

Sistema baseado em microcontrolador Arduino® para monitoramento de parâmetros em reação de degradação de corante

Lucas Gabriel Pereira dos Santos^{a*}, Alan Gomes da Câmara^a, Fábio Machado Cavalcanti^a, José Geraldo de Andrade Pacheco Filho^a

^aDepartamento de Engenharia Química, Centro de Tecnologia e Geociências, Instituto de Pesquisas de Petróleo e Energia (LITPEG), Laboratório de Refino e Tecnologia Limpa (LabRefino/Lateclim), Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 50740-540, Brasil.

*lucas.gsantos@ufpe.br

RESUMO

Impulsionada pela alta demanda do setor têxtil, a produção de jeans gera efluentes com alto risco ambiental. Para o corante Preto Reativo 5 (RB5, do inglês *Reactive Black 5*), que é bastante utilizado no setor, possuindo elevada recalcitrância e difícil remoção por métodos convencionais, os métodos POAs surgiram como uma alternativa promissora para sua degradação. Entretanto, a eficiência do processo depende de parâmetros como pH, temperatura e ainda monitoramento contínuo da degradação, exigindo coletas periódicas. Com o objetivo de otimizar esse monitoramento, o presente trabalho propôs o desenvolvimento de um sistema automatizado baseado em microcontrolador da plataforma Arduino®, capaz de registrar parâmetros em tempo real e armazenar os dados em dispositivo de memória. Os resultados demonstraram desempenho satisfatório, com comportamento similar ao de equipamentos analíticos convencionais, como o espectrofotômetro, evidenciando o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de baixo custo e de fácil operação.

Palavras-chave: Arduino; automação; corante; RB5; Fenton.

1. Introdução

A poluição da água causada por efluentes industriais, particularmente corantes sintéticos como o Preto Reativo 5 (RB5) que é amplamente utilizado na indústria têxtil, especialmente na produção de jeans, apresenta alta estabilidade química, resistência à luz e solubilidade em água. No entanto, essas mesmas propriedades o tornam um poluente recalcitrante e tóxico, com baixa biodegradabilidade. Uma vez liberado em corpos d'água, o RB5 pode perturbar os ecossistemas aquáticos, reduzindo a penetração da luz, prejudicando a fotossíntese em organismos aquáticos. Além disso, a degradação incompleta do RB5 pode levar à formação de subprodutos tóxicos, levantando preocupações adicionais para a saúde humana e ambiental (Yoshimura et al., 2022).

Diversos métodos, incluindo abordagens biológicas, físicas e químicas, têm sido investigados para mitigar os impactos ambientais dos corantes sintéticos, como os métodos biológicos, que embora sejam sustentáveis e econômicos, frequentemente apresentam eficiência limitada no tratamento de efluentes altamente concentrados (Dantas et al., 2024). Para lidar com essas limitações, Processos Oxidativos Avançados (POAs) surgiram como uma alternativa promissora para a degradação de poluentes orgânicos. Entre eles, o processo Fenton se destaca por utilizar íons de ferro e peróxido de hidrogênio para gerar radicais hidroxila altamente reativos, capazes de degradar uma ampla gama de poluentes orgânicos (Ahmed et al., 2025). No entanto, a eficiência desse processo degradativo é fortemente influenciada pelas variáveis pH, concentração de $[H_2O_2]$, temperatura e concentração de $[Fe^{2+/3+}]$ (Wang et al., 2016). Dessa forma, é de extrema importância que esses parâmetros sejam monitorados ao longo da reação, bem como o percentual da amostra degradada.

Com relação ao monitoramento, equipamentos, como cromatógrafos e espectrofotômetros, necessários para o acompanhamento requerem espaço controlado e fixo; possuem alto custo para implementação ou manutenção; e profissional altamente capacitado. Dessa forma, uma abordagem promissora é o uso de plataformas que possibilitem a criação de sistemas para medição, como o Arduino® que é uma plataforma eletrônica de código aberto e simples manipulação, baseado no uso da linguagem de programação C/C++ (Patel et al., 2026).

