

COMPROMISSO SUSTENTÁVEL: PRODUÇÃO LIMPA DE PERÓXIDO DE HIDROGÊNIO (H₂O₂) IN SITU E SUA APLICAÇÃO EM ESTAÇÕES DE TRATAMENTO DE ÁGUA

Raíssa Engroff Guimarães – e-mail: raissa_guimaraes02@hotmail.com

Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH), Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (PPG-IPH), Núcleo de Estudos em Saneamento Ambiental (NESA).

Avenida Bento Gonçalves, 9500

91501-970 – Porto Alegre – Rio Grande do Sul

Fabiana Luft Bavaresco – e-mail: fabianaluft@gmail.com

UFRGS, IPH, NESA

Louidi Lauer Albornoz – e-mail: louidi.lauer@ufrgs.br

UFRGS, IPH, NESA

Fernando Henrique Borba – e-mail: fernando.borba@uffs.edu.br

Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), campus Cerro Largo

Salatiel Wohlmuth da Silva – e-mail: salatiel.silva@ufrgs.br

UFRGS, IPH, NESA

Resumo: Estações de tratamento de água (ETA) convencionais não foram projetadas para remover contaminantes emergentes. Nesse sentido, uma opção de adequação às ETA sem grandes intervenções civis é a utilização do processo oxidativo avançado H₂O₂/UV-C que conduz a geração de radicais hidroxila (HO•). O H₂O₂ é predominantemente fabricado por meio do processo de antraquinona, considerado não alinhado com práticas ambientais ideais. Em consonância com os princípios do desenvolvimento sustentável, a eletro-geração in situ de H₂O₂ emerge como uma alternativa promissora, proporcionando uma produção verde e segura. Assim, esse trabalho buscou avaliar a melhor condição de intensidade de corrente elétrica para eletro-geração in situ de H₂O₂ e, após, avaliar a capacidade do processo combinado H₂O₂/UV-C em degradar multicontaminantes. Os resultados demonstraram que foi possível acumular 75,6 mg L⁻¹ de H₂O₂ em 120 min utilizando uma corrente de 3 A, vazão de água de 50 L h⁻¹ e de ar igual a 5 L min⁻¹ em reator eletroquímico. Foi verificado que os multicontaminantes atenolol, prednisona e sulfametoxazol são passíveis de oxidação diretamente pelo H₂O₂ eletrogerado in situ, no entanto, a combinação do sistema com radiação UV-C demonstrou uma maior degradação dos contaminantes em menor tempo de reação, em comparação com o processo isolado. Assim, o sistema proposto destaca-se como uma alternativa sustentável para aplicação em águas contaminadas por múltiplos contaminantes, alinhando-se com os princípios ESG.

Palavras-chave: Tratamento avançado de água, Geração in situ de H₂O₂, Eletrólito sólido, Produção verde.

SUSTAINABLE COMMITMENT: CLEAN PRODUCTION OF IN SITU HYDROGEN PEROXIDE (H₂O₂) AND ITS APPLICATION IN WATER TREATMENT PLANTS

Realização



PUCRS



abes-rs@abes-rs.org.br

(51) 999330700

www.abes-rs.org.br



Abstract: Conventional water treatment plants (WTP) were not designed to remove emerging contaminants. In this sense, an option to adapt to WTP without major civil interventions is the use of the advanced oxidative process UV/H₂O₂ which leads to the generation of hydroxyl radicals (HO•). H₂O₂ is predominantly manufactured through the anthraquinone process, which is considered not in line with ideal environmental practices. In line with the principles of sustainable development, the in situ electrogeneration of H₂O₂ emerges as a promising alternative, providing green and safe production. Thus, this work sought to evaluate the best electrical current intensity condition for in situ electrogeneration of H₂O₂ and, after, evaluate the capacity of the combined H₂O₂/UV-C process to degrade multicontaminants. The results demonstrated that it was possible to accumulate 75.6 mg L⁻¹ of H₂O₂ in 120 min using a current of 3 A, water flow of 50 L h⁻¹, and air flow equal to 5 L min⁻¹ in an electrochemical reactor. It was verified that the multicontaminants atenolol, prednisone and sulfamethoxazole are subject to oxidation directly by H₂O₂ electrogenerated in situ, however, the combination of the system with UV-C radiation demonstrated greater degradation of the contaminants in a shorter reaction time, compared to the process isolated. Thus, the proposed system stands out as a sustainable alternative for application in waters contaminated by multiple contaminants, aligning with ESG principles.

Keywords: Advanced water treatment, In situ generation of H₂O₂, Solid electrolyte, green production.

1 INTRODUÇÃO

Muitos são os desafios para integrar no mundo corporativo os critérios ambientais, sociais e de governança, conhecido como ESG (do inglês *Environmental, Social and Governance*), especialmente para os serviços públicos. As empresas e órgãos responsáveis pelos serviços, tais como abastecimento de água e tratamento de efluentes, têm o potencial de proporcionar benefícios sociais por meio da criação de valor público e da contribuição para o desenvolvimento sustentável. No entanto, podem gerar impactos ambientais dependendo do uso e gestão dos recursos utilizados (VELTRI et al., 2023). O ESG representa um conjunto de ações adotadas pelas empresas que visam melhorar os aspectos ambientais, sociais e de governança dentro da organização, contribuindo com o desenvolvimento sustentável (WALTER, 2020). Nesse sentido, a adequação dos critérios ESG para os serviços de saneamento básico vai ao encontro do Objetivo 6: “Água e saneamento para todos” dos objetivos de desenvolvimento sustentável, que visa garantir a disponibilidade e a gestão sustentável de água e saneamento de maneira global (CHAITKIN et al., 2022; CLARA DE OLIVEIRA LEITE et al., 2022).

