

TECNOLOGIAS HÍBRIDAS APLICADAS AO REÚSO DE EFLUENTES PETROQUÍMICOS: INTEGRAÇÃO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS E ELETRO-OXIDAÇÃO

Éverton Hansen – everton-hansen@fepam.rs.gov.br, Universidade Feevale, Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental, ERS-239, 2755 93525-075 – Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Marcos Vinícius Tenedini - marcos.tenedini@yahoo.com, Universidade Feevale, Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental, ERS-239, 2755 93525-075 – Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Andréia Barros dos Santos – andreia.cetel@gmail.com, Universidade Feevale, Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Materiais e Processos Industriais, ERS-239, 2755 93525-075 – Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Andréa Moura Bernardes - amb@ufrgs.br, Universidade federal do Rio Grande do Sul, PPGE3M Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Av. Bento Gonçalves, 9500 91540-000

Marco Antônio Siqueira Rodrigues - marcor@feevale.br, Universidade Feevale, Programa de Pós-graduação em Qualidade Ambiental, ERS-239, 2755 93525-075 – Novo Hamburgo – Rio Grande do Sul

Resumo: A indústria petroquímica consome grandes volumes de água e geram efluentes que exigem tratamento avançado para possibilitar o reúso industrial. Este estudo desenvolveu e testou um sistema híbrido para tratamento de efluente petroquímico terciário real, integrando ultrafiltração (UF), osmose reversa (OR), eletrodeionização (EDI), destilação por membranas (DM) e eletro-oxidação (EO), visando à produção de água clarificada e desmineralizada com mínima geração de concentrados. A UF atingiu 91,5% de recuperação, removendo sólidos suspensos, turbidez e ferro, e produzindo alimentação adequada para a OR. A OR operou com 50,5% de recuperação, gerando permeado para EDI e teve seu concentrado tratado por DM. A EDI alcançou 95,3% de recuperação, produzindo água de alta pureza, adequada para a produção de vapor em caldeiras de alta pressão. A DM aplicada ao concentrado de RO obteve recuperação de 82%, produzindo permeado adequado para reúso como água clarificada. O concentrado de DM foi tratado por EO, reduzindo a carga orgânica e a concentração de cloretos, mas com eficiência limitada para outros compostos inorgânicos. O sistema integrado UF/OR/EDI/DM/EO alcançou um percentual global de reúso de até 98%, gerando água adequada para diferentes aplicações industriais. Os resultados evidenciam o potencial de sistemas híbridos para promover o reúso e avançar rumo ao descarte zero de efluentes líquidos.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Palavras-chave: Efluentes petroquímicos; Reúso de água; Processos de separação por membranas; Eletro-oxidação; Descarte zero.

HYBRID TECHNOLOGIES APPLIED TO PETROCHEMICAL WASTEWATER REUSE: INTEGRATION OF MEMBRANE SEPARATION PROCESSES AND ELECTRO-OXIDATION

Abstract: The petrochemical industry consumes large volumes of water and generates wastewater that requires advanced treatment to enable industrial reuse. This study developed and tested a hybrid system for the treatment of real tertiary petrochemical wastewater, integrating ultrafiltration (UF), reverse osmosis (RO), electrodeionization (EDI), membrane distillation (MD), and electro-oxidation (EO), aiming to produce clarified and demineralized water with minimal generation of concentrates. UF achieved a 91.5% recovery rate, removing suspended solids, turbidity, and iron, and producing suitable feedwater for RO. The RO unit operated at 50.5% recovery, generating permeate for EDI, while its concentrate was treated by MD. The EDI system achieved 95.3% recovery, producing high-purity water suitable for steam generation in high-pressure boilers. MD applied to the RO concentrate achieved an 82% recovery rate, producing permeate suitable for reuse as clarified water. The MD concentrate was treated by EO, reducing organic load and chloride concentration, although with limited efficiency for other inorganic compounds. The integrated UF/RO/EDI/MD/EO system achieved an overall reuse rate of up to 98%, producing water suitable for various industrial applications. The results highlight the potential of hybrid systems to promote water reuse and advance toward zero liquid discharge.

