

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Instituto de Química

Curso: Química Tecnológica

Vitor Gomes Carvalho

Tratamento de água produzida em poços de petróleo utilizando a tecnologia de membranas

Brasília

2025

Vitor Gomes Carvalho

Tratamento de água produzida em poços de petróleo utilizando a tecnologia de membranas

Trabalho apresentado à Universidade de Brasília, Campus Darcy Ribeiro, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Química Tecnológica.

Orientador: Profª. Drª. Lidiane Pereira Bessa

BRASÍLIA

2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, em especial aos meus pais, por todo o apoio, amor e compreensão ao longo de toda a minha trajetória acadêmica. Sem o incentivo e as orientações de vocês, não teria chegado até aqui.

A minha orientadora, Lidiane Pereira Bessa, por toda a dedicação, paciência e competência, que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Seu acompanhamento foi essencial para o aprimoramento das minhas ideias e para a realização deste TCC.

A todos os professores e colegas de curso, pelas trocas de conhecimento, experiências e pelo ambiente enriquecedor que contribuiu para minha formação.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho, o meu muito obrigado.

"A ciência é muito mais do que um corpo de conhecimentos,
é um modo de pensar". – Carl Sagan

RESUMO

O petróleo é um recurso natural muito utilizado na matriz energética global e de ampla utilização na indústria petroquímica. No entanto, a exploração e produção de petróleo estão associadas a riscos ambientais significativos, especialmente devido à geração de água produzida, um subproduto da extração de petróleo que contém diversos contaminantes, como hidrocarbonetos, metais pesados e compostos químicos. A gestão adequada dessa água é crucial para mitigar impactos ambientais. Na atualidade, há várias tecnologias de tratamento da água produzida, incluindo métodos físicos (como hidrociclones, adsorção, flotação e filtração), químicos (precipitação química, eletrodiálise, eletrocoagulação e processos oxidativos avançados) e biológicos (filtros biológicos, biorreatores e células de combustível microbiana). O uso de tecnologias de membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa) se apresenta como uma solução promissora para o tratamento eficiente e sustentável da água produzida, permitindo a remoção de contaminantes e a reutilização da água. A integração de diferentes técnicas, como a combinação de processos biológicos com tecnologias de membranas, é uma abordagem eficaz e sustentável. No entanto, desafios como a incrustação das membranas, o alto consumo de energia e a complexidade operacional ainda precisam ser superados para viabilizar a aplicação em larga escala, especialmente em locais remotos de exploração de petróleo. O tratamento da água produzida é uma área em constante evolução, com tecnologias que visam não apenas a remoção de contaminantes, mas também a recuperação de recursos.

Palavras-chave: Água Produzida. Tecnologias de Membranas. Tratamento de Efluentes. Processos de Separação.

ABSTRACT

Oil is a natural resource widely used in the global energy matrix and also has extensive applications in the petrochemical industry. However, oil exploration and production are associated with significant environmental risks, especially due to the generation of produced water, a byproduct of oil extraction that contains various contaminants such as hydrocarbons, heavy metals, and chemicals. Proper management of this water is crucial to mitigate environmental impacts. Currently, there are several technologies for treating produced water, including physical methods (such as hydrocyclones, adsorption, flotation, and filtration), chemical methods (chemical precipitation, electrodialysis, electrocoagulation, and advanced oxidation processes), and biological methods (biological filters, bioreactors, and microbial fuel cells). The use of membrane technologies (microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration, and reverse osmosis) presents a promising solution for the efficient and sustainable treatment of produced water, allowing the removal of contaminants and the reuse of water. The integration of different techniques, such as combining biological processes with membrane technologies, is an effective and sustainable approach. However, challenges such as membrane fouling, high energy consumption, and operational complexity still need to be overcome to enable large-scale application, especially in remote oil exploration sites. Produced water treatment is an area in constant evolution, with technologies aimed not only at contaminant removal but also at resource recovery.

