

Área: Sustentabilidade | **Tema:** Educação e Sustentabilidade

**MONTAGEM DE UM PROTÓTIPO DE REATOR CSTR E ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO
DE RESIDÊNCIA E CONVERSÃO: UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO DA ENGENHARIA
QUÍMICA**

**Assembling of a CSTR Reactor Prototype and study of Residence Time Distribution and
conversion: an Approach for Chemical Engineering Teaching**

Guilherme Henrique Wendland, Évelin Michele Radons, Gabriela Do Nascimento Vieira, Maria Augusta

Boniatti Libardoni e Marcele Arais Hoyer

RESUMO

O presente trabalho visa construir um reator CSTR com materiais de fácil acesso, primeiramente por meio do protótipo em ferramenta computacional 3D, AutoCad, com posterior produção física do mesmo, e realizar a determinação do tempo de residência e conversão média do reator construído, utilizando azul de metileno como traçador injetado na forma de pulso. Para quantificar estes fatores desejados, primeiramente será feito o ajuste de curva dos dados obtidos de absorvância, afim de gerar as concentrações de azul de metileno e após utiliza-se a primeira regra de Simpson, sendo esta uma forma numérica que permite obter dados aproximados da área sob o gráfico, para determinar o tempo de residência do reator não ideal, e a conversão que ocorre neste através do modelo de segregação.

Palavras-Chave: Reator CSTR, Distribuição do Tempo de Residência, Conversão.

ABSTRACT

The present work aims to build a CSTR reactor with easily accessible materials, primarily through the 3D computer tool prototype, AutoCad, with later physical production, and to determine the residence time and average conversion of the constructed reactor using methylene blue as a pulse-injected tracer. In order to quantify these desired factors, the curve of the absorbance data will first be adjusted in order to generate the methylene blue concentrations and then the first Simpson rule will be used, which is a numerical form that allows to obtain approximate data of the area under the graph, to determine the residence time of the non-ideal reactor, and the conversion that occurs in it through the segregation model.

Keywords: CSTR Reactor, Residence Time Distribution, Conversion.

MONTAGEM DE UM PROTÓTIPO DE REATOR CSTR E ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA E CONVERSÃO: UMA ABORDAGEM PARA O ENSINO DA ENGENHARIA QUÍMICA

1. INTRODUÇÃO

O estudo de reatores dentro do curso de engenharia química é de vital importância, principalmente quando há o uso de práticas laboratoriais, sendo em modelos de bancada em laboratório ou protótipos com materiais de fácil acesso. Estas atividades auxiliam na compreensão e desenvolvimento de aspectos que, somente em sala de aula, podem não ser abordados ou até mesmo passarem despercebidos.

O reator contínuo de tanque agitado, CSTR, é utilizado comumente em processamento industrial e é caracterizado por possuir uma mistura intensa, sendo tipicamente utilizado em fase líquida. Geralmente é operado em estado estacionário, assim a temperatura, a concentração e a velocidade da reação dentro do CSTR não dependem do tempo nem da posição. A corrente de alimentação, logo na entrada, é misturada instantaneamente com o conteúdo do reator, destruindo imediatamente a identidade da alimentação (FOGLER, 2009).

Estes reatores são utilizados, principalmente, em indústrias de polimerizações, saponificação e hidrólise. Assim, os reatores CSTR necessitam do estudo de diversos parâmetros, como o tempo de residência e conversão, os quais são amplamente utilizados para modelar o escoamento e funcionamento dos mesmos (Olivet et al., 2005).

Nem todos os elementos do fluido levam exatamente o mesmo tempo em um reator real, exceto no caso especial de um reator de escoamento pistonado ideal. As funções de distribuição de tempos de residência fornecem uma forma quantitativa para descrever quanto tempo um fluido escoando permanece em um reator. Estas funções podem ser obtidas utilizando um marcador. Uma das formas de injetar este marcador é como pulso ideal, isto é, todo o marcador entra no recipiente ao mesmo tempo. Entretanto o marcador deixa o recipiente em uma faixa de tempo, isso indica que ocorre uma mistura de fluido no interior do recipiente. As curvas de resposta do marcador fornecem uma descrição quantitativa de quanto tempo um fluido escoando permanece dentro do reator (ROBERTS, 2009).

