

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**LUIZ FELIPE BELLÉ DA COSTA**

**PROJETO DE UM REATOR CSTR DE BANCADA AUTOMATIZADO COM USO  
DE ARDUINO E APLICADO NA DEGRADAÇÃO CATALÍTICA DE CORANTES  
TÊXTEIS**

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2025**

**LUIZ FELIPE BELLÉ DA COSTA**

**PROJETO DE UM REATOR CSTR DE BANCADA AUTOMATIZADO COM USO  
DE ARDUINO E APLICADO NA DEGRADAÇÃO CATALÍTICA DE CORANTES  
TÊXTEIS**

**Design of an Automated Bench-Scale CSTR Reactor Using Arduino and  
Applied to the Catalytic Degradation of Textile Dyes**

Trabalho de conclusão de curso de graduação,  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dra. Ana Paula de Oliveira Schmitz  
Coorientador: Prof. Dr. Jonas Joacir Radtke

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2025**

**LUIZ FELIPE BELLÉ DA COSTA**

**PROJETO DE UM REATOR CSTR DE BANCADA AUTOMATIZADO COM USO  
DE ARDUINO E APLICADO NA DEGRADAÇÃO CATALÍTICA DE CORANTES  
TÊXTEIS**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia química da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 25/junho/2025

---

Ana Paula de Oliveira Schmitz  
Doutorado em Engenharia química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Jonas Joacir Radtke  
Doutorado em Métodos Numéricos em Engenharia  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Guilherme Bertoldo  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2025**

## RESUMO

DA COSTA, Luiz Felipe Bellé. **Projeto de um reator CSTR de bancada automatizado com uso de Arduino e aplicado na degradação catalítica de corantes têxteis**. 2025. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2025.

Este trabalho teve como objetivo otimizar a recuperação de cobalto a partir de baterias íon-lítio exauridas para produção de catalisador aplicado na degradação do corante azul reativo 5G, além de desenvolver um reator contínuo de mistura completa (CSTR) em escala laboratorial automatizado por Arduino. O material catódico, extraído de baterias de smartphones, foi empregado na síntese de catalisadores à base de óxido de cobalto (Co-Ox), cuja caracterização foi feita por análises como DRX, FTIR, TGA, MEV e fisissorção de N<sub>2</sub>. A otimização das condições operacionais de degradação catalítica do corante azul reativo 5G utilizando o catalisador Co-Ox produzido a partir da metodologia base, foi realizada por um Delineamento Composto Central Rotacional (DCCR) 2<sup>2</sup>, avaliando-se os efeitos do pH inicial da solução de corante e da dosagem de catalisador sobre a eficiência de degradação. Os ensaios cinéticos foram conduzidos nas condições otimizadas utilizando-se 200 mL de solução de corante (C<sub>0</sub> = 100 mg/L). A eficiência do processo foi monitorada por espectrofotometria UV-Vis em 614 nm ao longo de 3 horas. No segundo DCCR 2<sup>2</sup>, buscou-se otimizar a síntese do catalisador. A lixiviação ácida para recuperação do cobalto foi avaliada com foco na otimização do rendimento mássico e da degradação catalítica, utilizando-se as concentrações de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> como variáveis independentes. O catalisador obtido, foi aplicado em ensaios de degradação catalítica em reator batelada, com dosagem de catalisador de 0,6 g/L e solução de corante (C<sub>0</sub> = 100 mg/L) em pH 1,85, sendo a mistura mantida sob agitação por 3 horas. Como resultados obtidos no estudo, identificou-se características do catalisador como estrutura porosa e irregular, bandas na região de 543-643 cm<sup>-1</sup> relacionadas a ligações Co-O, picos do perfil cristalográfico correspondentes a Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, sugerindo-se a formação desse composto. Além disso, a partir de 150°C não houve perda de massa acentuada, indicando não haver mais decomposição significativa do material. Foi determinada a área superficial específica de 5,06 m<sup>2</sup>/g e tamanho de poros de 339,4 Å (predominância de mesoporos no catalisador). A partir da análise estatística apropriada, foi determinado como ponto ótimo para a degradação catalítica o pH inicial da solução de 1,85 e dosagem do catalisador de 0,6 g/L. Para o segundo delineamento experimental, a análise de desejabilidade global indicou como condição ótima a concentração de 0,26 mol/L de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e 1,13% v/v de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, sendo otimizadas nessas condições ambas as variáveis rendimento mássico do catalisador (70%) e degradação catalítica do corante azul reativo 5G (89%). O modelo cinético de pseudoprimeira ordem ajustou-se bem aos dados cinéticos coletados com os catalisadores obtidos nas condições do ponto ótimo e da metodologia base (R<sup>2</sup> = 0,9881 e 0,9904), com constante cinética de 0,29 ± 0,03 min<sup>-1</sup> e 0,038 ± 0,004 min<sup>-1</sup>, respectivamente. Com o catalisador obtido nas condições otimizadas, o reator CSTR projetado foi avaliado, obtendo resultados promissores na degradação do corante. O estudo propõe, assim, uma abordagem de minimização de impactos ambientais sustentável, com a valorização de resíduos de