No Brasil, cerca de 15,8% da população não possui acesso à rede de abastecimento de água e 44,2% não possuem acesso a serviços de saneamento (SNIS, 2022). Além disso, a qualidade da água dos mananciais que servem como fontes do abastecimento também é uma questão preocupante, pois está diretamente relacionada com as diferentes atividades humanas que estão causando grandes impactos no ecossistema em geral (KOLPIN et al., 2002). A poluição e a contaminação da água, geram riscos ao meio ambiente e à saúde pública, mediante o aumento de doenças veiculadas a água e as modificações na biota aquática (JAIN; YEVATIKAR; RAXAMWAR, 2021; WOLF et al., 2019).

A ampla utilização de produtos químicos resulta na contaminação de diferentes matrizes ambientais. Estudos relatam a presença de produtos farmacêuticos e de cuidados pessoais, agroquímicos, medicamentos de uso veterinário, plastificantes e surfactantes, dentre outros, em águas superficiais, subterrâneas e inclusive na água potável (SANTOS et al., 2020; SEIBERT et al., 2020; VALBONESI et al., 2021).

A ocorrência desses compostos no ambiente representa uma ameaça para todo o ecossistema, considerando que a exposição de longo prazo pode ocasionar impactos negativos a seres humanos e organismos aquáticos, como distúrbios no sistema reprodutivo e endócrino, anomalias físicas e outros efeitos tóxicos, bem como o desenvolvimento e proliferação de bactérias resistentes a antibióticos (FELIS et al., 2020; KOVALAKOVA et al., 2020).



Grande parte destes compostos possuem propriedades de difícil degradação o que torna o sistema de tratamento de água e esgoto ineficientes para sua remoção. No Brasil, as estações de tratamento de água (ETA) e de tratamento de efluentes (ETE) possuem, em geral, um tratamento convencional, o que significa que não foram projetadas para realizar a degradação e/ou remoção desses contaminantes (BLUM et al., 2017; GRANDCLÉMENT et al., 2017). Assim, há necessidade do estudo, desenvolvimento e aplicação de novas tecnologias de tratamento de água e efluentes abrangendo esta problemática e buscando realizar a degradação e/ou remoção desses compostos para fornecer água segura para a população e reduzir o impacto ambiental dessas substâncias na natureza e na população (GONZÁLEZ-GONZÁLEZ et al., 2022; KRISHNAN et al., 2021).

Os processos oxidativos avançados (POA) baseados na geração de oxidantes fortes como o radical hidroxila ($\text{HO}^\bullet$), têm se destacado na remoção desses compostos de água e efluentes. Tendo em vista o tratamento avançado de água, a combinação de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) e radiação ultravioleta (UV) representa uma alternativa promissora, pois é facilmente escalável, fácil de automatizar, não necessita de grandes obras civis para sua instalação e ausência da formação de lodo durante o processo (HOLLMAN et al., 2021).

Contudo, a utilização de H_2O_2 em ETA possui restrições relacionadas ao transporte, armazenamento e manuseio das soluções de H_2O_2 em alta concentração, visto que estas são instáveis e inflamáveis, trazendo riscos operacionais e grande impactos ambientais em caso de derramamentos ocasionados em acidentes (XIA et al., 2019). Somado a isso, o processo de produção de H_2O_2 é ainda predominantemente realizado industrialmente pela oxidação da antraquinona, a qual necessita de uma alta demanda energética, utilização de solventes orgânicos e resulta na geração intensiva de resíduos, muitas vezes, tóxicos (SIAHROSTAMI et al., 2020; YANG et al., 2018).

Tendo em vista uma proposta mais segura, econômica e verde, visando reduzir a utilização de reagentes químicos tóxicos e problemas de armazenamento e transporte (WANG et al., 2021; ZHAO et al., 2022), métodos alternativos para a geração de H_2O_2 vem sendo investigados, como a síntese direta, eletro-geração e síntese fotocatalítica (CIRIMINNA et al., 2016; JI et al., 2021; ZHANG et al., 2022).

A eletro-geração de H_2O_2 ocorre pela reação eletroquímica de redução de oxigênio (RRO) em cátodos de materiais carbonosos, metais nobres ou ligas metálicas. Dentre esses, os eletrocatalisadores de carbono se destacam, pois, possuem propriedades não tóxicas e possuem baixo custo (SIAHROSTAMI et al., 2020; ZHANG et al., 2020). No entanto, eletrodos convencionais são limitados pela baixa solubilidade do oxigênio (O_2) em água e consequentemente, possuem maior resistência na transferência de massa da reação, obtendo menor eficiência e maior consumo de energia no processo (REIS et al., 2012; ZHOU et al., 2019a). Assim, a utilização de um eletrodo de difusão de gás (EDG) vem ganhando destaque na literatura como uma alternativa ao uso dos eletrodos convencionais, pois possui características que favorecem a RRO, como maior área superficial e, uma interface trifásica (água/cátodo/ O_2), na qual ocorre a difusão de O_2 pelo eletrodo, aumentando a eficiência da eletrossíntese de H_2O_2 .