Assim, o conhecimento da distribuição do tempo de residência baseado em técnicas de estímulo-resposta, como a perturbação do tipo pulso, possibilita estudar a idealidade de um dado sistema, podendo também determinar o comportamento não ideal, causado pelas zonas de estagnação (Olivet et al., 2005). Já a conversão, define o percentual de produto que é gerado a partir dos reagentes presentes no reator. Quanto maior esse fator de conversão, mais efetiva é a reação.

2. METODOLOGIA

2.1 Desenvolvimento de protótipo de um reator CSTR

Os materiais utilizados na elaboração do protótipo do reator foram: 4 unidades de vidros de conserva 5 L; 1 unidade de vidro borossilicato; 1 unidade de tampa de vidro; 3

unidades de torneiras plásticas; 1,5 m de mangueira de silicone; 3 unidades de cola silicone; 8 bastões de cola quente; 3 unidades de cotovelo união $\frac{1}{2}$ ''; 3 unidades de união para mangueira $\frac{1}{2}$ ''; 4 unidades de lacres plásticos; base para reator em MDF pré-fabricada; 6 unidades de parafusos, 1 Kg tinta branca para madeira; furadeira; lixadeira; 1 unidade de motor de bateadeira e 2 unidades de pás de bateadeira.

Para a construção do protótipo do reator foram utilizados os vidros de conserva de 5 L e o vidro em borossilicato, que apresenta como principais características elevada resistência química e coeficiente de expansão térmico mínimo, possibilitando a sua utilização como ambiente para realização das reações químicas. Dois dos vidros de conserva foram perfurados para instalação de torneiras plásticas, estes vidros foram utilizados como uma espécie de tanque de armazenamento para os reagentes químicos.

Na construção do reator, que será encamisado, foram feitas 3 perfurações lateralmente em um vidro de conserva de 5 L, sendo uma das perfurações localizada na parte inferior e outra na parte superior, este vidro terá a função de camisa, onde o fluido de troca térmica fluirá da parte inferior, preenchendo a camisa e por fim escoando pela saída superior. Nestas perfurações laterais foram encaixadas mangueiras através de duas unidades de união, as quais foram fixadas com cola silicone, para garantir que não houvesse problemas quanto a vazamentos. A terceira perfuração será responsável pela saída do produto da reação. O reator será o frasco de borossilicato, onde na parte inferior, foi encaixado, com o auxílio de dois lacres de plástico, um fragmento de mangueira de silicone. Por tratar-se de um vidro estreito, teve-se dificuldades quanto ao encaixe do reator na camisa, pois quando se efetuava o encaixe da mangueira do reator com a saída destinada ao produto da reação, a mangueira dobrava-se, para isso, foi adaptado uma conexão cotovelo de $\frac{1}{2}$ '', o que permitiu fazer a curva com a mangueira sem dobrá-la. O reator em borossilicato foi preso na camisa, com a garantia de que estivesse localizado no centro e para isso foi utilizado um nível para garantir o eixo central e para fixação do mesmo foi utilizado cola quente e por fim cola silicone.

Na tampa do reator foram feitas três perfurações, duas lateralmente, para entrada dos reagentes e uma na parte superior, para o agitador. O reator foi fixado em uma base, pré-fabricada em material MDF, e finalizada com tinta branca.

Já os tanques de armazenamento de reagentes, foram fixados em pequenos fragmentos em madeira,. O motor de bateadeira foi instalado entre os dois vidros, para promover a agitação da mistura. Para sua instalação foi fabricada uma pequena estrutura em madeira, capaz desustentar o peso do motor e que garantisse sua posição no centro da tampa do reator.

2.2 Experimento

O experimento foi realizado no Laboratório de Engenharia Química da Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul (UNIJUÍ).

Inicialmente as correntes de fluido (água) do protótipo do reator CSTR foram ativadas ao abrir a válvula do tanque de armazenamento de reagentes, e também a válvula de saída do reator. Em seguida, dentro do reator, foi injetado 1 mL de corante azul de metileno, na concentração de 1 g/L, com uma seringa, no menor tempo possível para se aproximar de um pulso teoricamente instantâneo. A partir deste momento foi ligado o cronômetro e foram recolhidas em tubos de ensaio amostras do produto diretamente na válvula de saída do reator a cada 10 segundos, até aproximar-se de 80 segundos. O

procedimento foi realizado em duas etapas: primeiramente com agitação do sistema, e após foi realizada uma nova injeção de azul de metileno sem agitação. Posteriormente foram feitas leituras das absorbâncias em um espectrofotômetro UV-visível no comprimento de onda de 665 nm.