Keywords: Petrochemical wastewater; Water reuse; Membrane separation processes; Electro-oxidation; Zero liquid discharge.

1. INTRODUÇÃO

A indústria petroquímica produz uma ampla gama de derivados de petróleo, insumos petroquímicos e polímeros através de processos intensivos em consumo de água e energia e geradores de elevados volumes de efluentes líquidos (Zhang *et al.*, 2023). A adoção de estratégias de economia circular tem se tornado essencial para otimizar o uso de recursos, reduzir a geração de resíduos e mitigar impactos ambientais, com destaque para o reúso de água como alternativa para minimizar a captação de fontes naturais (Iulianelli & Drioli, 2020; Nariyoshi, 2016; Ronquim *et al.*, 2020). Os efluentes petroquímicos apresentam composição que não permite seu reúso direto em elevadas vazões, sendo necessária a realização de tratamentos adicionais para enquadramento aos parâmetros exigidos pela indústria. Nesse cenário, os processos de separação por membranas (PSM) destacam-se como soluções consolidadas para a remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Os PSM podem utilizar a pressão como força motriz, como é o caso da microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR). Já entre os PSM que utilizam o campo elétrico como força motriz de separação, destacam-se a eletrodialise (ED), aplicada para a separação de íons, regeneração de ácido/base, conversão de sal e dessalinização; e a eletrodeionização (EDI), utilizada, dentre outras aplicações, na produção de água ultra pura, na remoção de metais em soluções diluídas, na recuperação de espécies valiosas e remoção de compostos radioativos (Gurreri *et al.*, 2020). Adicionalmente, a destilação por membranas (DM), que opera sob gradientes térmicos entre a alimentação e o permeado, tem sido estudada como alternativa promissora para o tratamento de correntes de alta salinidade, devido à sua elevada rejeição de solutos (Wu *et al.*, 2018).

Apesar da elevada eficiência, os PSM apresentam como principal limitação a geração de correntes concentradas. A osmose reversa, por exemplo, pode produzir entre 20 e 30% de concentrado (Fontanova *et al.*, 2023; Devaisy *et al.*, 2023; Xiang *et al.*, 2019), frequentemente descartado sem tratamento adequado, o que representa risco ambiental significativo (Mansour *et al.*, 2018). Estudos prévios evidenciam que esses concentrados apresentam elevadas concentrações de sais e matéria orgânica, inviabilizando seu descarte direto (Venzke *et al.*, 2017).

Diante desse desafio, a integração de PSM com processos oxidativos avançados (POA) surge como uma estratégia promissora para aumentar a recuperação de água e reduzir o volume de rejeitos. Os POA baseiam-se na geração de radicais hidroxila ($\bullet\text{OH}$), espécies altamente reativas capazes de degradar compostos orgânicos recalcitrantes (Ameta, 2018; Mohammed & Fasnabi, 2016; Richardson & Kimura, 2017). Entre eles, a eletro-oxidação (EO) destaca-se pela sua eficácia no tratamento de correntes concentradas, promovendo a oxidação da matéria orgânica residual (Chen *et al.*, 2022).

Nesse contexto, o presente estudo propõe e avalia um sistema híbrido integrando UF, OR, EDI, DM e EO para o tratamento de efluentes petroquímicos, com foco na maximização do reúso de água e na minimização da geração de rejeitos. A abordagem busca contribuir para o avanço de estratégias de descarte zero de efluentes líquidos, alinhando desempenho técnico e sustentabilidade em operações petroquímicas.

