

DISTRIBUIÇÃO DE TEMPOS DE RESIDÊNCIA EM REATORES CONTÍNUOS DO TIPO TANQUE AGITADO (CSTRS)

Polyana Miguelão¹
Júlia Parissenti²
Diogo Luiz de Oliveira³

RESUMO

Um reator de mistura contínuo (CSTR) em escala piloto e três reatores CSTR em série foram utilizados para estudar o comportamento fluidodinâmico quando submetidos a variações de vazão e de agitação. O objetivo principal do presente trabalho foi determinar os tempos de residência dos reatores, comparando-os com os teóricos para diagnosticar possíveis desvios da idealidade. Por meio de uma perturbação “tipo pulso”, 10 mL do traçador azul de metileno, com concentração de 0,4 g/L, foi injetada, de uma só vez, em um curto período de tempo, na corrente de alimentação. Com tempos previamente estabelecidos, foram retiradas amostras na corrente de saída do primeiro reator (um único CSTR) e do terceiro reator (três reatores CSTR em série). Em seguida, com a ajuda de um espectrofotômetro realizou-se a leitura das concentrações dessas amostras. Com os valores obtidos, foi descoberto o tempo médio de residência e comparado com os valores teóricos. Foram utilizadas duas vazões: uma baixa de 4,23 mL/s e uma alta de 9,63 mL/s (um CSTR) e 11,00 mL/s (três CSTRs em série). Para cada caso, em um primeiro momento o sistema não tinha agitação e, na sequência, uma agitação moderada. Com os resultados obtidos, pode-se concluir que o reator CSTR e os três reatores em série apresentaram tempos médios de residência um pouco menores que o tempo espacial, indicando a presença de zonas mortas, mas, de modo geral, seus comportamentos fluidodinâmicos são muito próximos do ideal. Palavras-chave: Reator CSTR. Reator real. Reator ideal. Distribuição de tempo de residência.

1 INTRODUÇÃO

O reator do tipo CSTR é normalmente utilizado em reações de fase líquida, quando se necessita de intensa agitação, e pode ser utilizado tanto isoladamente quanto combinado em série. Segundo Levenspiel (2000), como o nome sugere, nesse tipo de reator o conteúdo está bem agitado e uniforme. Assim, sua corrente de saída tem a mesma composição que o fluido em seu interior. Esse tipo de escoamento chama-se mistura perfeita, e o reator correspondente é chamado de reator de mistura perfeita ou MRF (*mixed flow reactor*).

Esse tipo de reator tem como principal vantagem sua grande capacidade de processamento requerida. Embora o investimento do capital necessário seja maior, os custos operacionais por unidade do produto são menores para operações contínuas que em batelada. E a desvantagem é que a conversão do reagente por unidade de volume do reator é a menor entre os reatores com escoamento contínuo. Consequentemente, reatores muito grandes são necessários para que se obtenham altas conversões (PEREIRA, 2018).

Entretanto, pode-se afirmar que reatores reais são versões imperfeitas dos reatores ideais descritos na literatura, sendo vários os fatores envolvidos em um sistema reacional real que influenciam na eficiência de uma reação química em sistemas não ideais, como o tempo de residência, a temperatura, o grau de agitação e a cinética da reação. Dessa forma, são necessários ajustes nas equações de projetos dos reatores ideais, levando em conta esses desvios observados na prática.

¹ Graduanda em Engenharia Química pela Universidade do Oeste de Santa Catarina; polyana.miguelao@outlook.com

² Graduada em Engenharia Química pela Universidade do Oeste de Santa Catarina; juliaparissenti@hotmail.com

³ Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina; Graduado em Engenharia Química pela Universidade Federal de Santa Catarina; Professor na Universidade do Oeste de Santa Catarina; diogo.oliveira@unoesc.edu.br

Segundo Fogler (2009), a distribuição do tempo de residência (DTR) de um reator é uma característica da mistura que ocorre no reator químico. A DTR é determinada experimentalmente injetando, no interior do reator, uma substância química inerte, molécula ou átomo, chamada de traçador, em algum tempo $t = 0$, medindo, então, a concentração do traçador, na corrente do efluente, em função do tempo. Além de ser uma espécie não reagente facilmente detectável, o traçador deve ter propriedades físicas similares àquelas da mistura reagente e ser completamente solúvel na mistura. Ele também não deve absorver nas paredes ou em outra superfície do reator. Os dois métodos mais usados de injeção são perturbação em pulso e perturbação em degrau. Na perturbação em pulso, utilizada neste trabalho, uma certa quantidade de traçador é injetada de uma só vez na corrente de alimentação, no menor tempo possível.

