

## OTIMIZAÇÃO DE VAZÃO EM UM SISTEMA DE DOIS TROCADORES DE CALOR COM FENÔMENOS DE INCRUSTAÇÃO E ENVELHECIMENTO.

Murilo Della Valentina Favaro (PIBIC/CNPq/UEM), João Pedro Vidotti de Cesaro, Caliane Bastos Borba Costa (Orientador). E-mail: cbbcosta@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

### Engenharia Química /Processos Industriais de Engenharia Química

**Palavras-chave:** Otimização; Incrustação; Trocador de Calor.

### RESUMO

A incrustação diminui a eficiência de trocadores de calor, portanto métodos para reduzir sua influência são necessários. Uma estratégia, que era o objetivo deste trabalho, é otimizar a vazão de trocadores de calor em paralelo, uma vez que apenas dividir a corrente igualmente não leva aos melhores resultados. O caso de estudo é uma rede de dois trocadores em paralelo, seguida de uma fornalha, para aquecimento final do fluido de processo. Do lado do tubo, considerou-se um sistema de escoamento no qual ambas as linhas entre o divisor e o misturador foram projetadas para que as perdas de pressão em ambos os trocadores fossem iguais entre si. Para o casco, foi utilizado o método da sessão áurea para encontrar as vazões que levassem ao menor custo de operação, por meio da redução da carga térmica da fornalha e da diminuição da potência da bomba. Ao final, conseguiu-se uma economia de \$27.000 em um ano, se comparada com uma situação em que a vazão seja distribuída igualmente entre os trocadores.

### INTRODUÇÃO

O fenômeno da incrustação é a deposição de partículas na superfície de trocadores de calor (TC), que vão gradualmente formando camadas que apresentam alta resistência térmica. Essas camadas sofrem envelhecimento devido às altas temperaturas presentes no equipamento fazendo com que suas propriedades físico-químicas sejam alteradas de “gel” para “coque”. Esse processo (incrustação) resulta em uma redução na troca térmica e um aumento na queda de pressão (ISHIYAMA et al., 2020).

Outra ocorrência comum em uma rede de trocadores de calor é a existência de uma conformação em paralelo, uma vez que a vazão do processo é demasiada para apenas um trocador de calor. Uma alternativa para distribuir a vazão entre trocadores em paralelo seria distribuir igualmente a vazão entre todos esses trocadores, o que é menos eficiente em comparação a uma otimização da distribuição de vazão ou uma estimação por pressão, de forma a implementar uma restrição de igualdade para que a perda de pressão seja igual em cada trocador (ASSIS et al., 2015).

Este artigo tem como seu objetivo principal a otimização das vazões do lado do casco de dois trocadores em paralelo. Essa otimização é crucial, pois a implementação correta pode reduzir as perdas de eficiência devido à incrustação ao longo do tempo. Isso, por sua vez, diminui a necessidade de limpezas frequentes e paradas de processo.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As equações para a simulação da incrustação, parâmetros do processo e os dados de projeto dos trocadores de calor foram obtidas de Cesaro *et al.* (2024). As Equações 1 e 2 representam a incrustação e o envelhecimento no tubo, respectivamente. Para o lado do casco uma taxa de incrustação constante foi considerada (CESARO *et al.*, 2024).

$$\frac{dR_{f,g}}{dt} = \alpha Pr^{-0.33} Re^{-0.66} \exp\left(-\frac{E_f}{RT_f}\right) - \gamma \tau_w \quad (1)$$

$$\frac{dR_{f,c}}{dt} = \frac{A_a}{\lambda_c} \exp\left(-\frac{E_a}{RT_{gc}}\right) \delta_g \quad (2)$$

Na Equação 1,  $R_{f,g}$  representa a resistência térmica do gel,  $\alpha$  o coeficiente de deposição,  $Pr$  o número de Prandtl,  $Re$  o número de Reynolds,  $E_f$  a energia de ativação,  $R$  a constante dos gases ideais,  $T_f$  a temperatura do filme,  $\gamma$  o coeficiente de supressão,  $\tau_w$  a tensão de cisalhamento. Já na Equação 2,  $R_{f,c}$  é a resistência do coque,  $A_a$  e o fator pré-exponencial de envelhecimento,  $\lambda_c$  a condutividade térmica do coque,  $E_a$  a energia de ativação do envelhecimento,  $T_{gc}$  a temperatura da interface gel-coque e  $\delta_g$  a espessura da camada gel.

