



Latin American Journal of Energy Research – Lajer (2023) v. 10, n. 1, pp. 23–32
<https://doi.org/10.21712/lajer.2023.v10.n1.p23-32>

Principais métodos de tratamento da água produzida em unidades marítimas de produção de petróleo

Main methods of treatment of produced water in offshore oil production units

Antonio Marcos Viana Junior¹, Leandra Altoé^{2*}, Pedro Agostinho da Silva Baila Madeira Antunes³, Antonio Augusto Martins Pereira Júnior⁴

¹ Bacharel em Engenharia de Petróleo pela Universidade Federal do Espírito Santo - Ufes, Campus São Mateus, ES, Brasil.

² Professora do Departamento de Engenharia e Tecnologia, Universidade Federal do Espírito Santo - Ufes, Campus São Mateus, ES, Brasil.

³ Professor do Departamento de Ambiente, Instituto Politécnico de Viseu - IPV, Viseu, Portugal.

⁴ Estudante de doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

*Autora para correspondência, E-mail: leandra.altoe@ufes.br.

Received: 22 Mai 2023 | Accepted: 31 Mai 2023 | Published online: 10 June 2023

Resumo: No processo de extração de óleo e gás, é gerado um subproduto denominado “água produzida”, que contém poluentes e precisa ser tratado antes de ser descartado no meio ambiente. O objetivo desse trabalho foi analisar os principais métodos de tratamento da água produzida em unidades marítimas de produção de petróleo. Esses tratamentos são divididos em primários, secundários e terciários. Entre os métodos primários, destacam-se: hidrociclone; separador API; e coagulação, floculação e sedimentação. Com relação aos métodos secundários, ressalta-se: flotação; e filtração e adsorção. E quanto aos métodos terciários, enfatiza-se: processos de oxidação avançada; e membranas. Como o descarte no mar é a destinação mais comum da água produzida, é importante utilizar uma combinação adequada de tratamentos para mitigar os impactos ambientais dessa atividade.

Palavras-chave: petróleo e gás natural, produção marítima de petróleo, água produzida, métodos de tratamento da água, mitigação de impactos ambientais.

Abstract: In the oil and gas extraction process, a by-product called “produced water” is generated, which contains pollutants and needs to be treated before being discarded in the environment. The objective of this work was to analyze the main methods of treatment of water produced in offshore oil production units. These treatments are divided into primary, secondary, and tertiary. Among the primary methods, the following stand out: hydrocyclone; API separator; and coagulation, flocculation and sedimentation. With regard to secondary methods, it is worth mentioning: flotation; and filtration and adsorption. And as for tertiary methods, it is emphasized: advanced oxidation processes; and membranes. As disposal at sea is the most common destination for produced water, it is important to use an appropriate combination of treatments to mitigate the environmental impacts of this activity.

Keywords: oil and gas, offshore oil production, produced water, water treatment methods, mitigation of environmental impacts.

1 Introdução

No processo de extração de óleo e gás em um reservatório, gera-se um subproduto denominado “água produzida” (“produced water”) (Amakiri et al., 2022), composta por uma complexa mistura de substâncias orgânicas e inorgânicas que podem, ou não, estar dissolvidas (Ghafoori et al., 2022). Essa é tratada por uma combinação de métodos, que incluem utilização de adsorventes químicos, filtros, separador de fases e hidrociclones, entre outros (Amakiri et al., 2022). Para então ser, posteriormente, descartada no mar ou reinjetada no reservatório como método de recuperação secundário do petróleo, a qual é considerada como a melhor prática ambiental para destinação da água produzida (Beyer et al., 2020).

A reinjeção da água produzida no reservatório, apesar de ser ambientalmente desejável, nem sempre é técnica ou economicamente viável, ocorrendo comumente o seu descarte no mar (BEYER et al., 2020). Assim, configura-se como uma importante fonte de poluição das atividades de produção de petróleo em ambiente marinho, com efeitos danosos de longo prazo à saúde humana e vida aquática devido a presença de contaminantes que podem ser cancerígenos, fitotóxicos e genotóxicos (Zhao et al., 2021; Ghafoori et al., 2022; Ibrahim, Banerjee e El-Naas, 2022).

O processo de tratamento da água produzida deve ser feito com base nas suas características e alinhamento com o enquadramento legal vigente. A Resolução n.º 393/2007 do Conselho Nacional de Meio Ambiente, CONAMA, delimita os parâmetros admitidos de concentração máxima de teor de óleos e graxas para que a água produzida possa ser descartada no mar. Além disso, estabelece limites de temperatura, concentração de compostos nocivos e vedação de descarte da água produzida em áreas próximas de zonas de proteção ambiental ou ecologicamente sensíveis (CONAMA, 2007).