2. METODOLOGIA

O efluente petroquímico utilizado neste estudo foi obtido na estação de tratamento de efluentes (ETE) de um complexo petroquímico localizado no sul do Brasil. A ETE é composta por etapas de tratamento preliminar, primário e secundário com lodos ativados. Após o tratamento secundário, o efluente passa por um polimento terciário em uma série de oito lagoas de estabilização, sendo posteriormente disposto no solo. As amostras utilizadas neste estudo foram coletadas na última (oitava) lagoa. A Figura 1 mostra uma representação esquemática do sistema de tratamento proposto para o reúso de efluentes petroquímicos. Na indústria estudada, a água desmineralizada deve apresentar condutividade elétrica inferior a $0,3 \mu\text{S}/\text{cm}$ (Hansen *et al.*, 2019), especificação necessária para garantir a geração segura de vapor de alta pressão sem formação de incrustações ou processos corrosivos em caldeiras.

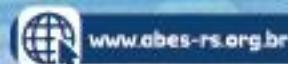
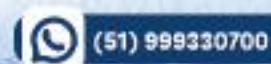
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



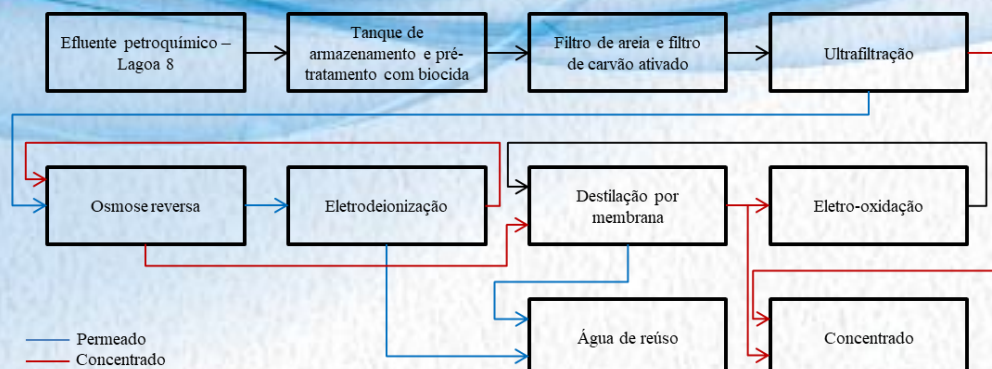


Figura 1 – Representação esquemática do tratamento híbrido aplicado ao efluente petroquímico.

2.1 Sistema híbrido de tratamento

O sistema integrado de tratamento UF/OR/EDI consistiu em unidades de filtração com areia (três camadas graduadas de areia, de 33 cm de espessura cada, com granulometrias de 1,4; 0,9 e 0,4 mm) e carvão ativado (AlphaCarbo, 1 mm, com 1 m de leito), seguidas por UF, OR e EDI. Essa sequência de tratamento foi implementada em uma unidade piloto de reúso de água (Figura 2), com capacidade de 1 m³/h. O sistema de UF operou a 2,5 bar e temperatura entre 18 e 22 °C, utilizando membranas espirais de polietersulfona (PW4040 F30, 7,3 m², 10.000 Da). O sistema de OR utilizou membrana de poliamida BW30 (4040), operando a 5,0 bar. O sistema de EDI empregou um módulo comercial Ion Tech® ITDS 10, composto por 10 células preenchidas com resinas de troca iônica, catiônicas e aniônicas (0,044 m² cada), totalizando área de membrana de 0,88 m², e dois eletrodos (0,044 m² cada), sendo o cátodo de aço inoxidável e o ânodo de titânio revestido com dióxido de titânio. Os ensaios de UF e OR foram realizados continuamente por quatro semanas, enquanto o ensaio de EDI foi conduzido por 24 horas contínuas.