A linguagem de programação utilizada foi o Python. A vazão do lado do tubo foi determinada de forma a manter iguais as perdas de pressão dos dois trocadores de calor (CESARO *et al.*, 2024). Já a otimização da vazão do lado do casco foi implementada utilizando o método da sessão áurea, que tem como objetivo encontrar um mínimo ou máximo de certa função. Para isso, duas estimativas iniciais são necessárias, criando um intervalo. Nesse método, dois pontos intermediários são calculados dentro do intervalo e condicionais são utilizadas para descartar umas das duas extremidades do intervalo, até que a regra de parada seja satisfeita. Essa regra pode ser feita a partir de um número de iterações máximas ou pelo tamanho do intervalo.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

À medida que a espessura de incrustação aumenta, ocorre uma redução no diâmetro do tubo, elevando a velocidade do fluido e o valor do número de Reynolds. Essa diminuição no diâmetro do tubo também acarreta maiores quedas de pressão. É importante observar que o TC2 apresenta maior incrustação do que o TC1. A Figura 1 apresenta as variações, com o tempo, da potência necessária de

bombeamento (a) e da carga térmica de cada trocador de calor (b). Percebe-se que a diminuição do raio da seção de escoamento acarreta aumento da potência de bombeamento. Concomitantemente, a incrustação leva a uma queda das cargas térmicas dos trocadores, dificultando troca térmica entre os fluidos do tubo e casco.

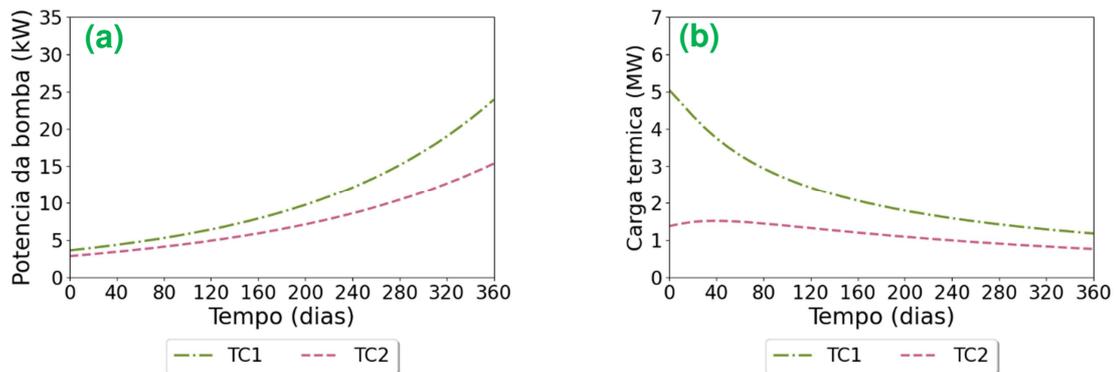


Figura 1 - Potência da bomba (a) e carga térmica (b) para cada trocador.

