

TRATAMENTO DA ÁGUA DE PRODUÇÃO UTILIZANDO A ADSORÇÃO ASSISTIDA POR FLOCULAÇÃO IÔNICA.

Mariana M. Mendonça¹, Carlos D. R. da Silva², Manoel R. Fernandes³, Ricardo F. Melo⁴

Resumo: A água de produção é um efluente gerado na exploração do petróleo e caracterizado como poluidor, devido às altas concentrações de algumas substâncias tóxicas. Nesse contexto, o presente trabalho avalia o tratamento de uma água produzida sintética - solução de fenol - utilizando a adsorção assistida pela floculação iônica. Dessa forma, utiliza-se um tensoativo (produção própria), a base de ácido palmítico, e carvão ativado para a formação dos flocos com caráter hidrofóbico que permitem a adsorção dos compostos orgânicos em sua superfície. Durante a pesquisa, estudou-se a influência no sistema de parâmetros como: tempo de contato (cinética), concentração do carvão ativado e efeito do pH. Com os resultados obtidos, nota-se a maior eficiência de remoção em 99%, utilizando 0,3 g de carvão ativado, 0,25 g de tensoativo e 0,125 g de cloreto de cálcio, para tratamento de uma solução com 100 ppm de fenol. Após os testes, observa-se que a concentração de carvão ativado, até 0,3 g, influencia diretamente no tempo de contato das amostras, bem como na sua eficiência de remoção e, quando superior a essa quantidade, não há aumento significativo na remoção.

Palavras-chave: Adsorção, Água de produção, Carvão ativado, Tensoativo e Floculação iônica.

1. INTRODUÇÃO

A água de produção é um efluente gerado durante a exploração e a produção de petróleo, apresenta uma variedade de sedimentos, sais, materiais orgânicos, produtos químicos, metais pesados e, até hidrocarbonetos residuais [1]. Essa água, por possuir diversas substâncias dissolvidas, sendo algumas tóxicas, é caracterizada como poluidora. Por esse motivo, não é adequada para consumo humano ou para o descarte ao meio ambiente. Com isso, é notável a importância de uma boa gestão de tratamento antes de descartar o efluente.

A remoção de compostos orgânicos da água produzida é um dos principais desafios enfrentados pela indústria do petróleo, devido aos riscos relacionados ao descarte inadequado. Nesse sentido, de acordo com a literatura, diversas pesquisas estão sendo desenvolvidas atualmente, visando solucionar este problema, como a resina composta seguida de microfiltração [2], a coagulação/floculação [3,4], a tecnologia de membranas [5-8], o ultrassom [9], a coalescência fibrosa [10], os processos oxidativos avançados [11,12], o sistema bioeletroquímico [13], a remoção por aluminossilicatos [14], a eletrofloculação [15] e a adsorção [16-18]. Posto isso, uma das alternativas que apresenta potencial para tratamento da água produzida é a floculação iônica [19,20] em presença de carvão ativado.

Este processo consiste na produção de flocos com caráter hidrofóbico, formados por tensoativo e carvão, o que permite a adsorção [21,22] dos compostos orgânicos em sua superfície. A adição de carvão ativado ao sistema permite uma melhora na eficiência do processo e rápida sedimentação dos flocos. A matéria-prima para a produção do tensoativo usado na floculação iônica é proveniente de óleos vegetais, portanto uma fonte sustentável.

A presente pesquisa objetivou a avaliação do tratamento de uma água produzida sintética - solução de fenol - utilizando como método a adsorção em carvão ativado assistida pela floculação iônica. Para a avaliação da eficiência do processo, parâmetros como cinética, concentração do carvão ativado e do tensoativo foram avaliados neste estudo. Portanto, pretende-se com os resultados obtidos explorar soluções inovadoras e sustentáveis para o tratamento da água produzida. Dessa forma, pode-se garantir a redução dos possíveis impactos ambientais e sociais que seriam causados pelo descarte irregular, e avaliar o possível reuso da água de produção tratada.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Fundamentação teórica

2.1.1. Adsorção

A adsorção é uma propriedade físico-química das moléculas e caracteriza-se pela retenção de partículas em um determinado material. Para que esse processo ocorra, faz-se necessário a presença de um fluido na fase líquida ou gasosa (adsorvato), o qual interage com o material sólido (adsorvente) presente na solução. Desse modo, o adsorvato se retém na interface externa do adsorvente. Atualmente, a adsorção é altamente aplicada na indústria para o tratamento e remoção de componentes, como a recuperação de vitaminas contidas em mostos de fermentação, secagem de gases e, também, para a remoção de contaminantes em efluentes da indústria que são descartados diretamente ao meio ambiente [24]. Na utilização desse método, o tempo de contato, o pH e a interação do poluente com o adsorvente são fatores que podem afetar a aplicação deste método [29].

