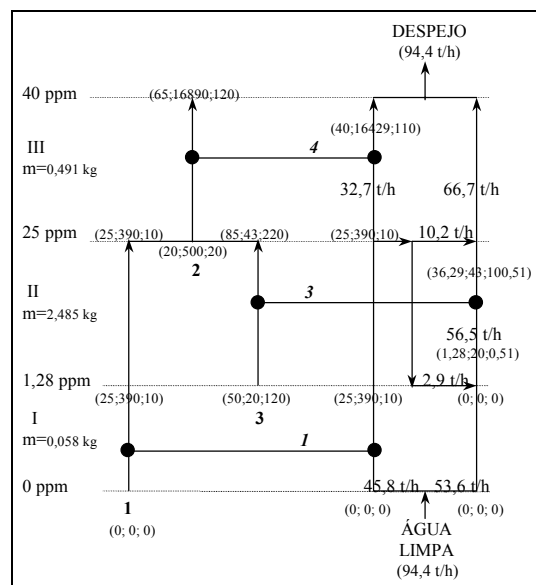


Figura 8. Rede otimizada.

O projeto final da rede (Figura 9), após a identificação e a quebra de laços de transferência de massa, alcançou uma redução de 26,37% no consumo de água, se comparado ao processo convencional (sem a reutilização da água), e uma redução de 2,84% no consumo de água, se comparado ao processo otimizado por Takama et al. (1980). A minimização é obtida por meio da reutilização da água do processo 1 nos processos 2 e 3.

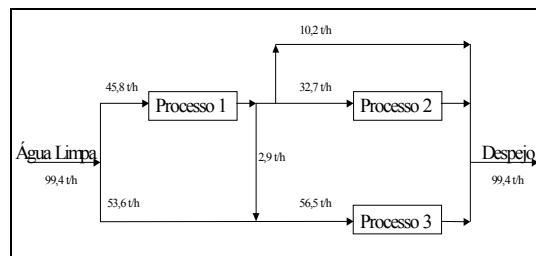


Figura 9. Projeto final da RETM obtido.

Cálculo do custo

Utilizando os dados do Quadro 1, encontram-se

os valores de custo apresentados na Tabela 3. Comparando os resultados obtidos, verifica-se uma redução de 23,31% no custo total. Isso mostra que a reutilização da água, além do benefício ambiental (redução de 26,37% no consumo de água), pode levar a uma redução no custo total do processo.

Tabela 3. Valores do custo após reutilização da água.

	Vazão (t/h)	Custo fixo (10 ³ U\$)	Custo oper. (10 ³ U\$)	Custo água (10 ³ U\$)	Custo Total (10 ³ U\$)
Caso convencional	135,00	1060	1087	324	2471
Reutilização utilizando a Análise <i>Pinch</i>	99,40	856	800	239	1895
Redução (%)	26,37	19,25	26,40	26,37	23,31

Se for feita uma comparação entre o método de otimização apresentado por Takama *et al.* (1980) e a metodologia proposta, utilizando-se a Análise *Pinch*, verifica-se que, apesar da Análise *Pinch* obter uma maior redução no consumo de água (26,37% contra 24,22%), não se obteve o menor custo total. Isso se deve ao fato de que não se trabalhou com a otimização do custo do sistema de tratamento do despejo.

No entanto, se for utilizada água regenerada, ou seja, se for utilizada uma determinada quantidade de água após o tratamento de um determinado poluente (nesse caso será reutilizada a água que sai do processo 4), seguido de uma otimização no custo dos processos de tratamento, chega-se ao processo apresentado na Figura 10. Como mostrado na Tabela 4, a Análise *Pinch* seguida de uma otimização no sistema de tratamento obteve uma redução de 9,38% no consumo de água e uma redução de 3,80% no custo total em relação ao método apresentado por Takama *et al.* (1980).

Tabela 4. Custo após otimização no sistema de tratamento.