Figura 2 – Unidade piloto de tratamento de efluente petroquímico para reúso.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

A corrente de concentrado da OR foi tratada por DM em uma unidade em escala laboratorial com capacidade de processamento ajustável entre 40 e 170 L/h. O sistema incluía um tanque de alimentação de 30 L, equipado com uma resistência elétrica de aquecimento de 3 kW, e um tanque de permeado de 25,4 L. O módulo de membrana e o espaçador foram construídos em polipropileno, apresentando área efetiva de membrana de 0,023 m². Foi empregada uma membrana plana hidrofóbica de polietileno (Aquastill) com tamanho de poro de 0,3 µm, porosidade de 80% e ângulo de contato superior a 118°. O concentrado da RO e o permeado foram alimentados com vazão de 84 L/h. O concentrado da RO foi mantido a 60 °C, enquanto o permeado foi mantido a 20 °C. O sistema operou em modo de recirculação total. O ensaio de MD foi conduzido por 1080 horas.

A corrente de concentrado gerada pelo processo de DM foi tratada por meio de um sistema de EO em escala laboratorial. O arranjo experimental foi composto por um tanque de alimentação de 2 L, uma bomba (Seaflo, SFDP1-040-060-51) e uma válvula de recirculação para retorno do excedente de vazão. A vazão de entrada no módulo de eletrodos foi mantida constante em 75 L/h. Uma fonte de corrente contínua (Manaus PS 6000, 0–32 V, 0–6 A, Icel) forneceu as correntes aplicadas, sendo a tensão monitorada e ajustada ao longo da operação. O módulo de EO foi construído em acrílico e equipado com eletrodos de placa plana do tipo ânodo dimensionalmente estável (DSA®), compostos por Ti/TiO₂ (70%) e RuO₂ (30%), cada um com área ativa de 100 cm² (10 cm × 10 cm). Foram avaliadas densidades de corrente de 20, 30 e 40 mA/cm² e cada ensaio teve duração de 5 horas.

2.2 Análises físico-químicas

Para avaliar os tratamentos aplicados ao efluente petroquímico foram realizadas as seguintes análises físico-químicas: cálcio (SM 3111 D), cloreto (SM 4110 B), condutividade elétrica (SM 2510), Demanda Química de Oxigênio (DQO) (SM 5220 C), ferro (SM 3111 B), magnésio (SM 3111 B), pH (SM 4500 H⁺), potássio (SM 3500 K B), sódio (SM 3500 Na B), sólidos suspensos totais (SST) (SM 2540 D), sulfato (SM 4110 B) e turbidez (SM 2130 B).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A recuperação de efluente e o fluxo de permeado (médias) obtidos nos diferentes PSM testados neste estudo são apresentados na tabela 1.

Tabela 1 - Recuperação de efluente e fluxo de permeado obtidos nos diferentes PSM.

Tratamento	Recuperação (%)	Fluxo (L/h.m ²)
Ultrafiltração	91,5	19,0
Osmose Reversa	50,5	21,0
Eletrodeionização	95,3	10,0
Destilação por Membrana	82,0	5,4

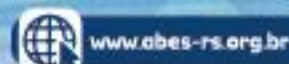
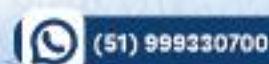
Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



O sistema de UF alcançou 91,5% de recuperação do efluente, com fluxo médio de 19 L/h.m². As pressões médias na entrada do módulo de UF e na corrente de permeado foram de 1,7 e 1,5 bar, respectivamente. O fluxo permaneceu estável ao longo das quatro semanas de ensaio, o que pode ser atribuído às limpezas frequentes da membrana, realizadas a cada 30 minutos. O sistema de OR atingiu 50,5% de recuperação do efluente, com fluxo médio de 21 L/h.m². As pressões médias na entrada do módulo de OR e no permeado foram de 5,2 e 4,8 bar, respectivamente. A adição de biocidas provavelmente contribuiu para o controle da proliferação microbiana, mantendo a estabilidade do fluxo de permeado da OR. A baixa variação de fluxo indica que o pré-tratamento por UF garantiu qualidade adequada da água de alimentação para a OR, minimizando o *fouling* e permitindo a operação em baixa pressão (<6 bar) (Qasim *et al.*, 2019).

O sistema de EDI operou continuamente por 24 h com uma corrente elétrica de 1,5 A, alcançando 95,3% de recuperação do efluente e fluxo da corrente diluída de 10 L/h.m². Já o sistema de DM operou por 1.080 h, com recuperação de 82% do efluente e fluxo médio de permeado de 5,4 L/h.m².

