

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

AVERIGUAÇÃO DO COMPORTAMENTO ESPECTRAL DE ESPÉCIES CLORO-ATIVAS GERADAS *IN SITU* POR ÂNODOS BASEADOS EM Ti/IrO₂-SnO₂-Ta₂O₅

Lucas Destefani Paquini, Lília Togneri Marconsini, Bruno Regis Lyrio Ferraz, Maria Eduarda de Souza Sacre, Luciene Paula Roberto Profeti, Josimar Ribeiro, Demetrius Profeti.

Universidade Federal do Espírito Santo, Avenida Fernando Ferrari, 29075-910 – Vitória-ES, Brasil,
lucasdestefanip@hotmail.com, lilia.marconsini@edu.ufes.br, bruno.ferraz@ufes.br,
maria.sacre@edu.ufes.br, luciene.profeti@ufes.br, josimar.ribeiro@ufes.br, demetrius.profeti@ufes.br

Resumo

A poluição dos recursos hídricos se constitui como uma problemática contundente aos dias atuais. Dessarte, o desenvolvimento de metodologias de tratamento de efluentes baseada em cloro-ativo se tornou uma alternativa viável e largamente utilizada. A geração de espécies cloro-ativas via eletrodos do tipo ADE se consolidou por exibir elevados parâmetros de eficiência e robustez frente ao tratamento de águas residuais. Especificadamente, no presente trabalho, investigou-se a aplicação de eletrodos baseados em Ti/IrO₂-SnO₂-Ta₂O₅, sob variadas proporções, frente a eletrogeração de cloro-ativo. Os estudos mostraram que eletrodos com a composição Ir/Sn/Ta 30:65:05 se mostram os mais eficientes e econômicos dentre as demais composições, com um consumo de energia específica de 0,453 kWh.m⁻³. Adicionalmente, verificou-se que o aumento no teor de Ta na amostra promoveu uma redução na eficiência de eletrogeração, comprovado pelos valores de absorvância de ClO⁻ mais atenuados na composição Ir/Sn/Ta 30:40:30. Assim, constatou-se que fatores estruturais da camada de óxidos mistos podem estar ligados ao comportamento eletroquímico geral constatado no estudo.

Palavras-chave: Efluentes. Cloro. ADE. Eficiência. Estrutura.

Área do Conhecimento: Ciências Exatas e da Terra - Química

Introdução

O desenvolvimento de metodologias eficazes frente ao tratamento de efluentes líquidos se consolidou como uma importante demanda para os dias atuais (PAQUINI *et al.*, 2023). Com efeito, diversos ramos da sociedade têm se mobilizado com o intuito de propor soluções viáveis e eficientes para a eliminação de poluentes orgânicos persistentes (POPs) presentes em despejos domésticos e industriais. Nesse sentido, os POPs são caracterizados não apenas pela sua natureza recalcitrante, mas também por serem espécies carcinogênicas, teratogênicas, biomagnificantes e de regulamentação limitada perante às leis vigentes (NIDHEESH, 2018; PANT; ADHOLEYA, 2007). A principal razão para essa limitação está nos seus efeitos ecotoxicológicos e comportamentais, os quais não são muito bem esclarecidos dentre a comunidade científica (MARTÍNEZ-SÁNCHEZ; ROBLES; GODÍNEZ, 2022). De acordo com Alharbi *et al.* (2018) a presença de POPs em efluentes industriais compõem uma carga total de cerca de 65% do efluente despejado.

Dentre as diversas possibilidades empregadas no tratamento de efluentes contaminados por POPs, a utilização de agentes de elevado poder oxidante como, por exemplo, espécies cloro-ativas, têm ganhado destaque pela simplicidade, ampla utilização nas estações de tratamento de água (ETAs), disponibilidade e eficiência de conversão de moléculas à espécies mais biodegradáveis (LUNA-TRUJILLO *et al.*, 2020). No que concerne ao tratamento de águas residuárias, quando uma determinada quantidade de cloro é adicionada ao corpo aquoso, uma parte dessa adição reage com certas substâncias orgânicas e inorgânicas, enquanto que outra parte torna-se remanescente na água e passa a ser chamada de cloro residual, podendo ser expresso em mg.L⁻¹ ou ppm. De acordo com a Legislação Brasileira, a concentração final de cloro residual na água potável não pode ultrapassar, em média, 1,5 ppm para o consumidor final (BRASIL, 2004). Partido desse pressuposto, embora a aplicação de espécies cloro-ativas seja eficiente frente a uma gama de poluentes, a formação de intermediários de reação se torna uma problemática contundente e já vem sendo extensivamente reportada na literatura corrente, como em Lee *et al.* (2016), Coledam *et al.* (2018) e Xie (2003). Diante disso, considerações relacionadas aos fatores operacionais de sistemas de