Tendo em vista o grande volume gerado de água produzida e o fato de ser uma descarga constante no mar, mesmo valores regulamentados pela legislação podem gerar graves impactos ambientais (Barambu et al., 2021). Estima-se que a quantidade de hidrocarboneto despejado no mar mundialmente de forma lícita ao longo do tempo seja maior do que a liberada em grandes acidentes da indústria do petróleo (Liu et al., 2021). Neste contexto, objetivou-se com este trabalho fazer uma análise dos principais métodos de tratamento de água produzida em unidades de petróleo e gás natural em ambiente marinho.

2 Metodologia

O estudo sobre os principais métodos de tratamento da água produzida em unidades marítimas de produção de petróleo foi realizado por meio de levantamento bibliográfico, considerando-se, principalmente, artigos publicados em bases internacionais, como a plataforma *Science Direct*, nos anos recentes.

Primeiramente, foi apresentada uma visão geral sobre a caracterização da água produzida na produção de petróleo e gás em ambiente marinho, com enfoque em seus parâmetros e componentes, por ser de fundamental importância o conhecimento das condições deste subproduto para a elaboração de um plano efetivo de tratamento.

Em seguida, estudou-se os principais métodos de tratamento da água produzida atualmente empregados na indústria petrolífera, que são subdivididos em métodos primários, secundários e terciários, de acordo com a etapa do tratamento que são utilizados, bem como os seus princípios de operação e particularidades.

Após isso, foi realizada uma análise comparativa entre os métodos de tratamento dentre os primários, secundários e terciários, considerando parâmetros como os custos de aquisição, operação e manutenção e a eficiência de tratamento sobre determinadas condições e tipos de contaminantes, além da dimensão dos equipamentos utilizados para cada método, já que são fatores restritivos em uma unidade de produção em meio marinho.

3 Resultados e discussões

3.1 Caracterização da água produzida

A caracterização da água produzida, para determinar os seus constituintes majoritários, é o primeiro passo para a escolha dos métodos de tratamento mais adequados. Tem como objetivo identificar as características fundamentais e a concentração de componentes inorgânicos e orgânicos, a fim de estabelecer uma estratégia para redução da concentração desses componentes a níveis dos estabelecidos pela legislação (Jiménez et al., 2018).

Entre as características fundamentais da água produzida, e que precisam ser analisadas para a definição dos métodos de tratamento, estão a densidade, tensão superficial, condutividade, salinidade, carbono orgânico total, carência química de oxigênio, sólidos suspensos totais, sólidos dissolvidos totais e pH (Liu et al., 2021).

Para os componentes inorgânicos contidos na água produzida, os íons de maior concentração são os de cloro e sódio. Íons de cálcio, potássio, bicarbonato, magnésio e outros sais solúveis também podem ser encontrados, além da presença de sulfetos em reservatórios sulfurosos (Liu et al., 2021). A elevada concentração desses compostos deve ser levada em conta, principalmente, pelo fato de poderem causar corrosão na planta de processamento (Shang e Zhu, 2021).

A presença de íons metálicos depende das características da formação da qual o óleo e gás são extraídos, além das substâncias que, porventura, foram injetadas no reservatório. Entre os mais comuns, estão os íons de ferro, zinco, manganês e bário. E a diferença de concentração desses íons contidos na água produzida em relação aos contidos na água do mar, principalmente os metais pesados, pode ser um dos principais fatores de toxicidade da água de produção (Liu et al., 2021).

Os hidrocarbonetos são os compostos orgânicos de maior concentração e mais perigosos contidos na água produzida. Com destaque para os compostos orgânicos aromáticos, que apresentam maior solubilidade na água, o que dificulta a sua remoção. Esses compostos, como os BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno), além de hidrocarbonetos aromáticos policíclicos, são uma grande preocupação devido a sua toxicidade e efeito danoso para o ecossistema marinho (Liu et al., 2021; Ambaye et al., 2022).

3.2 Descrição dos métodos de tratamento da água produzida

Anterior à aplicação dos métodos específicos para tratamento da água produzida, normalmente, é feita a separação primária entre óleo, gás natural e água nas unidades petrolíferas. Isto é feito, geralmente, com o uso do separador trifásico, o qual permite a separação inicial dos componentes supracitados por sedimentação devido à ação da gravidade, ilustrado na Figura 1.

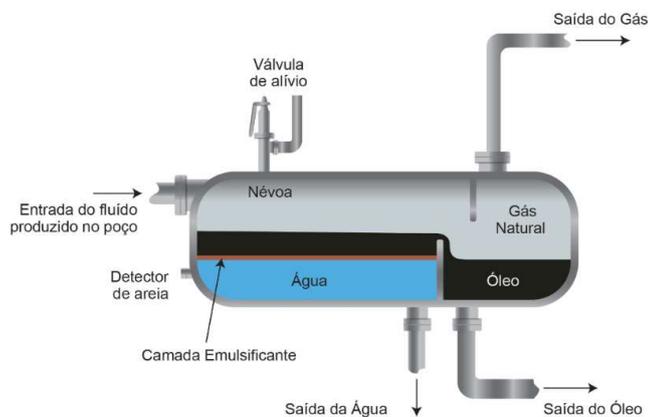


Figura 1. Esquema ilustrativo de um separador trifásico. Fonte: Forain (2022) adaptado.

