



Tratamento e monitoramento simultâneo de contaminantes farmacêuticos por processos eletroquímicos avançados acoplados

Robson S. Souto¹, Anderson M. Santos¹, Willyam R.P. Barros² e Marcos R.V. Lanza¹

¹ Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, Brasil.(robsonssouto@gmail.com)

²Faculdade de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD, Dourados, MS, Brasil.

Este trabalho apresenta uma plataforma integrada para tratamento e monitoramento em tempo real de contaminantes farmacêuticos em água. Um reator eletroquímico de fluxo com eletrodo de difusão gasosa foi acoplado a um sistema FIA-MPA, permitindo quantificar simultaneamente H_2O_2 e paracetamol. O processo combinado UVC@e- H_2O_2 alcançou até 92% de remoção. O sistema demonstrou alta sensibilidade, rapidez analítica e potencial para aplicações em tratamento descentralizado de águas.

Palavras-chave: Processos oxidativos avançados; Reator eletroquímico de fluxo; Monitoramento em tempo real.

INTRODUÇÃO

A presença de contaminantes farmacêuticos em ambientes aquáticos tem se tornado uma preocupação crescente devido à sua persistência e baixa remoção em sistemas convencionais de tratamento de água. Compostos como analgésicos, antibióticos e antidepressivos são frequentemente detectados em concentrações que variam de $ng\ L^{-1}$ a $\mu g\ L^{-1}$, podendo causar impactos ambientais relevantes (Shaheen et al., 2022).

Diante desse cenário, os processos oxidativos avançados (POAs), especialmente os eletroquímicos, têm se destacado como alternativas promissoras, devido à sua eficiência, escalabilidade e possibilidade de aplicação *in situ* (Santos et al., 2022). Entre essas tecnologias, os reatores eletroquímicos de fluxo (EFR) permitem a geração local de oxidantes, como o peróxido de hidrogênio (H_2O_2), reduzindo custos operacionais e impactos ambientais.

Além disso, a combinação de H_2O_2 com radiação UVC potencializa a formação de radicais hidroxila ($HO^\bullet$), altamente reativos, responsáveis pela degradação de compostos orgânicos recalcitrantes (Glaze et al., 1987). Paralelamente, técnicas analíticas como a análise por injeção em fluxo com amperometria de múltiplos pulsos (FIA-MPA) vêm sendo utilizadas para monitoramento rápido e seletivo de espécies químicas.

Entretanto, a integração entre sistemas de tratamento e monitoramento em tempo real ainda é pouco explorada. Assim, este trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar uma plataforma integrada capaz

de promover a degradação de paracetamol e o monitoramento simultâneo de H_2O_2 em um sistema contínuo.

MATERIAL E MÉTODOS

O sistema experimental consistiu na integração de um EFR equipado com eletrodo de difusão gasosa (GDE) com um sistema FIA-MPA para monitoramento em tempo real.

O H_2O_2 foi gerado eletroquimicamente via redução de oxigênio, enquanto a degradação do paracetamol ocorreu sob diferentes condições operacionais, incluindo a aplicação isolada e combinada de radiação UVC e oxidação eletroquímica.

Parâmetros como densidade de corrente, vazão e concentração inicial do contaminante foram otimizados. A quantificação dos analitos foi realizada por métodos eletroquímicos (FIA-MPA), sendo comparada com técnicas convencionais (UV-Vis e HPLC).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados evidenciam que a eficiência do sistema integrado está diretamente relacionada às condições operacionais do reator eletroquímico de fluxo (EFR), especialmente densidade de corrente, vazão e concentração inicial do contaminante.

Inicialmente, avaliou-se o efeito da densidade de corrente na degradação do paracetamol (PCT) e na geração de H_2O_2 . Observa-se que o aumento da densidade de corrente promove maior produção de peróxido de hidrogênio, refletindo em maior eficiência de degradação até um limite operacional.

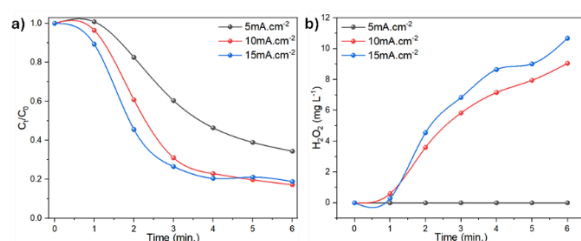


Figura 1 - Efeito da densidade de corrente na degradação do PCT e na concentração de H₂O₂. **a)** Remoção de PCT no modo UVC@e-H₂O₂, **b)** evolução da concentração de e-H₂O₂ na mesma configuração experimental.

De acordo com essa figura, a degradação do PCT atingiu aproximadamente 80% para densidades de corrente de 10 e 15 mA cm⁻², sendo escolhido o valor de 10 mA cm⁻² como condição ótima devido ao menor consumo energético e maior eficiência global do sistema. Observa-se ainda que o aumento excessivo da corrente não resulta em ganho proporcional de degradação, possivelmente devido à ocorrência de reações paralelas e formação de subprodutos que competem pelos radicais oxidantes (Khuwijtjaru et al., 2014).

A influência da vazão também foi investigada, demonstrando que menores vazões favorecem o aumento do tempo de residência e, consequentemente, maior acúmulo de H₂O₂. Entretanto, a eficiência de degradação apresentou comportamento de saturação, indicando limitação cinética do processo.