Diversos trabalhos já vêm utilizando o Arduino® para desenvolvimento de sistemas que monitoram ou quantificam compostos, seja com aplicação ambiental ou química (Sharipov et al., 2025). Aoki e Kamai (2024) utilizaram o Arduino para monitoramento de água no solo, variável importante para agricultura, e compararam o sistema com um modelo comercial, obtendo resultados com diferenças menores que 2%, evidenciando o desempenho da plataforma para esse tipo de aplicação. Heo et al. (2019) e Ozer et al. (2022) utilizaram a plataforma

para desenvolvimento de sistemas capazes de quantificar a presença de íons metálicos em solução aquosa e no suor, respectivamente. Os trabalhos obtiveram boas faixas de detecção e respostas rápidas. Ainda no primeiro trabalho, houve validação das medições com equipamentos mais robustos, como espectrofotômetro UV-Vis, obtendo resultados com diferenças menores que 4% entre os métodos, o que eleva o reconhecimento dessa plataforma para diversas aplicações, já que também é de baixo custo.

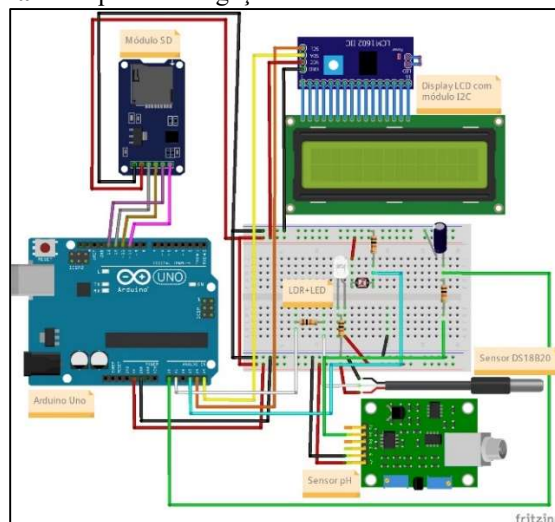
Diante disso, o presente trabalho teve como intuito desenvolver um sistema baseado na plataforma Arduino e utilizá-lo para o monitoramento de características importantes para as reações catalíticas de Fenton, como pH e temperatura, e acompanhamento da degradação do corante RB5 em um experimento de prova conceito por meio de LED (do inglês, *Light Emitting Diode*) e sensor LDR (do inglês, *Light Dependent Resistor*).

2. Metodologia

2.1. Sistema para monitoramento

Os componentes eletrônicos utilizados no sistema de monitoramento, com um custo total de aproximadamente R\$600,00, foram: 1 Arduino® Uno R3, 1 Sensor LDR, 1 Sensor de pH PH-4502c (c/ eletrodo), 2 Resistores 10 kΩ e 1 resistor de 4,7 kΩ, 1 Sensor de Temperatura DS18B20, 1 Capacitor eletrolítico 47 uF/16 V, 1 Módulo para cartão Micro SD mais o cartão SD, 1 Display LCD 16x2 mais o módulo serial I2C para LCD, 1 bomba d'água submersível, 1 Fonte 12 V, 1 LED branco e diversos jumpers. Enquanto que o esquema de ligações, demonstrado na Figura 1, entre o microcontrolador e periféricos (sensores, display LCD, LED, módulo SD), foi desenvolvido com o auxílio de uma placa de ensaio ou prototipagem (*protoboard*). O software usado para elucidar o esquema de ligações foi o Fritzing.

Figura 1. Esquema de ligações do sistema de monitoramento.



2.2. Experimento catalítico

Para a reação Fenton, foi usado o catalisador Sulfato de Ferro (II) (FeSO_4 , NEON, 98%) na concentração 5 mg L^{-1} , além de 10 mM de peróxido de hidrogênio (H_2O_2 , NEON, 97%). Utilizou-se 250 mL do corante RB5 em concentração inferior a 30 mg L^{-1} . A reação, que ocorreu em um béquer de 600 mL, esteve em sistema com recirculação por meio de uma mini bomba submersível. Durante 18 min, deixou-se o sistema com recirculação ativa, permitindo o preenchimento da tubulação e total saída do ar, bem como estabilidade dos sensores. Passado esse tempo, adicionou-se o catalisador e o peróxido de hidrogênio. O experimento foi concluído após 100 min. A fim de comparar os resultados com outros instrumentos, foi coletado uma amostra de 5 mL nos tempos 0, 35 e 100 min, analisadas no espectrofotômetro UV-Vis, um pHmetro comercial e um termômetro de mercúrio (Hg).