A água que sai do separador trifásico passa por diversos métodos de tratamento, com o objetivo de reduzir a concentração de contaminantes tóxicos e melhorar a sua qualidade. A utilização em conjunto desses processos pode purificar a água não somente para atingir os padrões regulatórios de descarte, mas também para prover a sua reutilização em diferentes atividades (Ghafoori et al., 2022). Esses métodos são classificados em três estágios, sendo eles: tratamentos primários, secundários e terciários, os quais possuem especificidades e finalidades diferentes (Amakiri et al., 2022). Os principais métodos de tratamento da água produzida empregados atualmente são apresentados na Figura 2.

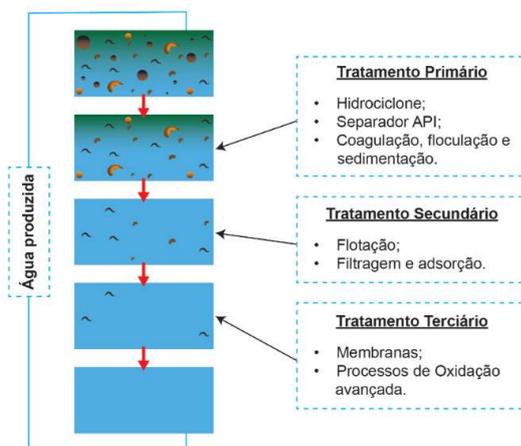


Figura 2. Métodos de tratamento da água produzida em unidades de petróleo. Fonte: Amakiri et al. (2022) adaptado.

O tratamento primário da água produzida é responsável pela remoção de partículas de sólidos suspensos com tamanhos que variam entre 5 e 15 μm e gotículas de óleo. São compostos por métodos de

tratamentos físicos ou químicos em que os contaminantes indesejáveis são removidos por diferença de densidade, ação da gravidade, ou adição de agentes químicos. Entre esses métodos, estão hidrociclone; separador API; e processos de coagulação, floculação e sedimentação (Amakiri et al., 2022).

O hidrociclone é um dispositivo estático que utiliza a pressão de entrada do fluido para produzir uma força centrífuga e um padrão de fluxo capaz de separar dois líquidos de diferentes densidades. A água produzida ingressa no hidrociclone pelo dispositivo de entrada a alta velocidade. A ação do campo centrífugo, juntamente com a diferença de densidade dos fluidos, cria uma separação de fases entre a água produzida e o óleo em que cada fase sai por uma abertura (Liu et al., 2021). Um desenho esquemático de um hidrociclone é mostrado na Figura 3.

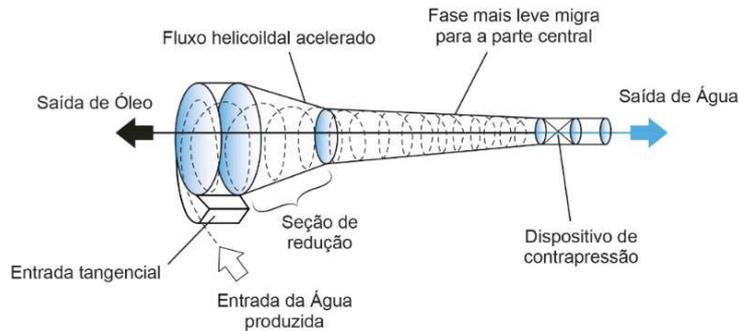


Figura 3. Esquema ilustrativo de um hidrociclone. Fonte: Liu et al. (2021) adaptado.

O separador API é um método de tratamento da água produzida especificado pelo *American Petroleum Institute* (API). Neste equipamento, as gotículas de óleo presentes na água produzida ascendem e permanecem na superfície, devido a imiscibilidade destes dois fluidos, até serem removidas (Odiete; Agunwamba, 2019). O separador API é subdividido em três compartimentos: canal de entrada, seção de separação e canal de saída, como representado pela Figura 4.



Figura 4. Esquema ilustrativo de um separador API. Fonte: Odiete e Agunwamba (2019) adaptado.

O processo conjunto de coagulação, floculação e sedimentação é responsável pela remoção de partículas coloidais através da ação da gravidade (Peng et al., 2020). Inicialmente, é feita a adição de agentes químicos (coagulantes) como sulfato de alumínio, cloreto de ferro e sulfato de ferro ou utilização de polímeros em um sistema coloidal. Isto faz com que às partículas colidam e se aglutinem em flocos de maior diâmetro, aptos então a serem removidos pela ação da gravidade por sedimentação (Zhao et al., 2021; Amakiri et al., 2022). Na Figura 5, é mostrado um esquema ilustrativo deste processo.

