

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA A TECNOLOGIA DO RIO
GRANDE DO SUL - CAMPUS FELIZ
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA**

THAIS BALLICO

**ESTUDO CINÉTICO DA DESCOLORAÇÃO DO AZUL BRILHANTE FCF, CRISTAL
VIOLETA E VERDE DE MALAQUITA EM REATORES BATELADA, CSTR E PFR**

FELIZ

2022

THAIS BALLICO

ESTUDO CINÉTICO DA DESCOLORAÇÃO DO AZUL BRILHANTE FCF, CRISTAL VIOLETA E VERDE DE MALAQUITA EM REATORES BATELADA, CSTR E PFR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

Orientadora: Prof. Nicéia Chies da Fré
Coordenadora: Prof. Daiane Romanzini

FELIZ

2022

THAIS BALLICO

ESTUDO CINÉTICO DA DESCOLORAÇÃO DO AZUL BRILHANTE FCF, CRISTAL VIOLETA E VERDE DE MALAQUITA EM REATORES BATELADA, CSTR E PFR

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de bacharelado em Engenharia Química do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharela em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Analia Borges Folle

Prof. Daiane Romanzini

ORIENTADOR

Prof. Nicéia Chies da Fré

Feliz, 12 de julho de 2022.

AGRADECIMENTOS

Ao finalizar este trabalho junto à graduação de Engenharia Química, vibro por estas conquistas e vejo que tenho muito agradecer, por isso, quero agradecer as pessoas que estiveram comigo nesta jornada.

Primeiramente, meus pais, Simone e Valmir Ballico, pelo exemplo de força e amor, em que, sempre me deram suporte e apoio em tudo que precisei. Esta conquista é deles também.

À minha irmã, Cristina Ballico, que sempre esteve me aconselhando nas minhas decisões. Aos meus irmãos, Giovani e Guilherme Ballico, que estiveram presentes em toda esta caminhada.

Ao Daniel Abreu, meu namorado, que sempre me ajudou, apoiou e aconselhou em toda a graduação e cotidiano.

À professora Nicéia Chies da Fré, pela paciência e suporte no desenvolvimento do TCC. Ao professor Matheus Felipe Pedrotti, pelo auxílio e conselhos nos experimentos deste trabalho.

RESUMO

Os corantes são utilizados em muitas indústrias químicas principalmente nas têxteis, alimentícias, cosmética e alimentícia. Os corantes utilizados neste trabalho foram o azul brilhante FCF, cristal violeta e verde de malaquita. O propósito deste trabalho foi realizar o estudo cinético da descoloração de cada reagente, determinando a constante de velocidade, as conversões do reator batelada, reator de mistura em tanque ideal e reator tubular ideal, contribuindo para aulas experimentais futuras no Laboratório de Engenharia Química. As reações do cristal violeta e verde de malaquita ocorreram com hidróxido de sódio, já a reação do azul brilhante ocorreu com hipoclorito de sódio. As três reações foram realizadas de acordo com método de excesso de um dos reagentes a fim de obter um modelo de reação de pseudo-primeira ordem. As determinações das concentrações foram realizadas através de leituras no espectrofotômetro em determinados comprimentos de onda a fim de obter absorção máxima de cada um dos corantes e os experimentos foram realizados em uma bancada didática de reatores. Utilizando-se o método integral de análise de dados experimentais, os valores encontrados das concentrações *versus* tempo formaram uma equação linear, sendo possível determinar o valor da constante de velocidade para cada reação e nisso, na temperatura de 21° C, encontrou-se o k para o azul brilhante FCF de $1,5319 \text{ s}^{-1}$, cristal violeta de $0,1255 \text{ s}^{-1}$ e o do verde de malaquita de $1,072 \text{ s}^{-1}$. As conversões experimentais obtidas dos reatores foram comparadas com as conversões teóricas calculadas utilizando-se as equações específicas para cada reator, dessa maneira, as diferenças das conversões calculadas no reator batelada foi de 0,96%, já no reator de mistura em tanque ideal de 6,1% e no reator tubular ideal de 7,2%.

Palavras-chave: Azul brilhante FCF. Cristal violeta. Verde de malaquita. Cinética de reação. Reatores.

ABSTRACT

Dyes are used in many chemical industries mainly in textile, food, cosmetics and food. The dyes used in this work were brilliant blue FCF, crystal violet and malachite green. The purpose of this work was to perform the kinetic study of the decolorization of each reagent, determining the speed constant, the conversions of the batch reactor, ideal tank mixer reactor and ideal tubular reactor, contributing to future experimental classes in the Chemical Engineering Laboratory. The crystal violet and malachite green reactions occurred with sodium hydroxide, while the brilliant blue reaction occurred with sodium hypochlorite. The three reactions were carried out according to the method of excess of one of the reactants in order to obtain a pseudo-first-order reaction model. The concentration determinations were performed by spectrophotometer readings at certain wavelengths in order to obtain maximum absorbance of each of the dyes and the experiments were performed on a didactic reactor bench. Using the integral method of experimental data analysis, the values found for the concentrations versus time formed a linear equation, and it was possible to determine the value of the rate constant for each reaction and, on this, at 21° C, the k for FCF brilliant blue was found to be 1.5319 s⁻¹, crystal violet 0.1255 s⁻¹ and malachite green 1.072 s⁻¹. The experimental conversions obtained from the reactors were compared with the theoretical conversions calculated using the specific equations for each reactor, thus, the differences in the conversions calculated in the batch reactor was 0.96%, in the tank mix reactor 6.1% and in the tubular reactor 7.2%.

Keywords: Brilliant blue FCF. Crystal violet. Malachite green. Reaction kinetics. Reactors.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Reação de ordem zero.....	16
Figura 2 – Reação de primeira ordem.....	17
Figura 3 – Reação de segunda ordem	17
Figura 4 – Estrutura da molécula do azul brilhante FCF.....	18
Figura 5 – Reação da descoloração do azul brilhante FCF.....	19
Figura 6 – Estrutura da molécula do cristal violeta	19
Figura 7 – Reação da descoloração do cristal violeta	20
Figura 8 – Estrutura da molécula do verde de malaquita	20
Figura 9 – Reação da descoloração do verde de malaquita.....	21
Figura 10 – Reator batelada.....	22
Figura 11 – Reator contínuo de tanque agitado	25
Figura 12 – Reator com escoamento empistonado	26
Figura 13 – Espectrofotômetro PHOX V-12	29
Figura 14 – Bancada didática Up Control.....	30
Figura 15 – Absorbância <i>versus</i> Tempo do azul brilhante FCF	33
Figura 16 – Determinações dos k' do azul brilhante	34
Figura 17 – Determinação do k do azul brilhante	34
Figura 18 – Conversões e o erro no reator batelada	35
Figura 19 – Absorbância <i>versus</i> Tempo cristal violeta	38
Figura 20 – Determinações dos k' do cristal violeta	38
Figura 21 – Determinação do k do cristal violeta.....	39
Figura 22 – Absorbância <i>versus</i> Tempo do verde de malaquita.....	40
Figura 23 – Determinações dos k' do verde de malaquita.....	40
Figura 24 – Determinação do k do verde de malaquita	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Concentração das soluções dos corantes nas determinações cinéticas.	31
Tabela 2 – Padronização da solução do hipoclorito de sódio	32
Tabela 3 – Padronização da solução do hidróxido de sódio.....	32
Tabela 4 – Dados obtidos do reator CSTR.....	36
Tabela 5 – Dados obtidos do reator PFR	37

SIGLAS, TERMOS E ABREVIações

CSTR	-	Continuous Stirred-tank Reactor
FCF	-	For Coloring Food
IUPAC	-	International Union of Pure and Applied Chemistry
L	-	Litros
mol/L	-	mol/Litros ou Molaridade
nm	-	Nanômetro
PFR	-	Plug Flow Reactor
s	-	Segundos
mL/min	-	Mililitros por minutos
min	-	Minutos
°C	-	Grau Celsius
k	-	Constante de velocidade
k'	-	Constante de velocidade da reação de pseudo-primeira ordem
C_{A0}	-	Concentração inicial do reagente A
C_A	-	Concentração final do reagente A
r_A	-	Velocidade da reação A
A_0	-	Absorbância inicial
A	-	Absorbância final
t	-	Tempo

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 OBJETIVO GERAL	12
1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS.....	12
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 CINÉTICA	13
2.1.1 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE VELOCIDADE	14
2.1.2 MÉTODO INTEGRAL.....	15
2.1.3 AZUL BRILHANTE FCF	18
2.1.4 CRISTAL VIOLETA	19
2.1.5 VERDE DE MALAQUITA	20
2.2 REATORES	21
2.2.1 REATOR BATELADA.....	22
2.2.2 REATOR CONTÍNUO DE TANQUE AGITADO – CSTR	24
2.2.3 REATOR COM ESCOAMENTO EMPISTONADO - PFR	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	28
3.1 MATERIAIS.....	28
3.2 PREPARAÇÃO DOS REAGENTES.....	28
3.3 PADRONIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES.....	29
3.4 PREPARAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS	29
3.5 EXPERIMENTO E COLETA DE DADOS	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	32
4.1 PADRONIZAÇÕES DAS SOLUÇÕES	32
4.2 AZUL BRILHANTE FCF	33
4.2.1 REATOR BATELADA.....	35
4.2.2 REATOR CSTR	36
4.2.3 REATOR PFR	36
4.3 CRISTAL VIOLETA	37
4.4 VERDE DE MALAQUITA	39
5 CONCLUSÃO	42
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

Os corantes sintéticos orgânicos são utilizados em muitos processos químicos, como podemos destacar as seguintes indústrias: têxtil, farmacêutica, automobilística, cosméticos, couros, fotografia, plásticos, papel e alimentícia. Devido à grande produção e ampla aplicação na indústria, as perdas dos corantes são consideráveis: cerca de 1% a 2% na produção, de 20% a 50% nas indústrias têxteis e 70% que são usados na tintura de cabelos. Com isso, estima-se que meia tonelada de corante é descartada no meio ambiente (ZANONI E YAMANAKA, 2016, p. 8).