Na sequência, avaliou-se o efeito da concentração inicial de PCT, verificando-se que a eficiência de remoção diminui levemente com o aumento da concentração do contaminante. Esse comportamento está associado à formação de subprodutos intermediários que atuam como sequestradores de radicais hidroxila, reduzindo a disponibilidade desses agentes oxidantes para a degradação do composto alvo.

Além disso, foi analisado o desempenho dos processos isolados e combinados. Os resultados mostraram que tanto a radiação UVC isolada quanto a oxidação eletroquímica individual apresentaram baixa eficiência na degradação do PCT. Em contraste, a combinação UVC@e-H₂O₂ resultou em um efeito sinérgico significativo (Sánchez-Montes et al., 2020).

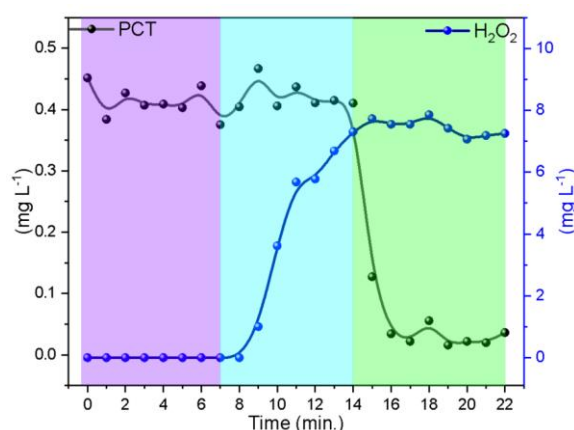


Figura 2 - Comparação entre os diferentes processos (UVC, AO@e-H₂O₂ e UVC@e-H₂O₂) na degradação do PCT.

Conforme evidenciado nessa figura, apenas o processo combinado promoveu degradação expressiva, atingindo cerca de 92% de remoção em sistema de fluxo contínuo. Esse comportamento confirma que a ativação do H₂O₂ pela radiação UVC é essencial para a geração de radicais hidroxila (HO[•]), responsáveis pela oxidação eficiente do contaminante.

Outro aspecto relevante foi o desempenho do sistema FIA-MPA no monitoramento simultâneo de H₂O₂ e PCT. A técnica apresentou elevada sensibilidade, baixo limite de detecção e alta frequência analítica, permitindo o acompanhamento em tempo real do processo. Quando comparado aos métodos convencionais (UV-Vis e HPLC), o sistema eletroanalítico demonstrou maior resolução temporal e melhor estabilidade dos sinais, especialmente em condições dinâmicas de fluxo.

Dessa forma, os resultados confirmam que a integração entre tratamento eletroquímico e monitoramento analítico constitui uma abordagem eficiente e inovadora, permitindo não apenas elevada remoção de contaminantes, mas também controle em tempo real do processo, o que representa um avanço significativo em sistemas de tratamento de água.

CONCLUSÃO

O trabalho demonstrou que a integração entre reator eletroquímico de fluxo e sistema FIA-MPA é uma estratégia eficiente para o tratamento e monitoramento simultâneo de contaminantes farmacêuticos.

A combinação UVC@e-H₂O₂ apresentou elevada eficiência de degradação, enquanto o sistema analítico permitiu detecção rápida, sensível e seletiva.

A plataforma proposta apresenta potencial para aplicação em sistemas descentralizados de tratamento de água, podendo ser expandida para outros contaminantes e condições reais de efluentes.



AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro concedido pelas agências brasileiras de fomento à pesquisa, incluindo o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (processo nº 303943/2021-1), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) (processos nº 2016/19612-4, 2018/22210-0, 2018/22211-7, 2018/22022-0, 2019/06650-3, 2020/02743-4, 2022/12895-1, 2023/14335-6 e 401122/2025-5), a Fundação de Apoio ao Desenvolvimento do Ensino, Ciência e Tecnologia do Estado de Mato Grosso do Sul (FUNDECT) (processo nº 83/044.409/2024) e a Universidade do Estado de Mato Grosso (UNEMAT) pelo suporte a esta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- SHAHEEN, J. F. et al. Fate, transport, and risk assessment of widely prescribed pharmaceuticals in terrestrial and aquatic systems: A review. *Emerging Contaminants*, v. 8, p. 216–228, 2022.
- SANTOS, G. O. S. et al. Recent advances in H₂O₂ electrosynthesis based on the application of gas diffusion electrodes: Challenges and opportunities. *Current Opinion in Electrochemistry*, v. 36, p. 101124, 2022.
- GLAZE, W. H.; KANG, J.-W.; CHAPIN, D. H. The chemistry of water treatment processes involving ozone, hydrogen peroxide and ultraviolet radiation. *Ozone: Science & Engineering*, v. 9, n. 4, p. 335–352, 1987.
- KHUWIJITJARU, P. J., PLERNJIT, B. SUAYLAM, S. SAMUHASENEETOO, R. PONGSAWATMANIT, S. ADACHI. Degradation kinetics of some phenolic compounds in subcritical water and radical scavenging activity of their degradation products. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 92, n. 5, p. 810–815, 2014.
- SÁNCHEZ-MONTES, I. I. SALMERON GARCÍA, G. RIVAS IBANEZ, J.M. AQUINO, M.I. POLO LOPEZ, S. MALATO, I. OLLER. UVC-based advanced oxidation processes for simultaneous removal of microcontaminants and pathogens from simulated municipal wastewater at pilot plant scale. *Environmental Science: Water Research & Technology*, v. 6, n. 9, p. 2553–2566, 2020.