Para determinar a DTR é utilizada a grandeza $E(t)$, chamada de função distribuição de tempo de residência. Essa função representa a distribuição de idades do fluido à saída do reator, sendo descrita pela Equação 1 (SASSAKI, 2005).

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad (1)$$

Em que (t) é a concentração de saída do traçador em função do tempo e \int é a área sob a curva $C(t)$.

Para reatores ideais de mistura homogênea e perfeitamente agitados, a composição dentro do reator é igual à concentração dos efluentes, e a função $E(t)$ pode ser representada pelas equações (2) e (3), sendo que t é o tempo definido de retirada de amostra e τ é o tempo espacial.

$$E(t) = \frac{e^{-\frac{t}{\tau}}}{\tau} \quad (2)$$

E conseqüentemente:

$$E(\theta) = \tau \cdot E(t) = e^{-\theta} \quad (3)$$

Em que:

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad (4)$$

A grandeza θ representa o número de volumes de fluido do reator, baseado nas condições de entrada, que escoou através do reator no tempo t . A finalidade de criar essa função distribuição normalizada é que o desempenho do escoamento dentro de reatores de diferentes tamanhos pode ser comparado diretamente (FOGLER, 2009).

Outro parâmetro que deve ser analisado é o tempo de residência médio (t_m), que significa o tempo de permanência das moléculas que passaram pelo sistema.

$$t_m = \int_0^{\infty} tE(t)dt \quad (5)$$

Para escoamento ideal:

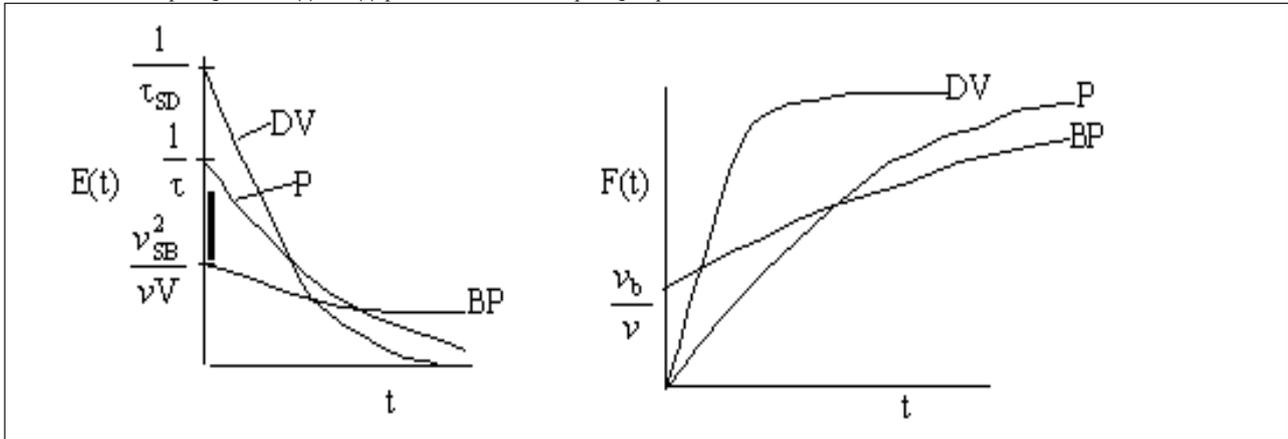
$$t_m = \tau = \frac{V}{v_0} \quad (6)$$

Em que: V é o volume do reator e v_0 é a vazão de alimentação.