Cristal violeta, verde de malaquita e azul brilhante FCF são alguns dos corantes utilizados em estudos de processos de descoloração devido a sua grande utilização nas indústrias. Desta forma afetando diretamente no tratamento de águas, estudos e validação de processos. Assim, conforme Vianna *et al.* (2008, p. 1353), são necessários os estudos das reações de descoloração dos corantes principalmente para diminuir este poluente com materiais de baixo custo e fácil operação.

O estudo da cinética química é essencial na físico-química, química orgânica, no estudo de transferência de massa e calor e principalmente para projetar equipamentos em escala industrial, por exemplo os reatores. Na determinação de dados cinéticos, a velocidade da reação é a função de estado do sistema, deste modo, o número de mols de A reage por unidade de tempo e unidade de volume (LEVENSPIEL, 1974, p. 2).

A utilização de reatores químicos tem como principal objetivo a realização de uma reação química, com a obtenção de um ou mais produtos com parâmetros controlados. Estes equipamentos podem ser classificados conforme o processo químico como contínuo e descontínuo (SANTOS E VASCONCELOS, 2002, p. 11).

No processo químico descontínuo, o reator é comumente chamado de batelada. Os reatores em escoamento contínuo, em sua maioria, operam em estado estacionário. No qual, são abordados dois reatores deste modelo: Reator Contínuo de Tanque Agitado (CSTR) e Reator com Escoamento Empistonado (PFR).

Neste trabalho, foi realizado o estudo cinético da descoloração dos reagentes azul brilhante FCF, cristal violeta e verde de malaquita no qual definiu-se as constantes de velocidade de cada reação. Posteriormente, foram determinadas as conversões nos reatores batelada, CSTR e PFR com todos os parâmetros

controlados. Com intuito de realizar todo o estudo na bancada didática de reatores, que consta no Laboratório de Engenharia Química, para colaborar nas aulas experimentais e verificar o comportamento das reações no equipamento.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 OBJETIVO GERAL

Realizar estudo cinético da descoloração dos reagentes azul brilhante FCF, cristal violeta e verde de malaquita e efetuar o estudo da conversão de uma reação nos reatores batelada, CSTR e PFR.

1.1.2 OBJETIVO ESPECÍFICOS

- Utilizar o método integral de análise de dados experimentais para obter os parâmetros cinéticos das reações (constante de velocidade da reação e ordem de reação);
- Demonstrar a obtenção da equação de conversão em um reator batelada e comparar com o valor experimental obtido na bancada didática;
- Obter a equação da conversão num reator CSTR, afim de comparar o valor obtido experimentalmente com o valor teórico calculado através da equação obtida do reator;
- Determinar experimentalmente a conversão no reator PFR e do valor teórico calculado através da equação da conversão obtida, confrontando o valor encontrado na equação e o valor obtido experimentalmente;
- Contribuir com as aulas experimentais que são realizadas na bancada didática de reatores do Laboratório de Engenharia Química.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 CINÉTICA

A cinética é a variação de consumo de reagentes ou de formação dos produtos com o acontecimento da reação. A velocidade da reação de consumo ou geração, é como a tangente da curva cinética varia. No começo da reação, a concentração da reação é maior e ao longo do tempo ela vai diminuindo, tendendo a zero quando atinge o equilíbrio. Para acompanhar a curva cinética mede-se a variação da concentração, da pressão ou outra variável intensiva que seja proporcional a grandeza da reação (SCHMAL, 2017, p. 4).

A relação da velocidade de reação e concentração de uma espécie química é chamada de velocidade de reação. A lei de velocidade pode ter uma relação linear com a concentração, por exemplo:

$$-r_A = kC_A \quad (1)$$

A constante de velocidade é independente da concentração dos materiais, entretanto, é dependente da temperatura que a reação é realizada, força iônica, solvente, entre outros (SCHMAL, 2017, p. 58).

Em uma reação composta por dois reagentes, $A + B \rightarrow \text{Produto}$, o reagente A normalmente é utilizado como base de cálculo, que é o reagente limitante. A velocidade de consumo de A, em determinado tempo t , depende da temperatura e concentração, onde o aumento da concentração de reagentes e temperatura aumenta o número de colisões moleculares (ANGELUCCI E GODOI, 2010, p. 10).

O modelo de potência é uma maneira de demonstrar essa dependência. Por exemplo, pode-se visualizar abaixo, a fórmula da lei de velocidade com cada concentração elevada a uma potência:

$$-r_A = kC_A^m C_B^n \quad (2)$$

Os expoentes das concentrações expressam o conceito da ordem de reação, onde se refere como as concentrações estão elevadas. Ainda, m e n podem ser iguais aos coeficientes estequiométricos de A e B. Com isso, o m tem ordem em relação a A e n tem ordem em relação a B. A soma de m e n é a ordem total ou a ordem da reação (ANGELUCCI E GODOI, 2010, p. 11).

2.1.1 DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE DE VELOCIDADE

O reator batelada é o reator mais adequado para determinação de parâmetros cinéticos. Visto que há uma grande facilidade de coletar amostras em diferentes tempos de reação e por ser mais flexível comparado aos reatores contínuos (OLIVEIRA, 2017, p. 119).

Para as determinações dos parâmetros cinéticos, começa-se pelo balanço molar de um reator que consta logo abaixo (FOGLER, 2009, p. 7):

$$F_{A0} - F_A + G_A = \frac{dN_A}{dt} \quad (3)$$

Em que:

F_{A0} = taxa de entrada de A no sistema, mol/s;

F_A = taxa de saída de A no sistema, mol/s;

G_A = taxa de geração de A por reação química, mol/s;

$\frac{dN_A}{dt}$ = taxa de acúmulo de A no sistema, mol/s.

A taxa de entrada e saída num sistema batelada é igual a zero, a taxa de geração poder ser calculada:

$$G_A = r_A V \quad (4)$$

Se o volume for constante, a equação de balanço molar torna-se:

$$r_A V = \frac{dN_A}{dt} \quad (5)$$

$$r_A = \frac{d(N_A/V)}{dt} \quad (6)$$

Mas:

$$C_A = \frac{N_A}{V} \quad (7)$$

Obtém-se:

$$r_A = \frac{dC_A}{dt} \quad (8)$$

Pode-se combinar esta fórmula com a da lei da velocidade, resultando:

$$\frac{dC_A}{dt} = kC_A^m C_B^n \quad (9)$$

A fim de facilitar a condução da reação, uma vez que não são conhecidos m e n dos reagentes usados na equação da taxa da reação, usa-se o método de excesso. Assim, será conduzida com o reagente B em excesso, onde, a concentração deste é mantida basicamente constante toda a reação ($C_{B0} \cong C_B$) (OLIVEIRA, 2017, p. 162).

Com isso:

$$-r_A = k'C_A^m \quad (10)$$

Em que:

$$k' = k_A C_B^n \cong k_A C_B^n \quad (11)$$

O coeficiente k' é a constante de velocidade de excesso desta reação. Em outras palavras, a reação é conduzida para se comportar como uma reação de primeira ordem, deste modo, significando uma reação de pseudo-primeira ordem.

Para a determinação dos parâmetros cinéticos a partir de resultados experimentais, utiliza-se por meio da interpretação de dados, o método diferencial ou método integral de análise. No presente trabalho, foi utilizado o método integral.

2.1.2 MÉTODO INTEGRAL

A ordem da reação pode ser definida pelo método integral, no qual se supõe uma ordem de reação, integrando-se a equação resultante, considerando a utilização de um reator batelada. Se os dados experimentais satisfizerem a obtenção de uma equação linear, então o modelo proposto é considerado válido. Métodos para reações de ordem zero, de primeira e segunda ordem são normalmente avaliados (FOGLER, 2009, p. 212).

Caso a ordem da reação assumida estiver correta através do método integral, dados de concentração e tempo, será obtido um gráfico linear que comprova a validade do modelo (NAVARRO E NAVARRO, 2015, p. 10).

Para uma reação $A \rightarrow$ Produtos, em um sistema batelada a volume constante, contém a mesma equação demonstrada na equação 8 (FOGLER, 2009, p. 212):

$$r_A = \frac{dC_A}{dt}$$

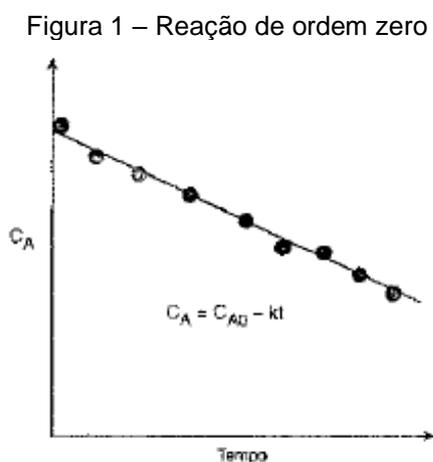
Na reação de ordem zero, $r_A = -k$, e combinando-se com a lei da velocidade com o balanço molar:

$$\frac{dC_A}{dt} = -k \quad (12)$$

Agora integrando com $C_A = C_{A0}$ em $t = 0$:

$$C_A = C_{A0} - kt \quad (13)$$

A reação de ordem zero, conforme a Figura 1, o gráfico da concentração A em função do tempo será uma reta com uma inclinação $-k$.



Fonte: Adaptado de Fogler (2009, p. 213).

Na condição de uma reação de primeira ordem, a integração com a combinação do balanço molar com a lei de velocidade

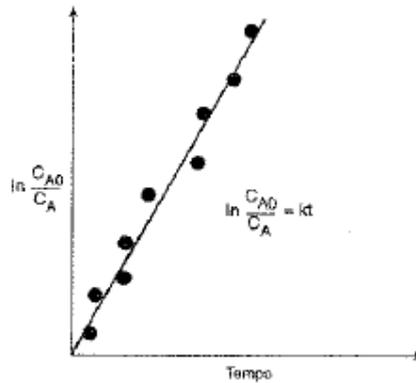
$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A \quad (14)$$

E na condição inicial de $C_A = C_{A0}$ em $t = 0$, em seguida integrando:

$$\ln \frac{C_A}{C_{A0}} = -kt \quad (15)$$

Com isso, é possível observar na Figura 2 que o gráfico de $\ln (C_A/C_{A0})$ está em função do tempo com a inclinação $-k$.