2.1.2. Floculação iônica

A floculação iônica é um processo de separação sólido-líquido que ocorre em uma solução que contém algum cátion de metal bivalente, como o cálcio, magnésio, entre outros. Sendo assim, há aglomeração das partículas que formam os flocos, retém o poluente em sua interface externa e facilitam a remoção [29-30]. Isso acontece por conta da interação do composto orgânico com a interface apolar. No caso deste estudo, foi auxiliada pela presença do tensoativo aniônico e os flocos formados (precipitados) foram removidos por filtração à vácuo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O adsorvente utilizado nesta metodologia foi o carvão ativado em pó. O tensoativo foi produzido com ácido palmítico e hidróxido de sódio. O composto orgânico escolhido foi o fenol, a partir disso foi feita a água produzida sintética - solução de fenol. Todos os experimentos de adsorção foram realizados na mesa agitadora orbital SL 180/A e a leitura da absorbância no espectrofotômetro digital IL-593-S-BI UV-VIS (273 nm foi o comprimento de onda utilizado para a leitura do fenol). Todos os experimentos foram realizados em duplicatas.

3.1. Produção do tensoativo

O tensoativo foi produzido com base de ácido palmítico ($C_{16}H_{32}O_2$) e hidróxido de sódio (NaOH), reação que forma o palmitato de sódio ($C_{16}H_{31}NaO_2$), agente de saponificação. Inicialmente, foi realizada a produção do palmitato de sódio com 5 g de ácido palmítico. Devido a proporção estequiométrica da reação, 1:1, utiliza-se 0,019 moles de ambas as substâncias, o que corresponde a 0,76 g do hidróxido de sódio, sendo adicionado 1,14 g para que o NaOH esteja em excesso de 50% e a reação ocorra totalmente. Após a pesagem, dissolve-se o NaOH em 100 mL de água destilada. O ácido palmítico foi dissolvido em 50 mL de etanol. Após isso, misturou-se as duas soluções em balão de fundo redondo e colocou-se em sistema de evaporação com refluxo monitorado por 2 horas. Após isso, coloca-se na estufa a 100°C para que toda a umidade seja evaporada.

3.2. Curva de calibração

Inicialmente, foi preparada uma solução de fenol (C_6H_5OH) 100 ppm. A pesagem foi realizada no interior da estufa por medidas de segurança. Em um becker, foi pesada a quantidade de fenol calculada e dissolvida com água destilada para obter a concentração no volume escolhido. Com os cálculos de diluição para 5, 20, 50 e 80 ppm e a solução inicial finalizada, realizou-se a obtenção das concentrações calculadas. Todas as leituras foram realizadas com o comprimento de onda de 273 nm e analisadas para a formação da curva de calibração. O gráfico foi plotado no excel e foi obtida a equação para o cálculo das concentrações das futuras soluções produzidas.

