

MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE UM SISTEMA DE RESFRIAMENTO DE SODA CÁUSTICA

Luciano Medeiros de Souza ¹, José Jailson Nicácio Alves ², Luís Gonzaga Sales Vasconcelos ³

¹Universidade Federal de Campina Grande /Departamento de Engenharia Química, Av. Aprígio Veloso, Campus Universitário, 882, 58109-970, Campina Grande - PB, lucianoeq@yahoo.com.br

²Universidade Federal de Campina Grande /Departamento de Engenharia Química, Av. Aprígio Veloso, Campus Universitário, 882, 58109-970, Campina Grande – PB, jailson@deq.ufcg.edu.br

³Universidade Federal de Campina Grande /Departamento de Engenharia Química, Av. Aprígio Veloso, Campus Universitário, 882, 58109-970, Campina Grande – PB, vasco@deq.ufcg.edu.br

Palavras-chave: modelagem, simulação, resfriamento, soda cáustica

Área do Conhecimento: EPG3 - Engenharia

Resumo- No processo de produção de soda cáustica, umas das etapas é o resfriamento da solução de hidróxido de sódio. O resfriamento da solução de hidróxido de sódio é feito numa série de tanques que utilizam água gelada e água de torre de resfriamento para reduzir a temperatura da solução até o valor especificado. O objetivo neste trabalho é otimizar um sistema de resfriamento de soda cáustica. A função a ser minimizada é a temperatura de saída da soda cáustica do sistema. Com este objetivo, desenvolveu-se um modelo matemático para o sistema e um código de cálculo em linguagem FORTRAN-90. O modelo matemático baseia-se nos balanços de energia e massa para o tanque e a serpentina. Determinou-se a melhor configuração (série e paralelo) e o melhor ponto de entrada de água de resfriamento (gelada e da torre).

Introdução

Atualmente no processo de produção de cloro-soda, uma das etapas é o resfriamento da soda cáustica. Este resfriamento é feito numa série de tanques que utilizam água gelada e água da torre de resfriamento para reduzir a temperatura da solução até o valor especificado. A questão a ser

analisada neste trabalho é se a configuração atual é a melhor em termos de custo operacional do resfriamento. O sistema estudado aqui é o de uma das áreas da unidade de resfriamento da BRASKEM, unidade CLORO-SODA, localizada em Maceió-Al, o qual é mostrado esquematicamente na Figura 1 [1].

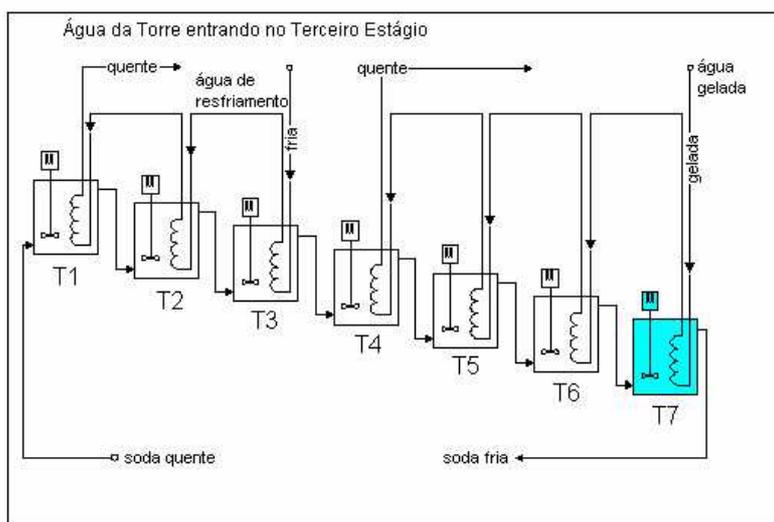


Figura 1 - Sistema de resfriamento dos tanques [1].

A solução de soda cáustica é, na verdade, uma mistura contendo água, hidróxido de sódio e

sais como o cloreto de sódio e o sulfato de sódio. Durante o resfriamento da solução ocorre à

cristalização de sais presentes na solução, especialmente o cloreto de sódio que se encontra em maior quantidade.

Uma descrição matemática do processo é fundamental para o entendimento e otimização do sistema. Neste sentido, um modelo matemático do sistema de resfriamento e sua resolução numérica foram desenvolvidos e são apresentados como ferramenta auxiliar na otimização do processo via simulação computacional.

O sistema é composto por sete tanques em série, onde a soda escoar por gravidade de um tanque para outro.