Figura 2 – Reação de primeira ordem



Fonte: Adaptado de Fogler (2009, p. 213).

Se a reação for de segunda ordem em A:

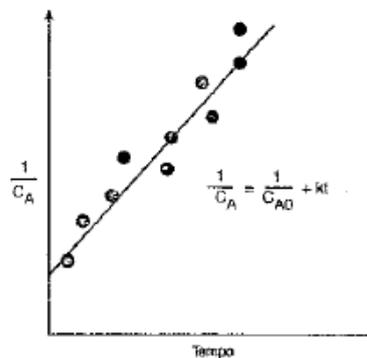
$$-\frac{dC_A}{dt} = kC_A^2 \quad (16)$$

A integração resulta em:

$$\frac{1}{C_A} - \frac{1}{C_{A0}} = kt \quad (17)$$

Resultando num gráfico, Figura 3, de $1/C_A$ em função do tempo com a inclinação k .

Figura 3 – Reação de segunda ordem



Fonte: Adaptado de Fogler (2009, p. 213).

As concentrações de C_{A0} e C_A podem ser determinadas experimentalmente por espectrofotometria empregando a Lei de Beer pelas equações:

$$C_{A0} = \frac{A_0}{b\varepsilon} \quad (18)$$

$$C_A = \frac{A}{b\varepsilon} \quad (19)$$

Em que:

b = caminho ótico, cm;

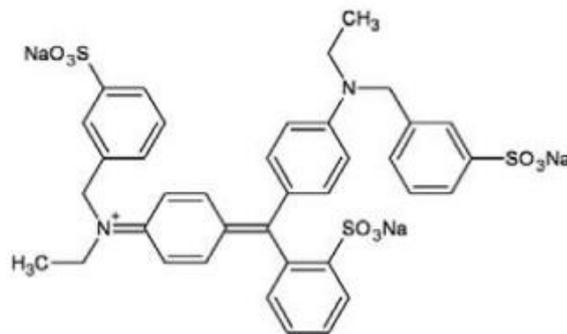
ϵ = absorptividade molar, L/mol*cm;

A = absorbância.

2.1.3 AZUL BRILHANTE FCF

O azul brilhante FCF, também muito conhecido como *Acid Blue 9* (Figura 4), é aplicado na indústria farmacêutica, perfumaria, beleza e na indústria de alimentos.

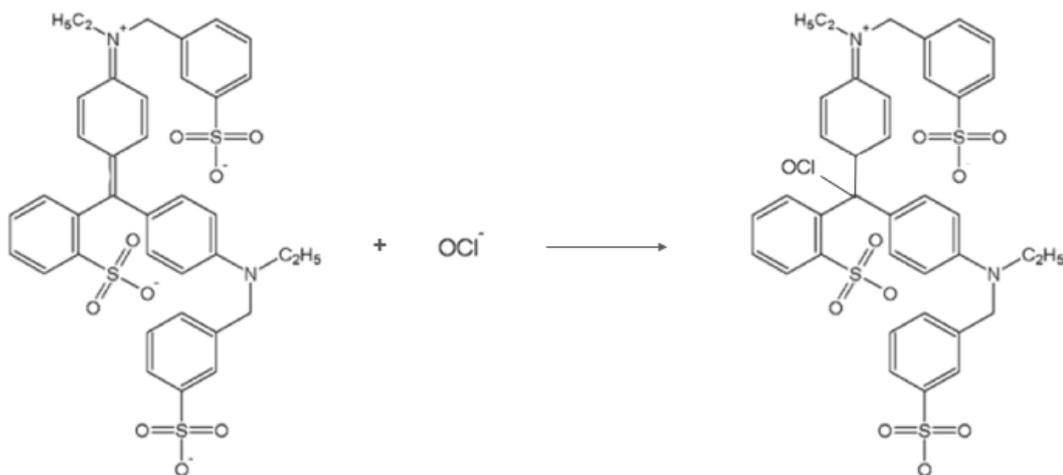
Figura 4 – Estrutura da molécula do azul brilhante FCF



Fonte: Adaptado de Haetinger, Marmitt, da Silva e Stulp (2008, p. 74).

A reação do azul brilhante com hidróxido de sódio é muito semelhante ao do cristal violeta com o hidróxido de sódio, mas a reação de descoloração do azul brilhante é, comparativamente ao cristal violeta, muito mais lenta. Por isso, foi utilizado o hipoclorito de sódio no lugar do hidróxido de sódio. A reação de descoloração ocorre conforme a Figura 5. O comprimento de onda de máxima absorção do azul brilhante é de 640 nm para ser utilizado no espectrofotômetro (EMMERT, HEB, GEIDEL e GRÄB, 2020, p. 96).

Figura 5 – Reação da descoloração do azul brilhante FCF

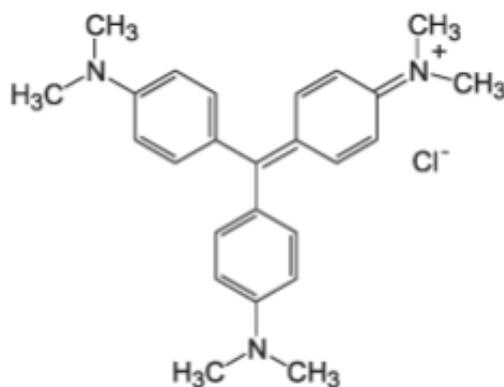


Fonte: Adaptado de Emmert et al (2020, p. 96).

2.1.4 CRISTAL VIOLETA

O cristal violeta (CV) ou Violeta básico 3 (Figura 6) pertence ao grupo dos triarilmetanos. Ele é utilizado comumente como indicador de pH, agente bacteriostático, desinfetante de pele e na indústria têxtil (MITTAL, MITTAL MALVIYA, KAUR e GUPTA, 2010, p. 1).

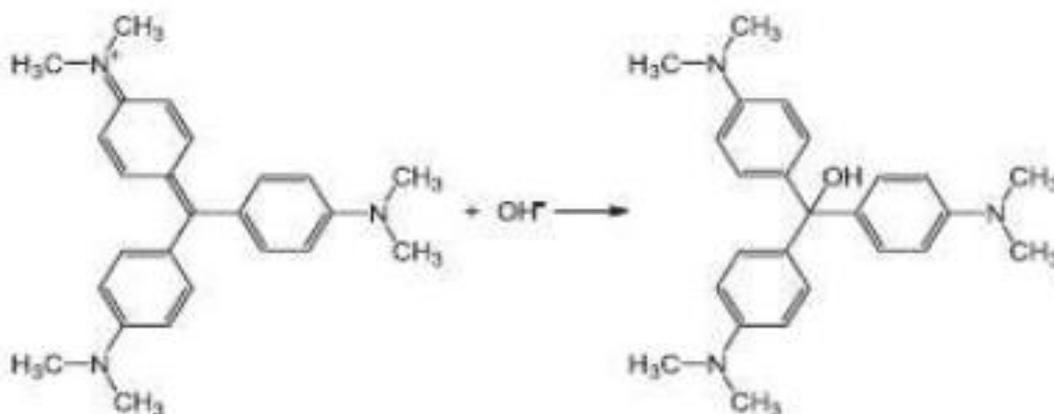
Figura 6 – Estrutura da molécula do cristal violeta



Fonte: Adaptado de Bertolini e Fungaro (2011, p. 3).

A reação de descoloração do cristal violeta com o hidróxido de sódio ocorre como mostra a Figura 7:

Figura 7 – Reação da descoloração do Cristal Violeta



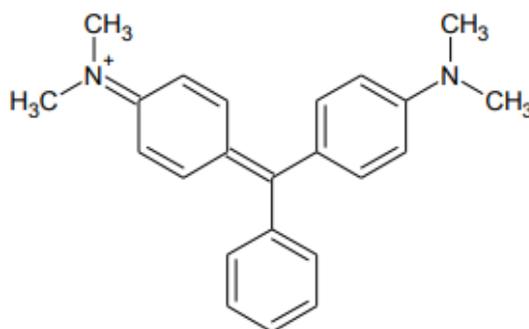
Fonte: Adaptado de Corsaro (1964, p. 1).

O hidróxido de sódio, OH^- , foi usado em excesso no experimento. Ao usar um espectrofotômetro Uv-visível é possível determinar a concentração do cristal violeta com um comprimento de onda de 595 nm, conforme o estudo de Du et al (2013, p. 285).

2.1.5 VERDE DE MALAQUITA

O corante verde de malaquita (VM) ou 4-[(4-dimetilaminofenil)-fenil-metil]-N,Ndimetilanilina (IUPAC) (Figura 8) é um pigmento trifenilmetano utilizado principalmente na indústria têxtil e também muito na piscicultura. Ele tem também uma atividade antimicrobiana e previne e trata algumas doenças de peixes (APOLÔNIO, 2015, p. 1).

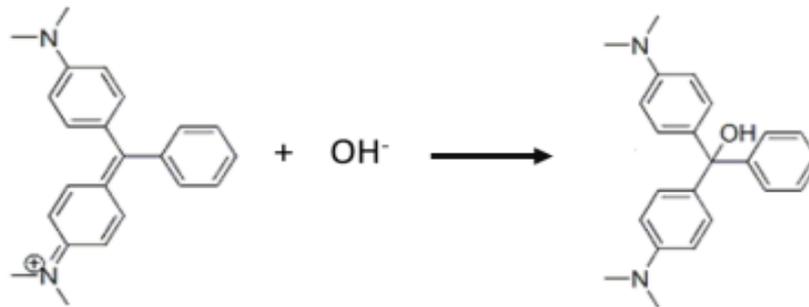
Figura 8 – Estrutura da molécula do verde de malaquita



Fonte: Adaptado de Apolônio (2015, p. 6).