Para determinação das concentrações das amostras recolhidas, foi necessário construir uma curva analítica com dados conhecidos de concentrações. Primeiramente foi definido os limites estabelecidos pelo método, ou seja, entre 0,1 e 1 g/L, e a partir da solução estoque de azul de metileno de 1g/L, foram feitas diluições em um balão volumétrico de 50,00 mL, de acordo com a equação 1.

$$C_1 \times V_1 = C_2 \times V_2 \quad (1)$$

Onde C_1 é a concentração da solução estoque de azul de metileno, 1 g/L; V_1 é o volume a ser retirado da solução estoque; C_2 é a concentração desejada, ou seja, a concentração diluída; V_2 é o volume total da solução analítica a ser preparada, ou seja 50,00 mL.

Com as leituras de absorbância e com a curva analítica, pode-se construir uma tabela com o tempo de coleta e com a concentração de azul de metileno liberada na saída do reator. Com esses dados, pode-se determinar a distribuição do tempo de residência para o reator CSTR construído.

2.3 Tratamento dos dados

2.3.1 Distribuição do Tempo de Residência ($E(t)$)

A quantidade $E(t)$ é chamada de função de distribuição de tempo de residência, e é ela que descreve quantitativamente quanto tempo diferentes elementos de fluido permanecem no reator. De acordo com Fogler (2009) a equação 2 pode ser explicitada para a distribuição do tempo de residência por:

$$E(t) = \frac{c(t)}{\int_0^{\infty} c(t) dt} \quad (2)$$

2.3.2 Primeira Regra de Simpson

A 1ª Regra de Simpson é obtida aproximando-se o polinômio $f(x)$ por um polinômio interpolador de 2º grau. Para utilização desta regra deve-se subdividir o intervalo de integração $[a,b]$ em n subintervalos iguais de amplitude h , e a cada grupo de subintervalos, deve ser aplicada a primeira regra de Simpson (BARROSO, 1987). Esta regra permite calcular a área sob o gráfico para uma integração.

Como esta regra é aplicada em pares de subintervalos, o número n de subintervalos, ou, amostras, deverá ser sempre par. Abaixo na equação 3, é demonstrada a equação da 1ª Regra de Simpson.

$$I = \frac{h}{3} [y_0 + 4y_1 + 2y_2 + 4y_3 + 2y_4 + \dots + 2y_{n-2} + 4y_{n-1} + y_n] \quad (3)$$

2.3.3 Ajuste de Curva

Em um experimento podem ocorrer diversos interferentes, onde os erros experimentais estão associados. Em um modelo matemático, a variável resposta, dependente, com o conjunto das variáveis explicativas, independentes, permite determinar uma previsão do comportamento da variável resposta (BARROSO, 1987).

Ao estudar as variáveis, dependentes e independentes, deve-se plotar os dados em um diagrama de dispersão, pois ele fornece uma ideia da forma e comportamento exibida por eles.

No ajuste de curva são obtidos dados como a equação da reta e o R^2 . A equação da reta demonstra a melhor reta que passa pelos pontos no digrama de dispersão, ou seja fornece o comportamento correto dos valores do experimento, permitindo calcular a concentração acerca de um determinado tempo. Já o valor de R^2 tem como função avaliar a qualidade dos dados encontrados, avaliando químicamente, o valor deve ser o mais próximo de 1, pois o nível de qualidade dos dados, precisão, devem ser extremamente confiáveis.