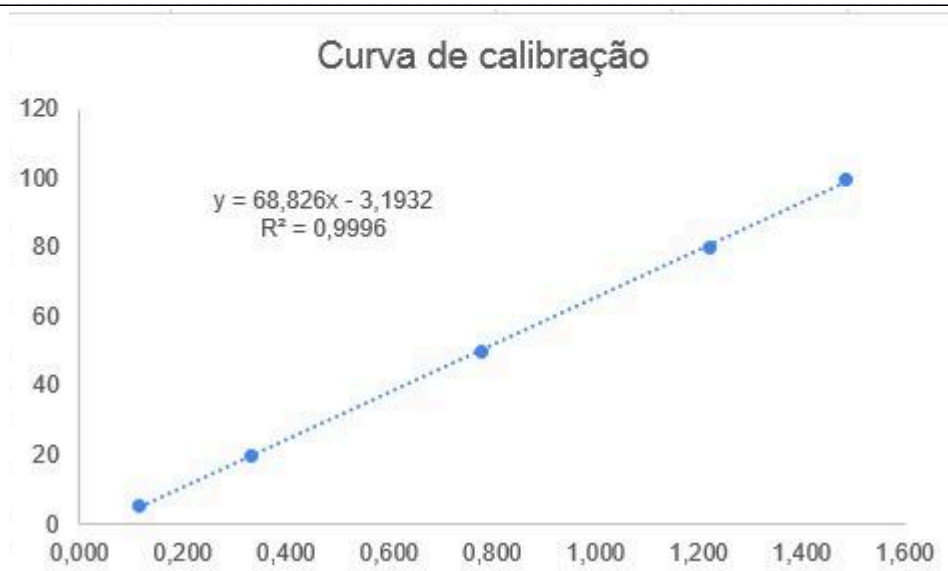


Gráfico 1 - Curva de calibração - solução de fenol.

3.3. Testes de cinética de adsorção

O estudo da cinética avalia a adsorção de fenol relacionado ao tempo, com a utilização da adsorção com carvão ativado e com a adsorção assistida por floculação iônica.

Estes experimentos foram realizados em duas etapas, a primeira com sistema de 1 g de carvão ativado em pó e 50mL da solução de fenol 100 ppm, e a segunda com sistema de 1g de carvão ativado em pó, 50 mL da solução de fenol 100 ppm, 0,25 g de tensoativo e 0,125 g de cloreto de cálcio. Essas proporções foram definidas baseados na literatura [23]. Inicialmente, foi pesado o carvão ativado para cada amostra em um erlenmeyer de 250 mL, o tensoativo e o cloreto de cálcio foram pesados em beckers separados de 50 mL. Após a pesagem, os componentes foram misturados simultaneamente ao carvão ativado e agitados na mesa agitadora.

As amostras foram agitadas nos tempos de 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120, 150 e 180 minutos. Após o tempo de agitação, foi realizada a leitura de absorbância no espectrofotômetro, a fim de analisar as concentrações do poluente em diferentes tempos de contato.

3.4. Teste de equilíbrio de adsorção

O estudo do equilíbrio avalia a adsorção do fenol relacionado a variação da concentração de carvão ativado, no sistema contendo somente carvão, e a concentração do tensoativo e do floculante, no sistema onde foi utilizada a adsorção assistida por floculação iônica.

Os experimentos de equilíbrio de adsorção também foram realizados em duas etapas, sendo a primeira, apenas com o carvão ativado variando-se em 0,01; 0,025; 0,05; 0,075; 0,1; 0,15; 0,2; 0,25; 0,3; 0,4 e 0,5 g e 50 mL da solução de fenol 100 ppm. Nesse contexto, foi pesado o carvão para cada amostra em um erlenmeyer de 250 mL. Após a pesagem, foi adicionado 50 mL da solução de fenol. Em seguida, todas as amostras foram agitadas na mesa agitadora por 90 minutos (tempo determinado no estudo cinético). Na segunda etapa, as amostras tiveram a mesma variação da quantidade de carvão, entretanto, foi adicionado tensoativo e cloreto de cálcio de acordo com a proporção definida nos testes de cinética. Após o tempo de agitação, foi realizada a leitura de absorbância, a fim de analisar as concentrações do poluente em diferentes concentrações dos reagentes.