O processo de descoloração do verde de malaquita ocorre conforme a reação da Figura 9:

Figura 9 – Reação da descoloração do verde de malaquita



Fonte: Adaptado Borges (2014, p. 13).

A reação se comporta como uma reação pseudo-primeira ordem, onde a concentração de OH^- é elevada durante a reação.

Conforme Perdigão et al (2018), o comprimento de onda de absorção máxima do corante verde de Malaquita é de 615nm.

2.2 REATORES

Os dados cinéticos da reação a ser realizada são fundamentais para o projeto do reator, a fim de serem diretamente implementados nas equações para o modelo de equipamento. Assim, foi utilizada a equação geral de balanço de massa, preliminarmente, para desenvolver as equações de projeto dos reatores mais utilizados na indústria: batelada, CSTR e PFR. Após, foram realizadas as suposições relacionadas à modelagem de cada tipo de reator começando pela equação 3 (FOGLER, 2009, p. 6).

Entrada – Saída + Geração = Acúmulo

$$F_{A0} - F_A + G_A = \frac{dN_A}{dt}$$

Quando todas as variáveis do sistema são espacialmente uniformes em todo o volume, a velocidade de geração do reagente A é determinada pela equação 4. Desse modo, agora, considera-se que a velocidade de formação de A para a reação varie com a posição:

$$\Delta G_{A1} = r_{A1} \Delta V_1 \quad (20)$$

Para podermos reescrever a equação anterior, toma-se os limites adequados e definição de integral, resultando em:

$$G_A = \int_0^V r_A dV \quad (21)$$

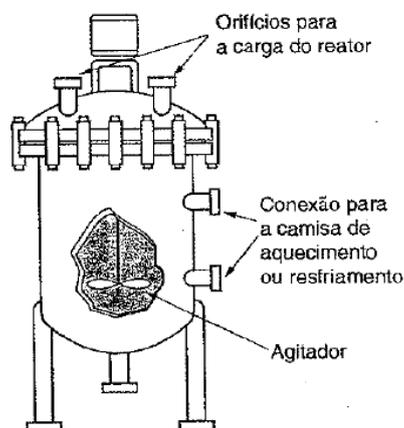
Agora iremos substituir o G_a na equação, finalizando a obtenção da equação geral do balanço molar:

$$F_{A0} - F_A + \int_0^V r_A dV = \frac{dN_A}{dt} \quad (22)$$

2.2.1 REATOR BATELADA

O reator batelada (Figura 10) é versátil e simples, normalmente consiste de um agitador e sistema de aquecimento ou resfriamento. Com isso, normalmente, quando é necessário fazer uma análise preliminar de uma reação é realizada neste equipamento. Os reagentes são adicionados inicialmente no reator e aguarda-se o tempo necessário para que ocorra o equilíbrio ou conversão desejada (DOS SANTOS E VASCONCELOS, 2002).

Figura 10 – Reator Batelada



Fonte: Adaptado do Fogler (2009, p. 8).

O reator batelada não tem vazões contínuas de entrada e saída, dessa forma, $F_{A0} = F_A = 0$. O balanço de massa geral resulta (FOGLER, 2009, p. 30):

$$\frac{dN_A}{dt} = \int_0^V r_A dV \quad (23)$$

Se a mistura é perfeita, não haverá variação na velocidade da reação dentro do volume do reator, assim:

$$\frac{dN_A}{dt} = r_A V \quad (24)$$

Podemos rearranjar e calcular o tempo necessário para reduzir o número inicial de mols de N_{A0} para um número final de N_{A1} , deste modo:

$$dt = \frac{dN_A}{r_A V} \quad (25)$$

Integrando com os limites $t = 0$ e $N_A = N_{A0}$, e em $t = t_1$ e $N_A = N_{A1}$, consegue-se:

$$t_1 = \int_{N_{A1}}^{N_{A0}} \frac{dN_A}{-r_A} \quad (26)$$

Quanto mais tempo o reagente permanece no reator, maior a conversão em produtos. Assim, a conversão X_A é uma função do tempo que os reagentes permanecem no reator. O número de mols de A no reator, após uma conversão X ter sido atingida é:

$$N_A = N_{A0} - N_{A0}X = N_{A0}(1 - X_A) \quad (27)$$

Substituindo,

$$t = N_{A0} \int_0^X \frac{dX_A}{-r_A} \quad (28)$$

Caso a reação ocorrer em volume constante:

$$t = \frac{N_{A0}}{V} \int_0^X \frac{dX_A}{-r_A} \quad (29)$$

Em uma reação de primeira ordem tem-se a equação 1:

$$-r_A = kC_A$$

Obtém-se:

$$t = \frac{N_{A0}}{V} \int_0^X \frac{dX_A}{kC_A} \quad (30)$$

Considerado volume constante:

$$N_{A0} = \frac{C_{A0}}{V} \quad (31)$$

E também

$$C_A = C_{A0}(1 - X_A) \quad (32)$$

Substituindo na equação global molar:

$$t = C_{A0} \int_0^X \frac{dX_A}{kC_{A0}(1 - X_A)} \quad (33)$$

De modo que C_{A0} e k são constantes:

$$t = \frac{1}{k} \int_0^X \frac{dX}{(1 - X_A)} \quad (34)$$

Resolvendo a integral

$$t = -\frac{1}{k} \ln(1 - X_A) \quad (35)$$

$$X_A = 1 - \exp(-kt) \quad (36)$$

Com a equação 34, consegue-se estimar os valores teóricos de conversão no reator de batelada. Para a determinação de conversão experimental, a conversão pode ser calculada pela seguinte equação:

$$X_A = \frac{C_{A0} - C_A}{C_{A0}} \quad (37)$$

Substituído o C_{A0} e C_A pela Lei de Beer pelas equações 18 e 19:

$$X_A = \frac{A_0 - A}{A_0} \quad (38)$$

Sendo assim, com as equações 36 e 38 as conversões podem ser calculadas e comparadas para determinar se o experimento ocorreu corretamente.

2.2.2 REATOR CONTÍNUO DE TANQUE AGITADO – CSTR

O reator CSTR (Figura 11) opera em estado estacionário, no qual não há variação dos parâmetros das propriedades da mistura reacional e não há acúmulo de reagentes no tanque (OLIVEIRA, 2017, p. 119).

Figura 11 – Reator contínuo de tanque agitado



Fonte: Adaptado de Fogler (2009, p. 10).

Uma vez que a concentração e temperatura são iguais no fundo ou na parte superior do tanque, elas também são iguais na saída do reator ideal e nesse estágio a conversão da reação é constante. A equação geral de balanço de massa quando é aplicada ao CSTR operado em estado estacionário (FOGLER, 2009, p. 34):

$$\frac{dN_A}{dt} = 0 \quad (39)$$

Em que não há variação espacial na velocidade de reação

$$\int_0^V r_A dV = Vr_A \quad (40)$$

Substituindo na equação global, resulta:

$$V = \frac{F_{A0} - F_A}{-r_A} \quad (41)$$

Com esta equação pode-se definir o volume do reator. Mas, caso o volume seja conhecido, é possível determinar o tempo espacial da reação com a fórmula:

$$\tau = \frac{V}{v_0} \quad (42)$$

Para substituir o volume na fórmula do tempo espacial, primeiro substitui-se:

$$F_A = F_{A0}(1 - X_A) = F_{A0} - F_{A0}X_A \quad (43)$$

Como:

$$V = \frac{F_{A0} - F_A + F_{A0}X}{-r_A} \quad (44)$$

$$V = \frac{F_{A0}X_A}{-r_A} \quad (45)$$

E ainda pode-se substituir o

$$F_{A0} = C_{A0}v_0 \quad (46)$$

Por fim, substituindo as equações temos a conversão no reator CSTR:

$$-r_A V = C_{A0}v_0 X_A \quad (47)$$

$$C_{A0}X_A = kC_{A0}(1 - X_A)\tau \quad (48)$$

$$X_A = \frac{k\tau}{1 + k\tau} \quad (49)$$

A conversão teórica do reator CSTR foi determinada pela equação 49. Já a conversão teórica foi obtida pela mesma equação do reator batelada a equação 38.

2.2.3 REATOR COM ESCOAMENTO EMPISTONADO - PFR

O reator com escoamento empistonado (Figura 12) tem a configuração de um tubo cilíndrico que opera em estado estacionário. O consumo dos reagentes acontece ao longo do escoamento do reator e a concentração varia continuamente na direção axial do equipamento (FOGLER, 2009, p. 34).



Fonte: Adaptado de Fogler (2009, p. 12).

A equação diferencial geral do balanço molar é a equação 20:

$$F_{A0} - F_A + \int_0^V r_A dV = \frac{dN_A}{dt}$$

Em que:

$$\frac{dN_A}{dt} = 0 \quad (50)$$

Integrando parte da equação:

$$F_{A0} - F_A + \Delta V r_A = 0 \quad (51)$$

Rearranjando a equação:

$$\left[\frac{F_{A0} - F_A}{\Delta V} \right] = r_A \quad (52)$$

Tomando o limite quando ΔV tende a zero, obtemos a forma diferencial do balanço no estado estacionário para um PFR.

$$\frac{dF_A}{dV} = r_A \quad (53)$$

Considerando uma conversão de X_A :

$$dF_A = F_{A0} dX_A \quad (54)$$

Agora integrando e rearranjando a equação:

$$\int_0^{X_A} F_{A0} dX_A = \int_0^V (-r_A) dV \quad (55)$$

Integrando:

$$\frac{V}{F_{A0}} = \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} \quad (56)$$

Como F_{A0} pode ser substituído pela fórmula 41, então:

$$\tau = \frac{V}{v_0} = C_{A0} \int_0^{X_A} \frac{dX_A}{r_A} \quad (57)$$

Substituindo r_A e integrando a equação, resultará:

$$\tau = -\frac{1}{k} \ln(1 - X_A) \quad (58)$$

Isolando a X_A :

$$X_A = 1 - e^{-k\tau} \quad (59)$$

Para a definição da conversão teórica do reator PFR foi utilizada a equação 59. A determinação da conversão experimental foi obtida pela mesma equação dos reatores batelada e CSTR, conforme a equação 38.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento experimental deste trabalho foi dividido nas seguintes etapas: materiais, preparação dos reagentes, padronização das soluções, preparação dos equipamentos, realização dos experimentos e coleta de dados.