2.3.4 Modelo de Segregação

Assumindo que a reação ocorrendo no reator é de primeira ordem, a taxa de conversão é definida como:

$$X(t) = 1 - e^{-kt} \quad (4)$$

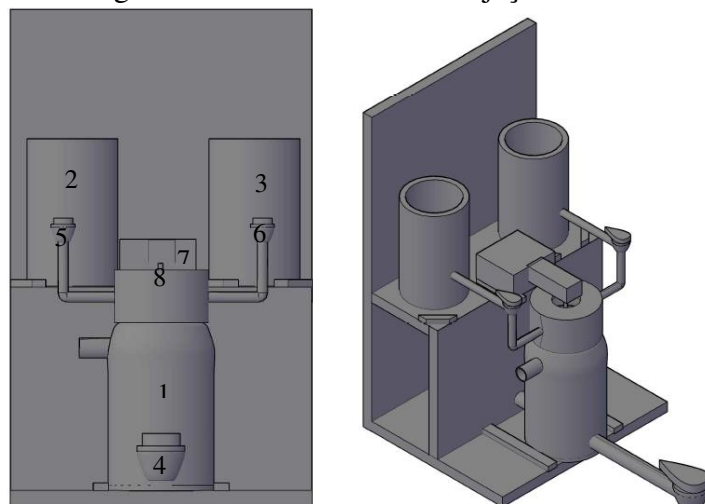
Ao longo de um reator formam-se regiões com diferentes concentrações, resultando em partículas que ficam menos tempo e mais tempo. A conversão média é determinada através da equação 5:

$$\bar{X} = \int_0^{\infty} X(t)E(t)dt \quad (5)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Primeiramente foi projetado, através da ferramenta computacional AutoCad, o modelo de reator CSTR. Na Figura 1 podem ser observadas as vistas do projeto executado.

Figura 1. Reator CSTR em Projeção 3D



Fonte: autores.

Na tabela 1 constam os componentes do reator e seu respectivo número, para observação de cada componente e sua alocação no protótipo.

Tabela 1. Definição dos Componentes do Reator

Legenda	Equipamento
1	Reator Principal
2	Armazenamento de Reagente
3	Armazenamento de Reagente
4	Válvula
5	Válvula
6	Válvula
7	Motor
8	Agitador

Fonte: autores.

O protótipo finalizado do reator CSTR pode ser observado na figura 2, onde observa-se que o mesmo encontra-se em funcionamento após a injeção do corante azul de metileno pela injeção pulso.

Figura 2. Protótipo de Reator CSTR



Fonte: autores.

Com o reator concluído foi determinado o tempo de residência e a taxa de conversão para as duas situações, com agitação e sem agitação dos reagentes. Os resultados de leitura das absorbâncias de azul de metileno retiradas na saída do reator são expressas na tabela 2.

Tabela 2. Alíquotas de produto do reator CSTR com agitação e sem agitação

Tempo (s)	Absorbância (Com Agitação)	Absorbância (Sem Agitação)
0	0	0
10	0,188	0,139
20	0,093	0,068
30	0,048	0,040
40	0,025	0,025
50	0,011	0,012
60	0,005	0,008
70	0,002	0,004
80	0	0,003

Fonte: autores.

Através dos dados pode-se calcular a concentração de azul de metileno na saída do reator. Para isso, primeiramente foi necessário a construção da curva analítica, para obtenção da equação da reta, que fornece a concentração do componente em estudo conforme a leitura de absorbância. As concentrações e absorbâncias estão apresentadas na tabela 3.

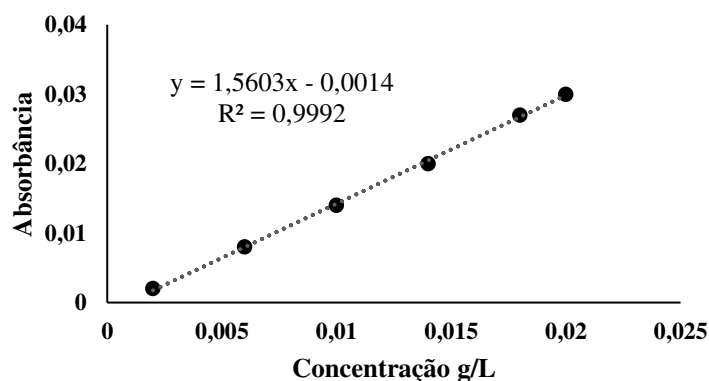
Tabela 3. Absorbâncias Curva Analítica

Concentração g/L	ABS
0,002	0,002
0,006	0,008
0,01	0,014
0,014	0,02
0,018	0,027
0,02	0,03

Fonte: autores.

A figura 3 apresenta a curva analítica obtida para as concentrações de azul de metileno e a absorbâncias correspondentes. Ainda pode ser verificado o ajuste da curva e a equação da reta.