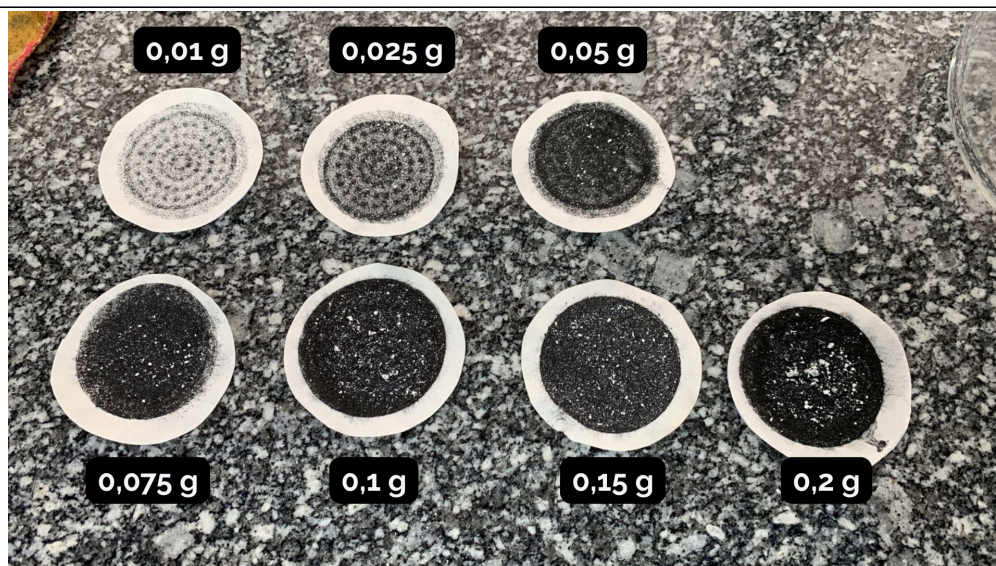


Figura 1 - Papéis de filtro após filtração à vácuo. Fonte: AUTOR, 2023.

3.5. Efeito do pH

O ensaio para análise do pH foi realizado com 50 mL solução de fenol 100 ppm, 0,3 g de carvão ativado, 0,25 g de tensoativo e 0,125 g de cloreto de cálcio para cada amostra. A solução de fenol foi ajustada para a faixa de pH de 2 a 12. A pesagem do carvão ativado para cada amostra foi realizada em um erlenmeyer de 250 mL, o tensoativo e o cloreto de cálcio foram pesados em beakers separados de 50 mL. Após a pesagem, misturou-se os reagentes, simultaneamente ao carvão ativado, mantendo-se o sistema sob agitação na mesa agitadora por 90 minutos, tempo necessário para atingir o equilíbrio. Após o tempo de agitação, foi realizada a leitura de absorvância, a fim de analisar as concentrações do poluente em diferentes pH.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Testes cinéticos de adsorção

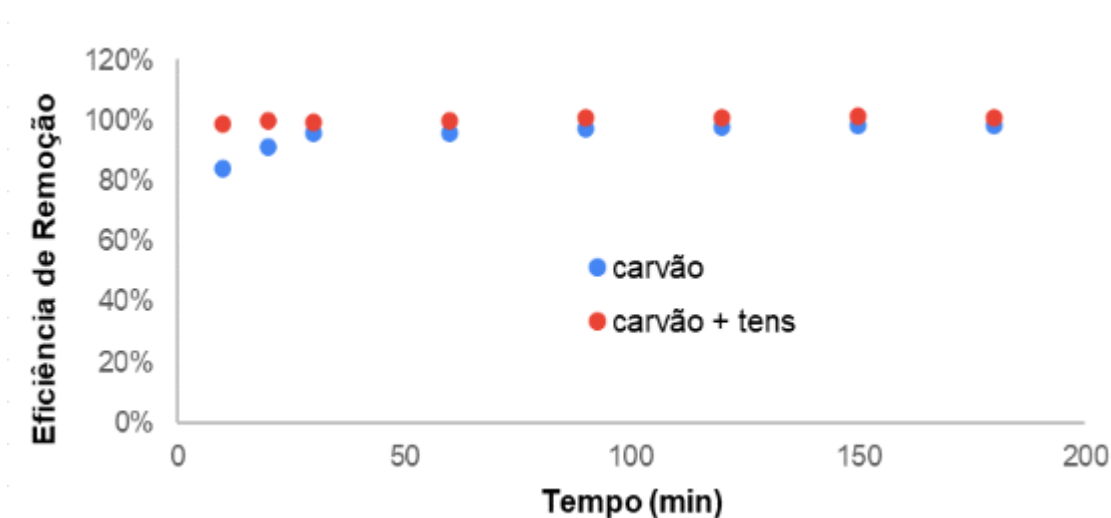


Gráfico 2 - Remoção do fenol variando o tempo de contato.

Analisando os resultados obtidos, no gráfico 2, nota-se que a porcentagem de eficiência de remoção (%E) se manteve constante a partir dos 90 minutos, em ambos os casos. Entretanto, quando comparados os primeiros testes, apenas com a presença do carvão ativado, aos testes com a utilização do tensoativo, mesmo com a

eficiência de remoção alta, é perceptível que a remoção é maior no segundo caso, atingindo praticamente 100%. Isso ocorre devido a cadeia hidrofóbica do tensoativo, que potencializa a eficiência de remoção, pois adiciona sítios de adsorção na superfície do carvão ativado, criando maior interação do fenol com o floculo formado. Quando se compara a remoção x tempo percebe-se que a %E já se eleva na faixa inicial do tempo e tende a se manter constante a partir dos 90 minutos. Sendo assim, [24] explica esse comportamento devido a grande quantidade de sítios de carvão vazios para a adsorção no tempo inicial, na sequência, essa quantidade diminui e surge a força repulsiva das moléculas que já foram adsorvidas, o que impede a adsorção dos sítios restantes.