Além disso, o funcionamento do sistema eletroquímico é dependente da condutividade elétrica (CE) da solução. Soluções de cloreto ou sulfato de sódio, são normalmente utilizadas para promover o aumento de CE em soluções sintéticas ou de baixa carga iônica. Consequentemente, a utilização desses sais pode ser uma fonte de contaminação secundária no tratamento de água para abastecimento (MARTÍNEZ-HUITLE et al., 2015; ZHOU et al., 2019b). Neste caso, outra maneira de reduzir a utilização de reagentes químicos é a incorporação de eletrólitos sólidos no sistema eletroquímico, promovendo o conceito de economia circular, minimizando riscos e corroborando com a proteção ambiental.

Neste contexto, a avaliação da produção *in situ* de H_2O_2 mediante a utilização de um EDG e um eletrólito sólido justifica-se por representar uma alternativa potencial para produção mais limpa deste oxidante e consequentemente uma redução dos produtos químicos utilizados no sistema e dos riscos de armazenamento e transporte. Dessa forma, o trabalho busca facilitar a gestão ambiental dos insumos durante o processo de tratamento de água, promovendo soluções que contribuam com o desenvolvimento sustentável e atendimento aos critérios ESG, alinhado também ao aprimoramento das técnicas avançadas de tratamento.



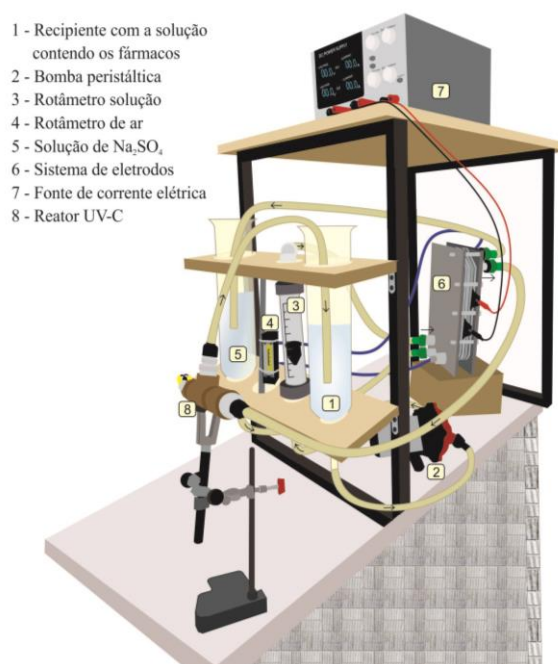
2. METODOLOGIA

Para substituir o processo industrial de produção de H_2O_2 , um sistema de eletro-geração *in situ* foi desenvolvido e estudado. Após a obtenção da melhor condição para a geração de H_2O_2 , o processo foi combinado com radiação UV- C_{254nm} para investigar a degradação de multicontaminantes emergentes da água. A descrição das etapas do procedimento experimental e analítico estão descritas a seguir.

2.1. Sistema de produção *in situ* de H_2O_2

A produção *in situ* de H_2O_2 foi realizada em um sistema eletroquímico (Figura 1) composto por uma câmara anódica (10 cm × 10 cm), uma câmara catódica (10 cm × 10 cm) e uma câmara de gás (10 cm × 10 cm). A célula utilizada nos ensaios é uma *Electro MP Cell* (Tarm, Dinamarca) do tipo filtro-prensa, equipada com um ânodo de DIACHEM® e um cátodo de difusão de ar de carbono-PTFE, ambos com área ativa de 100 cm². O compartimento anódico não era o foco deste trabalho, por tanto, foi utilizado uma membrana de troca catiônica IONSEP-HC-C (HDX 100) visando evitar a decomposição do H_2O_2 no ânodo. A corrente elétrica foi aplicada ao par de eletrodos utilizando uma fonte de alimentação (DC Power Supply MPS-3005B). O ar foi fornecido continuamente por um compressor de ar (SCHULZ MSA 8,1/25) e a vazão de ar foi regulada por um rotâmetro de ar (Blaster Controles BLI200) em 5 L min⁻¹.

Figura 1 - Ilustração do sistema eletroquímico com geração de H_2O_2 combinado a irradiação UV-C.



Aproximadamente 35 g de uma resina de troca iônica (AMBERLITETM IRC120 H) foi selecionada como eletrólito sólido e adicionada na câmara catódica para fornecer condutividade elétrica a solução afluyente que flui através da resina. Um litro do afluyente foi recirculado para a célula eletroquímica por meio de uma bomba Seaflo (SFDP1-040-060-51), sob uma vazão de 50 L h⁻¹ regulada por um rotâmetro (Blaster Controles BLI200). Enquanto isso, um litro de uma solução de 0,035 M Na_2SO_4 sob uma vazão de 2 L min⁻¹ foi recirculada na câmara anódica.