3.1 MATERIAIS

As soluções dos reagentes foram preparadas com os reagentes no seu formato mais puro e das seguintes empresas:

- Azul brilhante FCF P.A. - Cinética;
- Cristal violeta P.A. - NEON;
- Hidróxido de sódio - NEON;
- Solução de hipoclorito de sódio 10-12% - Cinética;
- Verde de malaquita oxalato P.A. - NEON.

3.2 PREPARAÇÃO DOS REAGENTES

As soluções do azul brilhante, cristal violeta, verde de malaquita, hidróxido de sódio e hipoclorito de sódio foram preparadas um pouco antes da realização dos experimentos no Laboratório de Engenharia Química do IFRS Câmpus Feliz. A diluição dos corantes foi realizada com água destilada, em que, a concentração do azul brilhante ficou aproximadamente em $1,97 \times 10^{-4}$ mol/L, do cristal violeta de $1,76 \times 10^{-5}$ mol/L e o verde de malaquita de $7,38 \times 10^{-6}$ mol/L. As soluções de hidróxido de sódio e hipoclorito de sódio foram realizadas com água destilada numa concentração aproximada de 0,01 e 0,025 mol/L respectivamente.

As curvas de calibração, a partir das concentrações conhecidas das soluções para determinação da concentração da solução para cada um dos corantes, foram realizadas através das medidas de absorção no Espectrofotômetro PHOX V-12 (Figura 13). A leitura da absorbância foi realizada em comprimento de onda específico para absorção máxima de cada um dos corantes, definido a partir de pesquisa de artigos científicos, previamente realizada.

Figura 13 – Espectrofotômetro PHOX V-12



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.3 PADRONIZAÇÃO DAS SOLUÇÕES

A padronização da solução do hipoclorito de sódio foi realizada a partir da coleta 10 mL da amostra, posteriormente transferida para um balão volumétrico de 100 mL e aferido até a marcação com água destilada. Depois, no erlenmeyer, adicionou-se 10 mL de solução de iodeto de potássio 10%, 5 mL da amostra diluída, 20 mL de ácido acético 33%. Titulou-se rapidamente com tiosulfato de sódio 0,1 N até atingir coloração amarelo claro. Adicionou-se 1 mL da solução de amido 0,5% e continuou-se a titulação até desaparecer a cor azul (DE SOUSA, 2012, p. 1)

Já a padronização do hidróxido de sódio foi realizada com biftalato de potássio, no qual a determinação é 1:1. Assim, utilizando-se um erlenmeyer, foi pesado aproximadamente 0,03 g de biftalato de potássio, adicionado 50 mL de água destilada e 3 gotas de fenolftaleína 1%. Titulou-se com a solução de hidróxido de sódio que está sendo padronizada até aparecer a primeira coloração rosa (DE SÁ *et. al.*, 2015, p. 41)

3.4 PREPARAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Os experimentos ocorreram nos reatores batelada, CSTR e PFR da bancada didática Up Control (Figura 14). Os reatores batelada e CSTR tem volume útil de 2,2 L e o reator PFR tem 1,2 L. A bancada dispõe de um painel de controle de temperaturas e de duas bombas que são utilizadas para entrada dos reagentes.

No reator batelada foi colocado 1 L do corante e 1 L do outro reagente para ocorrer o processo de descoloração. O experimento no reator CSTR ocorreu após a finalização do experimento batelada, ligando-se as duas bombas na vazão de 120 mL/min com os dois reagentes nos reservatórios, a fim de manter a condição de estado estacionário e possibilitar a contagem do tempo e coleta de dados. No reator PFR a vazão de entrada de cada reagente, fixada nas bombas, foi de 60 mL/min. As vazões foram fixadas nessas condições para que o tempo espacial delas ficassem próximas e/ou igual a 10min. Em todos os processos, foram coletadas as amostras para a realização das leituras e determinação das concentrações através do espectrofotômetro.

Figura 14 – Bancada didática Up Control



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Antes de começar os ensaios foram observadas as temperaturas das soluções e a rotação do agitador do reator batelada e CSTR.

3.5 EXPERIMENTO E COLETA DE DADOS

No processo de obtenção dos dados cinéticos, todas as reações foram conduzidas com excesso de um dos reagentes a fim de caracterizar reação de pseudo-primeira ordem. Primeiro, para ter uma melhor parametrização do ensaio, foram determinados os k' de cada reação com três diluições diferentes das soluções de hidróxido de sódio e hipoclorito de sódio (Tabela 1). Então, foi plotado um gráfico $\ln C_{a0}/C_a$ em função do tempo conforme a equação 15. Na equação de reta encontra-se o k' de cada diluição. Depois, com os valores de k' , foi utilizado a equação 11 para determinar a constante de velocidade de cada diluição. A partir dos valores das constantes de velocidade foi plotado um novo gráfico para encontrar o valor da constante da velocidade real da solução preparada de cada corante. Este experimento foi conduzido no reator batelada.

Tabela 1 – Concentração das soluções dos corantes nas determinações cinéticas

Experimento	Solução do corante, %	Solução de NaClO ou NaOH, %	Água, %
1	25	25	50
2	25	50	25
3	25	75	0

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A partir das equações de projeto de cada um dos reatores (batelada equação 36, CSTR equação 49 e PFR equação 59) foram calculados os valores teóricos e comparados com os valores obtidos experimentalmente pela equação 38.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 PADRONIZAÇÕES DAS SOLUÇÕES

Na Tabela 2, são apresentados os volumes da solução do hipoclorito de sódio e de tiosulfato de sódio e por fim, molaridade resultante do hipoclorito de sódio em média de $0,01 \pm 0$ mol/L.

Tabela 2 – Padronização da solução do hipoclorito de sódio

Amostra	Volume do Hipoclorito de sódio, mL	Volume do titulante (Tiosulfato de sódio), mL	Concentração, mol/L
1	5	16,5	0,01
2	5	16,4	0,01
3	5	16,4	0,01
		Média	$0,01 \pm 0$

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os resultados da padronização do hidróxido de sódio encontram-se na Tabela 3, em que são apresentadas as massas aferidas de bifitalato de potássio, o volume da titulação de hidróxido de sódio e a molaridade da solução de hidróxido de sódio que foi de $0,0253 \pm 0,000,2$ mol/L.

Tabela 3 – Padronização da solução do hidróxido de sódio

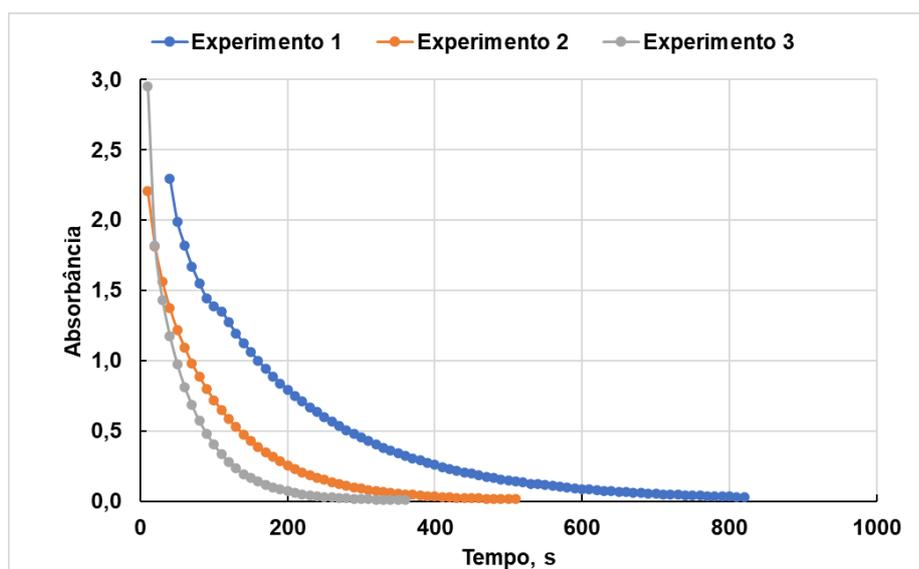
Amostra	Massa do Bifitalato de Potássio, g	Volume do titulante (NaOH), mL	Concentração, mol/L
1	0,0301	5,9	0,0250
2	0,0239	4,6	0,0254
3	0,0285	5,5	0,0254
		Média	$0,0253 \pm 0,0002$

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

4.2 AZUL BRILHANTE FCF

Conforme relatado anteriormente, a descoloração do azul brilhante ocorreu com uma reação pseudo-primeira ordem com a solução de hipoclorito de sódio em excesso. Os experimentos foram realizados com soluções de azul brilhante com três diferentes concentrações. Na Figura 15, são apresentados os valores de absorbância observados em função do tempo.