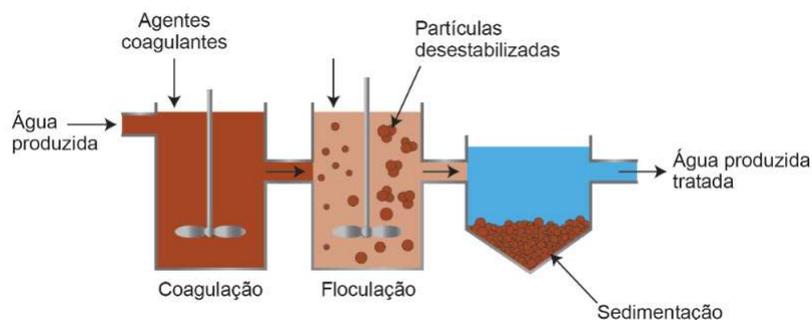


Figura 5. Esquema ilustrativo dos processos de coagulação, floculação e sedimentação. Fonte: Amakiri et al. (2022) adaptado.

O tratamento secundário da água produzida tem como objetivo dar continuidade ao tratamento primário, de maneira a melhorar a qualidade da água produzida e adequá-la aos padrões pré-estabelecidos, principalmente, no que se refere a concentração de óleo e remoção de contaminantes, como metais pesados (Liu et al., 2021). Nesta etapa do processo é esperado a remoção de até 90% do óleo e da matéria orgânica solúvel que não foram removidos pelo tratamento primário. Os métodos de tratamento secundário mais utilizados são flotação; e filtração e adsorção (Amakiri et al., 2022).

A flotação é utilizada como um método para remoção de sólidos suspensos e fibras sólidas de baixa densidade (Prakash; Majumder; Singh, 2018). Além disso, permite reduzir a concentração de óleos e graxas para valores próximos ao permitido para descarte no mar (Amakiri et al., 2022). Por esse processo as gotículas de óleo e os sólidos suspensos contidos na água são transportados após a formação de aglomerados através do contato destes com microbolhas, geradas na parte inferior do tanque de flotação (RAJAPAKSE et al., 2022). Posteriormente, esses aglomerados de bolhas, óleo e partículas se concentram na parte superior do tanque, devido a diferença de densidade desses materiais com a água produzida e, então, podem ser removidos do topo do tanque de flotação, como ilustrado na Figura 6 (Liu et al., 2021).

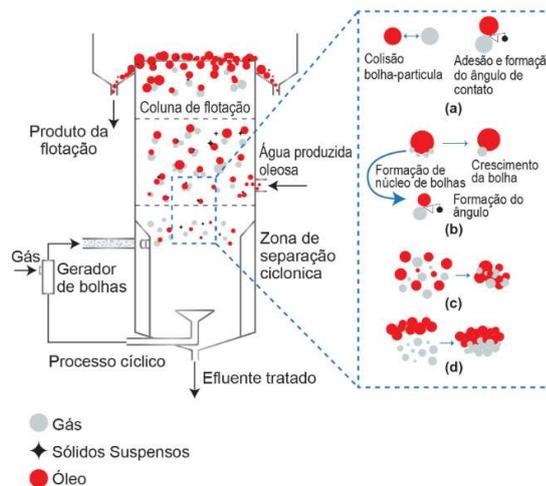


Figura 6. Esquema ilustrativo do método de flotação. Fonte: Liu et al. (2021) adaptado.

A filtração é aplicada para remoção de óleo e sólidos suspensos, além de alguns compostos orgânicos solúveis como hidrocarbonetos aromáticos que apresentam grande potencial de contaminação do ecossistema marinho se não forem removidos da água antes do seu descarte. O processo de filtração é baseado no movimento da água produzida através de um conjunto de filtros, de modo que as partículas poluentes ficam retidas após serem interceptados pelos materiais filtrantes (Liu et al., 2021). Um princípio muito importante no processo de filtração é o da adsorção, o qual consiste na interação de forças entre a superfície dos materiais adsorventes. Essa interação ocorre entre os materiais adsorventes, como carvão ativado e pó de serra, e a água produzida contendo os materiais contaminantes a serem removidos. Conforme a água produzida passa por esses materiais adsorventes, os agentes contaminantes ficam retidos na superfície desses materiais (Amakiri et al., 2022). O processo de filtração e adsorção pode ser observado na Figura 7 (Liu et al., 2021).

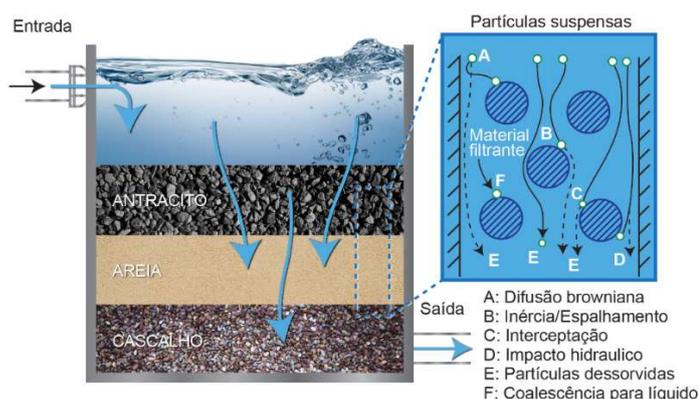


Figura 7. Esquema ilustrativo do processo de filtração e adsorção. Fonte: Liu et al. (2021) adaptado.