2.3. Processamento de sinais e calibração do sistema de monitoramento

Com o objetivo de obter um sinal de pH com menor nível de ruído, foram avaliados quatro métodos distintos de processamento de sinais: (i) ausência de processamento, (ii) aplicação de média móvel (Equação 1), (iii) utilização de filtro passa-baixa (Equação 2) e (iv) combinação entre média móvel e filtro passa-baixa.

Em particular, o filtro passa-baixa caracteriza-se por permitir a passagem de componentes de baixa frequência, associadas ao comportamento real do sistema, enquanto atenua componentes de alta frequência, tipicamente relacionadas ao ruído. Esse comportamento é determinado pela frequência de corte do circuito (Equação 3), a partir da qual sinais com frequência superior passam a ser progressivamente atenuados (Rawash et al., 2024). Com o objetivo de aprimorar a precisão das medições de pH, foi realizada a correção do sinal em função de soluções com padrão de pH 4 e 7, conforme descrito na Equação 4.

$$y'(n) = \frac{1}{4} * [x(n) + x(n - 1) + x(n - 2) + x(n - 3)] \{n \geq 3\} \text{ (Equação 1)}$$

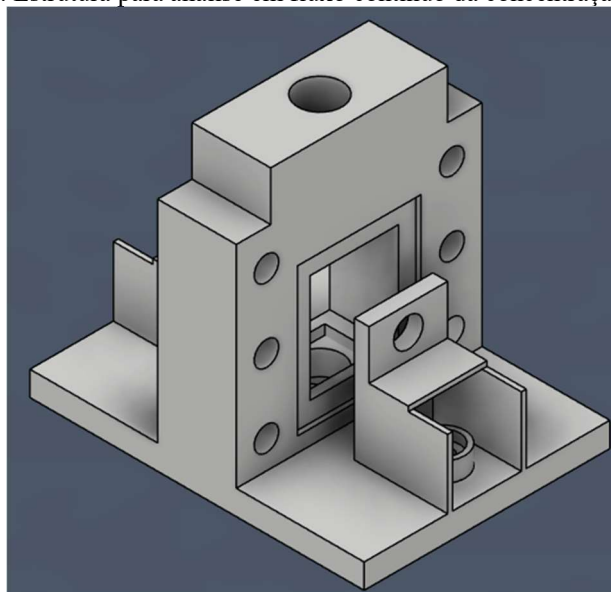
$$y''(n) = \left| \frac{V_{out}}{V_{in}} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi f R C_{eletrolítico})^2}} \{R = 4,7k\Omega, C_{eletrolítico} = 47\mu F\} \text{ (Equação 2)}$$

$$f_c = \frac{1}{2\pi R C_{eletrolítico}} \approx 0,7205 \text{ Hz} \{R = 4,7k\Omega, C_{eletrolítico} = 47\mu F\} \text{ (Equação 3)}$$

$$pH = -6,25 * V_{out} + 23,13 \text{ (Equação 4)}$$

A fim de validar a leitura do sistema LED/LDR, foi criada uma curva analítica em triplicata e em paralelo ao aparelho UV-Vis (Agilent Cary 100), partindo da concentração de 0 mg L⁻¹ (água destilada) até 100 mg L⁻¹. Para melhor acompanhar a degradação do corante RB5 no sistema proposto, foi desenvolvido uma estrutura com princípio semelhante as cubetas para análises em fluxo, como mostrado na Figura 2.

Figura 2. Estrutura para análise em fluxo contínuo da concentração do RB5.