Key-words: Produced Water. Membrane Technologies. Effluent Treatment. Separation Processes.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema de um hidrocilone e o mecanismo de separação 18
Figura 2 - Mecanismo de flotação por ar 20
Figura 3 - Exemplo de filtro de areia 21
Figura 4 - Processo de Precipitação Química (coagulação e floculação) 23
Figura 5 - Categorias Principais de Membranas Sintéticas 28
Figura 6 - Relação entre Força Motriz, Morfologia e Seletividade 31
Figura 7 - Representação Diagramática das configurações populares de DM; a) DMCD b) DMEA c) MDV d) MDGA 34
Figura 8 - Diagrama de fluxo do processo analisado 36
Figura 9 - Diagrama esquemático do sistema MMG-DM: (a) MMG e (b) DM. Métodos de pré-tratamento, incluindo oxidação SPC, filtração granular (zeólita, areia de sílica, CGA e AA), assim como coagulação, foram aplicados 37
Figura 10 - Diagrama esquemático da destilação por membrana a vácuo usado no estudo 39
Figura 11 - Mecanismo de penetração COVs: A) moléculas de 2 butoxietanol (2-BE) são atraídas e aderem à superfície das membranas devido a interações hidrofóbicas entre a cabeça alquila no 2-BE e a superfície hidrofóbica do polímero da membrana; B) três ligações de hidrogênio são formadas entre o 2-BE e as moléculas de água; C) os vapores de água “empurram” as moléculas de 2-BE avançando através dos poros da membrana; D) a umectação dos poros começa a aparecer devido ás propriedades surfactantes do 2-BE 40
Figura 12 - Sistema de filtração por membrana de fibra oca (a) configuração (b) e (c) módulos para MF, UF e NF 42
Figura 13 - Representação esquemática das estratégias de tratamento MF-B e B-MF 43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Ácido Acético
DMEA	Destilação por Membrana com Espaço de Ar
B	Tratamento Biológico
B-MF	Tratamento Biológico seguido de Microfiltração
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xilenos
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DMCD	Destilação por Membrana com Contato Direto
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
CAG	Carvão Ativado Granular
MMG	Membrana Movida por Gravidade
DM	Destilação por Membrana
CrM	Cristalização por Membrana
MF	Microfiltração
MF-B	Microfiltração seguida de Tratamento Biológico
DME	Destilação Multiestágios
NF	Nanofiltração
O&G	Óleos e Graxas
POA	Processos Oxidativos Avançados
FDPV	Fluoreto de Polivinilideno
OI	Osmose Inversa
DSS	Dodecil Sulfato de Sódio
DMGA	Destilação por Membrana com Gás Arrastador
SPC	Oxidação por Peróxido de Hidrogênio e Catalisador
SS	Sólidos Suspensos
COT	Carbono Orgânico Total
SST	Sólidos Suspensos Totais
UF	Ultrafiltração
UV	Ultravioleta
DMV	Destilação por Membrana a Vácuo
COVs	Compostos Orgânicos Voláteis

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.2 OBJETIVO GERAL 13
1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 13
2 REVISÃO TEÓRICA 14
2.1 ÁGUA PRODUZIDA EM POÇOS DE PETRÓLEO 14
2.1.1 Definição 14
2.2 Origem da água produzida 14
2.3 Características da água produzida 15
2.4 Tratamento da Água Produzida 16
2.4.1 Tratamentos Físicos 17
2.4.1.1 Hidrociclone 17
2.4.1.2 Adsorção 18
2.4.1.3: Flotação 19
2.4.1.4 Filtração 20
2.4.2 Tratamentos Químicos 21
2.4.2.1 Precipitação química 22
2.4.2.2 Eletrodiálise 23
2.4.2.3 Eletrocoagulação 23
2.4.2.4 Processos de Oxidação Avançada 24
2.4.3 Tratamentos Biológicos 25
2.4.3.1 Filtros Biológicos 25
2.4.3.2 Biorreatores 25
2.4.3.3 Pântano construído 25
2.4.3.4 Célula de Combustível Microbiana 26
3 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS 26
3.1 Características das Membranas 27

3.2 Microfiltração 30
3.3 Ultrafiltração 31
3.4 Nanofiltração 31
3.5 Osmose inversa 32
3.6 Destilação por membranas 32
4 METODOLOGIA 35
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 35
6 CONCLUSÃO 44
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS 45
BIBLIOGRAFIA 47

1 INTRODUÇÃO

O petróleo, um recurso natural de extrema relevância, é constituído por uma complexa mistura de hidrocarbonetos, encontrado em estado líquido no interior de reservatórios subterrâneos. Este recurso desempenha um papel fundamental na matriz energética global, sendo uma das principais fontes de energia que sustentam as atividades econômicas e o cotidiano da sociedade moderna. Além de sua função como combustível, o petróleo é amplamente empregado como matéria-prima essencial na indústria petroquímica, dando origem a uma vasta gama de produtos, desde plásticos e polímeros até fertilizantes e outros insumos industriais, que são indispensáveis para diversos setores da economia. Sua importância estratégica e versatilidade o tornam um elemento central no desenvolvimento tecnológico e industrial contemporâneo (THOMAS, 2004).

No entanto, a indústria de Exploração e Produção de petróleo está associada a riscos ambientais significativos, particularmente durante as etapas de perfuração e produção. Essas operações demandam o uso intensivo de recursos hídricos e uma variedade de substâncias químicas, que, se não gerenciadas adequadamente, podem resultar em impactos ambientais graves. A poluição decorrente dessas atividades é uma preocupação global, pois pode gerar a contaminação de ecossistemas, tanto terrestres quanto aquáticos, em áreas próximas a campos de petróleo. A contaminação pode afetar fontes de água potável e afetar comunidades locais. Esses desafios destacam a necessidade de práticas mais sustentáveis e de rigorosos controles ambientais para mitigar os impactos negativos dessa indústria (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024).

Além dos hidrocarbonetos, é bastante comum que a produção de petróleo seja acompanhada pela extração de água. O volume de água gerado durante esse processo varia significativamente, dependendo das características específicas do reservatório e das condições em que a água está presente no meio poroso (THOMAS, 2004). Essa água é considerada um subproduto das atividades de Exploração e Produção, e um potencial risco ambiental (ZARKANI; EL FADEL, 2024). Gerenciar este subproduto apresenta um desafio e talvez uma oportunidade para a indústria, especialmente sob regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas (ZARKANI; EL FADEL, 2024).

