

DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA EM UM REATOR CONTÍNUO DE TANQUE AGITADO

DETERMINATION OF THE DISTRIBUTION OF RESIDENCE TIME IN A CONTINUOUS STIRRED TANK REACTOR

Mário Luiz Pereira Souza^{1*}

RESUMO

O estudo e projeto de reatores químicos são objetivos que norteiam, em diversos ramos, o Engenheiro de Processos. Mensurar as melhores condições, formas de operação e distúrbios que comprometam o bom desenvolvimento de tais vasos de reação no ambiente industrial é de fundamental relevância para garantir um produto final dentro das especificações requeridas. No que tange ao projeto de reatores, é necessário estudar o quanto seu comportamento se desvia da idealidade. Destarte, deve-se determinar a curva de distribuição de tempo de residência (DTR), na qual é possível identificar o tempo que as moléculas contidas numa massa fluida permanecem no reator. O presente trabalho visa à obtenção da distribuição de tempo de residência de um reator de mistura perfeita (CSTR). Utilizou-se o método experimental estímulo-resposta tipo pulso. Para os valores obtidos, analisando-se o tempo médio de residência em comparação com o tempo espacial, foi obtido um erro relativo de 8,19%. Logo, pode-se inferir que a presença de zonas mortas confirma a não idealidade.

Palavras-chave: Reatores Químicos. DTR. CSTR. Engenharia Química.

ABSTRACT

The study and design of chemical reactors is an objective that guides the Process Engineer in several branches. Measuring the best conditions, forms of operation and disturbances that compromise the proper development of such reaction vessels in the industrial environment is of fundamental importance to guarantee a final product within the required specifications. Regarding the design of reactors, it is necessary to study how much their behavior deviates from ideality. Thus, the residence time distribution curve (DTR) must be determined, in which it is possible to identify the time that the molecules contained in a fluid mass remain in the reactor. The present work aims to obtain the residence time distribution of a perfect mix reactor (CSTR). The experimental pulse-type stimulus-response method was used. For the values obtained by analyzing the average residence time in comparison with the spatial time, a relative error of 8.19% was achieved. Therefore, it can be inferred that the presence of dead zones confirms non-ideality.

Keywords: Chemical Reactors. DTR. CSTR. Chemical Engineering.

¹ Instituto Federal do Norte de Minas Gerais (IFNMG) – Campus Montes Claros. *<marioluiz198@gmail.com>

1. INTRODUÇÃO

Os processos industriais, de forma geral, possuem em sua base estrutural mecanismos e técnicas de transformações de matérias, a fim de se obter um produto final. Diversos equipamentos são utilizados nas indústrias químicas que buscam a excelência na produtividade e no controle dos processos para otimização e eliminação de desperdícios.

Entre os equipamentos utilizados, destaca-se o Reator Contínuo de Tanque Agitado, ou Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR), constituído por um tanque com presença de um agitador, que promove uma grande interação do material em seu interior e tem sua operação ocorrendo em estado estacionário, com vazões de entrada e saída constantes.

Apesar do modelo CSTR ser tomado como ideal, na prática operacional ocorrem distúrbios e outros eventos que interferem no funcionamento do reator, fazendo com que o mesmo opere de forma não ideal e realize conversões diferentes das ideais. Algumas das principais causas desses comportamentos são: os desvios de trajetória, também conhecidos por curto-circuitos, que fazem com que algumas linhas de corrente de fluido percorram o sistema de forma mais rápida que as outras; as zonas de estagnação, também chamadas de zonas mortas, que fazem com que parte dos fluidos que adentram o reator não se apresente de forma homogênea.

O objetivo do presente trabalho consiste na determinação da distribuição do tempo de residência (DTR) em um módulo didático de reator CSTR, utilizando-se corante como traçador, por meio do método experimental estímulo-resposta do tipo pulso.