2.2. Procedimento experimental

Como afluente na avaliação da geração *in situ* de H_2O_2 , foi utilizada água deionizada (pH = 5,3, CE = $7 \mu S \text{ cm}^{-1}$, a $25^\circ C$), obtida com um sistema Permution RO 0420.

Após, atenolol (ATN), prednisona (PRED) e sulfametoxazol (SMX) foram selecionados, pois representam três classes diferentes de fármacos, um β -bloqueador (ATN), um glicocorticoide (PRED) e um antibiótico (SMX). Além disso, são frequentemente detectados em águas e efluentes de diferentes regiões do Brasil e do mundo (PERIN et al., 2021; REIS et al., 2019; SODRÉ; DUTRA; SANTOS, 2018). A solução de trabalho foi preparada a partir da diluição das três substâncias em água deionizada até a concentração final de 5 mg L^{-1} .

Ao reator eletroquímico foram aplicadas diferentes condições experimentais para otimização da geração de H_2O_2 e de oxidação dos fármacos alvo. Manteve-se as vazões de ar e de água constantes a 5 L min^{-1} e 50 L h^{-1} , respectivamente, alterando-se a intensidade de corrente em 1, 2 e 3 Ampere (A).

Conforme desejado, o pH foi alterado utilizando soluções 1 M de H_2SO_4 e NaOH. O pH foi determinado por método potenciométrico com um pHmetro Digimed DM-22 equipado com eletrodo combinado de pH DME-CV1. A condutividade elétrica foi determinada em um condutivímetro Digimed DM-32 equipado com célula DMC-010M.

2.3. Determinação analítica

Para determinação e quantificação do H_2O_2 eletrogerado *in situ* foi desenvolvida a curva de calibração e o reagente químico utilizado foi H_2O_2 comercial (NEON, 35% P.A., $34,01 \text{ g mol}^{-1}$).

A metodologia adotada para determinação de H_2O_2 foi a do Oxissulfato de Titânio (IV) ($\geq 29\% \text{ Ti}$) como reagente indicador, adquirido da *Sigma-Aldrich*, utilizando o espectrofotômetro UV (Pró-Análise UV-1600) no comprimento de onda de trabalho de 408 nm (CORDEIRO-JUNIOR; LANZA; RODRIGO, 2023; SALES MONTEIRO et al., 2022).

A avaliação da degradação dos fármacos foi realizada por análises de cromatografia líquida de alta eficiência (HPLC), em um equipamento Shimadzu LC20A com detector DAD SPD-20AV, amostrador automático SIL-20A e uma coluna C18 (Shim-pack XR-ODS, 3,0 mm ID $\times$ 50 mm, Shimadzu). As fases móveis, suas proporções, vazão, tempo de corrida e comprimentos de onda foram adaptados da literatura (DA SILVA et al., 2019; DONG; TRENHOLM; ROSARIO-ORTIZ, 2015; MIKLOS et al., 2018; YANG et al., 2017). A fase móvel A foi tampão fosfato 0,025M (pH = 2,5) e a fase móvel B foi acetonitrila, em uma proporção 55A:45B, com um fluxo de 1 mL min^{-1} por 6 min. Os comprimentos de onda foram ajustados para 227 nm para ATN, 246 nm para PRED e 269 nm para o SMX e o volume de injeção das amostras foi de $20 \mu L$.

3. RESULTADOS

Inicialmente foram realizados ensaios visando avaliar a influência da intensidade de corrente elétrica na produção de H_2O_2 *in situ*, em pH inicial neutro. A concentração de H_2O_2 , em sistemas em batelada, tende a acumular ao longo do tempo até atingir um valor máximo, posteriormente o H_2O_2 gerado também é consumido por reações paralelas que ocorrem simultaneamente no cátodo (AGLADZE et al., 2007; PERRY et al., 2019; SALMERÓN et al., 2021). Assim, a maior geração de H_2O_2 ocorreu sob intensidade de corrente de 3 A, atingindo a concentração máxima de $75,6 \text{ mg L}^{-1}$ de H_2O_2 em 120 min (Figura 2).

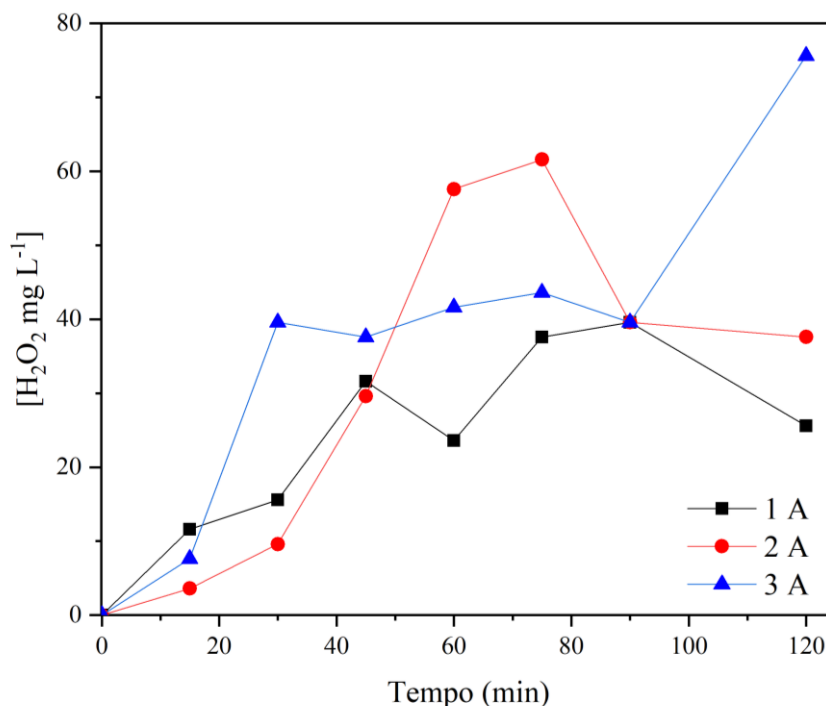
Isso pode estar relacionado com a geração de um campo elétrico mais forte entre o ânodo e o cátodo, devido à elevação da tensão, fornecendo mais prótons para a solução e acelerando a transferência de elétrons, consequentemente favorecendo a geração de H_2O_2 (CUI et al., 2017; HEJAZI; TAGHIPOUR, 2023).