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

tratamento que empregam cloro-ativo ainda são material de estudo para se alcançar otimizações necessárias. Segundo Xu *et al.* (2022) o principal intuito em conduzir estudos acerca dessa temática está na proteção da saúde pública por meio de dois caminhos viáveis (i) a inativação de patógenos e (ii) fornecimento de uma margem segura e aceitável para a formação de intermediários organoclorados.

A produção eletrolítica de cloro-ativo a partir de íons cloreto é uma das reações eletroquímicas industriais mais importantes e é amplamente utilizada para a desinfecção de água potável (CAÑIZARES *et al.*, 2006; COMMINELLIS, 1994). A reação de desprendimento de cloro (RDCI) pode ser promovida por meio de uma enorme variedade de materiais anódicos. Contudo, as melhores propriedades eletrocatalíticas para a RDCI são encontradas em ânodos ativos (e.g., Pt, RuO₂ e IrO₂), os quais são capazes de converter, de maneira efetiva, os íons cloreto a cloro molecular (BONFATTI *et al.*, 2000a; FERRO *et al.*, 2014; GARCIA-SEGURA; OCON; CHONG, 2018a; ROSESTOLATO; BATTAGLIN; FERRO, 2014). De modo geral, o termo cloro-ativo é utilizado para se referir a todas espécies de cloro possíveis em água, a saber, ácido hipocloroso (HOCl), hipoclorito (OCl⁻) e cloro molecular (Cl₂). Todas essas espécies são consideradas ótimos agentes oxidantes frente a diferentes POPs.

Em sistemas sob baixas concentrações de íons cloreto, reações paralelas à RDCI podem vir a ocorrer, como é o caso das reações de desprendimento de oxigênio (RDO), as quais causam uma perda de eficiência faradaica ao processo eletroquímico. Como forma de se contornar essa limitação, o emprego de eletrodos do tipo Ânodo Dimensionalmente Estável (ADE) se tornou uma opção viável. Esses eletrodos são constituídos por um suporte metálico, geralmente de titânio (Ti) ou tântalo (Ta), revestido por óxidos metálicos eletronicamente condutores ou semicondutores como, por exemplo, TiO₂, IrO₂, SnO₂, SbO₂, Ta₂O₅, RuO₂ ou PbO_x. Em termos de suas propriedades, os ADEs promovem boa atividade catalítica, estabilidade térmica e química sob elevados sobrepotenciais e alta eficiência de corrente para RDCI, mesmo que em baixas concentrações de Cl⁻ (PROFETI; PROFETI; OLIVI, 2009; SAXENA; RUPARELIA, 2019; TITCHOU *et al.*, 2021; ZAZOU *et al.*, 2019). Diante do exposto, o presente trabalho se ampara na averiguação de eletrodos do tipo ADE, na composição Ti/IrO₂-SnO₂-Ta₂O₅, frente ao comportamento espectral de espécies cloro-ativas eletrogeradas *in situ* no sistema eletroquímico.

Metodologia

Os ensaios eletroquímicos foram desenvolvidos empregando um potenciostato/galvanostato Autolab PGSTAT 128N (Metrohm Autolab B.V., Utrecht, and The Netherlands), uma célula eletroquímica de vidro composta por um eletrodo de trabalho do tipo ADE com a configuração Ti/IrO₂-SnO₂-Ta₂O₅ (variando-se as composições dos óxidos mistos de Ir/Sn/Ta em 30:65:05; 30:60:10; 30:50:20 e 30:40:30), uma placa de platina como contra-eletrodo e um eletrodo de Ag/AgCl_{sat} como referência. A solução de eletrólito (NaCl) empregada para a promoção da RDCI apresentou uma concentração de 0,1 mol.L⁻¹ e pH = 5,0. Todos os reagentes usados foram de grau analítico e a água ultrapura empregada foi obtida pelo sistema de purificação Mili Q[®].