3. Resultados e discussão

3.1. Curva analítica para concentração RB5

Como observado na Figura 4, na faixa de concentração de 0 ~ 30 mg L⁻¹, os dados apresentam comportamento aproximadamente linear, o que favorece a aplicação de um modelo de regressão linear para fins de quantificação. Essa linearidade indica que o sistema baseado em LED/LDR (gráfico à esquerda) é capaz de responder de forma proporcional à variação de concentração, em concordância com o comportamento esperado em técnicas espectrofotométricas convencionais, como a espectroscopia UV-Vis (gráfico à direita). Dessa forma, a equação da reta ajustada nessa região foi empregada para a determinação quantitativa das amostras, garantindo maior confiabilidade nos resultados dentro da faixa linear do método (Figura 5).

Figura 4. Relações entre absorvância e concentração de RB5 obtidas com o sistema LDE/LDR (à esquerda) e com o espectrômetro UV-Vis (à direita).

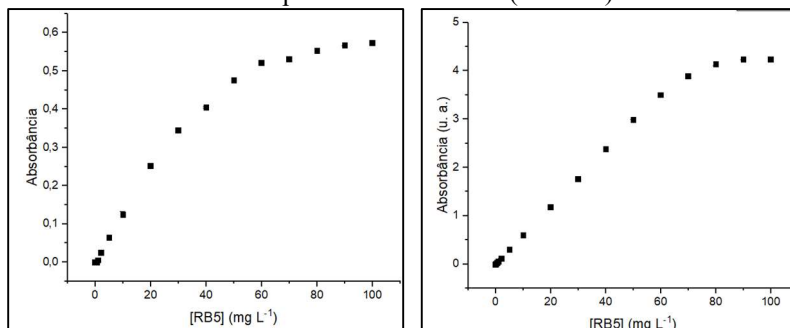
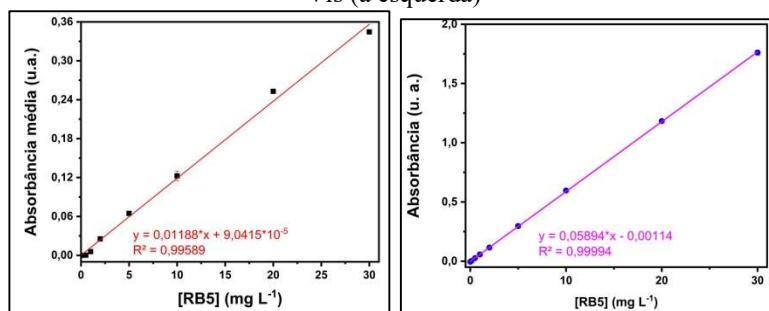


Figura 5. Curvas de calibração na faixa linear para o sistema LDE/LDR (à direita) e com o espectrômetro UV-Vis (à esquerda)

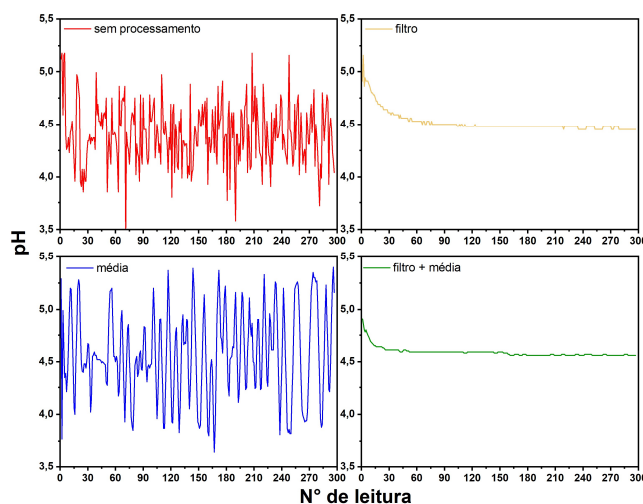


3.2. Processamento de sinais para o sensor de pH

Como pode ser percebido na Figura 6, assim como esperado, o sinal submetido ao processamento combinado, utilizando filtro passa-baixa e média móvel, apresentou significativa redução do ruído e maior continuidade ao longo das leituras, evidenciando uma resposta mais estável do sistema. Em contrapartida, o sinal obtido sem qualquer forma de processamento, seja analógico ou estatístico, apresentou alta variabilidade, caracterizando forte presença de ruído de alta frequência.