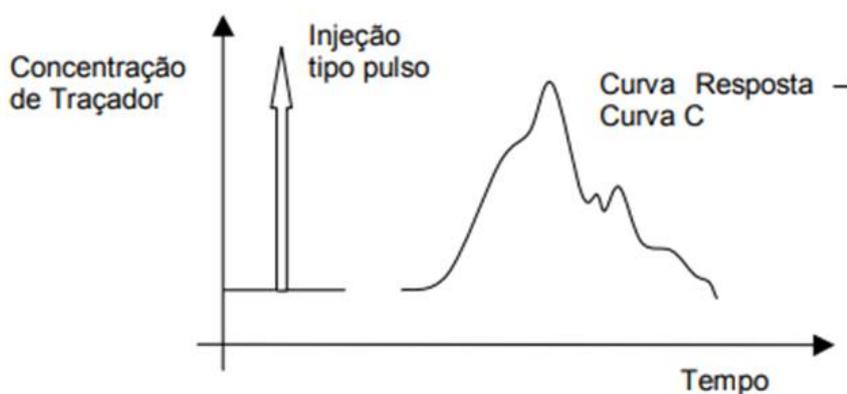
2. REFERENCIAL TEÓRICO

No que se refere à modelagem de um reator não ideal, é necessário lançar mão do estudo da distribuição do tempo de residência (DTR). Este estudo baseia-se no tempo que cada partícula permanece no reator. Para tanto, usa-se um corante como traçador para realizar as perturbações. De acordo com Fogler (2009), o corante a ser utilizado deve ser uma espécie não reagente que seja detectável de forma simples; ademais, ter propriedades físicas parecidas da mistura reagente e ser completamente solúvel nesta é algo essencial para a execução de medidas precisas.

Nas perturbações feitas em pulso, realiza-se a injeção do corante de forma instantânea (o mais rápido possível) e de uma só vez dentro do reator. A concentração de saída é então medida em função do tempo e, a partir desses dados, gera-se um gráfico de concentração versus tempo,

denominado curva C na análise de DTR. Na Figura 1, ilustra-se o esquema relativo ao estímulo do tipo pulso, aplicado à entrada do reator e a resposta obtida à sua saída.

Figura 1. Representação esquemática de um estímulo unitário instantâneo e da respectiva resposta



Fonte: Sasaki (2005, p. 8).

As descrições do modelo físico elucidadas pelas equações matemáticas abaixo foram embasadas em uma leitura minuciosa de Fogler (2009, p. 711- 715) e Schmal (2010, 514-518). O tempo (t) em que as diferentes concentrações (C) de fluido permanecem no reator é descrito, quantitativamente, por $E(t)$, denominada função de distribuição de tempo de residência. Esta função, para um sistema operando a vazão constante, é dada pela Equação 1.

Equação 1

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

O tempo de residência médio pode ser obtido a partir da área da curva de DTR, calculada com base na integral mostrada pela Equação 2, e a variância (σ^2), a qual indica a dispersão dos dados, é descrita pela Equação 3.

Equação 2

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} t \cdot E(t) dt$$

Equação 3

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} (t - T)^2 E(t) dt$$

Este estudo, realizado nas aulas de Laboratório de Engenharia Química IV, tem como objetivo traçar o perfil de DTR em um reator CSTR, usando um traçador que possibilita observar o tempo de permanência da partícula no referido equipamento, em diferentes agitações, com intuito de permitir que os alunos visualizem, na prática, possíveis fenômenos que descrevem a não idealidade em reatores químicos.

3. METODOLOGIA

Na presente seção, são abordados os materiais e métodos relativos ao cumprimento dos objetivos referentes à análise da não idealidade do módulo de reator CSTR. Para o presente estudo, foram utilizados os seguintes materiais:

- módulo didático Eco Educacional constituído por três reatores, em série, do tipo CSTR, e um reator de fluxo a pistão (PFR);
- soluções de azul de metileno em diferentes concentrações, as quais são mais bem descritas no próximo parágrafo (g/L);
- 12 tubos de ensaio;
- seringa;
- agulha;
- água destilada;
- tacômetro digital;
- proveta de 200 mL;
- cronômetro;
- espectrofotômetro.