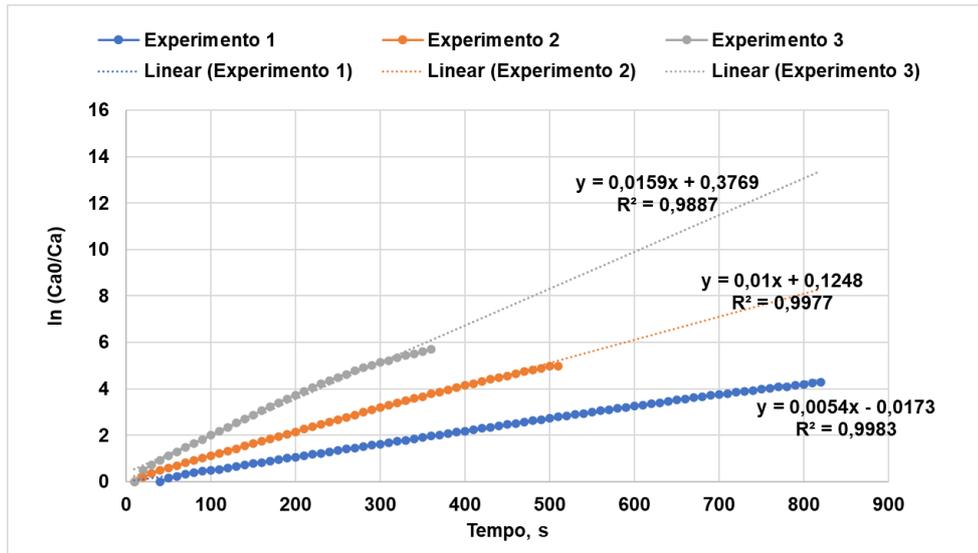
Figura 15 – Absorbância versus Tempo do azul brilhante FCF



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O comportamento das curvas absorbância x tempo está de acordo com o modelo de reação de pseudo-primeira ordem. Na sequência, foi utilizado o método integral para a determinação da constante da reação, que é evidenciado na Figura 16.

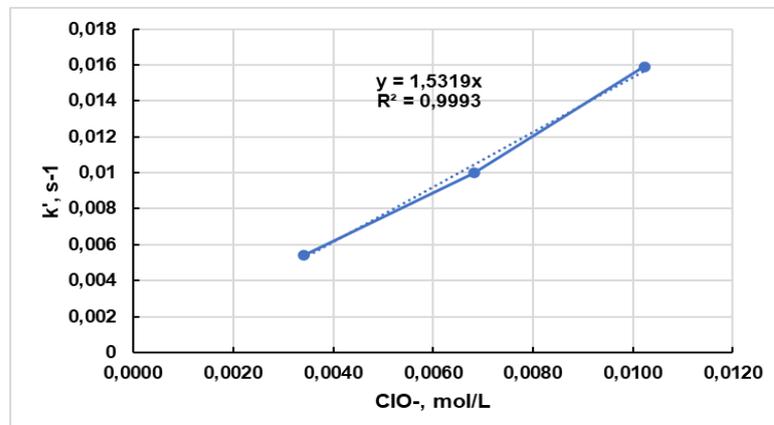
Figura 16 – Determinações dos k' do azul brilhante



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os valores de R^2 mostram um pequeno erro experimental. Para poder determinar a constante de velocidade, a partir dos valores de k' de cada experimento, foi plotado outro gráfico obtendo-se uma equação de reta. Assim, possibilitou encontrar a constante de velocidade da solução do azul brilhante de $0,01 \text{ mol/L}$ em $1,5319 \text{ s}^{-1}$ na temperatura de $21 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme exibido na Figura 17.

Figura 17 – Determinação do k do azul brilhante



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

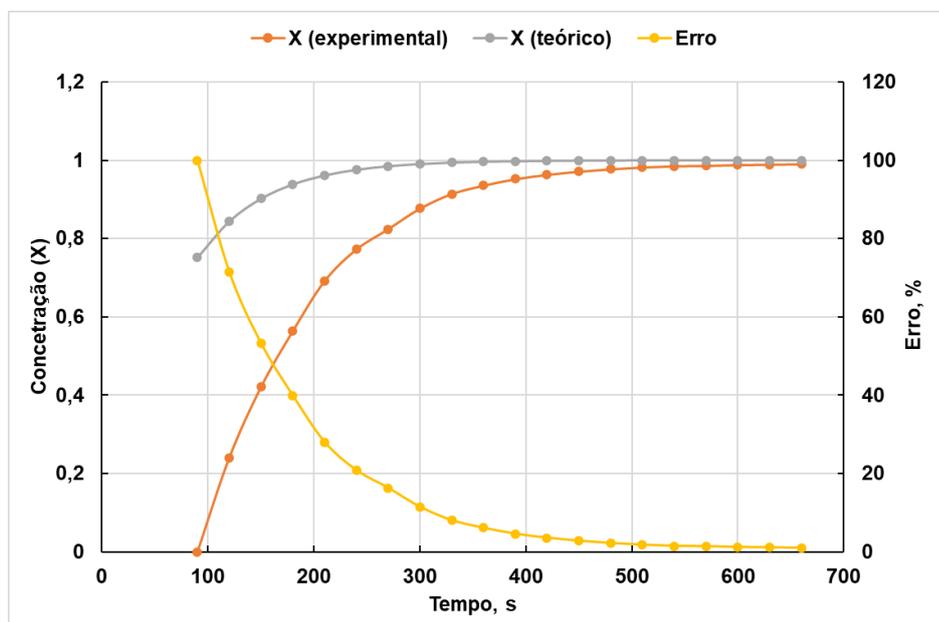
Os experimentos nos reatores foram realizados com o corante azul brilhante FCF, pois este é um corante alimentício, não prejudicial ao meio ambiente, podendo ser

descartado sem a necessidade de um tratamento complexo de efluentes. Além disso, foi possível determinar eficientemente a constante de velocidade da reação. Na figura 15, a concentração no começo da reação é alta e ao longo do tempo ela decai tendendo a zero e formando uma curva característica de uma reação de primeira ordem.

4.2.1 REATOR BATELADA

No reator batelada, foram adicionadas as soluções e acionados o temporizador e a agitação para a coleta de dados. Na Figura 18, estão os valores obtidos da conversão experimentalmente, teórica e o erro experimental, no qual, realizou-se a reação na temperatura de 15 °C.

Figura 18 – Conversões e o erro no reator batelada



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Como podemos observar, o resultado obtido experimentalmente para a conversão foi semelhante ao valor teórico previsto. A diferença entre os valores experimentais e teóricos para a concentração foi reduzindo com o avanço da reação, finalizando com 0,96% de diferença. Assim, é possível verificar que houve pequenas

fontes de erros, citando como exemplo a instabilidade na agitação do reator e na coleta de dados da absorbância.

4.2.2 REATOR CSTR

O experimento em reator CSTR iniciou após a finalização do estudo em reator batelada, utilizando o mesmo equipamento com o volume de dois litros, assim, foram acionadas as bombas de entradas de reagentes. Na Tabela 4, são exibidos os valores obtidos segundo a equação 49 para determinação da conversão teórica e a equação 38 para determinação da conversão experimental.

Tabela 4 – Dados obtidos do reator CSTR

τ teórico	9,2 min
X teórico	0,895
A0	3,348 A
A	0,545 A
X experimental	0,840
Erro	6,1%

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O tempo de residência conforme a equação 42 é de 9,2 minutos com uma conversão teórica de 0,895. A conversão experimental obtida foi de 0,840, verificando-se uma diferença de 6,1% entre os valores teórico e experimental. Os possíveis erros identificados foram a oscilação na agitação, impossibilitando a condição de mistura perfeita, e o tempo de coleta das amostras.

4.2.3 REATOR PFR

No reator PFR, com o reator vazio foi acionado as bombas das soluções e aguardado a estabilização da reação. Utilizando o mesmo procedimento do reator CSTR, foi calculado a conversão teórica pela equação 59 e a conversão experimental pela equação 38, de modo que se encontra na Tabela 5 estes dados.

Tabela 5 – Dados obtidos do reator PFR

τ teórico	10 min
X teórico	0,990
A0	2,773 A
A	0,225 A
X experimental	0,919
Erro	7,2%

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

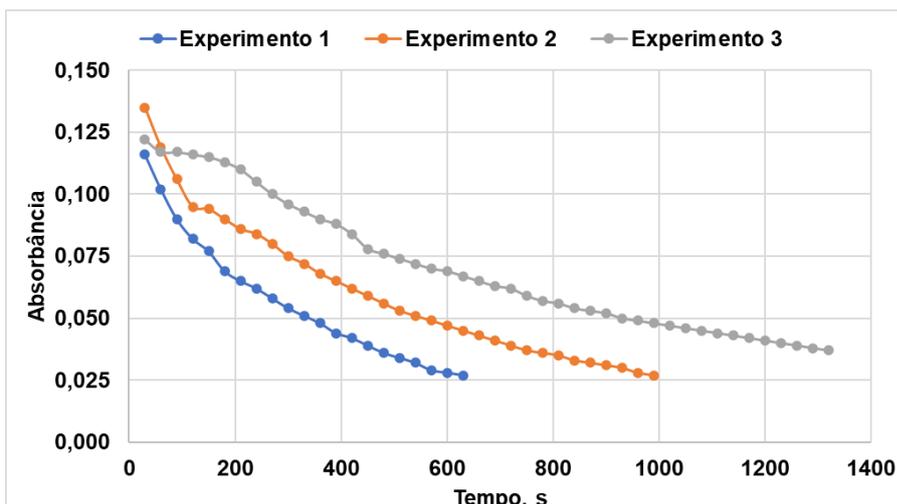
O tempo de residência teórico é de 10 minutos com uma conversão teórica de 0,990. A conversão experimental foi de 0,919 e nisso, apresentou um erro 7,2%. Para cada segmento do reator PFR tem um disco com furos gerando uma turbulência no escoamento por assim dificultando ou acelerando a reação em cada etapa, desta forma não sendo um reator ideal devido essas características.

Observa-se também no reator PFR tem uma conversão maior comparado ao do CSTR mesmo ele tendo um volume e vazão menor. Conforme Fiori (2013, p. 49), isso ocorre pois no reator PFR as propriedades variam ao longo do tubo aumentando a interação dos reagentes.

4.3 CRISTAL VIOLETA

A descoloração do cristal violeta, como foi detalhado anteriormente, ocorreu também de acordo como uma reação de pseudo-primeira ordem com a solução de hidróxido de sódio em excesso. O experimento do cristal violeta ocorreu com três concentrações diferentes e na Figura 19 são apresentados os dados coletados em absorvância x tempo.