Água produzida pode ser definida como sendo toda água gerada ao longo da exploração e produção do petróleo. Caracteriza-se por ser um rejeito com elevado caráter poluidor e grande complexidade, pois como fica em contato com o petróleo e o gás, apresenta uma grande variedade de substâncias dissolvidas (SOUZA *et al*, 2015). Esse fator é agravado, mais ainda, pelas características físicas e químicas amplamente heterogêneas da água produzida, que dependem de fatores como a composição de hidrocarbonetos, a água usada em operações de recuperação avançada de petróleo, a formação geológica e a localização do campo de petróleo. A presença de compostos orgânicos recalcitrantes no descarte de águas residuais de petróleo é um dos principais riscos quando descartados no ambiente marinho e em regiões costeiras próximas a áreas agrícolas, rios e córregos (AMAKIRI *et al*., 2022).

Por causa da grande variação de características, causada pela localização geográfica e do tipo de método de perfuração, completação, recuperação, entre outros fatores de produção de óleo e gás, não há um método único para o tratamento desse subproduto, seja para descarte, seja para reaproveitamento (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024). A água produzida é gerenciada por meio de uma sequência convencional comum de tratamento, incluindo separadores de fase, decantadores, ciclones e filtros grosseiros, para atender aos padrões de descarte. No entanto, esses processos não são adequados para atender aos critérios rigorosos de qualidade da água previstos para aplicações de reutilização (JIMÉNEZ *et al*., 2018).

A composição da água produzida de diferentes fontes pode variar em ordens de magnitude. Os principais compostos da água produzida incluem: compostos de óleo dissolvidos e dispersos, minerais formadores dissolvidos, compostos químicos de produção, sólidos de produção (incluindo sólidos formadores, produtos de corrosão e incrustação, bactérias, ceras e asfaltenos), gases dissolvidos (ALI *et al*., 2018).

Diversas tecnologias de tratamento são necessárias para reduzir o nível de contaminantes tóxicos ou melhorar a qualidade da água produzida em poços de petróleo. As tecnologias são classificadas em tratamentos primário, secundário e terciário (AMAKIRI *et al*., 2022).

Os principais métodos para tratamento de água produzida são (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024):

- Separação físico-química: A água é submetida a processos como decantação, filtração e flotação para remover sólidos e óleos livres.
- Dessalinização: A utilização de membranas de osmose reversa ou destilação para remover a salinidade da água.
- Tratamento biológico: O uso de bactérias e outros organismos para decompor contaminantes orgânicos presentes na água.
- Remoção de metais pesados: Processos como precipitação química ou troca iônica para remover elementos como mercúrio, arsênio e cádmio.
- Reinjeção de água: Em muitos casos, a água produzida é reinjetada no reservatório de onde foi extraída, tanto para aumentar a pressão e a recuperação do petróleo quanto para evitar o descarte de grandes volumes de água.

A tecnologia de membranas tem emergido como uma solução altamente promissora para o tratamento de água produzida, destacando-se por sua eficácia na remoção de uma ampla gama de contaminantes. Além de sua eficiência, essa abordagem se apresenta como uma alternativa mais sustentável quando comparada aos métodos convencionais, que frequentemente geram subprodutos que podem ser prejudiciais ao meio ambiente. Nesta revisão, serão exploradas e analisadas as principais técnicas de tratamento disponíveis, abrangendo métodos físicos, químicos e biológicos, com um enfoque especial nas tecnologias de membranas. Serão discutidos os princípios de funcionamento, as aplicações, os benefícios e os desafios associados a cada técnica. Adicionalmente, serão abordadas as perspectivas futuras para o aprimoramento dessas tecnologias, considerando avanços em materiais, *designs* inovadores e integração com outras abordagens de tratamento, visando otimizar a eficiência e a sustentabilidade no manejo da água produzida.

1.2 OBJETIVO GERAL

Investigar e analisar as tecnologias de membranas disponíveis para o tratamento da água produzida em poços de petróleo, e a reutilização como água de injeção.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar os principais contaminantes presentes na água produzida.
- Avaliar métodos de tratamento físico, químico e biológico.
- Avaliar as tecnologias de membrana utilizadas no tratamento da água produzida.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 ÁGUA PRODUZIDA EM POÇOS DE PETRÓLEO

2.1.1 Definição

A água produzida em poços de petróleo refere-se à água que é extraída juntamente com o petróleo durante o processo de extração.

2.2 Origem da água produzida

A água produzida se origina de diversas fontes e pode ser classificada nos tipos principais:

- Água associada ao petróleo: Esta água é geralmente encontrada nos reservatórios subterrâneos junto com o petróleo. Quando o petróleo é extraído, a água, muitas vezes salina, também vem à tona, embora em menor volume do que o próprio petróleo.
- Água de formação: Em alguns casos, a água é encontrada em grandes quantidades no reservatório subterrâneo, e sua extração é inevitável. Ela pode ser proveniente de aquíferos ou de água residual de outros processos geológicos.
- Água Injetada: Água suplementar é injetada no reservatório para superar a redução da pressão e aumentar a recuperação do petróleo.

A água produzida pode ter origem em acumulações naturais de água, conhecidas como aquíferos, que frequentemente estão localizadas adjacentes às formações rochosas que contêm hidrocarbonetos. Além disso, ela também pode ser resultante da injeção de água em reservatórios, uma prática comum em projetos de recuperação secundária ou terciária de petróleo, que tem como objetivo aumentar a pressão do reservatório e melhorar a eficiência na extração de óleo. Esses processos contribuem para a presença significativa de água no fluxo de produção (THOMAS, 2004).