4.2. Teste de equilíbrio de adsorção

No sistema com carvão ativado, percebe-se que a eficiência de remoção se manteve constante a partir da concentração de 0,3 g. Entretanto, nas análises com a adsorção assistida por floculação iônica, é notável a melhora na eficiência de remoção nas mesmas concentrações de carvão ativado. Também pode-se concluir que o acréscimo da quantidade do carvão ativado aumenta significativamente a %E até o seu ponto de equilíbrio, momento em que mesmo com o aumento do carvão ativado, não percebe-se mais mudança na eficiência de remoção, o mesmo comportamento ocorreu nos experimentos do estudo [24]. Comparando com [25], o equilíbrio da adsorção também foi atingido com uma pequena quantidade de carvão ativado - 0,5 g para 100 mL de solução - e eficiência de remoção em 94%.

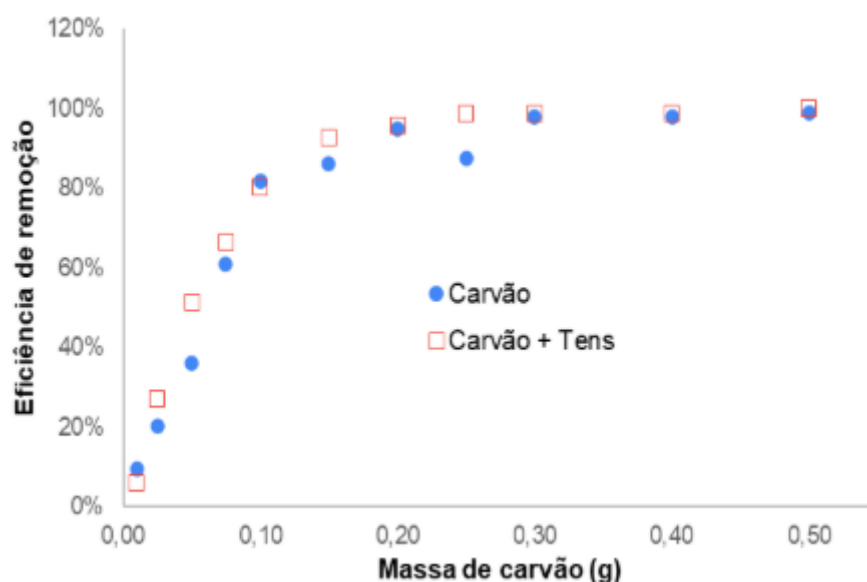


Gráfico 3 - Remoção do fenol variando a quantidade de carvão ativado e com a adição do tensoativo.

Nesse sentido, nota-se, no gráfico 3, que a maior disponibilidade do carvão ativado aumenta a eficiência de remoção até quase 100%, pois mais sítios de adsorção estão disponíveis para reter o fenol. Contudo, observou-se que em concentrações mais baixas de carvão ativado, a adição de tensoativo proporcionou alcançar uma alta eficiência de remoção mais rapidamente.

4.3. Efeito do pH

O estudo do efeito do pH é relevante pois esse parâmetro altera o mecanismo de adsorção [26].