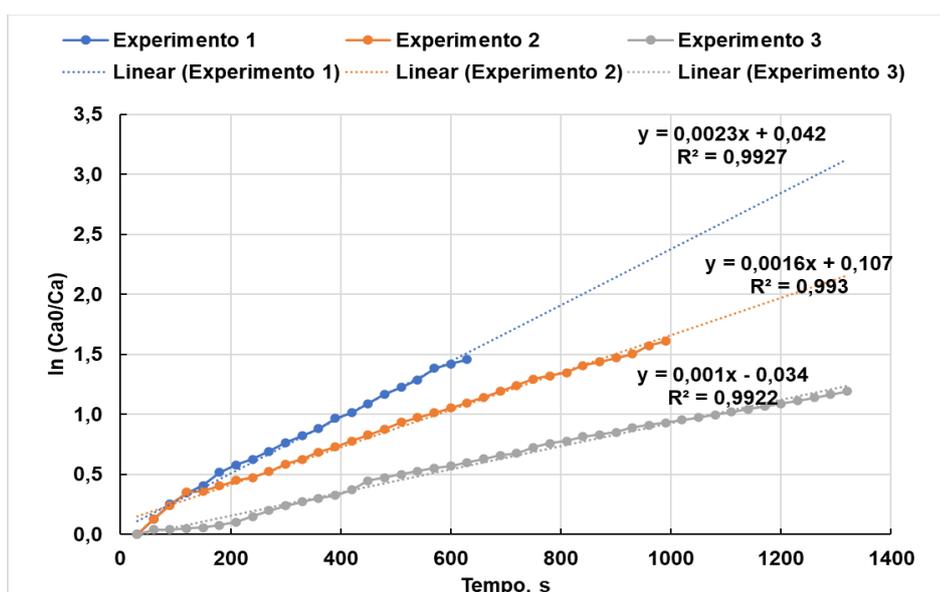
Figura 19 – Absorbância versus Tempo do cristal violeta



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Utilizando o método integral foi plotado o gráfico para determinação das constantes de velocidades da reação em cada concentração, como apresentado na Figura 20.

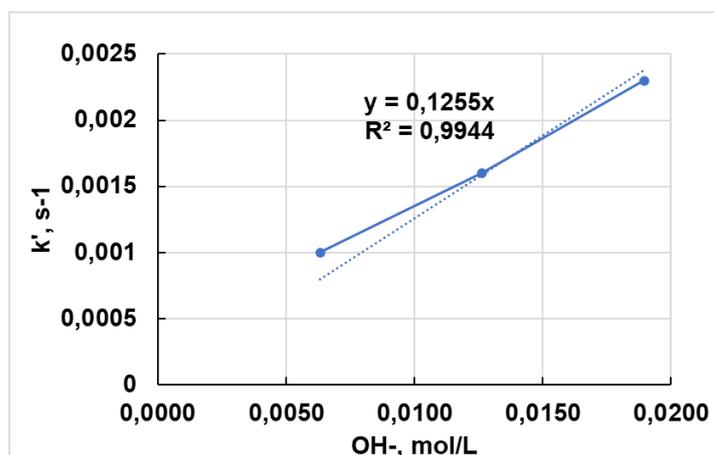
Figura 20 – Determinações dos k' do cristal violeta



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Após, para a determinação da constante de velocidade da reação do cristal violeta, na Figura 21, foi disponibilizado o gráfico com as três constantes de velocidade das diferentes concentrações e encontrou-se a velocidade de reação em $0,1255 \text{ s}^{-1}$ na temperatura de $21 \text{ }^\circ\text{C}$.

Figura 21 – Determinação do k do cristal violeta



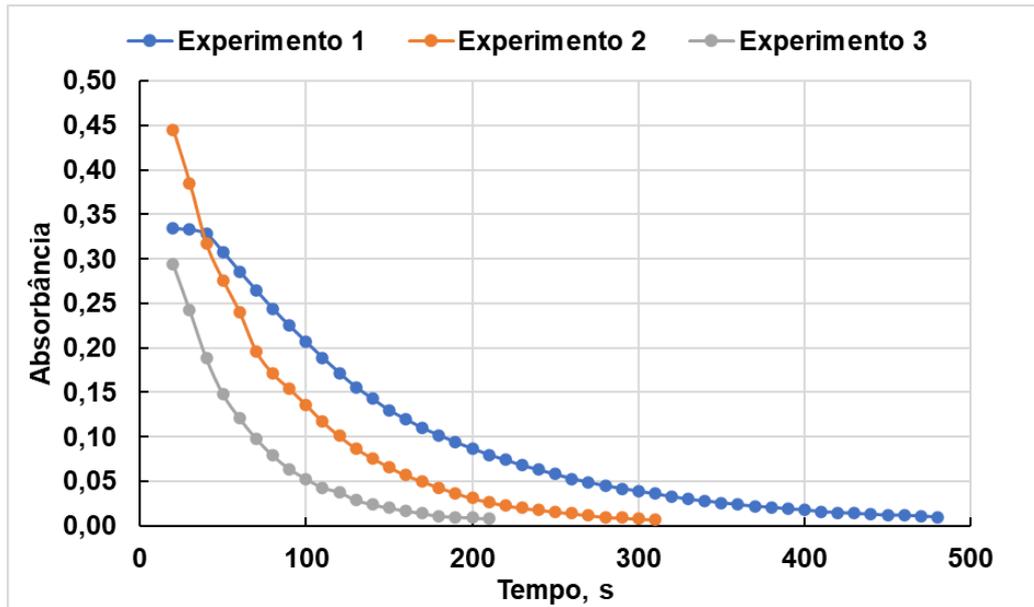
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os possíveis erros nesta reação foram as concentrações molares das soluções. Pelos valores de R^2 observa-se que os experimentos ocorreram corretamente. Porém, o comportamento da curva cinética da Figura 19 é semelhante a uma reta e não uma curva de uma reação de primeira ordem comparada a literatura básica. Desta maneira, para reação ocorrer corretamente, teria que realizar novos estudos no qual deve-se aumentar a concentração de OH^- , solução de hidróxido de sódio, ou ter que diluir a solução de cristal violeta para obter a interação correta da reação. Não foi possível realizar este experimento em diferentes concentrações nos reatores da bancada didática pelo fato de ele ser prejudicial a natureza e ter que realizar o tratamento antes do descarte do mesmo.

4.4 VERDE DE MALAQUITA

Como anteriormente detalhado, a reação de descoloração ocorreu com a mesma solução de hidróxido de sódio do cristal violeta. Para tal, foram coletados os dados e plotados no gráfico como pode-se observar na Figura 22.

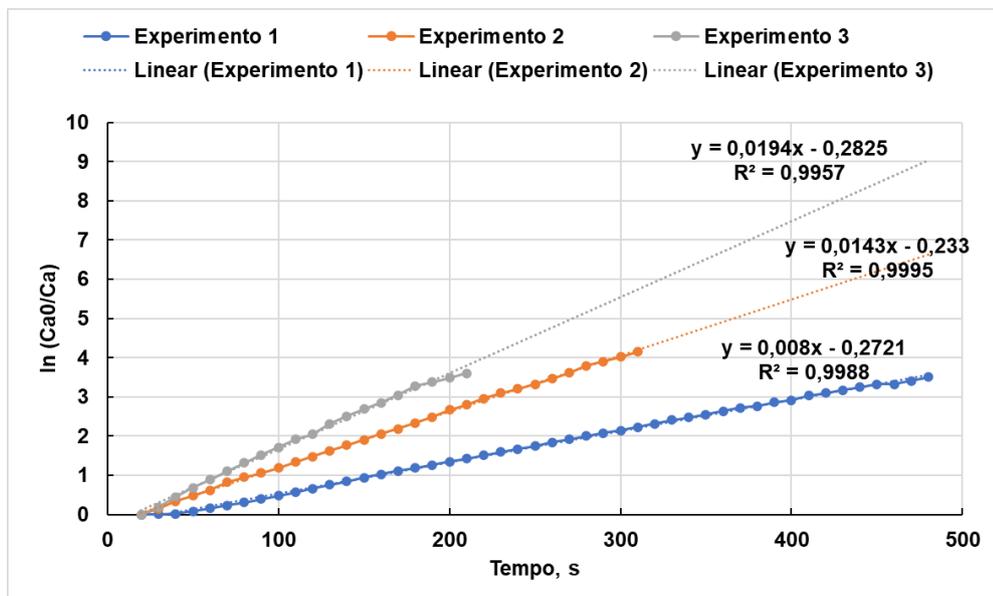
Figura 22 – Absorbância versus Tempo do verde de malaquita



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Na Figura 23, tem-se os gráficos das diferentes concentrações pelo método integral e com as respectivas constantes de velocidades.

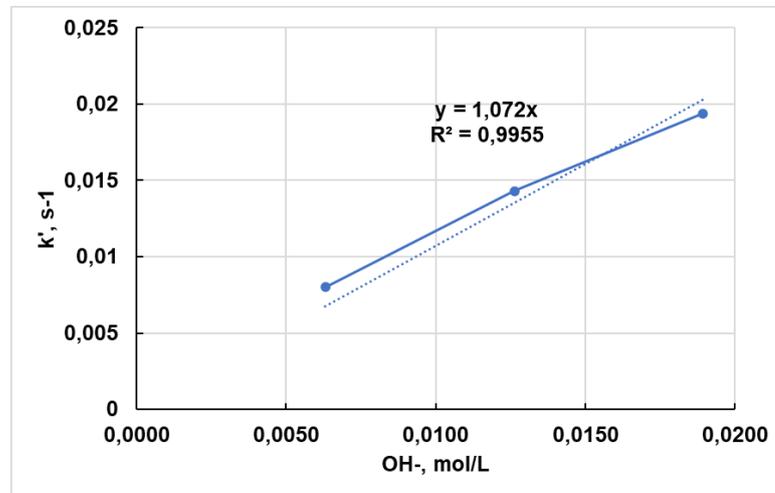
Figura 23 – Determinações das k' do verde de malaquita



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Por fim, a Figura 24 demonstra a constante de velocidade do verde de malaquita com as três constantes de velocidades determinadas logo acima.