Embora a água esteja sempre presente nos reservatórios de petróleo, nem sempre sua quantidade, expressa pelo termo "saturação de água", é suficiente para permitir seu deslocamento através da formação rochosa. Existe um limiar crítico,

conhecido como saturação mínima de água, a partir do qual a água adquire mobilidade e pode fluir dentro do meio poroso. Esse limiar não é fixo, variando de acordo com as características específicas da rocha reservatório, como sua porosidade e permeabilidade, bem como das propriedades dos fluidos presentes (THOMAS, 2004). Para que o mecanismo de influxo de água ocorra, é essencial que a formação rochosa que contém os hidrocarbonetos, seja óleo ou gás, esteja em contato direto com uma extensa acumulação de água. Essas formações, saturadas predominantemente com água, são denominadas aquíferos e podem estar posicionadas abaixo do reservatório de hidrocarbonetos, em uma configuração subjacente, ou conectadas lateralmente a ele. Essa proximidade e conexão entre o reservatório e o aquífero são fundamentais para permitir o movimento da água em direção ao reservatório, à medida que a pressão diminui durante a produção (THOMAS, 2004).

2.3 Características da água produzida

A água produzida é composta por uma combinação de água subterrânea extraída da formação geológica, substâncias químicas utilizadas durante os processos de perfuração e produção, e de água pluvial que pode se acumular nas áreas de perfuração e produção. Adicionalmente, essa água também pode ser derivada de fontes não convencionais de hidrocarbonetos, como óleo e gás de xisto, areias betuminosas e metano de leito de carvão (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024).

Os principais elementos da água produzida podem ser classificados de forma geral nos seguintes grupos (GHAFOORI *et al*., 2022):

- Compostos de óleo dissolvidos e dispersos: a dissolução do óleo na água produzida é influenciada por diversos fatores, como o tipo de óleo, o volume de água produzida, as condições termodinâmicas e a duração da produção. A maior parte dos hidrocarbonetos não se dissolve em água, fazendo com que o óleo se disperse na água e forme emulsões de óleo em água. Gotículas finas de óleo suspensas na água produzida geram óleo disperso, e o grau de dispersão é influenciado por fatores como a densidade do óleo e a tensão superficial entre a água e o óleo.
- Minerais dissolvidos da formação: os compostos inorgânicos na água produzida são divididos em ânions e cátions, como sais dissolvidos, materiais

radioativos e metais pesados, variando conforme as condições do processo e as características do poço. O sódio e o cloreto são as principais fontes de salinidade na água produzida. De acordo com a idade do poço e a geologia da formação, a água produzida pode conter pequenas quantidades de diferentes metais pesados, como cobre, cádmio, chumbo, mercúrio, prata, cromo, níquel e zinco. O rádio-226 e o rádio-228 são os materiais radioativos naturais mais comuns na água produzida.

- Compostos químicos da produção: de acordo com as características dos poços, durante a extração de petróleo e gás, são adicionados alguns aditivos, como diferentes tipos de inibidores, biocidas, dispersantes de asfaltenos, desincrustantes, quebradores de emulsões e produtos químicos para o tratamento de água, como clarificantes, coagulantes e floculantes, com o objetivo de tratar e otimizar a separação entre água e óleo.
- Sólidos da produção: os sólidos da produção consistem em diversos tipos de compostos orgânicos e inorgânicos, como argilas, ceras, bactérias, carbonatos, areia, lodo, produtos de corrosão e incrustação, além de sólidos formados na própria formação do poço, que estão presentes na água produzida. Uma quantidade significativa de sólidos suspensos, como lodo, areia e argila, pode formar uma lama sólida, o que pode reduzir a produção de água devido ao bloqueio no fundo do poço. O SiO_2, Fe_2O_3, Fe_3O_4 e $BaSO_4$ são alguns exemplos de substâncias inorgânicas que também podem ser encontradas na água produzida.
- Gases dissolvidos: a água produzida proveniente de campos de petróleo apresenta uma grande quantidade de gases dissolvidos, principalmente na forma de hidrocarbonetos voláteis. Contudo, os gases mais comuns na água produzida são CO_2, O_2 e H_2S. A solubilidade desses gases na água é influenciada por diversos fatores, como temperatura, pressão e salinidade.

2.4 Tratamento da Água Produzida

Devido a sua composição altamente variável, dependendo do local geológico e das operações de produção/extração, não há, na indústria, um único método de tratamento. As condições para o descarte também variam para cada país. Assim sendo, as tecnologias de tratamento de água produzida são escolhidas de acordo com

a característica da água produzida e dos requisitos exigidos, pelo órgão regulamentador de cada região, para descarte ou reutilização.

Os tratamentos da água produzida se dividem em físicos, químicos e biológicos, que podem ser combinados para atender os parâmetros mínimos da regulação.