	Vazão (t/h)	Custo fixo (10 ³ U\$)	Custo operacional (10 ³ U\$)	Custo da água (10 ³ U\$)	Custo total (10 ³ U\$)
Resultados apresentados por Takama <i>et al.</i> (1980)	102,3	676	372	246	1289
Análise <i>Pinch</i> seguida de otimização no sistema de tratamento	92,7	647	371	223	1240
Redução (%)	9,38	4,29	0,27	9,35	3,80

A quantidade de água regenerada utilizada do processo 4 é limitada em 9,6 t/h, devido às restrições impostas para as concentrações máximas de saída permitidas para os poluentes após o sistema de tratamento (5 ppm para o contaminante **a**, 2 ppm para o contaminante **b** e 2 ppm para o contaminante **c**). Se essas restrições fossem dadas em massa por hora, a vazão da água reutilizada após o tratamento no processo 4 seria de 45,8 t/h, o que reduziria o

consumo total de água para 56,5 t/h e o custo total para U\$ 1,024,000.00.

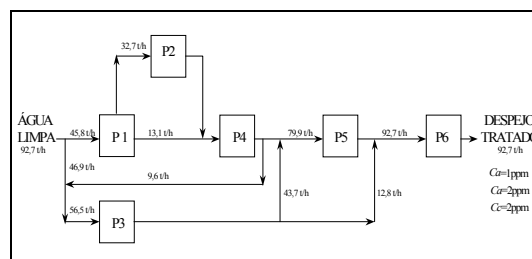


Figura 10. Diagrama de fluxo após reutilização utilizando Análise *Pinch* seguido de otimização do custo no sistema de tratamento.

Analizando os resultados obtidos, pode-se afirmar, primeiramente, que, pela reutilização da água, pode-se chegar a reduções significativas sobre a emissão de poluentes líquidos. Se a qualidade da água necessária aos processos for corretamente definida, os desempenhos dos processos podem ser mantidos.

Pela Análise *Pinch*, é possível chegar à vazão mínima de água necessária para um determinado conjunto de processos antes da síntese, ou seja, é possível obter a máxima reutilização de água possível.

Conclusão

Na comparação com os métodos de otimização utilizando programação matemática, verifica-se que a Análise *Pinch* obtém uma maior redução no consumo de água. Isso demonstra a sua eficiência em relação aos métodos de otimização convencionais, pois, além de garantir a menor vazão de despejo gerado (antes da síntese) e, conseqüentemente, uma maior redução no custo com a água, possibilita ao engenheiro acompanhar passo a passo o processo de reutilização e, com isso, propor modificações que levem a um processo mais eficiente, demonstrando o grande potencial de redução das emissões de poluentes alcançado pela reutilização da água utilizando a Análise *Pinch*.

Outra conclusão obtida nesse trabalho é que, nos casos em que não existe a necessidade de modificações nos equipamentos após a síntese da rede e, conseqüentemente, não existe acréscimo no custo fixo, a economia obtida com a reutilização é sempre significativa. Essa economia leva sempre a um duplo benefício: a redução no impacto ambiental obtida pela redução no consumo de água e a redução no custo total do processo.

Por fim, pode-se concluir que o maior benefício em utilizar a Análise *Pinch* na redução da emissão de

poluentes está na simplicidade de sua aplicação, na interação com o usuário e no conhecimento adquirido (do processo e dos equipamentos envolvidos no mesmo) durante a obtenção dos dados necessários para a aplicação da metodologia de síntese e análise de custos. Esse conhecimento, muitas vezes, permite propor mudanças nos equipamentos e no processo que podem levar a uma redução na emissão de poluentes bem como a uma redução nos custos, mesmo quando a metodologia não leva a resultados satisfatórios.

Referências

- LINNHOFF, B. et al. *A user guides on process integration for the efficient use of energy*. New York: The Institute of Chemical Engineering, 1982.
- MENON, R. *Projeto e otimização de redes de equipamentos de transferência de massa*. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2003.
- MÓDENES, A. N. *Utilização da Análise Pinch na redução de emissões de poluentes*. 1999. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.
- TAKAMA, N. et al. Optimal water allocation in a petroleum refinery. *Comput. Chem. Eng.*, New York, v. 4, n. 4, p. 251-258, 1980.
- WANG, Y. P.; SMITH, R. Wastewater minimization. *Chem. Eng. Sci.*, New York, v. 49, n. 7, p. 981-1006, 1994.

Received on August 22, 2003.

Accepted on November 25, 2003.