Figura 3. Curva Analítica

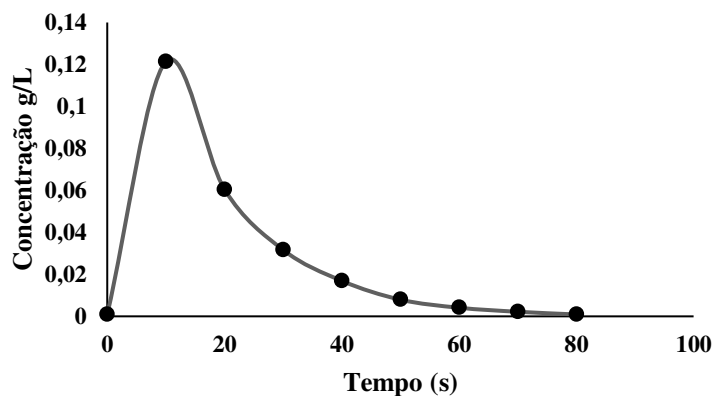


Fonte: autores.

A equação da reta obtida na Figura 3 tem como função $y = 1,5603x - 0,0014$, onde x é a medida de concentração de traçador e y a absorbância medida. A obtenção da curva permite o cálculo da concentração pela medida da absorbância para o estudo do reator. A função obtida fornece uma alta representatividade dos dados, pois seu R^2 está de acordo com o nível de precisão que o experimento requer, atingindo quase 100%.

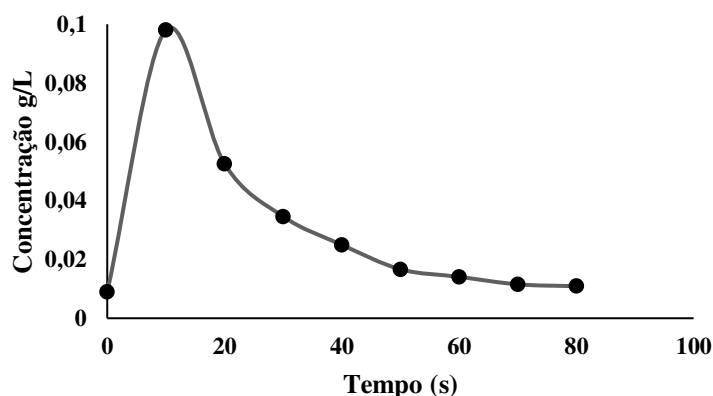
A partir da equação da reta obtida através da curva analítica e dos dados apresentados na tabela 2, pôde ser construída a curva de concentração de reagente (C_a) pelo tempo (t). Nas figuras 4 e 5, pode ser visualizado o comportamento para os dois experimentos realizados (com agitação e sem agitação).

Figura 4. Concentração versus Tempo para reator CSTR com agitação



Fonte: autores.

Figura 5. Concentração versus Tempo para reator CSTR sem agitação



Fonte: autores.

As curvas identificadas nas Figuras 4 e 5, são curvas características do reator tipo CSTR, pois a sua concentração é crescente até determinado tempo, e após, decresce até perto de zero, isso deve-se ao fato de não haver alimentação do traçador de forma contínua e representar o comportamento do reagente dentro do reator.

A análise do gráfico foi realizada utilizando a técnica de entrada tipo pulso, que permite determinar a distribuição do tempo de residência. Com o auxílio da equação 2,

são obtidos $E(t)$, para cada tempo. Para determinação de $E(t)$, primeiramente é necessário obter a área total sob a curva referente as leituras de concentração. Os resultados para $E(t)$ são expressos na Tabela 5.