Entretanto, vale ressaltar que intensidades de corrente ainda mais altas podem levar a reações parasitárias que acabariam por diminuir a eficiência de geração do oxidante (SALMERÓN et



al., 2021). Em contrapartida as intensidades de corrente de 1 e 2 A tiveram uma reação mais lenta para atingir concentrações mais elevadas de H_2O_2 .

Figura 2 – Geração *in situ* de H_2O_2 em diferentes intensidades de corrente (Vazão de água de 50 L hora^{-1} , vazão de ar = 5 L min^{-1}).



Diferentes autores também avaliaram a produção *in situ* de H_2O_2 utilizando cátodos de carbono-PTFE e atingiram concentrações semelhantes do oxidante. Um estudo obteve uma concentração de H_2O_2 acumulada em 30 min de 43 mg L^{-1} em $\text{pH} = 3$ (SALMERÓN et al., 2019) e 49 mg L^{-1} em pH neutro com intensidade de corrente elétrica de $7,36 \text{ A}$ (SALMERÓN et al., 2021). Outro estudo também avaliou a eletro-geração de H_2O_2 utilizando cátodos de carbono-PTFE e atingiu um acúmulo de 86 mg L^{-1} em 360 min, com intensidade de corrente de $0,05 \text{ A}$ e $\text{pH} = 3,5$ (MOREIRA et al., 2014).

Dessa forma, devido a maior geração de H_2O_2 , a condição de 3 A foi selecionada para os ensaios subsequentes da degradação dos contaminantes, por meio da aplicação dos processos de eletro-geração *in situ* de H_2O_2 com e sem radiação UV-C.

Ao final do processo de degradação por eletro-geração *in situ* de H_2O_2 (Figura 3 – (a)), a degradação do ATN, PRED e SMX atinge $89,82\%$, $74,98\%$ e $82,95\%$, respectivamente. Enquanto que no processo do sistema combinado de H_2O_2 eletro-gerado *in situ* + UV-C (Figura 3 – (b)), houve uma degradação ainda maior dos multicontaminantes, especialmente da PRED, nos primeiros min do processo.

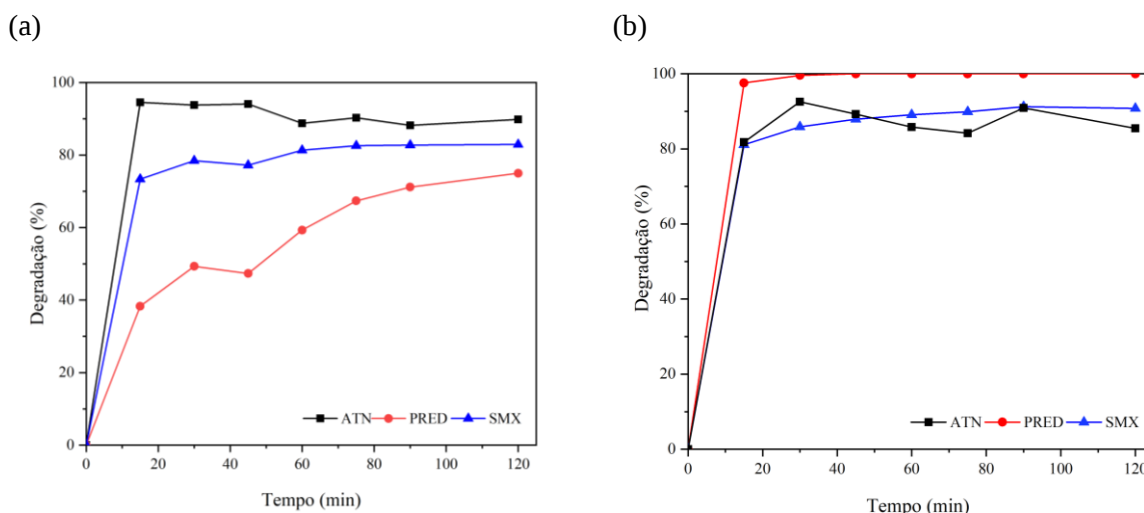
Ainda referente ao sistema combinado (Figura 3 – (b)), em 15 min de reação obteve-se uma degradação de $81,77\%$, $97,55\%$ e $81,10\%$ para ATN, PRED e SMX, respectivamente. Em 120 min a degradação da PRED e do SMX também foi maior quando comparado ao processo isolado. Isso pode estar associado a geração de $\text{HO}^\bullet$ e ao fato que a PRED e o SMX são compostos mais fotossensíveis.