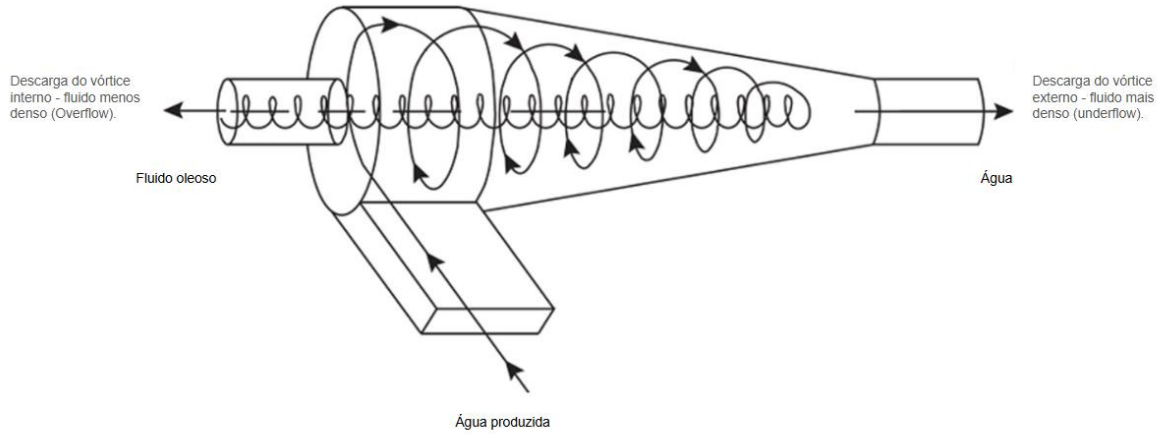
2.4.1 Tratamentos Físicos

Os métodos de tratamento físico são eficazes na remoção de partículas maiores de contaminantes, tanto orgânicos quanto inorgânicos. Esse tipo de tratamento é comumente empregado como uma etapa inicial, ou pré-tratamento, antes da aplicação de tecnologias mais sofisticadas. Dentre as diversas técnicas associadas ao tratamento físico, os avanços mais recentes nas abordagens mais utilizadas incluem o uso de ciclones, processos de adsorção, flotação e filtração (GHAFOORI *et al*., 2022).

2.4.1.1 Hidrociclone

O hidrociclone (Figura 1) é um método de tratamento físico que promove a separação de partículas sólidas e gotículas de óleo presentes em águas residuais provenientes da indústria petrolífera. Seu funcionamento baseia-se na pressão do fluido, que gera uma força centrífuga e um fluxo específico, permitindo a separação das partículas ou gotículas do líquido. Para que essa separação ocorra de forma eficiente, é essencial que as partículas ou gotículas possuam uma densidade significativamente diferente da do meio em que estão suspensas (AMAKIRI *et al*., 2022). O hidrociclone consiste em uma câmara cilíndrica conectada a uma seção cônica, que direciona os fluxos em direção ao ápice do cone, posicionado na saída inferior do equipamento (AMAKIRI *et al*., 2022). Os hidrociclones líquido-líquido são utilizados para realizar a separação de fases no tratamento de água produzida. A separação entre as fases líquido-líquido é mais complexa devido à pequena diferença de densidade entre os fluidos, ao comportamento dinâmico do fluido e à possibilidade de coalescência ou fragmentação das gotículas. O tamanho das partículas da fase dispersa pode variar entre 5 e 15 µm (GHAFOORI *et al*., 2022).

Figura 1 - Esquema de um hidrociclone e o mecanismo de separação.



Fonte: adaptado de Amakiri *et al*, 2022.

2.4.1.2 Adsorção

A adsorção é o processo físico-químico no qual moléculas, átomos ou íons de uma substância se acumulam na superfície de um sólido ou líquido, formando uma camada superficial. Esse fenômeno ocorre devido a forças de atração, como ligações de Van der Waals ou interações eletrostáticas, entre a substância adsorvida e a superfície do adsorvente. A adsorção é comumente empregada como uma etapa de "polimento" dentro de um processo de tratamento, em vez de ser uma tecnologia autônoma, uma vez que os materiais adsorventes podem ser rapidamente saturados por compostos orgânicos. Esses adsorventes são eficazes na remoção de mais de 80% de metais pesados, como ferro (Fe) e manganês (Mn), além de carbono orgânico total, BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos) e óleos presentes na água produzida (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024).