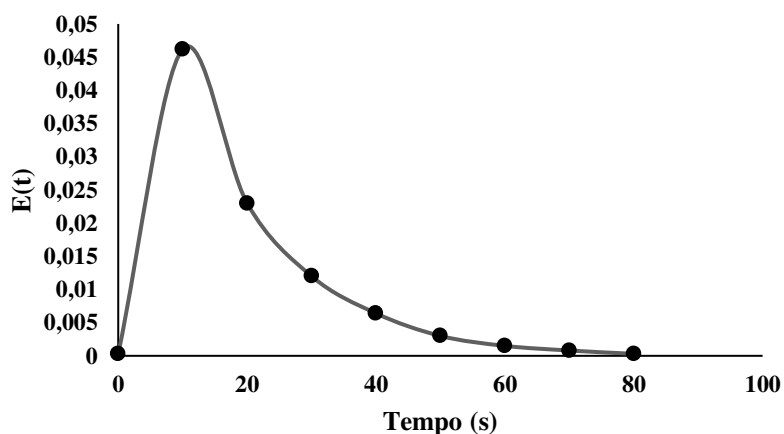
Tabela 5. Distribuição do Tempo de Residência para o Reator CSTR com agitação e sem agitação

Tempo (s)	$E(t)$ (Com Agitação)	$E(t)$ (Sem Agitação)
0	0,0003	0,0031
10	0,0445	0,0347
20	0,0222	0,0186
30	0,0116	0,0122
40	0,0062	0,0088
50	0,0029	0,0058
60	0,0015	0,0049
70	0,0007	0,0040
80	0,0003	0,0038

Fonte: autores.

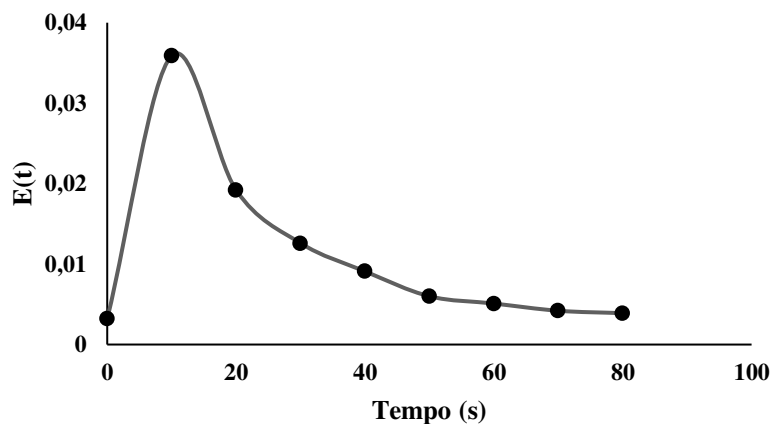
A partir dos resultados obtidos foi possível plotar os gráficos representados nas Figuras 6 e 7 de $E(t)$ versus tempo. Utilizando a equação 3, o reator operado com agitação obteve distribuição de 2,7223 g.s/L em 80 segundos e o reator operado sem agitação obteve distribuição de 2,8176 g.s/L em 80 segundos.

Figura 6. Distribuição do Tempo de Residência versus tempo para reator CSTR com Agitação



Fonte: autores.

Figura 7. Distribuição do Tempo de Residência versus tempo para reator CSTR sem Agitação



Fonte: autores.

Calculando a área no gráfico das Figuras 6 e 7, utilizando o método numérico da Primeira Regra de Simpson, concluiu-se que 61,39% do traçador permaneceu no reator com agitação entre 10 a 50 segundos e 58,16% do traçador permaneceu no reator sem agitação entre 10 a 50 segundos. Através dos gráficos percebe-se que para o experimento sem agitação o traçador permaneceu no reator após 80 segundos, oposto ao experimento operado sem agitação, onde as partículas permaneceram por até 80 segundos. Atribui-se a permanência do traçador no primeiro experimento a agitação, pois a velocidade de agitação pode ter ocasionado um maior tempo de residência dentro do reator, comprometendo a conversão de uma reação.

Considerando como constante de velocidade $0,05 \text{ s}^{-1}$, e, através da equação 4, foram determinados os valores das conversões para os dois experimentos:

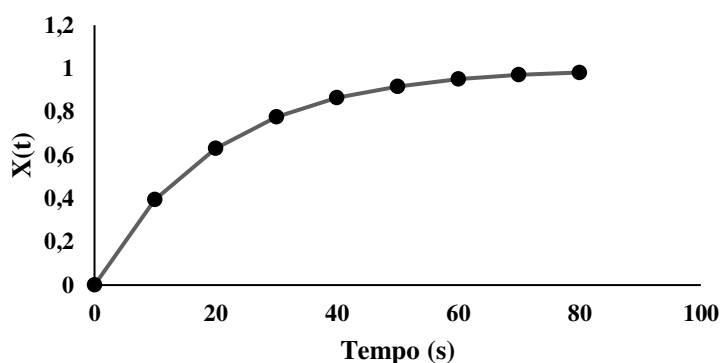
Tabela 6. Taxa de conversão para os experimentos

Tempo (min)	X(t) (Com Agitação)	X(t) (Sem Agitação)
0	0	0
10	0,3934	0,3934
20	0,6321	0,6321
30	0,7768	0,7768
40	0,8646	0,8646
50	0,9179	0,9179
60	0,9502	0,9502
70	0,9698	0,9698
80	0,9816	0,9816

Fonte: autores.