Ao comparar os processos, o sistema combinado atingiu maior degradação dos três fármacos em estudo em um menor tempo, quando comparado ao processo isolado. No entanto, visando a aplicação em um sistema de tratamento de água faz-se necessário a investigação da degradação dos multicontaminantes em matriz real, tendo em vista que a sua complexidade pode influenciar na degradação (LIAO et al., 2022; OLIVEIRA et al., 2019). Além disso, a avaliação dos produtos de



transformação gerados durante o processo de degradação é importante e devem ser avaliados em testes de toxicidade e em equipamentos mais complexos como LC-MSMS.

Figura 3. Degradação dos fármacos (a) pelo sistema de H_2O_2 eletro-gerado *in situ* e (b) pelo processo combinado H_2O_2 eletro-gerado *in situ* e UV-C (Vazão de água de 50 L hora^{-1} , vazão de ar = 5 L min^{-1} , corrente elétrica aplicada: 3 A).



Por fim, ao analisar os resultados obtidos, torna-se evidente que os processos de H_2O_2 eletro-gerado *in situ* combinado com UV-C representam uma alternativa promissora de substituição ao processo convencional de produção de H_2O_2 para aplicação em sistemas de abastecimento de água. Dessa forma, tanto a produção *in situ* de H_2O_2 quanto a ausência de adição de produtos químicos para a realização dos tratamentos destacam-se como práticas sustentáveis, alinhadas aos critérios ambientais do ESG e economia circular.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que o processo de eletro-geração *in situ* de H_2O_2 é capaz de produzir concentrações suficientes do oxidante para degradação dos três produtos farmacêuticos em estudo. Além disso, o processo de produção limpa minimiza a utilização de reagentes químicos, por meio da utilização de um EDG e um eletrólito sólido. Dessa forma, o sistema proposto contribui com o compromisso sustentável das organizações com o meio ambiente, pois proporciona a economia circular dos insumos utilizados durante o processo.

Dentre as intensidades de corrente avaliadas, a corrente de 3 A foi a que proporcionou maior acúmulo de H_2O_2 . Ainda, a utilização do sistema combinado (eletro-geração *in situ* de H_2O_2 e UV-C) atingiu maior degradação em menor tempo de reação. Dessa forma, este estudo apresenta uma alternativa ambientalmente adequada para o tratamento avançado de água permitindo assim uma diminuição do impacto ambiental desses produtos na natureza e consequentemente aumentando a qualidade de vida da população.

Agradecimentos

Agradecemos a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e a Universidade Federal da Fronteira Sul (UFFS), campus Cerro Largo/RS.

Realização

ABES-RS

PUCRS

UFRGS
UNIVERSIDADE FEDERAL
DO RIO GRANDE DO SUL



abes-rs@abes-rs.org.br

(51) 999330700

www.abes-rs.org.br



REFERÊNCIAS

AGLADZE, G. R. et al. Comparative study of hydrogen peroxide electro-generation on gas-diffusion electrodes in undivided and membrane cells. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 37, n. 3, p. 375–383, 1 mar. 2007.

BLUM, K. M. et al. Non-target screening and prioritization of potentially persistent, bioaccumulating and toxic domestic wastewater contaminants and their removal in on-site and large-scale sewage treatment plants. **Science of The Total Environment**, v. 575, p. 265–275, 1 jan. 2017.

CHAITKIN, M. et al. Estimating the cost of achieving basic water, sanitation, hygiene, and waste management services in public health-care facilities in the 46 UN designated least-developed countries: a modelling study. **The Lancet Global Health**, v. 10, n. 6, p. e840–e849, 1 jun. 2022.

CIBATI, A. et al. Unravelling the performance of UV/H₂O₂ on the removal of pharmaceuticals in real industrial, hospital, grey and urban wastewaters. **Chemosphere**, v. 290, p. 133315, 1 mar. 2022.

CIRIMINNA, R. et al. Hydrogen Peroxide: A Key Chemical for Today's Sustainable Development. **ChemSusChem**, v. 9, n. 24, p. 3374–3381, 2016.

CLARA DE OLIVEIRA LEITE, M. et al. A comparison of Brazilian, North American, and English water supply regulation models. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 18, p. 100748, 1 ago. 2022.

CORDEIRO-JUNIOR, P. J. M.; LANZA, M. R. DE V.; RODRIGO, M. A. R. Modeling the electrosynthesis of H₂O₂: Understanding the role of predatory species. **Chemical Engineering Science**, p. 118647, 18 mar. 2023.

CUI, L. et al. Energy efficiency improvement on in situ generating H₂O₂ in a double-compartment ceramic membrane flow reactor using cerium oxide modified graphite felt cathode. **Chemical Engineering Journal**, v. 330, p. 1316–1325, 15 dez. 2017.