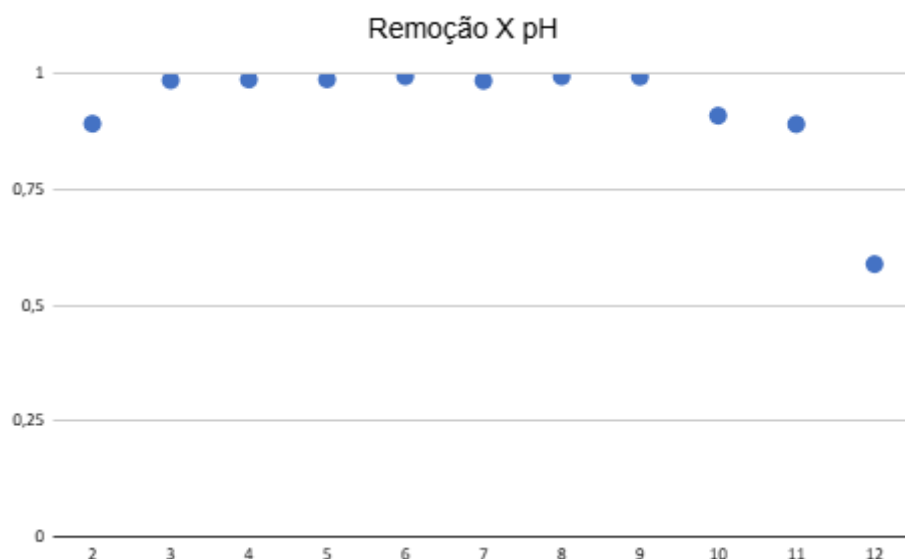


Gráfico 4 - Remoção do fenol com a variação do pH.

Com os resultados obtidos, disponíveis no gráfico 4, observou-se uma eficiência de remoção baixa no pH 2, pois a superfície do carvão ativado torna-se carregada positivamente e os compostos fenólicos não ionizados competem com a água pela adsorvidade na superfície do adsorvente [27]. Entre o pH 3 a 9, foi obtida uma alta eficiência de remoção, o que não foi obtido no estudo [19] em que foi usado apenas o tensoativo, assim nota-se a importância da presença do carvão ativado. A partir do pH 9, foi observado uma redução na eficiência de remoção, conforme estudo anterior [28], pois se formam íons fenolatos, carregados negativamente, resultando em forças repulsivas com o adsorvente. Essa queda de (%E) também foi observada em [24], onde o aumento do pH causa prejuízo à adsorção em razão da dissociação dos compostos.

5. CONCLUSÕES

Esta pesquisa objetivou avaliar o tratamento de uma água produzida sintética - utilizando uma solução de fenol – por meio da adsorção em carvão ativado assistida pela floculação iônica. Na cinética, a partir de 90 minutos de contato adsorvato/adsorvente, ambas as amostras (adsorção em carvão ativado e adsorção assistida por floculação iônica), nota-se uma constância na eficiência de remoção. No equilíbrio, apenas com o carvão ativado, percebe-se que a remoção aumenta com uma maior quantidade de carvão. Já na adsorção assistida por floculação iônica, a eficiência tende a 100%, com uma redução na quantidade de carvão ativado. Diante disso, é notável a contribuição do carvão ativado quando está em uma concentração maior e, mais relevante a otimização da remoção na presença do tensoativo. No pH entre 3 a 9 obteve-se alta remoção de fenol, porém há uma queda nos pH 2 e 10 a 12. Com a eficiência desse tratamento e os resultados obtidos, sugere-se a aplicação desse estudo a água de produção real e, por conseguinte, a escalas piloto.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] S. JIMÉNEZ, M.M. MICÓ, M. ARNALDOS, F. MEDINA, S. CONTRERAS. State of the art of produced water treatment, **Chemosphere**, v. 192, 2018, p. 186-208, ISSN 0045-6535. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139>>. Acesso em: 26 de agosto de 2023.
- [2] Hussein I. Abdel-Shafy, Mona S.M. Mansour, Mohamed M. El-Toony, Integrated treatment for oil free petroleum produced water using novel resin composite followed by microfiltration, Separation and Purification Technology, v 234, 2020, 116058, ISSN 1383-5866. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116058>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [3] Farajnezhad, H. e Gharbani, P. 2012. Tratamento de coagulação de águas residuais na indústria petrolífera utilizando policloreto de alumínio e cloreto férrico. *Revista Internacional de Pesquisa e Revisões em Ciências Aplicadas*, 13 (1), p. 306-310.
- [4] Mousa, KM e Hadi, HJ. 2016. Processo de coagulação/floculação para tratamento de água produzida. *Internacional J. Curr. Eng. Technol*, 6 (2), p. 551-555.
- [5] Francesca Macedonio, Aamer Ali, Teresa Poerio, Essam El-Sayed, Enrico Drioli, Mahmoud Abdel-Jawad. Direct contact membrane distillation for treatment of oilfield produced water, Separation and Purification