Após o cálculo da taxa de conversão, foi construído o gráfico referente aos resultados obtidos, sendo observado para ambos os experimentos o mesmo comportamento, o que demonstra que a agitação não influencia este tipo de reação. Na figura 8 pode ser observado o comportamento:

Figura 8. Taxa de conversão para os dois experimentos



Fonte: autores.

A curva representa a conversão do reagente com o passar do tempo, ou seja, o aumento observado na Figura 8 mostra o comportamento previsto para um reator CSTR.

Através do método numérico de integração, determinou-se a conversão média, assumindo o modelo de segregação. Realizando o cálculo, através da equação 5, chegou-se a conversão média de 53,60% para o reator operado com agitação, e de 59,96% para o reator operado sem agitação.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O protótipo construído de reator contínuo de tanque agitado (CSTR) mostrou-se eficiente quanto a determinação dos parâmetros propostos, pois foi possível determinar tanto o tempo de residência quanto a conversão, tornando-se um valioso instrumento de ensino.

Métodos numéricos são importantes em diversas áreas, na engenharia química é um grande aliado na determinação de tempos de residência e conversão em reatores CSTR, fornecendo valores médios que são importantes no projeto e eficiência de um reator.

A partir dos parâmetros avaliados, foi verificado que o comportamento observado nos gráficos é característico de um reator CSTR, porém, os valores de conversão média para os dois experimentos não foram satisfatórios, onde o experimento com o reator operado sem agitação obteve maior conversão média, entre 59,96%. Tal resultado pode ter relação com a velocidade de agitação do reator, visto que a velocidade utilizada estava além da permitida, o que pode acarretar em uma diminuição da conversão média, porém o resultado condiz com a avaliação da distribuição do tempo de residência, onde o reator sem agitação apresentou um maior tempo de residência e consequentemente uma maior conversão quando comparado ao reator com agitação.

Ainda foi possível avaliar os tempos de residência, onde para o reator operado com agitação 61,39% das partículas permaneceram no reator por cerca de 50 segundos, e 58,16% das partículas permaneceram no reator operado sem agitação por cerca de 50 segundos. Avaliando os dados obtidos para o tempo de residência nota-se uma pequena diferença entre os dois experimentos, percebe-se que a agitação praticamente não influenciou na permanência das partículas no reator para um tempo de 50s, pois a alta vazão no reator pode ter ocasionado a diminuição do tempo de residência para ambos os experimentos.

Devido ao pequeno tempo de residência dentro do reator, o seu uso está indicado para reações em que as reações ocorrem imediatamente devido a mistura, não sendo indicado para reações em que um maior tempo de residência é necessário.

O reator CSTR construído demonstrou-se robusto e um ótimo meio para o aprendizado de conceitos teóricos, porém algumas melhorias podem ser feitas, como a troca do motor utilizado para agitação, e a implementação de um controle de vazão automatizado, afim de melhorar a eficiência do mesmo.

5. REFERÊNCIAS

- [1] BARROSO, Leonidas Conceição et. al. Cálculo numérico: com aplicações. São Paulo: Harbra, 1987.
- [2] FOGLER, H. S. Elementos de Engenharia Química das Reações Químicas: 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC. 2009.
- [3] OLIVET, D.; VALLS, J.; GORDILLO, M. À.; FREIXÓ, À.; SÁNCHEZ, A. Application of residence time distribution technique to the study of the hydrodynamic behaviour of a full-scale wastewater treatment plant plug-flow bioreactor. *J. Chem. Technol. Biotechnol*, 2005.
- [4] ROBERTS, G.W. Reações Químicas e Reatores Químicos. 1ª Ed. Rio de Janeiro: LTC. 2010.