A Tabela 2 apresenta a caracterização das correntes de efluente petroquímico da lagoa 8 e permeados de todas as etapas de tratamento por processos de separação por membranas.

Tabela 2 – Caracterização do efluente petroquímico e permeados dos PSM.

Parâmetro	Efluente petroquímico (Lagoa 8)	Permeado da UF	Permeado da OR	Permeado da EDI	Permeado da DM
Cálcio (mg/L)	23,56	21,83	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Cloretos (mg/L)	136,96	176,00	1,88	< 1,00	< 1,00
Magnésio (mg/L)	7,520	6,040	0,082	0,025	0,040
Sulfatos (mg/L)	304,0	298,4	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Condutividade (µS/cm)	1718,00	1622,00	10,73	0,17	2,32
Ferro (mg/L)	1,39	< 0,10	< 0,10	< 0,10	< 0,10
DQO	58,60	43,20	2,85	NA	3,50
SST	6,4	2,1	2,1	2,1	NA
Turbidez (NTU)	52,967	0,311	0,323	0,208	0,150

O efluente petroquímico utilizado neste estudo apresentou 23,56 mg/L de cálcio, 136,96 mg/L de cloretos, 7,520 mg/L de magnésio e 304,0 mg/L de sulfatos (Tabela 2). Reduções expressivas (>90%) dessas espécies iônicas foram obtidas após a OR, especialmente para íons que representam risco de incrustação no sistema de EDI (Hernon *et al.*, 2010). A etapa de EDI promoveu remoção adicional de cloreto e magnésio, enquanto cálcio e sulfato já estavam abaixo do limite de quantificação após a OR. A remoção eficiente de cálcio e magnésio é particularmente relevante, pois esses íons são os principais responsáveis por incrustações e corrosão em sistemas de geração de vapor (Nadjafi *et al.*,

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

2018). As concentrações de magnésio no efluente final atenderam ao padrão de reúso para água desmineralizada ($<0,25 \text{ mg/L}$; Hansen *et al.*, 2019).

A condutividade do efluente petroquímico ($1.718 \text{ } \mu\text{S/cm}$) foi reduzida para $10,73 \text{ } \mu\text{S/cm}$ após a OR, atendendo aos critérios de qualidade para alimentação da EDI ($<40 \text{ } \mu\text{S/cm}$; Wood *et al.*, 2010). Isso demonstra a eficiência do processo combinado UF/OR na preparação da alimentação para a EDI, por meio da remoção de compostos formadores de incrustações. A OR também desempenha papel fundamental na proteção das resinas de EDI, prevenindo o *fouling* dos canais espaçadores e a degradação das resinas (Wood & Gifford, 2019). O efluente da EDI atingiu condutividade inferior a $0,30 \text{ } \mu\text{S/cm}$, atendendo ao padrão para reúso como água desmineralizada (Hansen *et al.*, 2019).

O ferro presente no efluente petroquímico ($1,39 \text{ mg/L}$) foi removido em 92% durante a UF. As etapas subsequentes de OR e EDI não puderam ser quantificadas quanto à remoção de ferro, uma vez que suas concentrações já estavam abaixo do limite de detecção após a UF. A DQO foi majoritariamente reduzida na etapa de RO, enquanto os sólidos suspensos totais e a turbidez foram efetivamente removidos na etapa de UF. Esses resultados evidenciam o papel complementar de cada tecnologia no sistema integrado UF/OR/EDI para produção de água desmineralizada.