A comparação do tempo de residência médio com o tempo espacial permite verificar se o escoamento é ideal, quando os dois são iguais, ou seja, $\tau = \tau_m$. Caso os dois sejam diferentes há um desvio do escoamento ideal, podendo haver predominância de curto-circuito quanto o tempo espacial for menor, ou formação de zonas mortas, em que o tempo de residência é menor.

No Gráfico 1, a seguir, pode ser visto o comportamento das funções E(t) e F(t) para reatores ideais, com desvio e com volume morto.

Gráfico 1 – Comparação de E(t) e F(t) para o CSTR sob operação perfeita, com desvio e volume morto



Fonte: Fogler (2009).

Nota: BP = desvio; P = perfeita; DV = volume morto.

Em casos de reatores CSTRs em série são colocados reatores com o mesmo tempo espacial. A função E(t) para esse caso é mostrada na equação (7), em que N é o número de reatores a serem utilizados em série:

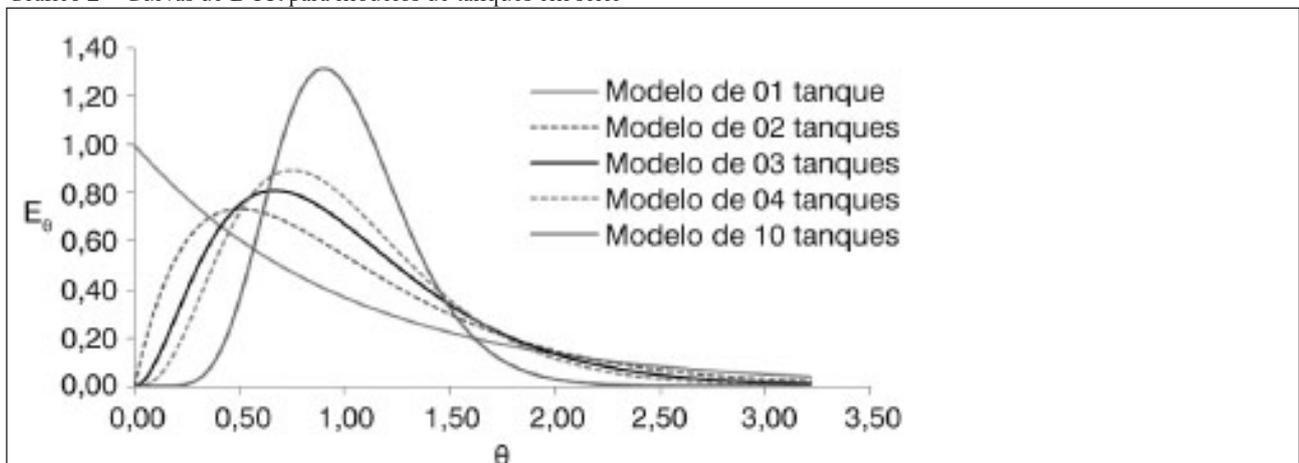
$$E(t) = \frac{N}{\tau} * \left(\frac{Nt}{\tau}\right)^{N-1} * \frac{e^{-Nt/\tau}}{(N-1)!} \tag{7}$$

Seguindo com o modelo adimensional, para três reatores CSTR em série:

$$E(\theta) = 13,50. \theta^2 e^{-3\theta} \tag{8}$$

O Gráfico 2 ilustra as DTRs de vários números de CSTRs em série.

Gráfico 2 – Curvas de DTR para modelos de tanques em série



Fonte: Levenspiel (2000).

Estudam-se modelos hidrodinâmicos que melhor se ajustam às curvas experimentais de $E(\theta)$ versus θ obtidas nos ensaios de vazão constante. Para expressar quantitativamente os desvios entre as curvas teórica e experimental, calcula-se a relação dada pela equação (SASSAKI, 2005):

$$Desvio = \frac{\sum_{i=0}^n [E(\theta)_{exp} - E(\theta)_{teo}]^2}{n} \quad (9)$$

Em que: n = número de pontos experimentais; $E(\theta)_{exp}$ = valores experimentais de $E(\theta)$; e $E(\theta)_{teo}$ = valores teóricos de $E(\theta)$.