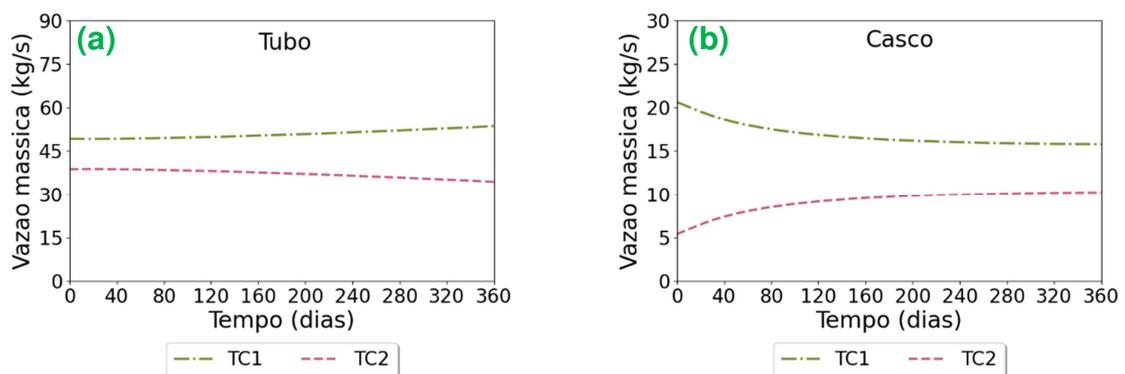


Figura 2 – Vazão ótima nos dois trocadores, para o lado do tubo (a) e casco (b).

A Figura 2 mostra as vazões nos lados do tubo e do casco para ambos os trocadores, como resultado do procedimento de otimização da distribuição de vazões. Na Figura 2(a), observa-se um leve aumento na vazão que passa pelos tubos do TC1 ao longo do tempo, resultando em uma redução correspondente na vazão em TC2. Esse comportamento ocorre devido à maior queda de pressão quando vazões elevadas são direcionadas para trocadores com maior incrustação, o que explica a queda da vazão em TC2 com o tempo, já que esse trocador de calor possui menores números de Reynolds e, conseqüentemente, maiores taxas de incrustação. Em contraste, a Figura 2(b) revela uma tendência oposta, com a vazão no casco do TC1 diminuindo ao longo do tempo. Isso deve-se a ser essa a situação que minimiza os custos de operação. O método utilizado reduziu os custos de \$9.698.000 (quando as frações de divisão do separador do lado do tubo e do casco foram mantidas iguais entre si) para \$9.671.000 no período de um ano. É importante

notar que grande parte da economia é alcançada nos períodos iniciais, no quais o TC1 ainda está relativamente limpo (em comparação ao TC2).

## CONCLUSÕES

Esse artigo focou na otimização das vazões do lado casco de trocadores de calor em paralelo. Foi possível notar a grande influência da incrustação no sistema, que acarretou em menores cargas térmicas e maiores quedas de pressão, elevando os custos do processo ao longo do tempo. No entanto a otimização de vazão realizada conseguiu reduzir significativamente os gastos do processo no período, indicando a importância dessa implementação.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq (Brasil), processos 307958/2021-3 e 138120/2023-4, e também da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES (Brasil), processo 88887.714299/2022-00 e Código Financeiro 001.

## REFERÊNCIAS

ASSIS, B. C. G. et al. Dynamic optimization of the flow rate distribution in heat exchanger networks for fouling mitigation. **Industrial & engineering chemistry research**, v. 54, n. 25, p. 6497–6507, 2015. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.iecr.5b00453>. Acesso em 23 ago. 2024

CESARO, J. P. V.; RAVAGNANI, M. A. S.; MELE, F. D.; COSTA, C. B. B. Estimation of pressure-driven flow rate in parallel heat exchangers with fouling, In: Anais do III Congresso Brasileiro em Engenharia de Sistemas em Processos (PSEBR 2024), no prelo, 2024.

ISHIYAMA, E. M.; PUGH, S. J.; WILSON, D. I. Incorporating Deposit Ageing into Visualisation of Crude Oil Preheat Train Fouling. **Process Integration and Optimization for Sustainability**, v. 4, n. 3, p. 187–200, 7 fev. 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s41660-019-00104-8>. Acesso em 23 ago. 2024