A DM foi aplicada à corrente de concentrado da OR com o objetivo de aumentar a recuperação do efluente. O permeado da DM apresentou baixas concentrações para todos os parâmetros avaliados, com eficiências de remoção superiores a 90%, corroborando resultados anteriores de DM (91–99%) reportados por Venzke *et al.* (2021). Embora o permeado da DM não tenha atendido ao padrão de condutividade exigido para água desmineralizada ($<0,30 \text{ } \mu\text{S/cm}$; Hansen *et al.*, 2019), ele atendeu ao limite de condutividade para água clarificada ($<165 \text{ } \mu\text{S/cm}$; Hansen *et al.*, 2019), utilizada em processos produtivos, torres de resfriamento e combate a incêndio, demonstrando sua adequação para essa aplicação, ao mesmo tempo em que indica a necessidade de um polimento adicional para a produção de água desmineralizada.

A Tabela 3 apresenta as eficiências máximas alcançadas no tratamento do concentrado da DM por EO.

Tabela 3 – Eficiências máximas alcançadas no tratamento do concentrado da DM por EO.

Parâmetro	Eficiência máxima alcançada (%)
Cálcio (mg/L)	21,6
Cloretos (mg/L)	52,3
Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	17,0
DQO (mg/L)	$> 63,0$
Magnésio (mg/L)	36,6
Potássio (mg/L)	7,0
Sódio (mg/L)	7,9
Sólidos totais (mg/L)	1,3
Sulfatos (mg/L)	8,3

A EO aplicada ao concentrado da DM possibilitou a obtenção de efluentes tratados com DQO inferior ao limite de detecção do laboratório (30 mg/L) em 3 horas de tratamento com densidade

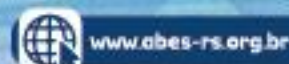
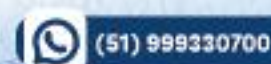
Realização



Correalizadores



Apoio Institucional



de corrente de 40 mA/cm². Após 5 horas, os valores de DQO ficaram abaixo de 30 mg/L tanto para 30 quanto para 40 mA/cm², correspondendo a remoções superiores a 63%. A densidade de corrente foi confirmada como o principal fator que influencia a taxa de reação da EO (Chen *et al.*, 2022). A EO também promoveu a remoção de cloretos (Tabela 3), provavelmente devido à sua conversão em compostos clorados que contribuíram para a oxidação da matéria orgânica. A remoção máxima foi de 52,3% (Tabela 3), coerente com valores reportados na literatura (Chen *et al.*, 2022).

Para os parâmetros que influenciam diretamente o processo de DM e estão associados à incrustação de membranas (potássio, sódio e sulfato), as eficiências de remoção foram inferiores a 10% (Tabela 3). A precipitação de sais na superfície do eletrodo pode ocorrer durante a EO, dependendo das condições operacionais e da composição do eletrólito. Essa incrustação reduz a eficiência eletroquímica ao obstruir os sítios ativos do ânodo (Bard *et al.*, 2022). Os resultados indicam que a EO melhora a qualidade do efluente, especialmente quanto à DQO e cloretos, mas tratamentos adicionais podem ser necessários para viabilizar o reúso de longo prazo do efluente tratado por EO como alimentação para DM.

Para uma avaliação da recuperação total de efluente obtida no estudo, foram consideradas as recuperações alcançadas nos tratamentos de UF (91,5%) (produzindo uma corrente concentrada que pode ser recirculada para o lodo ativado da ETE convencional), de OR (50,5%), de EDI (95,3%), de DM (82%), e também considerou-se que o concentrado da DM foi tratado por EO, e o efluente da EO foi recirculado para a unidade de DM para um novo ciclo de tratamento. De modo geral, o sistema híbrido proposto para tratamento do efluente petroquímico permitiu o reúso de aproximadamente 98% do efluente gerado no complexo petroquímico. Esses resultados demonstram que a incorporação de etapas adicionais de tratamento de efluentes aumenta substancialmente o potencial de reúso de água no processo industrial.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo demonstrou a viabilidade de um sistema híbrido UF/OR/EDI/DM/EO para o reúso de efluentes petroquímicos, combinando mecanismos complementares de separação por membranas e oxidação para maximizar a recuperação de água e minimizar a geração de concentrados. A UF apresentou 91,5% de recuperação, removendo sólidos suspensos, turbidez e ferro e garantindo qualidade adequada para a OR, que operou com 50,5% de recuperação e produziu permeado com condutividade inferior a 30 µS/cm, adequado para alimentação da EDI. A EDI atingiu 95,3% de recuperação, gerando água desmineralizada de alta pureza (condutividade < 0,30 µS/cm), atendendo às exigências industriais. O concentrado da OR tratado por DM alcançou 82% de recuperação, com remoções superiores a 90% para diversos parâmetros, produzindo permeado adequado para reúso como água clarificada. O concentrado da DM tratado por EO apresentou redução de DQO (>63%) e cloretos (até 52,3%), mas teve baixa remoção dos demais parâmetros, indicando a necessidade de tratamento adicional. De forma geral, o sistema integrado possibilitou cerca de 98% de reúso do efluente petroquímico, evidenciando o potencial da integração entre processos de membranas e eletro-oxidação para avançar rumo ao descarte zero de efluentes líquidos e à gestão circular da água.