O tratamento terciário, ou de purificação avançada, é realizado no fim do ciclo de tratamento da água produzida e é utilizado para reduzir ainda mais a turbidez e a concentração de gotículas de óleo e de contaminantes (Amakiri et al., 2022). Entre os principais métodos terciários, estão os processos de oxidação avançada e a utilização de membranas (Liu et al., 2021).

Os processos de oxidação avançada atuam por meio da remoção de substâncias tóxicas e poluentes, não somente reduzindo suas concentrações na água produzida, mas removendo-os de forma a deixar a água completamente livre de contaminantes orgânicos, o que a torna uma técnica ambientalmente desejável. A oxidação avançada envolve basicamente três passos, sendo o primeiro a formação de agentes oxidantes fortes, como hidroxila, hidroperóxila e superóxidos. Em seguida, esses agentes oxidantes reagem com os contaminantes contidos na água produzida e os convertem em compostos biodegradáveis (Albornoz; Soroka; Silva, 2021). Posteriormente, ocorre a oxidação dos compostos biodegradáveis gerados e sua completa mineralização em água, dióxido de carbono e sais inorgânicos (Ameta; Ameta, 2018).

As membranas, por sua vez, são materiais semipermeáveis e porosos que funcionam como uma espécie de barreira, possibilitando, assim, a retenção e a posterior separação de substâncias com diâmetro superior ao tamanho do seu poro. São subdivididas em ordem decrescente de tamanho do poro, como: membranas de microfiltração, membranas de ultrafiltração, membranas de nanofiltração e membranas de osmose reserva (Souza et al., 2021). A utilização de membranas é bastante promissora para tratamento efetivo da água produzida, pois permite não somente atingir os padrões de descarte da água, mas também opções para sua reutilização e é capaz de reter micropoluentes orgânicos ou inorgânicos, como metais pesados, hidrocarbonetos, sais e sólidos dissolvidos (Goh; Wong; Ismail, 2022).

3.2 Análise comparativa dos métodos de tratamento da água produzida

A seguir, apresenta-se uma análise comparativa entre os principais métodos de tratamento da água produzida, por estágio primário, secundário e terciário. Na Tabela 1, apresenta-se um comparativo entre os métodos primários descritos anteriormente no estudo.

Tabela 1. Comparação entre métodos primários para o tratamento da água produzida.

Parâmetro	Coagulação, floculação e sedimentação	Hidrociclone	Separador API
Custo de aquisição e operação	Baixo	Baixo	Baixo
Manutenção dos equipamentos	Exige manutenção contínua	Elevada	Baixo
Volume de água tratada	Grande	Grande	Grande
Remoção de sólidos presentes na água	Eficiente	Não indicado	-
Densidade do óleo presente na água	Não interfere na eficiência	Óleos muito pesados reduzem a eficiência	-
Adaptabilidade a variações no volume a ser tratado	Grande	Baixa	Grande
Efeitos da salinidade e variações no pH	Podem reduzir a eficiência	Não apresenta	Não apresenta
Remoção de gotículas de óleo	Até 85% do óleo removido	Eficiente para gotículas com diâmetro superior a 50 μm	Eficiente para gotículas com diâmetro superior a 150 μm

Fonte: Autoria própria, com dados de Odiete e Agunwamba (2019); Peng et al., (2020); Geng et al. (2021); Liu et al. (2021); Shaikh et al. (2021); Zhao et al. (2021); Amakiri et al. (2022); Elehinafe et al. (2022); Whitworth et al. (2022).

Os métodos primários de tratamento da água produzida são caracterizados por serem robustos, simples e já bastante consolidados na indústria do petróleo (Whitworth et al., 2022). Hidrociclones, separador API e coagulação, floculação e sedimentação possuem como similaridades o baixo custo de aquisição dos equipamentos (Shaikh et al., 2021) e capacidade de tratar grandes volumes de água produzida (Zhao et al., 2021).

Particularmente, o hidrociclone apresenta restrições para o tratamento de água com grande quantidade de sólidos ou gás livre e baixa eficiência de separação para óleos muito pesados (Amakiri et al., 2022), pelo fato destes terem peso específico próximos ao da água. Vale ressaltar ainda que devido a capacidade de tratamento de cada hidrociclone ser fixa, permite pouca adaptabilidade a variações na produção (Liu et al., 2021). Um fator decisivo em favor da ampla utilização dos hidrociclones em ambientes *offshore* é ser um método bastante compacto, comparativamente, menor e mais leve que os outros (Geng et al., 2021).

O processo conjunto de coagulação, floculação e sedimentação, por sua vez, pode ter sua eficiência reduzida devido a alterações no pH da água produzida e alta salinidade, além de menor eficiência para remoção de compostos orgânicos. Além disso, exige manutenção contínua dos equipamentos e a gestão de sedimentos e contaminantes é complexa (Peng et al., 2020; Elehinafe et al., 2022). O separador API, em contrapartida, tem boa adaptabilidade à variação de volume e baixo custo de manutenção, mas não garante remoção de gotículas de óleo com diâmetros inferiores a 150 μm (Amakiri et al., 2022).