DA SILVA, S. W. et al. Electrochemical advanced oxidation of Atenolol at Nb/BDD thin film anode. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 844, p. 27–33, 1 jul. 2019.

DONG, M. M.; TRENHOLM, R.; ROSARIO-ORTIZ, F. L. Photochemical degradation of atenolol, carbamazepine, meprobamate, phenytoin and primidone in wastewater effluents. **Journal of Hazardous Materials**, Advances in Analysis, Treatment Technologies, and Environmental Fate of Emerging Contaminants. v. 282, p. 216–223, 23 jan. 2015.

FELIS, E. et al. Antimicrobial pharmaceuticals in the aquatic environment - occurrence and environmental implications. **European Journal of Pharmacology**, v. 866, p. 172813, 5 jan. 2020.

GONZÁLEZ-GONZÁLEZ, R. B. et al. Persistence, environmental hazards, and mitigation of pharmaceutically active residual contaminants from water matrices. **Science of The Total Environment**, v. 821, p. 153329, 15 maio 2022.

GRANDCLÉMENT, C. et al. From the conventional biological wastewater treatment to hybrid processes, the evaluation of organic micropollutant removal: A review. **Water Research**, v. 111, p. 297–317, 15 mar. 2017.



HEJAZI, S. A.; TAGHIPOUR, F. Polytetrafluoroethylene-based gas diffusion electrode for electrochemical generation of hydrogen peroxide. **Electrochimica Acta**, v. 439, p. 141695, 20 jan. 2023.

HOLLMAN, J. et al. Application-Scale Parametric Evaluation of Ultraviolet Photolysis (UV) and UV/H₂O₂ for the Degradation of Neutral Pharmaceuticals in Municipal Wastewaters. **Journal of Environmental Engineering**, v. 147, n. 12, p. 04021061, 1 dez. 2021.

JAIN, N.; YEVATIKAR, R.; RAXAMWAR, T. S. Comparative study of physico-chemical parameters and water quality index of river. **Materials Today: Proceedings**, 25 out. 2021.

Ji, X. et al. Sustainable direct H₂O₂ synthesis over Pd catalyst supported on mesoporous carbon: The effect of surface nitrogen functionality. **Catalysis Today**, The 9th East Asia Joint Symposium on Environmental Catalysis and Eco-materials. v. 376, p. 1–8, 15 set. 2021.

KOLPIN, D. W. et al. Pharmaceuticals, Hormones, and Other Organic Wastewater Contaminants in U.S. Streams, 1999–2000: A National Reconnaissance. **Environmental Science & Technology**, v. 36, n. 6, p. 1202–1211, 1 mar. 2002.

KOVALAKOVA, P. et al. Occurrence and toxicity of antibiotics in the aquatic environment: A review. **Chemosphere**, v. 251, p. 126351, 1 jul. 2020.

KRISHNAN, R. Y. et al. Removal of emerging micropollutants originating from pharmaceuticals and personal care products (PPCPs) in water and wastewater by advanced oxidation processes: A review. **Environmental Technology & Innovation**, v. 23, p. 101757, 1 ago. 2021.

LIAO, W. et al. Non-radicals dominated degradation of sulfamethoxazole by a chemical-less microwave enhanced photolysis process. **Journal of Water Process Engineering**, v. 48, p. 102854, 1 ago. 2022.

MARTÍNEZ-HUITLE, C. A. et al. Single and Coupled Electrochemical Processes and Reactors for the Abatement of Organic Water Pollutants: A Critical Review. **Chemical Reviews**, v. 115, n. 24, p. 13362–13407, 23 dez. 2015.

MIKLOS, D. B. et al. UV/H₂O₂ process stability and pilot-scale validation for trace organic chemical removal from wastewater treatment plant effluents. **Water Research**, v. 136, p. 169–179, 1 jun. 2018.

MOREIRA, F. C. et al. Degradation of the antibiotic trimethoprim by electrochemical advanced oxidation processes using a carbon-PTFE air-diffusion cathode and a boron-doped diamond or platinum anode. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 160–161, p. 492–505, 1 nov. 2014.

OLIVEIRA, C. et al. Photodegradation of sulfamethoxazole in environmental samples: The role of pH, organic matter and salinity. **Science of The Total Environment**, v. 648, p. 1403–1410, 15 jan. 2019.

PAI, C.-W.; WANG, G.-S. Treatment of PPCPs and disinfection by-product formation in drinking water through advanced oxidation processes: Comparison of UV, UV/Chlorine, and UV/H₂O₂. **Chemosphere**, v. 287, p. 132171, 1 jan. 2022.

PERIN, M. et al. Pharmaceuticals, pesticides and metals/metalloids in Lake Guaíba in Southern Brazil: Spatial and temporal evaluation and a chemometrics approach. **Science of The Total Environment**, v. 793, p. 148561, 1 nov. 2021.

PERRY, S. C. et al. Electrochemical synthesis of hydrogen peroxide from water and oxygen. **Nature Reviews Chemistry**, v. 3, n. 7, p. 442–458, jul. 2019.



REIS, E. O. et al. Occurrence, removal and seasonal variation of pharmaceuticals in Brazilian drinking water treatment plants. **Environmental Pollution**, v. 250, p. 773–781, 1 jul. 2019.