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio da Capes, CNPq e FAPERGS para a realização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- Ameta, S.C.; Ameta, R. Advanced Oxidation Processes for Waste Water Treatment. Emerging Green Chemical Technology. Ed. Academic Press. P. i-iii. 2018. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810499-6.00014-0>
- Bard, A.J.; Faulkner, L.R.; White, H.S. Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications. Wiley; 3rd edition. 1104 P. 2022.
- Chen, L.; Li, F.; He, F.; Mao, Y.; Chen, Z.; Wang, Y.; Cai, Z. Membrane distillation combined with electrocoagulation and electrooxidation for the treatment of landfill leachate concentrate. Separation and Purification Technology. V. 291. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120936>.
- Devaisy, S.; Kandasamy, J.; Nguyen, T.V.; Ratnaweera, H.; Vigneswaran, S. Membranes in Water Reclamation: Treatment, Reuse and Concentrate Management. Membranes. Volume 13. 2023. <https://doi.org/10.3390/membranes13060605>
- Fontanova, E.; Grosso, V.; Pantuso, E.; Donato, L.; Profio, G.D. Energy duty in direct contact membrane distillation of hypersaline brines operating at the water-energy nexus. Journal of Membrane Science. Volume 676. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.memsci.2023.121585>
- Gurreri, L., Tamburini, A., Cipollina, A., & Micale, G. (2020). Electrodialysis applications in wastewater treatment for environmental protection and resources recovery: A systematic review on progress and perspectives. Membranes, 10(7), 146.
- Hansen, É., Rodrigues, M. A. S., & de Aquim, P. M. (2019). Characterization of aqueous streams in a petrochemical industry: A study for the reuse of industrial effluents. Journal of Water Process Engineering, 27, 99–109. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.11.018>
- Hernon, B. P., Zapanalidou, R. H., Zhang, L., Sims, K. J., & Siwak, L. R. (2010). Electrodeionization in power plant applications. GE Technical Paper.
- Iulianelli, A., & Drioli, E. (2020). Membrane engineering: Latest advancements in gas separation and pre-treatment processes, petrochemical industry and refinery, and future perspectives in emerging applications. Fuel Processing Technology, 206, 106464. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2020.106464>
- Mansour, F.; Alnouri, S.Y.; Al-Hindi, M.; Azizi, F.; Linke, P. Screening and cost assessment strategies for end-of-Pipe Zero Liquid Discharge systems. Journal of Cleaner Production. Volume 179. P. 460-477. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.064>
- Mohammed, S.; Fasnabi, P.A. Removal of dicofol from wastewater using advanced oxidation process. Procedia Technology. Volume 24. P. 645-653. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.160>

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

Nadjafi, M., Reyhani, A., & Al Arni, S. (2018). Feasibility of treatment of refinery wastewater by a pilot scale MF/UF and UF/RO system for reuse at boilers and cooling towers. *Journal of Water Chemistry and Technology*, 40, 167–176. <https://doi.org/10.3103/S1063455X18030098>

Nariyoshi, Y. N. Study of fundamentals in membrane distillation crystallization applied for water desalination. USP, 2016.