A média móvel realizou a suavização baseada no número de amostras, enquanto o filtro passa-baixa atuou diretamente no sinal com suavização elétrica. Vale ressaltar que, no entanto, tais abordagens isoladas mostraram-se menos eficazes quando comparadas ao uso combinado das duas técnicas.

Figura 6. Gráfico comparativo entre a qualidade dos sinais em leituras do parâmetro pH por meio do sensor.



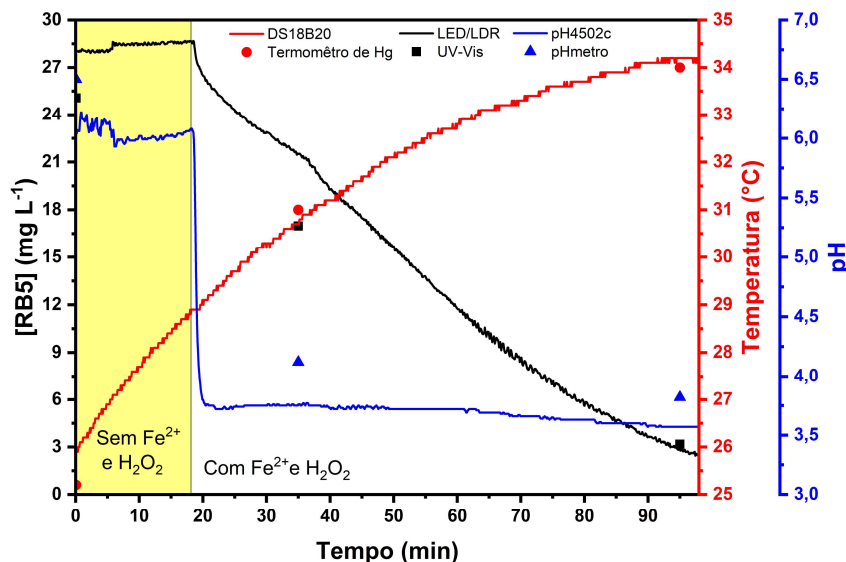
3.3. Monitoramento da reação de degradação

Os resultados obtidos, evidenciados na figura 7, demonstram o potencial do sistema para o monitoramento em tempo real da degradação do corante e dos outros parâmetros.

A metodologia óptica apresentou boa sensibilidade às alterações de concentração do RB5, permitindo acompanhar o perfil de degradação da reação a partir das variações de absorbância estimadas pela combinação LED/LDR. Além disso, as medições de temperatura apresentaram boa concordância com termômetro de mercúrio, evidenciando confiabilidade do sistema para esse parâmetro. Entretanto, o perfil serrilhado observado no gráfico da reação se dá pela constante presença de bolhas no sistema, causada pela bomba d'água.

Por outro lado, as medições de pH apresentaram diferenças de até uma unidade em relação ao pHmetro comercial utilizado ($R^2 = 0,84$), indicando limitações associadas à calibração experimental do sensor. Ainda assim, o sistema demonstrou potencial como ferramenta de baixo custo para monitoramento simplificado de processos oxidativos avançados.

Figura 7. Degradação do corante RB5 com 5 mg L⁻¹ de Fe²⁺ e 10 mM de H₂O₂.



4. Conclusão

O uso da plataforma Arduino® mostrou-se eficiente para o desenvolvimento de um sistema analítico de baixo custo, portátil e de fácil implementação, possibilitando o monitoramento simultâneo da concentração do corante, pH e temperatura em processos oxidativos avançados. A metodologia óptica baseada em LED/LDR apresentou boa concordância com as análises por espectrofotometria UV-Vis, especialmente na faixa linear.

A implementação de técnicas de processamento de sinais, incluindo média móvel e filtro passa-baixa, contribuiu significativamente para a redução de ruídos e aumento da estabilidade das leituras de pH. Entretanto, diferenças de até uma unidade em relação ao pHmetro comercial ainda foram observadas, possivelmente associadas às limitações intrínsecas do sensor utilizado, bem como às interferências elétricas.

No sistema Fenton desenvolvido, o monitoramento da degradação do corante RB5 mostrou-se efetivo, permitindo acompanhar continuamente a redução da concentração do corante e as alterações físico-químicas do meio reacional ao longo do processo oxidativo.