A técnica de cronopotenciometria foi empregada nos ensaios de eletrogeração, aplicando-se um valor fixo de corrente de 5,0 mA durante 5900 s a uma temperatura de 25 °C e sob agitação magnética vigorosa. Alíquotas da solução eletrolisada foram retiradas em tempos pré-estabelecidos (60 s – 5900 s) e analisadas utilizando um espectrofotômetro de absorção no UV-Vis (Thermo Scientific™ GENESYS™ 10S). As análises espectroscópicas envolveram o método de varredura de comprimento de onda, compreendendo uma faixa de 200 nm a 720 nm. A estimativa do consumo de energia específica por volume (CEE) relacionados ao processo de eletrogeração de espécies cloro-ativas pôde ser estimada a partir da Equação 01.

$$CEE(\%) = \frac{V_{it}}{v} \quad (1)$$

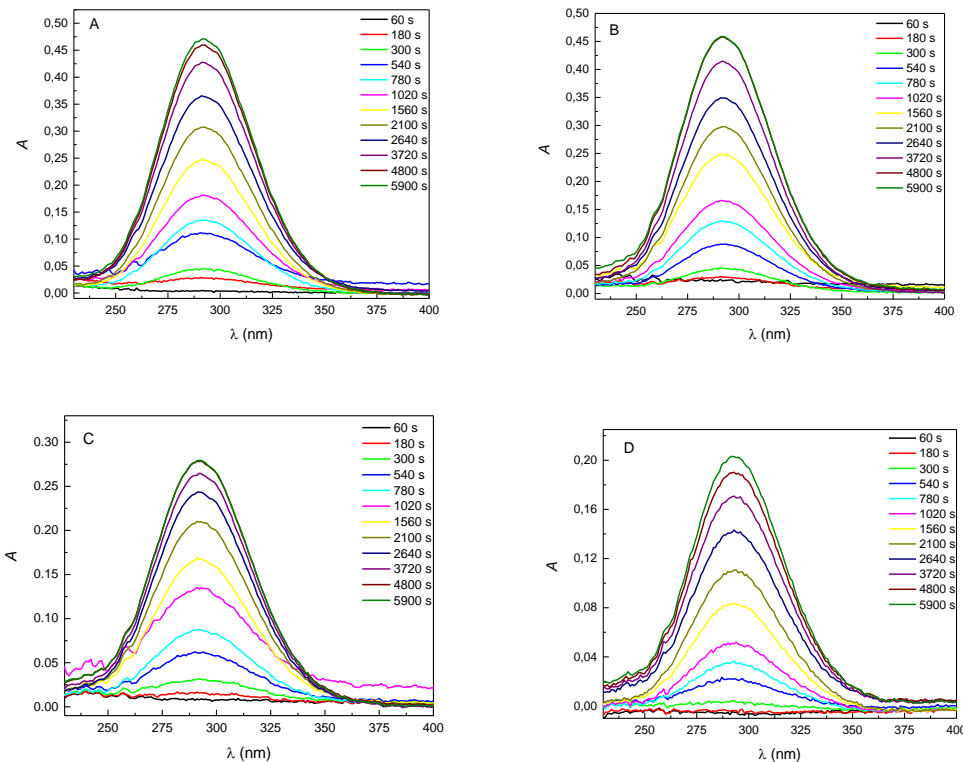
Em que V corresponde ao potencial (V), i a corrente elétrica (A), t é o tempo em segundos e v corresponde ao volume de solução eletrolisada (m³).

Resultados

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Diante da metodologia elucidada, verifica-se que o entendimento acerca do comportamento espectral se torna útil para que o efeito da extensão da reação seja melhor compreendido. Desse modo, para a eletrogeração de espécies cloro-ativas, análises espectroscópicas na região do UV-Vis foram conduzidas, originando os perfis espectrais destacados pela Figura 01.