A Figura 2 mostra a configuração dos tanques utilizados no processo de resfriamento.

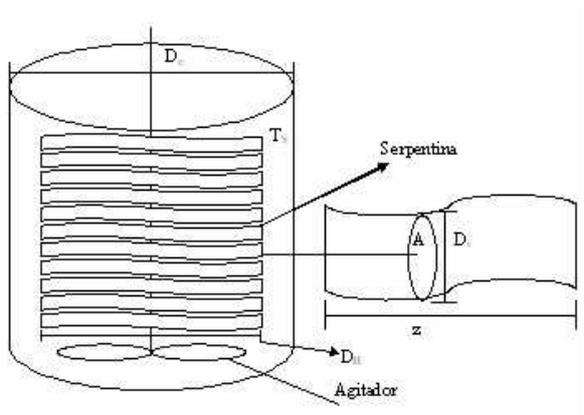


Figura 2 – Desenho esquemático do tanque

Cada tanque é dotado de agitador e serpentina de resfriamento cujas características são dadas na Tabela 1.

Tabela 1: características do sistema tanque/serpentina [2].

	Tanque	Serpentina
Quantidade	7	7
Diâmetro interno	3,658 m	114 mm
Altura/Comprimento	4,267 m	200 m
Espessura da parede	-	2,41 mm
Diâmetro helicoidal	-	3,6 m
Comprimento da pá	1,22 m	-

O fluido refrigerante é água escoando no interior das serpentinas em contracorrente com a solução de hidróxido de sódio. Nos primeiros três tanques usa-se água da torre de resfriamento e nos quatro últimos água gelada como fluido refrigerante.

Modelagem Matemática

O modelo matemático utilizado baseia-se nos princípios de conservação da massa e energia para o fluido refrigerante que escoar no interior

das serpentinas de resfriamento e para a solução no tanque. Assume-se que tanto a solução quanto o fluido refrigerante são incompressíveis. Utilizou-se um modelo transiente por que, embora nesta etapa do trabalho analisa-se o sistema estado estacionário.

Fluido Refrigerante

Para o fluido refrigerante utilizou-se um modelo distribuído (gradiente máximo ou tubular) sem dispersão [4].

$$\frac{\partial T}{\partial t} + v \frac{\partial T}{\partial z} + \frac{US}{C_p \rho A} (T - T_s) = 0 \quad (1)$$

Para a solução no tanque utilizou-se um modelo de tanque de mistura.

$$\rho V_s C_{ps} \frac{dT_s}{dt} = m_s C_{ps} (T_{SE} - T_s) - Q \quad (2)$$

onde

$$Q = \int_0^L US (T_s - T) dz \quad (3)$$

O coeficiente global de troca térmica (U) entre a solução quente e a água de resfriamento foi calculado da equação 4 [3]:

$$U = \frac{1}{A(R_d + R_p + R_i + R_e)} \quad (4)$$

onde as resistências individuais são calculadas das equações 5 a 8:

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} \quad (5)$$

$$R_p = \frac{\ln(D_e / D_i)}{2\pi k z_{max}} \quad (6)$$

$$R_e = \frac{1}{h_e A_e} \quad (7)$$

$$R_d = 0 \quad (8)$$

O coeficiente individual de transferência de calor por convecção no interior da serpentina foi estimado a partir das seguintes correlações [5]:

Escoamento laminar (Re < 2100):

$$\frac{h_i D_i}{k_f} = 1,86 \left[\left(\frac{D_i G}{\mu} \right) \left(\frac{c\mu}{k_f} \right) \left(\frac{D_i}{L} \right) \right]^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (9)$$

Escoamento turbulento (Re > 2100):

$$\frac{h_i D_i}{k} = 0,027 \left(\frac{D_i G}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{c\mu}{k_f} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (10)$$

As correlações anteriores foram desenvolvidas para o escoamento em um tubo linear. Os efeitos

de curvatura podem ser adicionados multiplicando-se o valor de h assim obtido por $1+3,5(D/D_H)$, onde D_H é o diâmetro da helicoidal formada pela serpentina (Kern, 1987).

$$\frac{h_e D_e}{k} = 0,87 \left(\frac{Z_p^2 N \rho_s}{\mu} \right)^{2/3} \left(\frac{c\mu}{k} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (11)$$

Esta ultima correlação foi obtida para uma serpentina mergulhada em um meio com um agitador de uma única pá de comprimento Z , com velocidade de rotação N . As características dos agitadores do sistema de resfriamento da BRASKEM são diferentes das características do agitador para o qual a correlação acima foi desenvolvida. Por hipótese, assumiu-se que a agitação é a mesma.