Para diagnosticar problemas relacionados ao perfil de escoamento e descrever o comportamento fluidodinâmico real, o seguinte trabalho tem como objetivo determinar experimentalmente distribuições de tempos de residência (DTR) de um reator de mistura contínua (CSTR) e de três reatores CSTR em série, possibilitando, em trabalhos futuros, a adequação das suas equações teóricas de conversão, levando em conta a não idealidade do processo.

2 METODOLOGIA

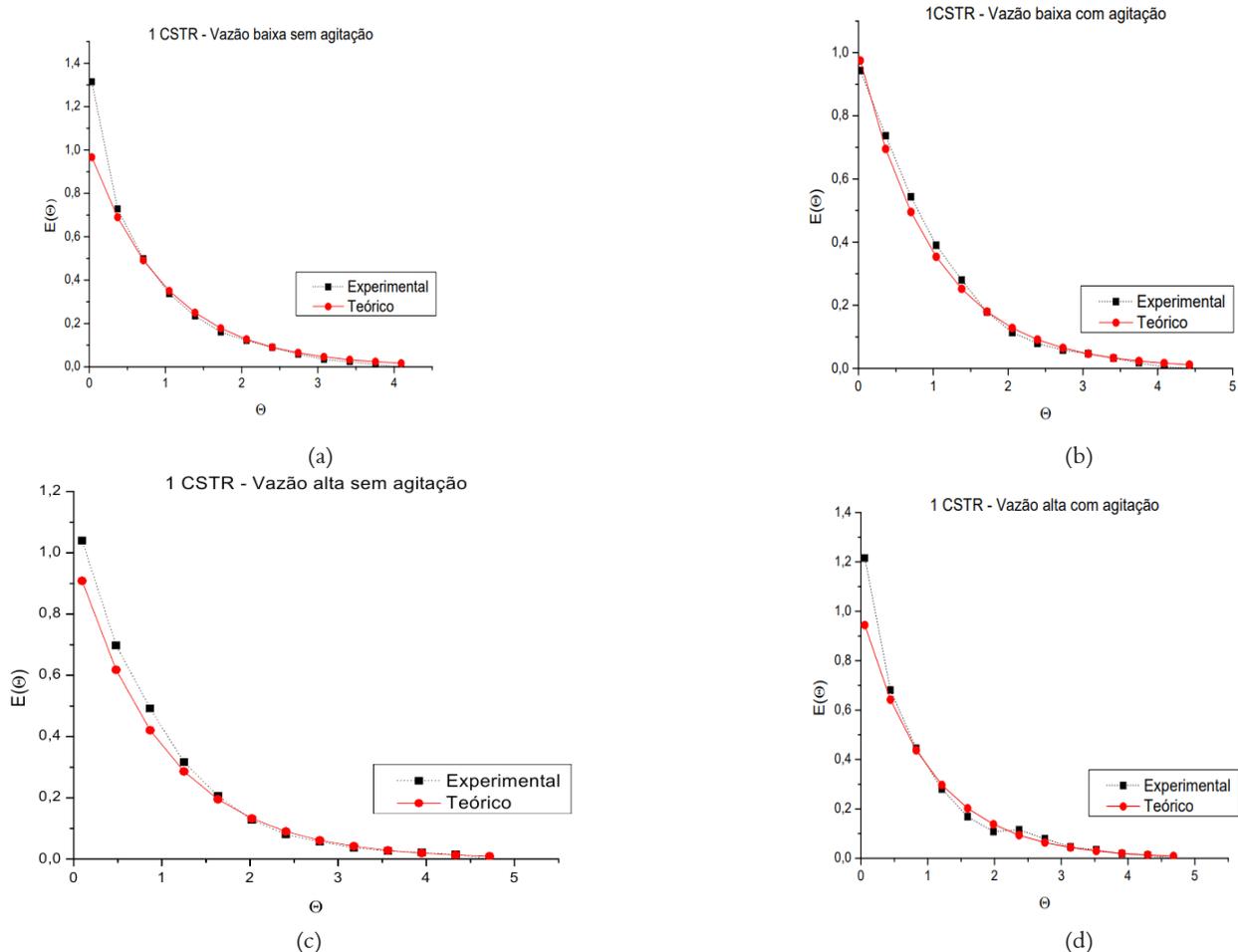
Para determinar o tempo de residência, utilizou-se água em temperatura ambiente, como fluido de transporte. A perturbação do sistema foi feita em tipo pulso, com a quantidade do traçador de 10 mL a uma concentração de 0,4 g/L, injetadas na corrente de alimentação com o auxílio de uma seringa.