Inicialmente, efetuou-se a construção de uma curva padrão, de modo a relacionar absorvância e concentração, para as soluções de azul de metileno nas concentrações, em g/L, de: 0,0001, 0,0005, 0,001, 0,002, 0,004 e 0,008. Constatou-se a absorvância de uma alíquota de água destilada, a fim de se obter o “branco” (ensaio realizado de modo a determinar o valor representativo à nulidade e, a partir deste, realizar as leituras intrínsecas às amostras).

Foram calibradas as vazões no módulo didático, cujo embasamento foram tempos espaciais pré-estabelecidos (33s, 60s e 80s). O módulo trabalhado do presente experimento é constituído por dois reservatórios (R_A e R_B) de 50L, três reatores CSTR, um reator de fluxo pistonado (PFR), duas bombas peristálticas, duas válvulas direcionadoras de fluxos, um tanque de 50L para os resíduos e um painel elétrico. A Figura 2 mostra, de forma clara, o equipamento utilizado.

Figura 2. Equipamento para Experimento de Reatores



Fonte: Eco Educacional (2013, p.17).

Foram enchidos os reservatórios R_A e R_B com água de torneira. Ligaram-se ambas as bombas peristálticas, de forma a ajustar as vazões para atingir os distintos tempos espaciais. Se utilizou de uma proveta para coleta de volume em um determinado tempo aferido com o auxílio de um cronômetro. Encheu-se o primeiro reator CSTR até o volume de 400mL e ajustou-se o agitador, com o auxílio do tacômetro digital, em uma rotação adequada. Em seguida, acoplou-se uma agulha à seringa de 10mL, de modo a injetar 0,5 mL de azul de metileno no reator analisado. Com o auxílio de um cronômetro, foram medidos 12 tempos, para que amostras fossem coletadas pela saída do reator. Por fim, foram efetuadas as leituras das amostras coletadas no espectrofotômetro.

4. RESULTADOS

Para determinar a curva de calibração do azul de metileno, mediram-se as absorvâncias das soluções-padrão no espectrofotômetro UV-visível.

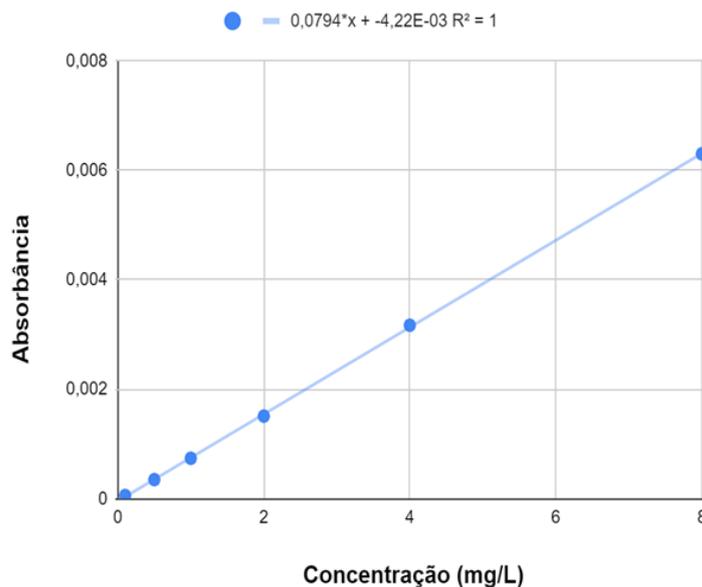
Tabela 1: Absorvância das soluções padrões

Padrão	Concentração (mg.L ⁻¹)	Absorvância
1	1,000x10 ⁻¹	6,000x10 ⁻³
2	5,000x10 ⁻¹	3,500x10 ⁻²
3	1,000	7,400x10 ⁻²
4	2,000	1,510x10 ⁻¹
5	4,000	3,170x10 ⁻¹
6	8,000	6,300x10 ⁻¹

Fonte: dados experimentais.