Resolução do Modelo

Utilizou-se o método das diferenças finitas, formulação totalmente implícita, com malha regular, para discretização do modelo matemático. Com isto obtem-se o seguinte sistema de equações para os nos da malha numérica: Utilizou-se o método das diferenças finitas, formulação totalmente implícita, com malha regular, para discretização do modelo matemático. Com isto obtem-se o seguinte sistema de equações para os nos da malha numérica:

Serpentina: Conforme mostra a Figura 3, ela é representada pela equação 12.

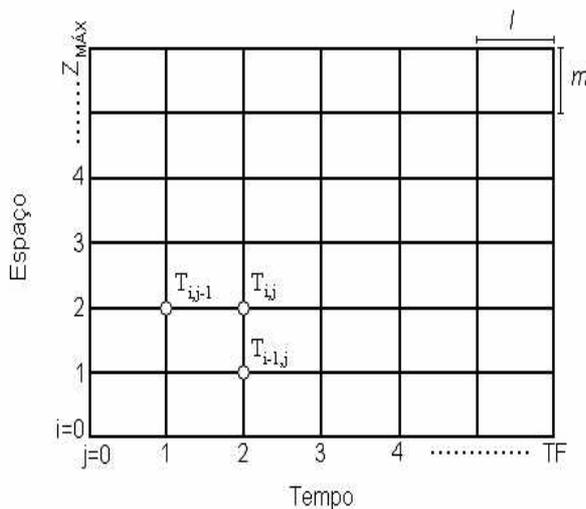


Figura 3 – Malha numérica para a serpentina (i =posição, j =tempo).

$$T_{i,j} = \frac{T_{i,j-1} + \frac{vl}{m} T_{i-1,j} + \frac{USl}{C_p \rho A} T_s}{\left(1 + \frac{vl}{m} + \frac{USl}{C_p \rho A} \right)} \quad (12)$$

i representa a posição no interior da serpentina e j o instante de tempo.

Tanque: A equação 13 representa o modelo referente aos parâmetros relacionados ao tanque.

$$T_{S_{k,j}} = \frac{\left(T_{S_{k,j-1}} + \frac{m_s C_{ps} * l * T_{S_{k-1,j}} - \frac{Q * l}{\rho V C_{ps}} \right)}{\left(1 + \frac{m_s C_{ps} * l}{\rho V C_{ps}} \right)} \quad (13)$$

k representa o tanque do sistema de resfriamento.

Resultados

Avaliou-se o sistema de resfriamento com as seguintes restrições:

- O numero e volumes dos tanques devem ser mantidos iguais aos atuais (7 tanques),
- A vazão de água gelada não pode ser superior a atual ($< 44 \text{ m}^3/\text{h}$),
- A vazão de água da torre de resfriamento não pode ser maior que a atual ($< 240 \text{ m}^3/\text{h}$ por tanque).

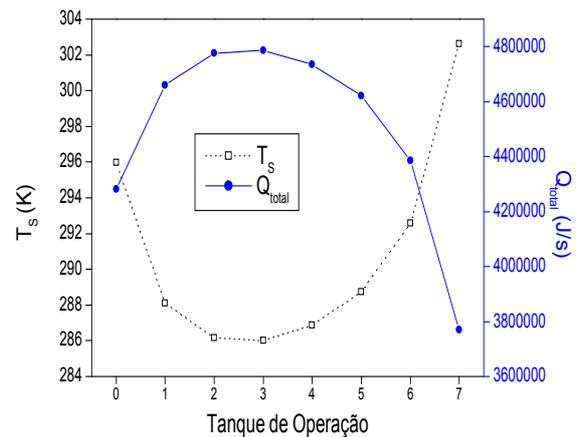


Figura 4 - Temperatura de saída da solução e carga térmica versus o tanque de operação.

Observa-se pela Figura 4 que a menor temperatura é atingida quando a entrada de água da torre ocorre no segundo (tanque T2) ou terceiro estágio (tanque T3), isto porque l he é oferecida uma melhor carga térmica total quando a entrada de água da torre ocorre nestes tanques.