- Technology, v 126, 2014, p. 69-81, ISSN 1383-5866. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.02.004>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [6] Selvaraj Munirasu, Mohammad Abu Haija, Fawzi Banat. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment—A review, *Process Safety and Environmental Protection*, v 100, 2016, p. 183-202, ISSN 0957-5820. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.psep.2016.01.010>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [7] CABRAL, Rayssa Costa; SANTOS, Dheiver Francisco. ESTUDO DAS PRINCIPAIS TÉCNICAS PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA PRODUZIDA DE PETRÓLEO. UMA ANÁLISE DAS PRINCIPAIS METODOLOGIAS UTILIZADAS EM CAMPO. Caderno de Graduação - Ciências Exatas e Tecnológicas - UNIT - ALAGOAS, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 175, 2019. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/fitsexatas/article/view/6782>>. Acesso em 25 março de 2024.
- [8] Mona S.M. Mansour, Hussein I. Abdel-Shafy, Mohamed M. El Tony, Waleed I.M. El Azab. Hybrid resin composite membrane for oil & gas produced water treatment, *Egyptian Journal of Petroleum*, v. 31, Issue 3, 2022, p. 83-88, ISSN 1110-0621. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ejpe.2022.08.001>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [9] Ali Sadatshojaie, David A. Wood, Seyyed Mohammad Jokar, Mohammad Reza Rahimpour. Applying ultrasonic fields to separate water contained in medium-gravity crude oil emulsions and determining crude oil adhesion coefficients, *Ultrasonics Sonochemistry*, v. 70, 2021, 105303, ISSN 1350-4177. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2020.105303>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [10] Hao Lu, Yi-qian Liu, Jing-bo Cai, Xiao Xu, Lin-sheng Xie, Qiang Yang, Yue-xi Li, Kai Zhu. Treatment of offshore oily produced water: Research and application of a novel fibrous coalescence technique, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 178, 2019, p. 602-608, ISSN 0920-4105. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.03.025>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [11] Coha, M., Farinelli, G., Tiraferri, A., Minella, M., & Vione, D. 2021. Advanced oxidation processes in the removal of organic substances from produced water: Potential, configurations, and research needs. *Chemical Engineering Journal*, 414, 128668.
- [12] Liu, B., Chen, B., Zhang, B., Song, X., Zeng, G., & Lee, K. 2021. Photocatalytic ozonation of offshore produced water by TiO₂ nanotube arrays coupled with UV-LED irradiation. *Journal of Hazardous Materials*, 402, 123456.
- [13] Jonnathan Cabrera, Muhammad Irfan, Yexin Dai, Pingping Zhang, Yanping Zong, Xianhua Liu. Bioelectrochemical system as an innovative technology for treatment of produced water from oil and gas industry: A review, *Chemosphere*, v. 285, 2021, 131428, ISSN 0045-6535. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131428>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [14] AGUIAR, M.R.M.P.; GUARINO, A.W.S., Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicato, *Quím. Nova* vol.25, nº.6b São Paulo – SP, 2002.
- [15] CERQUEIRA, A.A.; MARQUES, M.R.C.; RUSSO, C., Avaliação do processo eletrolítico em corrente alternada no tratamento de água de produção, *Química Nova*, Vol. 34, No. 1, 59-63, 2011.
- [16] Alvaro Gallo-Cordova, María del Mar Silva-Gordillo, Gustavo A. Muñoz, Xavier Arboleda-Faini, Daniela Almeida Streitwieser. Comparison of the adsorption capacity of organic compounds present in produced water with commercially obtained walnut shell and residual biomass, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 5, Issue 4, 2017, p. 4041-4050, ISSN 2213-3437. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.07.052>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [17] Tamires C. Costa Louzada, Silvio Edegar Weschenfelder, Bruna Temochko dos Passos, Luciana Prazeres Mazur, Belisa Alcantara Marinho, Maria de Fátima R. da Cunha, Adriano da Silva, Antônio Augusto Ulson de Souza, Selene M.A. Guelli Ulson de Souza. New insights in the treatment of real oilfield produced water: Feasibility of adsorption process with coconut husk activated charcoal, *Journal of Water Process Engineering*, v. 54, 2023, 104026, ISSN 2214-7144. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104026>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [18] Salem, F. Al, Thiemann, T., Polouse, V., Alshamsi, H., Alaryani, M., Alshamsi, M., Selem, B., Youssef, M., e S. Hasan. "Uso de ésteres celulósicos derivados de resíduos de pó de café como material sorvente para a purificação da água produzida nas operações de extração de petróleo do Kuwait." Artigo apresentado na International Petroleum Technology Conference, Dhahran, Arábia Saudita, fevereiro de 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.2523/IPTC-24578-MS>>. Acesso em 02 de maio de 2024.
- [19] P.R.M. CAVALCANTE, R.P.F. MELO, T.N. CASTRO DANTAS, A.A. DANTAS NETO, E.L. BARROS NETO, M.C.P.A. MOURA. Removal of phenol from aqueous medium using micellar solubilization followed by ionic flocculation, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 6, Issue 2, 2018, p. 2778-2784, ISSN 2213-3437. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jece.2018.04.025>>. Acesso em 19 de agosto de 2023.
- [20] NUNES, SHIRLLE KATIA DA SILVA; DANTAS, TEREZA NEUMA DE CASTRO; BARROS NETO, EDUARDO LINS DE; DANTAS NETO, AFONSO AVELINO; GRIMALDI, M. C. ; MOURA, MARIA CARLENISE PAIVA DE ALENCAR. Treatment of oilfield produced water: a cleaner process for producing sodium carbonate (SODA ASH). *Brazilian Journal of*