As duas vazões (4,23 e 9,63 mL/s) e as agitações (sem e moderada) utilizadas nos experimentos com um único CSTR foram predeterminadas para que, a partir dessas duas variáveis, fossem estabelecidos os tempos de retirada das amostras, em que o primeiro tempo ficou em 10 segundos após a injeção do traçador, e os demais de 20 em 20 segundos para alta vazão e de 40 em 40 segundos para baixa vazão, até se perceber que não havia mais nada no reator. Foram retiradas de 10 a 15 amostras, com aproximadamente 10 mL em cada seringa, sendo as suas concentrações medidas utilizando um espectrofotômetro.

Para determinar os parâmetros dos reatores CSTR em série, o procedimento experimental foi similar, diferenciando-se apenas nas vazões, que foram de 4,23 e 11 mL/s, e nas coletas que foram realizadas no terceiro reator.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No Gráfico 3 estão apresentadas as curvas de distribuição de tempos de residência normalizadas ($E(\theta)$) no reator CSTR, para vazões baixas e altas e para sistemas com agitação e sem agitação.

Gráfico 3 – Valores de $E(\theta) \times \theta$ de reator CSTR, para vazão baixa (a) sem agitação (b) com agitação, e para vazão alta (c) sem agitação e (d) com agitação

Fonte: os autores.

Nas condições operacionais avaliadas, notou-se que os experimentos ficaram com os resultados próximos aos teóricos. Ao analisar o Gráfico 3 (a), (b), (c) e (d), praticamente não é possível perceber diferenças significativas entre as quatro condições testadas, pois todas as curvas são muito semelhantes ao modelo teórico. Assim, é possível afirmar que esse reator CSTR tem seu comportamento fluidodinâmico perto do ideal quando operado com fluidos que têm a viscosidade similar à da água.

Para quantificar os desvios da idealidade são apresentados, na Tabela 1, os valores calculados para o tempo médio de residência (t_m), o tempo espacial (τ) e o desvio médio entre os valores experimentais e teóricos para cada caso, calculados pelas equações (5), (6) e (9), respectivamente:

Tabela 1 – Dados experimentais, teóricos e desvios para um CSTR

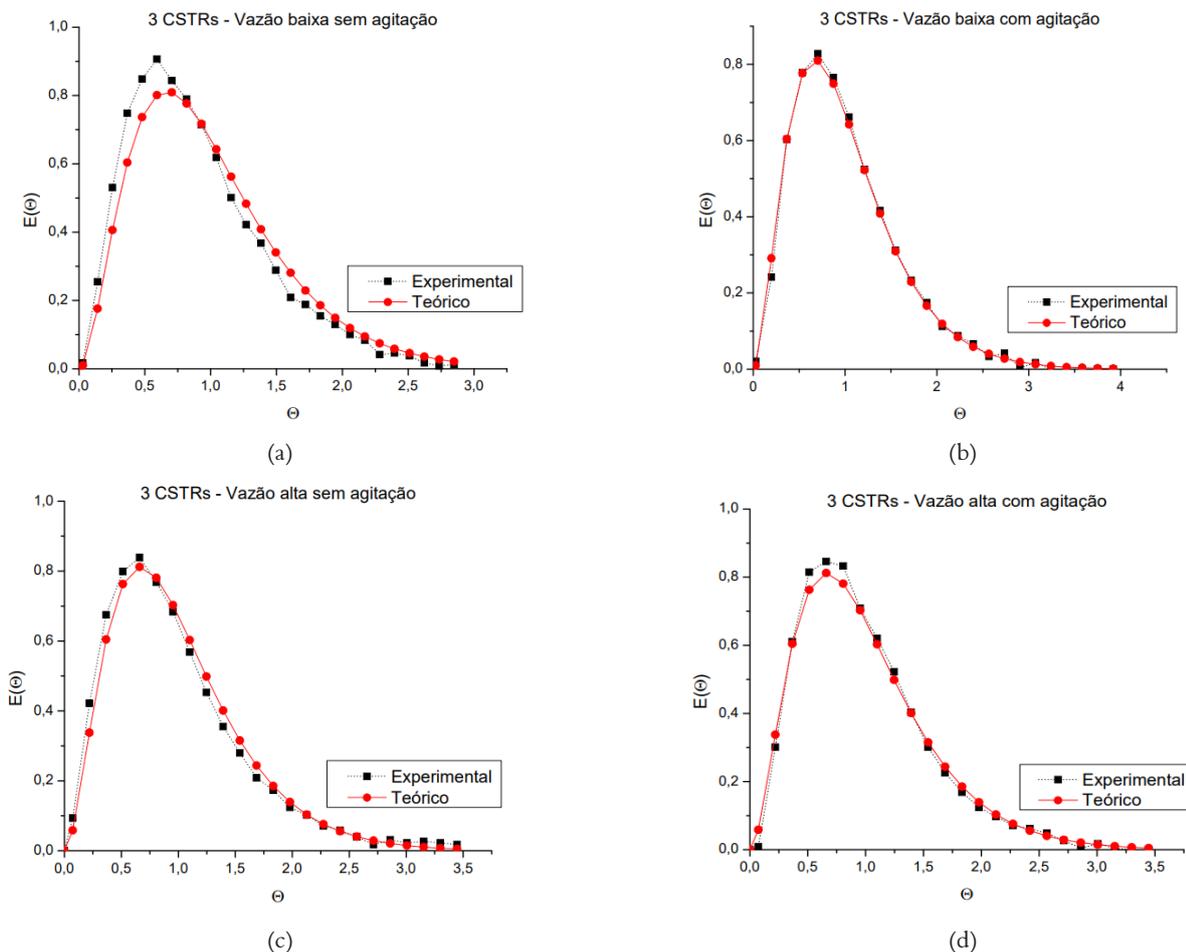
Vazão (mL/s)	Agitação	τ (s)	t_m (s)	Desvio
4,23	Sem	118,2	98,29	0,0063
	Com		107,52	0,00026
9,63	Sem	51,92	48,23	0,0057
	Com		50,31	0,0067

Fonte: os autores.

Comparando os tempos de residência, fica evidente que existe uma diferença entre os valores experimentais (t_m) e o valor teórico esperado para reatores ideais (τ). Em todos os casos o tempo médio de residência é menor que o tempo espacial, indicando a presença de volumes mortos no reator. Ao comparar as condições testadas por meio dos valores dos desvios, verifica-se que, para vazões baixas, o desvio é bem menor na presença de agitação. Ao trabalhar com vazões mais altas, a presença do agitador não parece interferir significativamente no escoamento.

No Gráfico 4 estão apresentadas as curvas de distribuição de tempos de residência normalizadas ($E(\theta)$) ao serem utilizados três reatores CSTR em série, para vazões baixas e altas e para sistemas com agitação e sem agitação.

Gráfico 4 – Valores de $E(\theta) \times \theta$ de reatores CSTRs em série, para vazão baixa (a) sem agitação (b) com agitação, e para vazão alta (c) sem agitação e (d) com agitação



Fonte: os autores.

Assim como observado no reator CSTR, os experimentos realizados nos três reatores em série apresentaram resultados muito próximos aos de reatores ideais. Ao se analisar o Gráfico 4 (a), (b), (c) e (d), percebe-se que esses reatores CSTR em série têm seu comportamento fluidodinâmico perto do ideal quando operados com fluidos que tenham a viscosidade similar à da água.