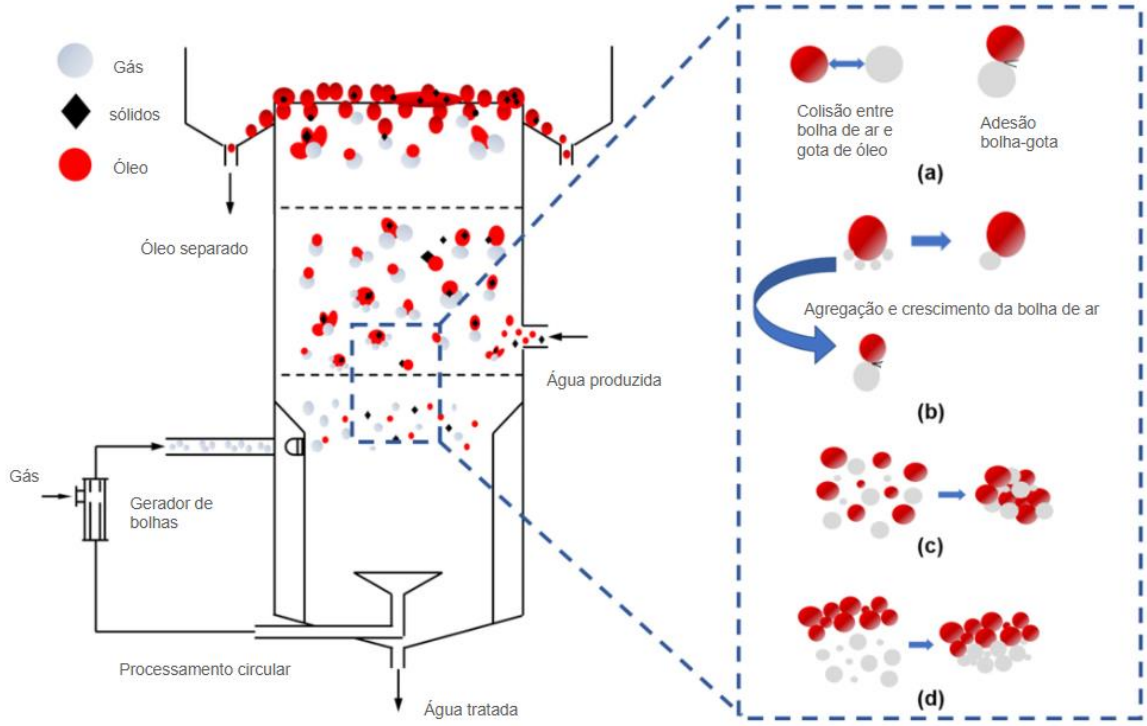
Diversos materiais adsorventes, como carvão ativado, zeólitas e argilas organofílicas, têm sido utilizados no tratamento de água produzida. Esse método não requer a adição de produtos químicos durante sua operação regular (GHAFOORI *et al*., 2022). A adsorção pode ser empregada em situações específicas, como em plataformas de armazenamento e descarregamento flutuantes ou em locais onde a reinjeção ou outras tecnologias não são viáveis, devido à sua simplicidade, requisitos operacionais diretos e alta eficiência. No entanto, para uma aplicação prática e economicamente viável, é essencial considerar a regeneração do adsorvente,

principalmente devido aos desafios logísticos de transporte. Isso se torna ainda mais crítico em plataformas *offshore*, onde é fundamental regenerar o adsorvente saturado diretamente a bordo (HENDGES *et al*., 2024). As principais limitações associadas à tecnologia de adsorção envolvem, em primeiro lugar, o risco potencial de obstrução do meio adsorvente devido à acumulação de partículas, o que pode reduzir significativamente sua eficiência operacional. Além disso, o processo de adsorção frequentemente resulta na geração de um subproduto químico, o qual pode demandar tratamento ou descarte adequado, adicionando complexidade e custos ao sistema. Esses fatores destacam desafios importantes que precisam ser considerados para a otimização e aplicação dessa tecnologia em diversos contextos industriais e ambientais (GHAFOORI *et al*., 2022).

2.4.1.3: Flotação

Flotação é um método de separação físico-químico em que partículas sólidas de uma mistura são separadas pela adesão a bolhas de ar, formando uma espuma que pode ser removida, como mostrado na Figura 2. Utilizado para separar misturas heterogêneas sólido-líquido ou sólido-sólido. As bolhas aderem aos poluentes, formando flocos iniciais que continuam a crescer por meio de captura, envolvimento e pontes, até que não consigam resistir ao cisalhamento do fluido ou alcancem a área de separação (CÉSAR; DE JAGER; NJOYA, 2024). Essa tecnologia tem sido extensivamente empregada no tratamento de águas produzidas em plataformas *offshore*, destacando-se como uma solução eficaz e versátil. Um dos principais motivos para sua ampla adoção reside nas suas múltiplas vantagens, entre as quais se destaca a capacidade de realizar a remoção simultânea de óleo e sólidos em suspensão. Essa dupla funcionalidade não apenas simplifica o processo de tratamento, mas também contribui para a otimização de recursos e a redução de custos operacionais (LIU *et al*., 2021).

Figura 2 - Mecanismo de flotação por ar.



Fonte: adaptado de Liu *et al*., 2021.