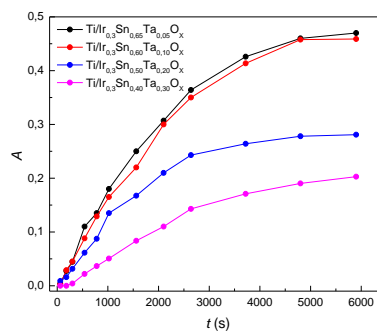
Figura 01 – Perfis espectrais oriundos da análise por UV-Vis das soluções de NaCl eletrolisadas por eletrodos do tipo ADE nas composições Ir/Sn/Ta (A) 30:65:05; (B) 30:60:10; (C) 30:50:20 e (D) 30:40:30. Condições operacionais: j : 2,5 mA cm⁻²; C_{NaCl}: 0,1 M; T = 25°C; pH = 5,0; $\Delta\lambda$ = 200 nm – 400 nm



Fonte: Os autores (2023)

Ademais, o comportamento espectral pode ser elucidado de outro modo, permitindo estimar os possíveis estágios de eletrogeração, conforme demonstra a Figura 02.

Figura 02 – Sobreposições relacionadas a absorvância máxima de hipoclorito (ClO⁻) eletrogerado contra tempo de eletrolise. Condições operacionais: j : 2,5 mA cm⁻²; C_{NaCl}: 0,1 M; T = 25°C; pH = 5,0; $\Delta\lambda$ = 200 nm – 400 nm

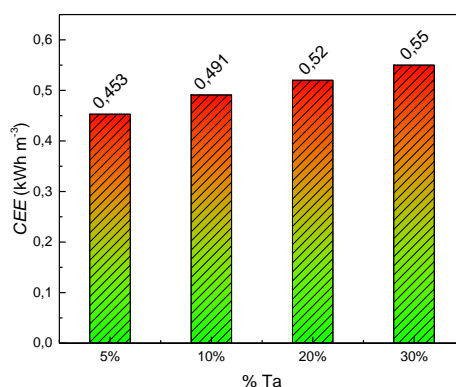


Fonte: Os autores (2023)

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

Um último parâmetro investigado no presente estudo foi o consumo de energia específica (CEE). A Figura 03 destaca os valores de CEE em função da percentagem de Ta nos eletrodos investigados.

Figura 03 – Perfil relacionado ao consumo de energia específica para os ADEs sob diferentes composições. Condições operacionais: j : 2,5 mA cm⁻²; C_{NaCl}: 0,1 M; T = 25°C; pH = 5,0; $\Delta\lambda$ = 200 nm – 400 nm



Fonte: Os autores (2023).

Discussão

A partir dos espectros apresentados, verifica-se que à medida que o tempo de eletrolise se perfaz, o pico de absorção máxima, localizado em $\lambda = 293$ nm (XIONG *et al.*, 2016), tende a aumentar consideravelmente a partir de 180 s, para todas as composições investigadas. Entretanto, o regime de aumento dos valores de absorbância se diferencia à medida que a proporção atômica de Tântalo varia nos eletrodos. Percebe-se que a eletrogeração de espécies cloro-ativas se torna limitada para a composição Ir/Sn/Ta 30:40:30, enquanto que para a composição Ir/Sn/Ta 30:65:05 o processo ocorre com maior eficiência, visto os valores de absorbância mais proeminentes. Sabendo-se que os valores de absorbância obtidos estão dentro da faixa linear para a Lei de Beer-Lambert, pode-se inferir que a concentração de espécies cloro-ativas segue a mesma tendência observada para a absorbância e, portanto, o eletrodo Ir/Sn/Ta 30:65:05 apresenta melhores características frente a RDCl (GARCIA-SEGURA; OCON; CHONG, 2018; XIONG *et al.*, 2016).