Na Tabela 2, é apresentado um comparativo entre os métodos secundários para o tratamento da água produzida abordados anteriormente.

Tabela 2. Comparação entre métodos secundários para o tratamento da água produzida.

Parâmetro	Flotação	Filtragem e adsorção
Demanda energética	Grande	Pequena
Custo de aquisição, operação e manutenção	Elevado	Menor custo, mas necessita de troca periódica dos filtros
Simplicidade e praticidade	Grande	Grande
Efeitos de variações no pH da água	Podem reduzir a eficiência	-
Remoção do óleo contido na água	Para até 40 ppm	Para valores inferiores a 2 ppm, a depender do meio filtrante
Eficiência para remoção de matéria orgânica dissolvida	Grande	Grande
Eficiência para remoção de metais pesados	Grande	Grande
Eficiência para remoção de sólidos suspensos	Grande	Grande
Adaptabilidade à diversos tipos de contaminantes	Grande	Grande e permite utilização de vários meios filtrantes em conjunto

Fonte: Autoria própria, com dados de Freeman et al. (2020); Eray et al. (2021); Naseem e Durrani (2021); Amakiri et al. (2022); Elehinafe et al. (2022); Joshi e Gururani (2022); Rajapakse et al. (2022); Wang et al. (2022).

Os métodos de tratamento secundário da água produzida possuem maior eficiência na remoção de contaminantes, como metais pesados e matéria orgânica dissolvida, e são fartamente consolidados na indústria do petróleo, mas associados a um maior custo de aquisição, operação e manutenção dos equipamentos se comparados com os métodos primários, bem como necessitam de uma gestão mais complexa dos seus resíduos (Wang et al., 2022; Elehinafe et al., 2022; Amakiri et al., 2022).

O processo de flotação apresenta baixa eficiência para remoção de partículas com diâmetro inferior a 20 μm e alta demanda energética (Freeman et al., 2020). Ainda, é descrito como sensível às variações de pH da água produzida (Naseem e Durrani, 2021). Ao passo que o processo de filtragem é mais simples e de menor custo, além da capacidade de adaptação para diversos tipos de contaminantes e baixo consumo energético (Eray et al., 2021), porém, é necessário realizar trocas periódicas dos filtros e meios adsorventes.

Na Tabela 3, apresenta-se um comparativo entre os métodos terciários para o tratamento da água produzida citados neste trabalho.

Tabela 3. Comparação entre métodos terciários para o tratamento da água produzida.

Parâmetro	Processos de oxidação avançada	Membranas
Demanda energética	Grande	Aumenta à medida que reduz o tamanho do poro
Custo de aquisição, operação e manutenção	Baixo custo de aquisição, elevado custo de operação e manutenção	Elevado
Adaptabilidade e eficiência para remoção de contaminantes	Muito grande	Muito grande
Garante qualidade da água necessária para que possa ser reutilizada	Sim	Sim

Fonte: Autoria própria, com dados de Ameta e Ameta (2018); Abdulredha, Hussain e Abdullah (2020); Albornoz, Soroka e Silva (2021); Ashraf et al. (2021); Barambu et al., (2021); Goh, Wong e Ismail (2022); Amakiri et al. (2022); Dansawad et al. (2022); Jankowski et al. (2022); Joshi e Gururani (2022).

Os métodos terciários, diferentes dos primários e secundários, ainda são pouco utilizados em unidades de produção de petróleo. Esses métodos são capazes de remover diversos tipos de poluentes e garantem padrões de qualidade que permitem a reutilização da água produzida (Ameta e Ameta, 2018; Goh, Wong e Ismail, 2022), entretanto, apresentam grande demanda energética e alto custo de operação (Amakiri et al., 2022; Joshi e Gururani, 2022). O processo de oxidação avançada, em especial, possui baixo custo de aquisição de equipamentos, comparado às membranas, e promove a completa mineralização dos contaminantes em compostos não nocivos (Ameta e Ameta, 2018, Ashraf et al., 2021). Enquanto as membranas, assim como a oxidação avançada, têm boa adaptabilidade à diferentes contaminantes, porém, têm a particularidade de ser necessário o monitoramento constante para retirada de incrustações por meio de agente químicos (Barambu et al., 2021).

4 Considerações finais

O primeiro passo para o planejamento de um tratamento efetivo da água produzida em unidades de petróleo é a sua correta caracterização, com a identificação de propriedades físicas, químicas e biológicas e de agentes contaminantes. Só então, ao considerar as propriedades da água e a sua destinação, é possível construir uma planta de tratamento de modo que a água atinja os parâmetros previamente definidos para a opção de destinação adotada.