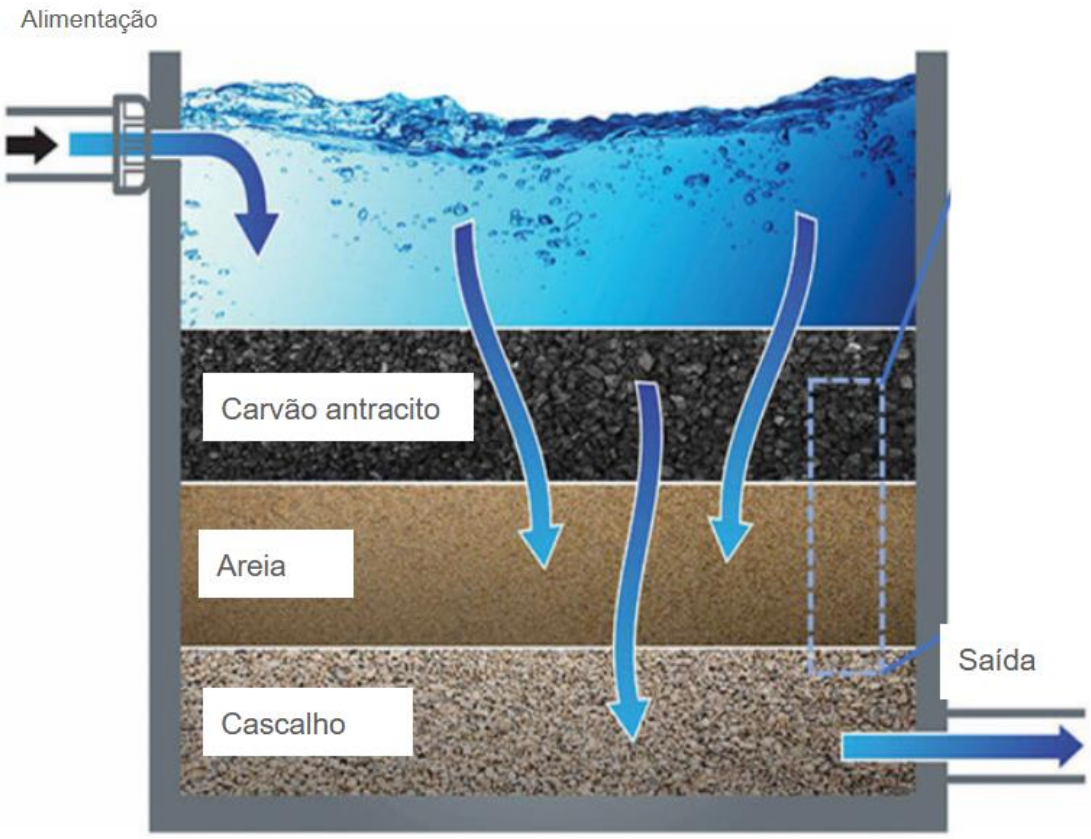
No entanto, é importante destacar que a flotação apresenta algumas desvantagens significativas, entre as quais se inclui o elevado consumo de energia. Esse alto consumo decorre da necessidade de aumentar a energia para pressurizar o sistema, bem como para assegurar uma circulação eficiente do gás. Tais requisitos energéticos podem impactar tanto a viabilidade econômica quanto a sustentabilidade do processo, especialmente em operações de grande escala (CÉSAR; DE JAGER; NJOYA, 2024). Além disso, o lodo produzido durante o processo de flotação exige uma remoção e um descarte apropriados, o que adiciona uma camada de complexidade ao sistema. Esse resíduo, frequentemente composto por uma mistura de sólidos e substâncias químicas, demanda um manejo apropriado para evitar impactos ambientais e garantir a conformidade com normas regulatórias (AMAKIRI *et al*., 2022).

2.4.1.4 Filtração

A filtração é o processo de separação no qual um sólido é retido por um material poroso, como papel de filtro ou membranas, enquanto o líquido ou gás atravessa o material. Utilizado para separação sólido-líquido ou sólido-gás. Os filtros de areia são

comumente empregados para remover partículas sólidas finas que não sedimentaram naturalmente. Além disso, eles podem ser eficazes na remoção de certos metais, como o ferro (Fe), sendo capazes de eliminar mais de 90% desse elemento. Existem diferentes tipos de filtros de areia, incluindo filtros de areia por gravidade, filtros de areia pressurizados, filtros de areia de fluxo ascendente e filtros de areia lentos (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024). Um exemplo de filtro de areia é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de filtro de areia.



Fonte: adaptado de Liu *et al*., 2021.

2.4.2 Tratamentos Químicos

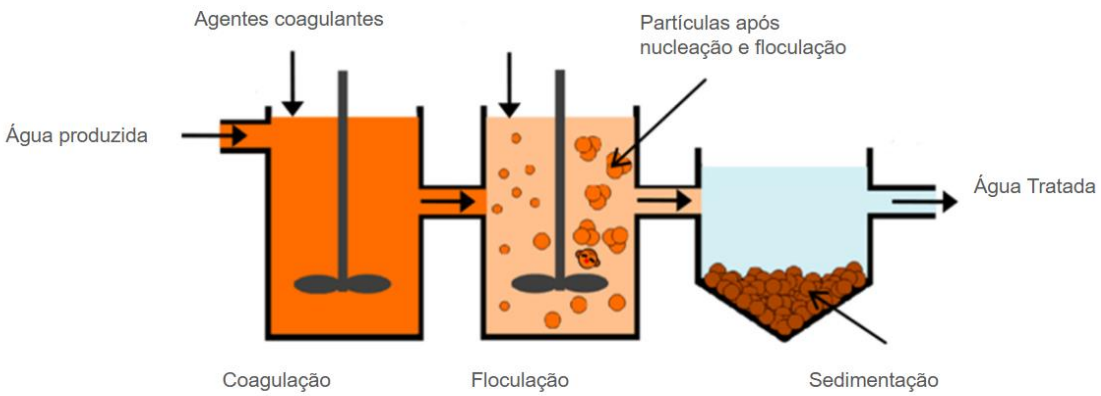
Diversos métodos químicos podem ser empregados para o tratamento de águas produzidas, baseando-se em reações químicas específicas para a remoção de contaminantes. Entre as técnicas mais utilizadas estão a precipitação química, eletroquímica e os Processos Oxidativos Avançados (POA). Um sistema de tratamento de águas produzidas eficaz deve ser capaz de reduzir ou eliminar uma ampla gama de contaminantes, incluindo sólidos totais dissolvidos, óleo disperso,

sólidos em suspensão, gases dissolvidos, substâncias químicas e materiais radioativos, além de amônia, sais e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (GHAFOORI *et al*., 2022). Métodos eletroquímicos têm se mostrado eficazes para tratar esse tipo de água residual, principalmente devido à sua capacidade de promover reações de oxidação e redução de contaminantes de maneira eficiente (CHO *et al*., 2024).