Qasim, M., Badrelzaman, M., Darwish, N. N., Darwish, N. A., & Hilal, N. (2019). Reverse osmosis desalination: A state-of-the-art review. *Desalination*, 459, 59–104.

Richardson, S.D.; Kimura, S.Y. Emerging environmental contaminants: Challenges facing our next generation and potential engineering solutions. *Environmental Technology & Innovation*. Volume 8. P. 40-56. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.04.002>

Ronquim, F.M.; Sakamoto, H.M.; Mierzwa, J.C.; Kulay, L.; Seckler, M.M. Eco-efficiency analysis of desalination by precipitation integrated with reverse osmosis for zero liquid discharge in oil refineries. *Journal of Cleaner Production*. Volume 250. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119547>

SM 2130 B, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 2130 B - Nephelometric Method, 23rd ed.

SM 2510, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 2510 - Conductivity, 23rd ed.

SM 2540 D, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 2540 D - Total Suspended Solids Dried at 103–105°C, 23rd ed.

SM 3111 B, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 3111 B - Direct Air-Acetylene Flame Method, 23rd ed.

SM 3111 D, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 3111 D - Direct Nitrous Oxide-Acetylene Flame Method, 23rd ed.

SM 3500 KB, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 3500 KB - Flame Photometric Method, 23rd ed.

SM 3500 NaB, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 3500 NaB - Flame Emission Photometric Method, 23rd ed.

SM 4110 B, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 4110 B - Ion Chromatography with Chemical Suppression of Eluent Conductivity, 23rd ed.

SM 4500 H⁺, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 4500 H⁺ - pH value, 23rd ed.

SM 5220 C, 2017. Standard Methods for the Examination of Water and Wasterwater. Method 5220 C - Closed Reflux, Titrimetric Method, 23rd ed.

Venzke, C. D.; Rodrigues, M.A.S.; Giacobbo, A.; Bacher, L.E.; Lemmert, I.S.; Viegas, C.; Striving, J.; Pozzebon, S. Application of reverse osmosis to petrochemical industry wastewater treatment aimed

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br

at water reuse. *Management of Environmental Quality: An International Journal*. Volume 28. P. 70–77. 2017. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2015-0149>

Venzke, C.D.; Rizzana, D.U.; Giacobbo, A.; Rodrigues, M.A.S.; He, T. Bernardes, A.M. Membrane distillation treating a real petrochemical reverse osmosis concentrate: Influence of membrane characteristics on the process performance. *Journal of Water Process Engineering*. Volume 39. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101722>

Wood, J., & Gifford, J. (2019). Continuous Electrodeionization (pp. 287–328). <https://doi.org/10.1002/9781119407874.ch7>

Wu, Y.; Kang, Y.; Zhang, L.; Qu, D.; Cheng, X.; Feng, L. Performance and fouling mechanism of direct contact membrane distillation (DCMD) treating fermentation wastewater with high organic concentrations. *Journal of Environmental Sciences*. Volume 65. P. 253–261. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.01.015>

Xiang, Q.; Nomura, Y.; Fukahori, S.; Mizuno, T.; Tanaka, H.; Fujiwara, T. Innovative Treatment of Organic Contaminants in Reverse Osmosis Concentrate from Water Reuse: a Mini Review. *Current Pollution Reports*. Volume 5. P. 294–307. 2019. <https://doi.org/10.1007/s40726-019-00119-2>

Zhang, T., Shen, F., Peng, X., Li, Z., & Zhong, W. (2023). Carbon-efficient production planning for long-chain integrated refinery-petrochemical processes: A material-energy-carbon optimization perspective. *Journal of Cleaner Production*, 426, 138916. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.138916>

Realização



Apoio Institucional



Correalizadores



(51) 999330700



abes-rs@abes-rs.org.br



www.abes-rs.org.br