Os métodos de tratamentos são divididos em primários, secundários e terciários. Antes de se iniciar os tratamentos específicos, normalmente, realiza-se a separação entre óleo, gás natural e água com uso de separador trifásico. Na sequência, entre os métodos primários, destacam-se hidrociclone, separador API e coagulação, floculação e sedimentação; entre os secundários, flotação e filtração e adsorção e; entre os terciários, membranas e processos de oxidação avançada.

Foi verificado que o tratamento da água produzida em unidades marítimas de petróleo tem sido feito atualmente com base em métodos primários e secundários, em especial, pelo emprego de separador trifásico (pré-tratamento), hidrociclones (tratamento primário) e processos de flotação (tratamento secundário), com posterior descarte no mar.

Tal combinação geralmente é capaz apenas de adequar a água produzida aos padrões mínimos de qualidade exigidos por legislação. Portanto, é importante aprimorar os métodos de tratamento, bem como a exigência de padrões legais mais restritivos, para reduzir os impactos ambientais das atividades de produção de petróleo e gás natural em ambiente marinho.

Referências bibliográficas

Abdulredha, M, Hussain, S and Abdullah, L (2020) ‘Overview on petroleum emulsions, formation, influence and demulsification treatment techniques’, *Arabian Journal of Chemistry*, v. 13, pp. 3403-3428. <<https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2018.11.014>>.

Albornoz, LL, Soroka, VD and Silva, MCA (2021) ‘Photo-mediated and advanced oxidative processes applied for the treatment of effluents with drugs used for the treatment of early COVID-19: Review’, *Environmental Advances*, v. 6, 100140. <<https://doi.org/10.1016/j.envadv.2021.100140>>

- Amakiri, KT, Canon, AR, Molinari, M and Angelis-Dimakis, A (2022) ‘Review of oilfield produced water treatment technologies’, *Chemosphere*, v. 298, 134064. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134064>>.
- Ambaye, Tg, Chebbi, A, Formicola, F, Prasad, S, Gomez, FH, Franzetti, A and Vaccari, M (2022) ‘Remediation of soil polluted with petroleum hydrocarbons and its reuse for agriculture: Recent progress, challenges, and perspectives’, *Chemosphere*, v. 293, 133573. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133572>>.
- Ameta, SC and Ameta, R (2018) *Advanced Oxidation Processes for Wastewater Treatment: Emerging Green Chemical Technology*. Cambridge: Academic Press.
- Ashraf, A, Liu, G, Yousaf, B, Arif, M, Ahmed, R, Irshad, S, Cheema, AI, Rashid, A and Gulzaman, H (2021) ‘Recent trend in advanced oxidation process-based degradation of erythromycin: Pollution status, eco-toxicity and degradation mechanism in aquatic ecosystems’, *Science of The Total Environment*, v. 772, 145389. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145389>>.
- Barambu, N, Bilad, M, Bustam, M, Kiki, K, Othman, M and Nordin, N (2021) ‘Development of membrane material for oily wastewater treatment: A review’, *Ain Shams Engineering Journal*, v.12, pp. 1361-1374. <<https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.08.027>>.
- Beyer, J, Goksøyr, A, Hjermand, Dø and Klungsoyr, J (2020) ‘Environmental effects of offshore produced water discharges: A review focused on the Norwegian continental shelf’, *Marine Environmental Research*, v. 162, 105155. <<https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105155>>.
- CONAMA (2007). *Resolução n° 393, de 8 de agosto de 2007*. Brasília: CONAMA/MMA.
- Dansawad, P, Yang, Y, Li, X, Shang, X, Li, Y, Guo, Z, Qing, Y, Zhao, S, You, S and Li, W (2022) ‘Smart membranes for oil/water emulsions separation: A review’, *Advanced Membranes*, v. 2, 100039. <<https://doi.org/10.1016/j.advmem.2022.100039>>.
- Elehinafe, FB, Agboola, O, Vershimaa, AD and Bamigboye, GO (2022) ‘Insights on the advanced separation processes in water pollution analyses and wastewater treatment - A review’, *South African Journal of Chemical Engineering*, v. 42, pp. 188-200. <<https://doi.org/10.1016/j.sajce.2022.08.004>>.
- Eray, E, Candelario, V, Boffa, V, Safafar, H, Munck, D, Zahrtmann, N, Kadrispahic, H and Jorgensen, M (2021) ‘A roadmap for the development and applications of silicon carbide membranes for liquid filtration: Recent advancements, challenges, and perspectives’, *Chemical Engineering Journal*, v. 414, 128826. <<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.128826>>.
- Forain (2022). ‘Three phase separators’. Disponível em: <<https://forain.net/products>> (Acesso em 05 de dezembro de 2022).
- Freeman, S, Booth, A, Sabbah, I, Tiller, R, Dierking, J, Klun, K., Rotter, A, Ben-David, E, Javidpour, J and Angel, D (2020) ‘Between source and sea: The role of wastewater treatment in reducing marine microplastics’, *Journal of Environmental Management*, v. 266, 1101642. <<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110642>>.
- Geng, S, Mao, Z, Huang, Q and Yang, C (2021) ‘Process Intensification in Pneumatically Agitated Slurry Reactors’, *Engineering*, v. 7, pp. 304-325. <<https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.03.002>>.
- Ghafoori, S, Omar, M, Koutahzadeh, N, Zendejboudi, S, Malhas, RN, Mohamed, M, Al-Zubaidi, S, Redha, K, Baraki, F and Mehvar, M (2022) ‘New advancements, challenges, and future needs on treatment of oilfield produced water: A state-of-the-art review’, *Separation and Purification Technology*, v. 289, 120652. <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120652>>.
- Goh, PS, Wong, KC and Ismail, AF (2022) ‘Membrane technology: A versatile tool for saline wastewater treatment and resource recovery’, *Desalination*, v. 521, 115377. <<https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115377>>.
- Ibrahim, MH, Banerjee, A, El-Naas, MH (2022) *Petroleum Industry Wastewater Advanced and Sustainable Treatment Method*. Amsterdam: Elsevier.
- Jankowski, W, Li, Guoqiang, L, Kujawski, W and Kujawa, J (2022) ‘Recent development of membranes modified with natural compounds: Preparation methods and applications in water treatment’, *Separation and Purification Technology*, v. 302, 122101. <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.122101>>.