As informações de coeficiente linear e angular obtidas pela linearização dos dados de calibração do azul de metileno são essenciais para a determinação da concentração da substância em cada amostra coletada. Quando inserido, por meio de uma perturbação tipo pulso, o azul de metileno pode fornecer a curva de DTR obtida pela quantização da saída deste ao decorrer do tempo. A curva de calibração é obtida pela representação gráfica da absorvância em função da concentração. Diante dos dados aferidos, é possível plotar a curva descrita na Figura 3.

Figura 3. Curva de calibração do azul de metileno.



Fonte: Dados da pesquisa.

Diante do exposto, a equação obtida para a calibração está disposta a seguir (Equação 4):

Equação 4

$$\text{Abs} = 7,940 \cdot 10^{-2} C - 4,220 \cdot 10^{-3}$$

Obteve-se um coeficiente de correlação igual a 1,0. Logo, a Equação 4 prediz, de forma eficiente, a curva de absorbância. Ademais, antes de qualquer cálculo ser realizado, é preciso que seja efetuada a calibração da bomba a ser utilizada. O reator foi operado para que se mantivesse com um volume de 400 mL de água em seu interior, com uma agitação equivalente a 825 rpm.

Para a determinação da curva de calibração utilizaram-se diferentes frequências nas bombas, respectivamente, 20, 24 e 35 (escala adimensional, no que tange ao módulo didático trabalhado). Cabe salientar que as frequências descritas foram utilizadas nas bombas 1 e 2. Os dados obtidos para vazão, a partir da coleta de amostras de um volume fixo em proveta e aferições do tempo para isso, estão dispostos na Tabela 2.

Tabela 2: Dados aferidos para o cálculo do tempo espacial

Frequência	Tempo (s)	Q(mL.s ⁻¹)	τ (s)
20	5,75±1,53	6,68±6,80x10 ⁻¹	83,91±18,66
24	5,15±4,47x10 ⁻¹	4,87±1,09	60,11±6,02
35	5,51±6,30x10 ⁻¹	12,05±4,73x10 ⁻¹	33,21±1,33

Fonte: Dados da pesquisa.

Para encontrar a concentração em cada ponto, é necessário utilizar a equação da curva de calibração do azul de metileno disposta na Figura 3. Nesse aspecto, a Equação 4 fornece o subsídio necessário para o cálculo da propriedade abordada no início deste parágrafo. Com base nas Equações 2 e 3, é possível encontrar os parâmetros dispostos na Tabela 3.

Tabela 3: Dados obtidos para o cálculo do tempo de residência e do tempo espacial.

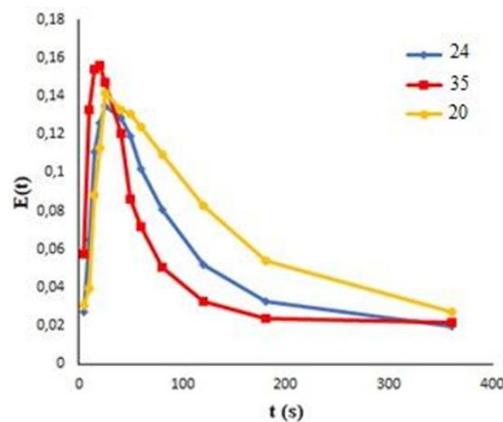
τ (s)	t _{médio} (s)	σ ² (s ²)
33,21±1,32	44,27±5,02x10 ⁻¹	3421,96±2,48x10 ⁻¹
60,11±6,02	51,43±4,54x10 ⁻¹	3305,98±2,50x10 ⁻¹
83,91±6,02	65,22±5,19x10 ⁻¹	4066,87±2,50x10 ⁻¹

Fonte: Dados da pesquisa.

A variância é uma indicação do espalhamento da distribuição, quanto maior o valor deste momento, maior o espalhamento da distribuição. A partir da Tabela 3, nota-se que esse parâmetro é maior para o tempo de residência (83,91±6,02). Logo, o experimento realizado para a frequência de 20 teve maior espalhamento da distribuição.

A Figura 4 demonstra a distribuição de tempos de residência para diferentes vazões de fluido. Ressalta-se que o gráfico foi plotado com dados utilizados para o cálculo do tempo médio.