REIS, R. M. et al. Use of Gas Diffusion Electrode for the In Situ Generation of Hydrogen Peroxide in an Electrochemical Flow-By Reactor. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 51, n. 2, p. 649–654, 18 jan. 2012.

SALES MONTEIRO, M. K. et al. Electrochemical Production of Hydrogen Peroxide in Perchloric Acid Supporting Electrolytes for the Synthesis of Chlorine Dioxide. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 61, n. 9, p. 3263–3271, 9 mar. 2022.

SALMERÓN, I. et al. Optimization of electrocatalytic H_2O_2 production at pilot plant scale for solar-assisted water treatment. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 242, p. 327–336, 1 mar. 2019.

SALMERÓN, I. et al. Carbon-based cathodes degradation during electro-Fenton treatment at pilot scale: Changes in H_2O_2 electrogeneration. **Chemosphere**, v. 275, p. 129962, 1 jul. 2021.

SANTOS, A. V. et al. Occurrence and risk assessment of pharmaceutically active compounds in water supply systems in Brazil. **Science of The Total Environment**, v. 746, p. 141011, 1 dez. 2020.

SEIBERT, D. et al. Occurrence, statutory guideline values and removal of contaminants of emerging concern by Electrochemical Advanced Oxidation Processes: A review. **Science of The Total Environment**, v. 748, p. 141527, 15 dez. 2020.

SIAHROSTAMI, S. et al. A Review on Challenges and Successes in Atomic-Scale Design of Catalysts for Electrochemical Synthesis of Hydrogen Peroxide. **ACS Catalysis**, v. 10, n. 14, p. 7495–7511, 17 jul. 2020.

SNIS. **SNIS - PAINEL DE INFORMAÇÕES SOBRE SANEAMENTO**. Disponível em: <<http://www.snis.gov.br/painel-informacoes-saneamento-brasil/web/painel-abastecimento-agua>>. Acesso em: 19 maio. 2022.

SODRÉ, F. F.; DUTRA, P. M.; SANTOS, V. P. DOS. Pharmaceuticals and personal care products as emerging micropollutants in Brazilian surface waters: a preliminary snapshot on environmental contamination and risks. **Eclética Química Journal**, v. 43, n. 1SI, p. 22–34, 28 jun. 2018.

VALBONESI, P. et al. Contaminants of emerging concern in drinking water: Quality assessment by combining chemical and biological analysis. **Science of The Total Environment**, v. 758, p. 143624, 1 mar. 2021.

VELTRI, S. et al. Do ESG factors improve utilities corporate efficiency and reduce the risk perceived by credit lending institutions? An empirical analysis. **Utilities Policy**, v. 81, p. 101520, 1 abr. 2023.

WALTER, I. Sense and Nonsense in ESG Ratings. **Sense and Nonsense in ESG Ratings**, n. 2, p. 307–336, 11 nov. 2020.

WANG, Y. et al. Selective electrochemical H_2O_2 generation on the graphene aerogel for efficient electro-Fenton degradation of ciprofloxacin. **Separation and Purification Technology**, v. 272, p. 118884, 1 out. 2021.

WOLF, J. et al. A Faecal Contamination Index for interpreting heterogeneous diarrhoea impacts of water, sanitation and hygiene interventions and overall, regional and country estimates of community



sanitation coverage with a focus on low- and middle-income countries. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 222, n. 2, p. 270–282, 1 mar. 2019.

XIA, C. et al. Direct electrosynthesis of pure aqueous H_2O_2 solutions up to 20% by weight using a solid electrolyte. **Science**, v. 366, n. 6462, p. 226–231, 11 out. 2019.

YANG, S. et al. Toward the Decentralized Electrochemical Production of H_2O_2 : A Focus on the Catalysis. **ACS Catalysis**, v. 8, n. 5, p. 4064–4081, 4 maio 2018.

YANG, Y. et al. Degradation of sulfamethoxazole by UV, UV/ H_2O_2 and UV/persulfate (PDS): Formation of oxidation products and effect of bicarbonate. **Water Research**, v. 118, p. 196–207, 1 jul. 2017.

ZHANG, X. et al. Insights into Practical-Scale Electrochemical H_2O_2 Synthesis. **Trends in Chemistry**, v. 2, n. 10, p. 942–953, 1 out. 2020.

ZHANG, Y. et al. H_2O_2 production at gas-diffusion cathodes made from agarose-derived carbons with different textural properties for acebutolol degradation in chloride media. **Journal of Hazardous Materials**, v. 423, p. 127005, 5 fev. 2022.

ZHAO, Y. et al. On-site H_2O_2 electro-generation process combined with ultraviolet: A promising approach for odorous compounds purification in drinking water system. **Chemical Engineering Journal**, v. 430, p. 132829, 15 fev. 2022.

ZHOU, W. et al. Efficient H_2O_2 electrogeneration at graphite felt modified via electrode polarity reversal: Utilization for organic pollutants degradation. **Chemical Engineering Journal**, v. 364, p. 428–439, 15 maio 2019a.

ZHOU, W. et al. Hydrogen peroxide generation from O_2 electroreduction for environmental remediation: A state-of-the-art review. **Chemosphere**, v. 225, p. 588–607, 1 jun. 2019b.