- Petroleum and Gas**, v. 7, n. 1, p. 31-41, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.5419/bjpg2013-0003>>. Acesso em 21 de julho de 2023.
- [21] T.S. ALOMAR, B.H. HAMEED, M. USMAN, F.A. ALMOMANI, M.M. BA-ABBAD, M. KHRAISHEH. Recent advances on the treatment of oil fields produced water by adsorption and advanced oxidation processes, **Journal of Water Process Engineering**, v. 49, 2022, 103034, ISSN 2214-7144. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2022.103034>>. Acesso em 25 de agosto de 2023.
- [22] FARAJI, A., CUCCARESE, M., MASI, S. et al. Use of carbon materials for produced water treatment: a review on adsorption process and performance. **Int. J. Environ. Sci. Technol.** (2021). Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13762-021-03395-y>>. Acesso em 25 de agosto de 2023.
- [23] LIMA, FERNANDA SIQUEIRA. Avaliação da remoção de fármacos por processos adsorptivos: estudos isotérmico, cinético e termodinâmico. 2023. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/52209>>. Acesso em 10 de fevereiro de 2023.
- [24] SCHNEIDER, Eduardo Luiz. Adsorption of phenolic compounds on activated carbon. 2008. 93 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos) - Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2008. Disponível em: <<https://tede.unioeste.br/handle/tede/1869>>. Acesso em 25 de julho de 2024.
- [25] Bestamin Özkaya. Adsorption and desorption of phenol on activated carbon and a comparison of isotherm models, *Journal of Hazardous Materials*, v. 129, Issues 1–3, 2006, p. 158-163, ISSN 0304-3894. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.025>>. Acesso em 25 de julho de 2024.
- [26] DEHMANI, Y.; FRANCO, D.S.P.; GEORGIN, J.; LAMHASNI, T.; BRAHMI, Y.; OUKHRIB, R.; MUSTAPHA, B.; MOUSSOUT, H.; OUALLAL, H.; SADIK, A. Comparison of Phenol Adsorption Property and Mechanism onto Different Moroccan Clays. **Water** **2023**, *15*, 1881. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/w15101881>>. Acesso em 25 de agosto de 2023.
- [27] XIE B, QIN J, WANG S, LI X, SUN H, CHEN W. Adsorption of Phenol on Commercial Activated Carbons: Modelling and Interpretation. **Int J Environ Res Public Health**. 2020 Jan 28;17(3):789. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/ijerph17030789>>. PMID: 32012816; PMCID: PMC7037044. Acesso em 25 de agosto de 2023.
- [28] W.P. CHENG et al., Phenol adsorption equilibrium and kinetics on zeolite X/activated carbon composite, **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers** (2016). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2016.02.004>>. Acesso em 25 de agosto de 2023.
- [29] SOUSA, Áquila Figueiredo de. Floculação iônica aplicada a remoção de contaminantes orgânicos: uma revisão. 2021. 45 f. Monografia (Bacharelado em Ciência e Tecnologia) - Centro Multidisciplinar de Pau dos Ferros, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Pau dos Ferros, 2021. Disponível em: <<https://repositorio.ufersa.edu.br/handle/prefix/11725>>. Acesso em 21 de Julho de 2025.
- [30] BARROS, Edlin Letícia Barbosa de. Remoção de corante de efluente têxtil sintético utilizando floculação iônica. 2019. 41f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2019. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/38844>>. Acesso em 21 de Julho de 2025.