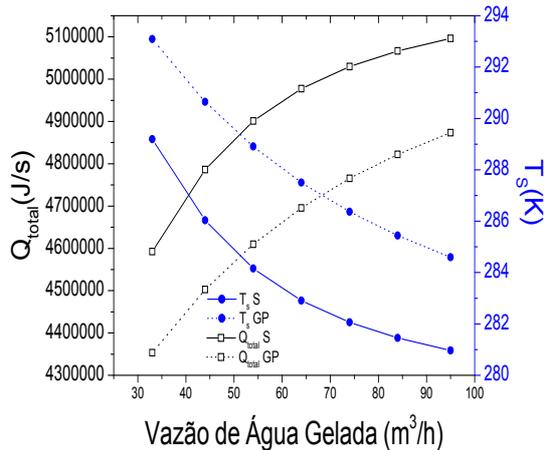


Figura 5 – Temperatura da solução no último estágio e carga térmica versus a vazão de água gelada

Na Figura 5, observa-se que a configuração em série (S), a solução no último estágio apresenta valores menores com o aumento da vazão de água gelada em comparação com a água gelada em paralelo (GP), devido a maior carga térmica trocada na configuração em série (S).

Conclusão

A partir do desenvolvimento do programa foi possível encontrar o melhor tanque para a entrada da água da torre de resfriamento que é o tanque T3, o que corresponde a atual configuração da BRASKEM. E verificar que a temperatura da solução sai a uma temperatura mais baixa quando se utiliza a água gelada em série. Os dados obtidos não foram comparados com dados da literatura, devido a não se encontrar trabalhos semelhantes a este.

Agradecimentos

Os autores agradecem a BRASKEM Petroquímica pelas informações.

Nomenclatura

A = área transversal de escoamento (m^2)
 c = calor específico [$J/(s)(K)$]
 C_{ps} = capacidade calorífica da solução [$J/(Kg)(K)$]
 D_e = diâmetro externo (m)
 D_H = diâmetro hidráulico (m)
 D_i = diâmetro interno (m)
 FC = fator de correção
 G = Vazão mássica [$kg/(h)(m^2)$]
 h_e = coeficiente de convecção externo [$W/(s)(m)(K)$]

h_i = coeficiente de convecção interno [$W/(s)(m)(K)$]
 i = posição do subscrito em z
 j = posição do subscrito em t
 k = número de tanques (s)
 k_f = condutividade térmica do fluido [$W/(s)(m)(K)$]
 l = incremento de tempo (s)
 m = incremento de espaço (m)
 m_s = vazão mássica da solução (kg/s)
 N = número de rotações (rps)
 Q = carga térmica do tanque (J/s)
 Q_{tot} = carga térmica total do tanque (J/s)
 R_d = resistência por incrustações [$s/(K)(J)$]
 R_e = resistência do lado da solução [$s/(K)(J)$]
 R_i = resistência do lado da água [$s/(K)(J)$]
 R_p = resistência da parede [$s/(K)(J)$]
 S = Perímetro da serpentina (m^2/m)
 t = tempo (s)
 T = temperatura da água na serpentina (K)
 T_{REF} = temperatura de referência (K)
 T_s = temperatura da solução (K)
 T_{SE} = temperatura da solução na entrada (K)
 U = coeficiente global térmico [$J/(s)(m^2)(K)$]
 \bar{v} = vazão volumétrica da solução (m^3/s)
 z = posição axial ao longo da serpentina (m)
 $z_{máx}$ = comprimento máximo da serpentina (m)
 Z_p = comprimento das pás (m)
 μ = viscosidade [$J/(kg)(K)$]
 μ_w = viscosidade no lado da parede [$J/(kg)(K)$]
 ρ = densidade da água (kg/m^3)
 ρ_s = densidade da solução (kg/m^3)
 v = velocidade média do fluido (m/s)

Referências

- [1] BRAGA JR., L. Modelagem e Otimização de um Sistema de Soda Cáustica (Comunicação Pessoal), 2001.
- [2] DESCRITIVO DA BRASKEM
- [3] FOUST, A.S.; WENZEL, L.A.; CLUMP, C.W.; MAUS, L.; Andersen, L.B. *Princípios das Operações Unitárias*, Segunda edição, Traduzido por Horácio Macedo, Livros Técnicos e Científicos, Rio de Janeiro, 1982.
- [4] HIMMELBLAU, D.M., BISCHOFF, K.B. *Process Analysis and Simulation: Deterministic Systems*, John Wiley & Sons, Inc, United States of America, 1968.
- [5] KERN, D.Q. *Processos de Transmissão de Calor*, Traduzido por Adir M. Luiz, Guanabara Koogan, Rio de Janeiro, 1987.