Figura 4. Distribuição de tempos de residência para diferentes frequências utilizadas na bomba



Fonte: Dados da pesquisa.

Na Figura 4, observa-se que todas as curvas apresentam um pico inicial quase instantâneo, indicando a ocorrência do fenômeno de curto-circuito, em que uma parte do fluido entra no reator e sai quase que imediatamente, sem se misturar com toda a massa de fluido. Ainda, na Figura 4, percebe-se a presença de uma longa cauda, característica de zonas mortas, onde uma parte do traçador demanda um tempo elevado para deixar o reator (COSTA et al., 2017). Esse fenômeno reflete o decaimento vagaroso da concentração detectada na saída (já que a concentração é diretamente proporcional à absorbância), isto pode ser atribuído a não idealidade dos reatores.

Caso o tempo médio de residência seja divergente do tempo espacial, o escoamento é não ideal. Para $t > \tau$ ocorre, preferencialmente, curto-circuito e para $t < \tau$ resulta em zonas mortas. Dessa forma, ocorreu curto-circuito no procedimento cuja frequência da bomba foi equivalente a 35; nas frequências de 20 e 24, houve a ocorrência de zonas mortas, fato que pode ser comprovado pela longa cauda no gráfico. Cabe ressaltar que foi notada uma diminuição do tempo espacial conforme o aumento da rotação. Ressalta-se que a diferença entre o tempo de residência médio e o tempo espacial foi de 8,19%. Constata-se, dessa forma, que o tempo de residência médio não divergiu consideravelmente do tempo espacial. De acordo com Gutierrez (2008), a diferença entre os dados experimentais e os dados teóricos pode ser atribuída às inconsistências/distúrbios na injeção do traçador, visto que esta é feita manualmente, podendo sofrer variação de velocidade (devido ao volume reduzido da célula).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos dados obtidos para construção da curva padrão, observou-se que os valores se apresentaram confiáveis, de modo que o coeficiente de determinação (R^2) foi equivalente a 1. Injetando o traçador em pulso foi conseguida a DTR para diferentes frequências utilizadas na bomba, em que todas as curvas apresentaram comportamento não ideal.

O estudo foi de fundamental importância para a visualização prática da existência de condições indesejadas nas reações químicas no que tange à utilização de reatores do tipo CSTR e determinação de tempos de residência para reatores não ideais. Por fim, visto que reações podem ser exotérmicas ou endotérmicas, estudos posteriores podem ser feitos, inerente à influência da temperatura, sendo observadas as variações entre a parte interna do reator e a sua camisa para aquecimento/refrigeração.

REFERÊNCIAS

- COSTA, M. M.; FERREIRA, H. L.; FERNANDES, V. H. E.; GONÇALVES, T. A. C.; MARQUES M. O.; VASCONCELOS, R. A. Estudo da distribuição do tempo de residência em um reator contínuo de tanque agitado. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 22., 2018, São Paulo. **Anais...** São Paulo: Editora Blucher, 2018.
- ECO EDUCACIONAL. Soluções Práticas para Ensino e Pesquisa. **Experimento de reatores:** Batelada – CSTR – PFR (roteiro de aulas práticas). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), 2013.
- FOGLER, H. S. **Elementos de engenharia das reações químicas**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2009.
- GUTIERREZ, C. G. C. C. **Distribuição do tempo de residência em um processo de pasteurização com trocador de calor a placas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de São Paulo (USP). São Paulo: USP, 2008.
- SASSAKI, R. A. **Distribuição de tempos de residência em sistemas alimentados com vazão variável**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Engenharia Civil) – Programa de pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Rio de Janeiro: UFRJ, 2005.
- SCHMAL, M. **Cinética e reatores:** aplicação na engenharia química - teoria e exercícios. Rio de Janeiro: Editora Synergia, 2010.

Submissão: 20/09/2020
Primeira decisão editorial: 18/08/2022
Versão final: 18/08/2022
Aceite: 18/08/2022