Na Tabela 2 são mostrados os valores calculados para o tempo espacial (τ), o tempo médio de residência (t_m) e o desvio médio entre os valores experimentais e teóricos para cada caso:

Tabela 2 – Dados experimentais, teóricos e desvios para CSRTs em série

Vazão (mL/s)	Agitação	τ (s)	t_m (s)	Desvio
4,23	Sem	354,61	318,40	0,00026
	Com		354,06	0,000013
9,63	Sem	136,36	132,48	0,000074
	Com		134,08	0,0000069

Fonte: os autores.

Analisando os dados da Tabela 2, percebe-se que em todos os casos o tempo médio de residência é menor que o tempo espacial, indicando a presença de volumes mortos no reator. Também é possível perceber que o caso que mais se afasta da idealidade (desvio experimental maior) é o de vazão baixa sem agitação. Mesmo assim, em todos os casos

o desvio é muito baixo, mostrando que os três reatores em série apresentaram um escoamento fluidodinâmico muito próximo do ideal.

4 CONCLUSÃO

Na análise do perfil de escoamento de um único reator CSTR foi observada a presença de zonas mortas no interior do reator. Entretanto, esse desvio da idealidade é muito baixo, sendo praticamente desprezível. Também foi possível observar a influência da agitação, pois quanto mais agitado o sistema menor é o desvio da idealidade. Assim, é possível afirmar que esse reator CSTR tem seu comportamento fluidodinâmico perto do ideal quando suficientemente agitado e operado com fluidos que tenham a viscosidade similar à da água.

No caso dos três CSTRs em série, os desvios da idealidade também são baixos e apresentam tendências para a formação de zonas mortas. Nesse caso, o maior desvio da idealidade ocorreu em condições de vazão baixa e sem agitação. Ao se aumentar a vazão e na presença de agitação, os reatores CSTR em série têm seu comportamento fluidodinâmico muito próximos do ideal.

De modo geral, conclui-se que os reatores estudados apresentam um perfil de escoamento muito próximo dos valores teóricos. Em trabalhos futuros na mesma linha de pesquisa será possível utilizar os dados da DTR obtidos para prever a conversão real de reações químicas com cinéticas conhecidas.

Distribution of time of residence in pilot-scale continuous stirred tank reactor (CSTRs)

Abstract

A pilot-scale continuous stirred tank reactor (CSTR) and three series CSTR reactors were used to study fluid dynamics behavior when exposed to variations in flow and agitation. The main objective of this study was to determine the residence time of the reactors, comparing them with the theoretical potential to diagnose possible deviations from the ideality. Through a pulse disturbance, 10 mL of blue methylene tracer with concentration of 0.4 g / L, was injected, in a short time period, into the feed stream. With pre-established times, samples were taken in the output stream of the first reactor (a single CSTR) and the third reactor (three series CSTR reactors). The concentrations of these samples were then read using a spectrophotometer. From the values obtained, the mean residence time was found and compared to the theoretical values. Two flow rates were used: a low of 4.23 mL / s and a high of 9.63 mL / s (one CSTR) and 11.00 mL / s (three series CSTR). For each case, at first the system had no agitation and, thereafter, moderate agitation. From the obtained results, it can be concluded that the CSTR reactor and the three series reactors had residence times a little smaller than the spatial time, indicating the presence of dead zones, but, in general, their fluid dynamics behavior is very close to the ideal.

Keywords: CSTR reactor. Real reactor. Ideal reactor. Residence time distribution.

REFERÊNCIAS

- FOGLER, H. S. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.
- LEVENSPIEL, O. **Engenharia das Reações Químicas**. 3. ed. São Paulo: Edgar Blucher, 2000.
- PEREIRA, M. A. C. Reator Mistura (CSTR). **Cálculo de Reatores**, Escola de Engenharia de Lorena, 2018. Disponível em: <<http://www.marco.eng.br/reatores/reatormistura.html>>. Acesso em: 10 mar. 2018.
- SASSAKI, R. A. **Distribuição de tempo de residência em sistemas alimentados com vazão variável**. Tese (Pós-graduação de Engenharia)–Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