Percebe-se com a Figura 02 que o processo de promoção da RDCl foi, de fato, distinto em cada eletrodo averiguado. Com isso, torna-se possível validar que os eletrodos Ir/Sn/Ta 30:65:05 e Ir/Sn/Ta 30:60:10 se aproximaram em termos de eficiência de eletrogeração, dentro da faixa linear investigada. Em complementariedade, as curvas exibem duas regiões bem pronunciadas, sendo: (i) aumento gradual dos valores de A com o tempo de procedimento e; (ii) estabilização da curva/plateau em um tempo aproximado de 2640 s para Ir/Sn/Ta 30:50:20 e 30:40:30, enquanto para as composições Ir/Sn/Ta 30:65:05 e 30:60:10 esse tempo foi de 4800 s. Essa estabilização nos valores de A sugere que o sistema possivelmente atingiu o estágio de equilíbrio e que a velocidade de geração de cloro e depleção/desprendimento a partir da solução se tornaram iguais (SEERY; BRITTON, 1964; TAŞTAN; DOLLINGER; ZIEGENBALG, 2018). Por fim, confirma-se que o aumento da proporção atômica de Ta nos ADEs investigados causou uma redução gradual na eletrogeração, justificado pela atenuação dos valores de A, como também visto anteriormente nos espectros. A saber, o eletrodo Ir/Sn/Ta 30:65:05 promoveu a formação de hipoclorito sob concentração cerca de 3,8 vezes maior que o eletrodo 30:40:30, considerando a faixa linear. Em termos do mecanismo da RDCl em eletrodos do tipo ADE, autores como Cañizares *et al.* (2006), Garcia-Segura, Ocon e Chong (2018), Oliveira *et al.* (2007) e Bonfatti *et al.* (2000) propõem, de modo geral, que as etapas apresentadas de (1) e (4) são as envolvidas no processo de eletrogeração de mediadores oxidantes baseados em cloro-ativo:



A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições



De acordo com Cañizares *et al.* (2006), uma primeira etapa no procedimento eletroquímico consiste na redução (Reação 1) da água no eletrodo catódico; enquanto que no anodo o processo de eletrogeração de cloro molecular (Equação 2) passa a ocorrer de maneira efetiva. De acordo com Soni *et al.* (2020), sob condições de pH ácido, o cloro molecular presente no seio da solução irá formar ácido hipocloroso, assim como apresentado na Equação 3, o qual é um potente agente oxidante e também é responsável por estabilizar o pH do meio na faixa de 3 – 8. Por outro lado, em condições alcalinas ou neutras, a depleção de HOCl segue de acordo com a Equação 4. Nessas circunstâncias, haverá a formação dos íons hipoclorito, os quais também funcionam como ótimos oxidantes, atuando prontamente na oxidação de POPs.

No que concerne a influência da estrutura da camada de óxidos sobre a eficiência da RDCI, o efeito de dispersão de Ir promovido pelos óxidos de Estanho SnO₂ pode ser a chave para se compreender a perda de eficiência dos ADEs com o aumento da %Ta. De acordo com Luna-Trujillo *et al.* (2020), o efeito promovido pela dispersão garante ao material anódico maior área eletroquimicamente ativa (AEA) o que por sua vez também favorece a ocorrência da RDCI. Quando a proporção de Ta é aumentada em vista da redução de Sn, a dispersão de Ir pode ficar comprometida, consequentemente reduzindo a AEA apta para a ocorrência de processos Faradaicos. Além desses aspectos, o trabalho desenvolvido por Ribeiro e De Andrade (2006) fornece indícios para se compreender o comportamento de formação dos óxidos de Ta (Ta₂O₅) nos ADEs. De acordo com os autores, a formação da estrutura de Ta₂O₅ ocorre preferencialmente sob condições de temperaturas entre 750 °C a 800 °C; condições as quais os eletrodos não foram submetidos, o que por consequência pode contribuir para a redução da homogeneidade na camada de óxidos mistos dos eletrodos. Isto pode contribuir para a redução dos parâmetros de eficiência frente a RDCI.

A partir da Figura 03, verifica-se que o consumo de energia específica dos ADEs durante a RDCI se apresentou muito próximo entre as composições estudadas. Dessarte, nota-se que um aumento na percentagem de Ta na amostra promoveu aumentos sutis nos valores de consumo energético, indo de 0,453 kWh.m⁻³ para a composição Ir/Sn/Ta 30:65:05 até 0,550 kWh.m⁻³ para a composição Ir/Sn/Ta 30:40:30. A magnitude dos valores encontrados está em concordância com estudos que aplicaram a RDCI para promoção de processos de degradação de corantes como, por exemplo, em Baddouh *et al.* (2018).