Adicionalmente, os resultados obtidos indicam perspectivas de aprimoramento do sistema, incluindo a otimização da intensidade luminosa emitida pelo LED mediante ajuste do resistor associado, o desenvolvimento de uma interface dedicada para o usuário e a realização de calibrações multiponto do sensor de pH, abrangendo uma faixa operacional mais ampla além dos padrões de pH 4 e 7, visando aumentar a precisão e robustez analítica da metodologia proposta.

Agradecimentos: Os autores agradecem o apoio financeiro do Programa de Formação de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - PRH-ANP, gerido pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo n° 2025/03493-5. Em especial ao

PRH30/UFPE. Agradecemos também ao Laboratório de Refino e Tecnologias Limpas e ao Instituto de Pesquisas em Petróleo e Energia pela infraestrutura para desenvolvimento do trabalho.

Referências

- Ahmed, Y., Maya, A. A. S., Akhtar, P., AlMohamadi, H., Mohammad, A. W., Ashekuzzaman, S. M., Olbert, A. I., & Uddin, M. G. (2025). Advancements and challenges in Fenton-based advanced oxidation processes for antibiotic removal in wastewater: From the laboratory to practical applications. Em *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 13, Número 1). Elsevier Ltd.
<https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.115068>
- Aoki, S., & Kamai, T. (2024). Open-source electronics Arduino platform for soil water measurement with the dual-probe heat-pulse (DHP) method. *Smart Agricultural Technology*, 9.
<https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100637>
- Dantas, E. J. M., Alves, M. E., Arias, S., Camara, A. G., Cavalcanti, J. V. F. L., Silva, G. L., Barbosa, C. M. B. M., & Pacheco, J. G. A. (2024). Cellulose-MIL-88A photocatalytic membrane to treat effluents containing dyes and oil emulsions. *Catalysis Today*, 441. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2024.114846>
- Heo, G., Manivannan, R., Kim, H., Kim, M. J., Min, K. S., & Son, Y. A. (2019). Developing an RGB - Arduino device for the multi-color recognition, detection and determination of Fe(III), Co(II), Hg(II) and Sn(II) in aqueous media by a terpyridine moiety. *Sensors and Actuators, B: Chemical*, 297.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2019.126723>
- Ozer, T., Agir, I., & Henry, C. S. (2022). Low-cost Internet of Things (IoT)-enabled a wireless wearable device for detecting potassium ions at the point of care. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 365.
<https://doi.org/10.1016/j.snb.2022.131961>
- Patel, A. K., Shrivastava, K., Thakur, K., Sharma, A., Deb, M. K., Kailasa, S. K., Shankar, R., & Arakawa, T. (2026). Advances in Arduino-Based optical devices for colorimetric detection in Environmental, Food, and clinical applications. Em *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. Korean Society of Industrial Engineering Chemistry. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2026.01.014>
- Rawash, Y. Z., Al-Naami, B., Alfraihat, A., & Owida, H. A. (2024). Advanced Low-Pass Filters for Signal Processing: A Comparative Study on Gaussian, Mittag-Leffler, and Savitzky-Golay Filters. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 11(7), 1841–1850. <https://doi.org/10.18280/mmep.110713>
- Sharipov, M., Uzokboev, S., Nghia, N. N., Azizov, S., Ryu, W. H., Tawfik, S. M., & Lee, Y. I. (2025). Recent progress in Arduino- and smartphone-based sensors for biochemical and environmental analysis. Em *TrAC - Trends in Analytical Chemistry* (Vol. 183). Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2024.118103>
- Wang, N., Zheng, T., Zhang, G., & Wang, P. (2016). A review on Fenton-like processes for organic wastewater treatment. Em *Journal of Environmental Chemical Engineering* (Vol. 4, Número 1, p. 762–787). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2015.12.016>
- Yoshimura, R., Wai, S. H., Ota, Y., Nishioka, K., & Suzuki, Y. (2022). Effects of Artificial River Water on PEM Water Electrolysis Performance. *Catalysts*, 12(9). <https://doi.org/10.3390/catal12090934>