- Jiménez, S, Micó, MM, Arnaldos, M, Medina, F and Contreras, S (2018) 'State of the art of produced water treatment', *Chemosphere*, v. 192, pp. 186-208. <<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.10.139>>.
- Joshi, N and Gururani, P (2022) 'Advances of graphene oxide based nanocomposite materials in the treatment of wastewater containing heavy metal ions and dyes', *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, v. 5, 100306. <<https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2022.100306>>.
- Liu, Y, Lu, H, Li, Y, Pan, Z, Dai, P, Wang, H and Yang, Q (2021) 'A review of treatment technologies for produced water in offshore oil and gas fields', *Science of The Total Environment*, v. 775, 145485. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145485>>.
- Naseem, T and Durrani, T (2021) 'The role of some important metal oxide nanoparticles for wastewater and antibacterial applications: A review', *Environmental Chemistry and Ecotoxicology*, v. 3, pp. 59-75. <<https://doi.org/10.1016/j.enceco.2020.12.001>>.
- Odiete, WE and Agunwamba, JC (2019) 'Novel design methods for conventional oil-water separators', *Heliyon*, v. 5, n. 5, e01620. <<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01620>>.
- Peng, B, Yao, Z, Wang, X, Crombeen, M, Sweeney, DG and Tam, KC (2020) 'Cellulose-based materials in wastewater treatment of petroleum industry', *Green Energy & Environment*, v. 5, pp. 37-49. <<https://doi.org/10.1016/j.gee.2019.09.003>>.
- Prakash, R, Majumder, SK and Singh, A (2018) 'Flotation technique: Its mechanisms and design parameters', *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, v. 127, pp. 249-270. <<https://doi.org/10.1016/j.cep.2018.03.029>>.
- Rajapakse, N, Zargar, M, Sen, T and Khiadani, M (2022) 'Effects of influent physicochemical characteristics on air dissolution, bubble size and rise velocity in dissolved air flotation: A review', *Separation and Purification Technology*, v. 289, 120772. <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120772>>.
- Shaikh, S, Hassan, M, Nasser, M, Sayadi, S, Ayesh, A and Vasagar, V (2021) 'A comprehensive review on harvesting of microalgae using Polyacrylamide-Based Flocculants: Potentials and challenges', *Separation and Purification Technology*, v. 277, 119508. <<https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119508>>.
- Shang, Z and Zhu, J (2021) 'Overview on plant extracts as green corrosion inhibitors in the oil and gas fields', *Journal of Material Research and Technology*, v. 15, pp. 5078-5094. <<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.10.095>>.
- Souza, JES, Araújo, BA, Sarmiento, KKF, Rebouças, LD, Medeiros, KM and Lima, CAP (2021) 'Zinc oxide polymeric nanocomposite membranes for wastewater treatment: Literature review', *Research, Society and Development*, v. 10, n. 8, e46510817402. <<https://doi.org/10.33448/rsd-v10i8.17402>>.
- Wang, C, Lu, Y, Song, C, Zhang, D, Rong, F and He, L (2022) 'Separation of emulsified crude oil from produced water by gas flotation: A review', *Science of The Total Environment*, v. 845, 157304. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157304>>.
- Whitworth, AJ, Forbes, E, Verster, I, Jokovic, V, Awatey, B and Parbhakar-Fox, A (2022) 'Review on advances in mineral processing technologies suitable for critical metal recovery from mining and processing wastes', *Cleaner Engineering and Technology*, v. 7, 100451. <<https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100451>>.
- Zhao, C, Zhou, J, Yan, Y, Yang, L, Xing, G, Li, H, Wu, P, Wang, M and Zheng, H (2022) 'Application of coagulation/flocculation in oily wastewater treatment: A review', *Science of The Total Environment*, v. 765, 142795. <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142795>>.