Conclusão

Diante do exposto, constata-se que os processos de purificação de efluentes contaminados por elevadas cargas de POPs se tornaram uma necessidade na atualidade. Partindo desse pressuposto, a utilização de sistemas que empregam espécies cloro-ativas na remoção é uma opção viável e de elevada eficiência na mitigação de patógenos. Com efeito, no presente estudo, a investigação acerca de eletrodos do tipo ADE frente a promoção da RDCI evidenciou que eletrodos com a composição Ir/Sn/Ta 30:65:05 se apresentaram eficientes e econômicos, energeticamente, durante a geração de espécies cloro-ativas. Por outro lado, o aumento no teor de Ta nos ADEs levou a uma redução geral nos valores de absorvância, para mesmo intervalo de eletrólise, e a um aumento nos valores de CEE. Em suma, conclui-se com a presente investigação que fatores estruturais acerca do comportamento da camada de óxidos mistos exercem grande influência sobre o comportamento geral da RDCI.

Referências

- ALHARBI, O. M. L. *et al.* Health and environmental effects of persistent organic pollutants. **Journal of Molecular Liquids**, v. 263, p. 442–453, ago. 2018.
- BADDOUH, A. *et al.* Electrochemical decolorization of Rhodamine B dye: Influence of anode material, chloride concentration and current density. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 6, n. 2, p. 2041–2047, abr. 2018.
- BONFATTI, F. *et al.* Anodic mineralization of organic substrates in chloride-containing aqueous media. **Electrochimica Acta**, v. 46, n. 2–3, p. 305–314, 2000a.
- BONFATTI, F. *et al.* Electrochemical Incineration of Glucose as a Model Organic Substrate. II. Role of Active Chlorine Mediation. **Journal of The Electrochemical Society**, v. 147, n. 2, p. 592, 2000b.