Figura 24 – Determinação do k do verde de malaquita



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Para a descoloração do verde de malaquita nessas concentrações a uma temperatura de 21 °C obtém-se uma constante de velocidade de 1,072 s⁻¹. Os ensaios nos reatores não foram realizados com o corante verde de malaquita pelo fato de o mesmo ser radioativo e prejudicial, principalmente a natureza.

5 CONCLUSÃO

A revisão bibliográfica deste trabalho foi realizada utilizando-se a bibliografia clássica e artigos científicos relacionados com o projeto. Com base destes fundamentos, foram efetuados os experimentos a fim de comprovar os modelos cinéticos, bem como as equações de projetos dos reatores.

As concentrações obtidas a partir das leituras de medidas de absorbância *versus* tempo das reações com os corantes azul brilhante e verde de malaquita tiveram o comportamento semelhante ao da literatura. Porém, a do corante cristal violeta não ficou similar, devido as concentrações das soluções que foram utilizadas.

A partir dos experimentos realizados, foi possível determinar as constantes de velocidades de cada reação na configuração de uma reação pseudo-primeira ordem. Conforme a literatura, os dados plotados de $\ln C_{A0}/C_A$ *versus* tempo ficaram lineares comprovando a validade do experimento e possibilitando a determinação das constantes de velocidades de cada descoloração.

Independentemente dos resultados experimentais obtidos é necessário verificar se os reagentes utilizados são tóxicos ao meio ambiente, e caso sejam, é fundamental a realização do tratamento para o descarte adequado. Com isso, para determinação das conversões nos reatores, foi utilizado o corante azul brilhante FCF por ser de grau alimentício.

Com o valor da constante de velocidade encontrada para o azul brilhante FCF, primeiramente foi possível encontrar os valores teóricos da conversão de cada reator. Na sequência, através da estabilização do processo, foi possível encontrar os valores experimentais e compara-los com os teóricos, em que se percebeu erros menores que 10% entre eles. Desta forma, constatando que os reatores não podem ser considerados como ideais e necessita fazer a determinação da distribuição de tempo de residência de cada reator.

Por fim, vale lembrar que a principal motivação deste trabalho era contribuir para a realização das aulas experimentais do componente curricular Laboratório de Engenharia Química II do curso de Engenharia Química. Assim, o procedimento experimental desenvolvido, bem como os resultados experimentais obtidos pode

contribuir para as aulas experimentais que fazem uso da bancada didática de reatores disponível no laboratório.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A fim de aprimorar os estudos cinéticos na bancada didática, são propostas algumas sugestões de trabalhos futuros:

- Executar as reações de descoloração em diferentes temperaturas e analisar como se comporta o valor da constante de velocidade como também a reação nos reatores;
- Modificar as vazões de alimentação dos reatores CSTR e PFR;
- Em relação aos erros encontrados dos reatores, realizar o ensaio de distribuição de tempo de residência.

REFERÊNCIAS

- ANGELUCCI, Camilo Andrea; GODOI, Glauber Silva. **Cinética Química**. São Cristóvão, 2010. Disponível em: <https://cesad.ufs.br/ORBI/public/uploadCatalogo/11400916022012Cinetica_Quimica_Aula_1.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2021.
- APOLÔNIO, Luiz Felipe. **Desenvolvimento de Método para Pré-concentração e Determinação de Leuco Verde Malaquita e Verde Malaquita em Águas por Análise de Imagem Digital em Superfície Adsorvente**. Viçosa, 2015. Disponível em: <<https://www.locus.ufv.br/bitstream/123456789/9668/1/texto%20completo.pdf>>. Acesso em: 20 dez. 2021.
- BERTOLINI, Tharcila C. R.; FUNGARO, Denise A.. **Estudos de Equilíbrio e Modelagem Cinética da Absorção do Corante Cristal Violeta sobre Zeólitas de Cinzas Leve e Pesada de Carvão**. São Paulo, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.ipen.br/bitstream/handle/123456789/14244/17543.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 30 dez. 2021.
- BORGES, Gabriela Alexandre. **Desenvolvimento de um Método de Extração Ambientalmente Seguro para a Remoção de Corantes Textéis Empregando Sistemas Aquosos Bifásicos**. Belo Horizonte, 2014. Disponível em: <<https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9NFFUS/1/vfdissgabriellaalexandreborges.pdf>>. Acesso em: 31 dez. de 2021.
- CONCEIÇÃO, António C. L.; DIOGO, Hermínio P. **Determinação de parâmetros cinéticos em fluxo com câmara de gradiente e detecção espectrofotométrica: aplicação à reação entre o violeta de cristal e o ião hidróxido**. Centro de Química Estrutural do Instituto Superior Técnico da Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2012. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/w7564SYfXXm3XXsH3BHhFyN/?lang=pt#>>. Acesso em: 05 fev. 2022.
- CORSARO, G. A.. **Calorimetric Chemical Kinetics Experiment**. Journal of Chemical Education, v. 41, n.1, p. 48-50, 1964. Available in: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/ed041p48>>. Acesso em: 01 jan. 2022.
- DE SÁ, Eduardo Lemos; MICARONI, Líliliana; KRIEGER, Nadia. **Disciplina de Química Geral Experimental**. Universidade Federal do Paraná Setor de Ciências Exatas – Departamento de Química, p. 1-70, 2015.
- DE SOUSA, Francisco Flávio P. et al. **Determinação de cloro em alvejantes por oxirredução: uma prática didática para o ensino de química analítica**. XVI ENEQ/X EDUQUI-ISSN: 2179-5355, 2012.
- DOS SANTOS, Valdemir Alexandre; VASCONCELOS, Eliane Cardoso. **Extrapolação de Dados Cinéticos Obtidos em Reatores Químicos Homogêneos**. Química & Tecnologia. PERNANBUCO, n. 1, p. 11-19, 2002.
- DU, Z.; MAO, S.; CHEN, Z.; SHEN, W. **Kinetics of the Reaction of Crystal Violet with Hydroxide Ion in the Critical Solution of 2-Butoxyethanol + Water**. The

Journal of Physical Chemistry, v. 117, n. 2, p. 283-290, 2013. Available in: <<http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/jp3111502>>. Acesso em: 01 jan. 2022.

EMMERT, Marcel; HEB, Konrad; GEIDEL, Ekkehard; GRÄB, Patrick. **Experiments to Introduce Students into the Temperature Dependence of the Reaction Rate.** World Journal of Chemical Education, vol. 8, no. 2 (2020): 92-99. doi: 10.12691/wjce-8-2-5.

FIORI, Juliano José. **Análise e simulação de um reator tubular para produção contínua de biodiesel.** Revista Engenharia, v. 5, n. 7, p. 47-60, 2013.

FOGLER, H. Scott. **Elementos de engenharia das reações químicas.** 4. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, c2009. xxix, 853 p. ISBN 9788521617167.

Haetinger, Claus; Marmitt, Sandro; Da Silva, Cristiano Pochmann; Stulp, Simone. **Avalização de Degradação do Corante Vermelho *Bordeaux* Através de Processo Fotoquímico.** Lajeado, 2008. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/esa/a/ffbtLfc5938QZdsT9Nz4jbz/?format=pdf&lang=pt>>. Acesso em: 02 jan. 2022.

LEVENSPIEL, Octave. **Engenharia das reações químicas.** São Paulo, SP: Blücher, c1974. xvii, 481 p.

Mittal, A., Mittal, J., Malviya, A., Kaur, D., Gupta, V. K., 2010. **Adsorption of hazardous dye crystal violet from wastewater by waste materials.** Journal of Colloid and Interface Science. 343, 463-473.

NAVARRO Y NAVARRO, Maria José. **Evaluación a Nivel Laboratorio de la Cinética de Reacción y las Propiedades Físicoquímicas de un Mineral que Contiene Sulfuro de Plomo y Sulfuro de Zinc, por Medio del Método de Lixiviación por Agitación (sólido-líquido), para Obtener Cloruro de Plomo y Cloruro de Zinc, para la Empresa Representaciones Química S. A..** Guatemala, 2015. Disponível em: <<http://www.repositorio.usac.edu.gt/3648/1/Mar%C3%ADa%20Jos%C3%A9%20Navarro%20y%20Navarro.pdf>>. Acesso em: 15 dez. 2021.

OLIVEIRA, Natália Maira Braga. **Fundamentos de cinética e introdução ao cálculo de reatores.** Instituição Unopar_Kroton 211 ISBN 9788552201779.

PERDIGÃO, P.L.; DE OLIVEIRA, H.C.B.; DOS SANTOS, F.R.; OLIVEIRA, G.W.; MELGAR, L. Z.. **Estudo Absorvido do Corante Verde Malaquita em Sílica Alumina Recoberta por Carbono Através da Quantificação por Espectrofotometria e Termogravimetria.** Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <<http://www.abq.org.br/cbq/2018/trabalhos/5/1923-26666.html>>. Acesso em: 12 dez. 2021.

SANTOS, Nayra Fernandes; Brito, Ana Beatriz Neves; YOSHIOKA, Carlos Minoru Nascimento. **Estudo da Eficiência do Processo Oxidativo Avançado UV/H₂O₂ na Descoloração do Corante Verde de Malaquita.** São Mateus, 2019. Disponível em: <<http://siscone.com.br/uploads/CBCat2019/20190424103402000001085.pdf>>. Acesso em: 05 fev. 2022.

SCHMAL, Martin. **Cinética e reatores: aplicação na engenharia química: teoria e exercícios**. 3. ed., rev. ampl. Rio de Janeiro, RJ: Synergia, 2017. xxiv, 680 p. ISBN 9788568483411.

VIANNA, Vilson Bedim; TÔRRES, Alexandre Rodrigues; AZEVEDO, Eduardo Bessa. **Degradação de corantes avançados determinados por processos oxidativos usando um reator com disco rota de baixa velocidade**. Química Nova, v. 31, p. 1353-1358, 2008.

ZANONI, Boldrin Zanoni; YAMANAKA, Hideko. **Corantes: Caracterização Química, Toxicológica, Métodos de Detecção e Tratamento**. 1 ed. São Paulo, SP: Cultura Acadêmica, 2016.