baterias íon-Lítio, contribuindo para o desenvolvimento de catalisadores alternativos e aplicáveis ao tratamento de efluentes industriais.

Palavras-chave: cobalto; catálise; degradação; resíduos.

Não autorizo a disponibilização de endereço de correio eletrônico para contato.

Autorizo a disponibilização do seguinte correio eletrônico para contato

## ABSTRACT

DA COSTA, Luiz Felipe Bellé. **Design of an Automated Bench-Scale CSTR Reactor Using Arduino and Applied to the Catalytic Degradation of Textile Dyes**. 2025. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia Química) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Francisco Beltrão, 2025. Título original: Projeto de um reator CSTR de bancada automatizado com uso de Arduino e aplicado na degradação catalítica de corantes têxteis

This study aimed to optimize cobalt recovery from spent lithium-ion batteries for the production of a catalyst applied in the degradation of the Reactive Blue 5G dye, as well as to develop a laboratory-scale Continuous Stirred Tank Reactor (CSTR) automated with Arduino. The cathode material, extracted from smartphone batteries, was used in the synthesis of cobalt oxide-based catalysts (Co-Ox), which were characterized by analyses such as X-ray Diffraction (XRD), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR), Thermogravimetric Analysis (TGA), Scanning Electron Microscopy (SEM), and nitrogen physisorption. The optimization of operational conditions for the catalytic degradation of Reactive Blue 5G dye using the Co-Ox catalyst produced from the base methodology was carried out through a 2<sup>2</sup> Central Composite Rotational Design (CCRD), evaluating the effects of the initial pH of the dye solution and the catalyst dosage on degradation efficiency. Kinetic tests were conducted under optimized conditions using 200 mL of dye solution ( $C_0 = 100$  mg/L). Process efficiency was monitored by UV-Vis spectrophotometry at 614 nm over 3 hours. In a second 2<sup>2</sup> CCRD, the catalyst synthesis was optimized. Acid leaching for cobalt recovery was evaluated focusing on the optimization of both mass yield and catalytic degradation performance, using  $H_2SO_4$  and  $H_2O_2$  concentrations as independent variables. The resulting catalyst was applied in catalytic degradation tests in batch reactors, with a catalyst dosage of 0.6 g/L and dye solution ( $C_0 = 100$  mg/L) at pH 1.85, with stirring maintained for 3 hours. The results of the study identified catalyst characteristics such as a porous and irregular structure, bands in the 543–643  $cm^{-1}$  region related to Co–O bonds, and diffraction peaks corresponding to  $Co_3O_4$ , suggesting the formation of this compound. Additionally, no significant mass loss was observed above 150°C, indicating the absence of further material decomposition. The specific surface area was determined as 5.06  $m^2/g$ , with an average pore size of 339.4 Å, indicating a predominance of mesopores in the catalyst. From appropriate statistical analysis, the optimal point for catalytic degradation was determined as an initial solution pH of 1.85 and a catalyst dosage of 0.6 g/L. For the second experimental design, the global desirability analysis indicated optimal conditions at a concentration of 0.26 mol/L  $H_2SO_4$  and 1.13% v/v  $H_2O_2$ , optimizing both catalyst mass yield (70%) and catalytic degradation efficiency of Reactive Blue 5G dye (89%). The pseudo-first-order kinetic model fitted well to the kinetic data collected with the catalysts obtained under both the optimal point and base methodology conditions ( $R^2 = 0.9881$  and  $0.9904$ , respectively), with kinetic rate constants of  $0.29 \pm 0.03$   $min^{-1}$  and  $0.038 \pm 0.004$   $min^{-1}$ , respectively. With the catalyst obtained under optimized conditions, the designed CSTR reactor was evaluated, yielding promising results in dye degradation. Thus, this study proposes a sustainable environmental impact minimization approach by valorizing lithium-ion battery waste, contributing to the development of alternative catalysts applicable to industrial effluent treatment.

Keywords: Cobalt; Catalysis; Degradation; Waste.