A era digital e suas implicações sociais: Desafios e contribuições

- CAÑIZARES, P. *et al.* Measurement of Mass-Transfer Coefficients by an Electrochemical Technique. **Journal of Chemical Education**, v. 83, n. 8, p. 1204, 1 ago. 2006.
- COLEDAM, D. A. C. *et al.* On the performance of HOCl/Fe²⁺, HOCl/Fe²⁺/UVA, and HOCl/UVC processes using in situ electrogenerated active chlorine to mineralize the herbicide picloram. **Applied Catalysis B: Environmental**, v. 227, p. 170–177, 2018.
- COMNINELLIS, C. Electrocatalysis in the electrochemical conversion/combustion of organic pollutants for waste water treatment. **Electrochimica Acta**, v. 39, n. 11–12, p. 1857–1862, ago. 1994.
- FERRO, S. *et al.* On the oxygen evolution reaction at IrO₂-SnO₂ mixed-oxide electrodes. **Electrochimica Acta**, v. 146, p. 257–261, 2014.
- GARCIA-SEGURA, S.; OCON, J. D.; CHONG, M. N. Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents — A review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 113, p. 48–67, jan. 2018a.
- GARCIA-SEGURA, S.; OCON, J. D.; CHONG, M. N. Electrochemical oxidation remediation of real wastewater effluents — A review. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 113, p. 48–67, jan. 2018b.
- LEE, Y. *et al.* Organic Contaminant Abatement in Reclaimed Water by UV/H₂O₂ and a Combined Process Consisting of O₃/H₂O₂ Followed by UV/H₂O₂: Prediction of Abatement Efficiency, Energy Consumption, and Byproduct Formation. **Environmental Science & Technology**, v. 50, n. 7, p. 3809–3819, 5 abr. 2016.
- LUNA-TRUJILLO, M. *et al.* Formation of active chlorine species involving the higher oxide MO_{x+1} on active Ti/RuO₂-IrO₂ anodes: A DEMS analysis. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 878, p. 114661, dez. 2020.
- MARTÍNEZ-SÁNCHEZ, C.; ROBLES, I.; GODÍNEZ, L. A. Review of recent developments in electrochemical advanced oxidation processes: application to remove dyes, pharmaceuticals, and pesticides. **International Journal of Environmental Science and Technology**, 6 jan. 2022.
- NIDHEESH, P. V. Removal of organic pollutants by peroxicoagulation. **Environmental Chemistry Letters**, v. 16, n. 4, p. 1283–1292, 23 dez. 2018.
- OLIVEIRA, F. H. *et al.* Electrochemical oxidation of an acid dye by active chlorine generated using Ti/Sn(1-x)Ir_xO₂ electrodes. **Journal of Applied Electrochemistry**, v. 37, n. 5, p. 583–592, 7 maio 2007.
- PANT, D.; ADHOLEYA, A. Biological approaches for treatment of distillery wastewater: A review. **Bioresource Technology**, v. 98, n. 12, p. 2321–2334, set. 2007.
- PAQUINI, L. D. *et al.* An overview of electrochemical advanced oxidation processes applied for the removal of azo-dyes. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v. 40, n. 1, 30 jan. 2023.
- PROFETI, L. P. R.; PROFETI, D.; OLIVI, P. Pt–RuO₂ electrodes prepared by thermal decomposition of polymeric precursors as catalysts for direct methanol fuel cell applications. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 34, n. 6, p. 2747–2757, mar. 2009.
- RIBEIRO, J.; DE ANDRADE, A. R. Investigation of the electrical properties, charging process, and passivation of RuO₂-Ta₂O₅ oxide films. **Journal of Electroanalytical Chemistry**, v. 592, n. 2, p. 153–162, jul. 2006.
- ROSESTOLATO, D.; BATTAGLIN, G.; FERRO, S. Electrochemical properties of stoichiometric RuN film prepared by rf-magnetron sputtering: A preliminary study. **Electrochemistry communications**, v. 49, p. 9–13, 2014.
- SAXENA, P.; RUPARELIA, J. Influence of Supporting Electrolytes on Electrochemical Treatability of Reactive Black 5 Using Dimensionally Stable Anode. **Journal of The Institution of Engineers (India): Series A**, v. 100, n. 2, p. 299–310, 16 jun. 2019.
- SEERY, D. J.; BRITTON, D. The continuous absorption spectra of chlorine, bromine, bromine chloride, iodine chloride, and iodine bromide. **The Journal of Physical Chemistry**, v. 68, n. 8, p. 2263–2266, 1964.
- SONI, B. D. *et al.* Electrochemical destruction of RB5 on Ti/PtO_x-RuO₂-SnO₂-Sb₂O₅ electrodes: a comparison of two methods for electrode preparation. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 17, n. 2, p. 903–916, 14 fev. 2020.
- TAŞTAN, Ü.; DOLLINGER, J.; ZIEGENBALG, D. Measurement of UV/VIS-absorption spectra of photochemically active solutions in continuous flow. **Flow Measurement and Instrumentation**, v. 59, p. 211–214, mar. 2018.
- TITCHOU, F. E. *et al.* An overview on the elimination of organic contaminants from aqueous systems using electrochemical advanced oxidation processes. **Journal of Water Process Engineering**, v. 41, n. April, p. 102040, jun. 2021.
- XIE, Y. **Disinfection byproducts in drinking water: Formation, analysis, and control**. [s.l.] CRC press, 2003.
- XIONG, K. *et al.* The detection for hypochlorite by UV-Vis and fluorescent spectra based on oxidized ring opening and successive hydrolysis reaction. **Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy**, v. 166, p. 79–83, set. 2016.
- XU, H. *et al.* Minimizing toxic chlorinated byproducts during electrochemical oxidation of Ni-EDTA: Importance of active chlorine-triggered Fe(II) transition to Fe(IV). **Water Research**, v. 219, p. 118548, jul. 2022.
- ZAZOU, H. *et al.* Cold incineration of 1,2-dichlorobenzene in aqueous solution by electrochemical advanced oxidation using DSA/Carbon felt, Pt/Carbon felt and BDD/Carbon felt cells. **Separation and Purification Technology**, v. 208, p. 184–193, jan. 2019.

Agradecimentos

Agradecemos à Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), a CAPES, FAPES e ao CNPq.