2.4.2.1 Precipitação química

A precipitação química é um método que envolve a adição de reagentes químicos à água, formando compostos insolúveis que, ao se agregarem, formam partículas sólidas chamadas "flocos". Esses flocos podem ser facilmente removidos por processos de sedimentação ou filtração, como mostrado na Figura 4. A coagulação tem como objetivo remover partículas suspensas através da adição de agentes químicos conhecidos como coagulantes, como sulfato de alumínio, cloreto férrico, sulfato férrico ou polímeros. Os coagulantes atuam na redução do potencial zeta do sistema coloidal, atingindo um valor no qual as partículas coloidais podem se aglutinar de forma eficiente. Esse processo é favorecido quando são estabelecidas condições adequadas de agitação. Durante a aplicação, os sais solúveis de alumínio e ferro se dissociam em íons, gerando espécies catiônicas que, por sua vez, formam colóides compostos por hidroxilas. Essas espécies hidroxiladas atuam como agentes floculantes. Por meio de interações coulombianas, as partículas suspensas no meio interagem com as cargas positivas presentes na superfície desses coloides, resultando na formação de flocos de tamanho considerável, que subsequentemente se depositam. Esse mecanismo é fundamental para a remoção eficaz de partículas coloidais em processos de tratamento de água (AMAKIRI *et al*., 2022). Na floculação, a aglomeração ocorre como resultado das forças de van der Waals (AMAKIRI *et al*., 2022).

Figura 4 - Processo de Precipitação Química (coagulação e floculação).



Fonte: adaptado de Amakiri *et al*, 2022

2.4.2.2 Eletrodiálise

A eletrodiálise é uma técnica eletroquímica que emprega um campo elétrico aplicado para induzir a migração de íons através de membranas seletivamente permeáveis, permitindo a separação eficiente desses íons da água. Esse processo é altamente versátil e pode ser aplicado tanto para a dessalinização de águas salobras quanto para a redução da concentração de sais e outros contaminantes inorgânicos presentes em águas produzidas. Por facilitar a remoção seletiva de íons indesejados, a eletrodiálise é uma solução tecnologicamente avançada e eficaz para o tratamento de águas com elevada carga de sais, contribuindo para a obtenção de água de qualidade adequada para reuso ou descarte mais seguro. (CHO *et al*., 2024). No entanto, esse método resulta na produção de água rejeitada ou salobra, caracterizada por uma elevada concentração de sais e poluentes. As membranas utilizadas nesse processo requerem limpeza periódica, por meio de enxágues, o que gera resíduos. Além disso, as membranas devem ser substituídas ao final de seu ciclo de vida útil. Vale destacar que o tratamento demanda uma quantidade significativa de energia ao longo de todo o processo (AMAKIRI *et al*., 2022).

2.4.2.3 Eletrocoagulação

A eletrocoagulação é uma tecnologia alternativa mais comum para a coagulação química ou floculação. Essa abordagem destaca-se por necessitar de doses menores de reagentes, gerando, assim, um volume reduzido de lodo. Além

disso, é capaz de reduzir significativamente os custos operacionais, tornando-se uma opção eficiente e econômica para o tratamento de águas e efluentes (BAI *et al*., 2024). Trata-se de um processo no qual eletrodos são empregados para gerar coagulantes em solução por meio de uma reação eletroquímica. Quando uma corrente elétrica é aplicada aos eletrodos, ocorre a liberação de íons metálicos na água, os quais interagem com os contaminantes presentes. Esses íons metálicos formam flocos que têm a capacidade de aglutinar diversas substâncias indesejadas, como óleos, sólidos suspensos e partículas finas, facilitando sua remoção (BAI *et al*., 2024).

Os processos de Eletrocoagulação representam abordagens inovadoras e promissoras para a remoção de diversos tipos de contaminantes presentes na água produzida. As vantagens desta tecnologia incluem uma operação simplificada, a utilização de equipamentos de baixo custo, tempos de tratamento reduzidos, além de um consumo menor de produtos químicos e uma produção de lodo significativamente baixa. A eletrocoagulação é capaz de eliminar substâncias orgânicas, gerar e armazenar energia, e ainda possibilitar a recuperação de materiais valiosos da água produzida, tudo isso com um impacto ambiental reduzido. No entanto, é necessário realizar mais estudos para otimizar os parâmetros operacionais, como o tempo de eletrocoagulação, a velocidade de circulação do fluido e a densidade de corrente, a fim de aprimorar ainda mais a eficiência do processo. (GHAFOORI *et al*., 2022).

2.4.2.4 Processos de Oxidação Avançada

O objetivo dos Processos de Oxidação Avançada é produzir oxidantes fortes e radicais intermediários, como os radicais hidroxila, que, por meio de reações químicas com os poluentes, podem destruir as substâncias orgânicas dissolvidas na solução e reduzir a toxicidade dos compostos alvo por meio de processos de oxidação (AMARJIT RAJBONGSHI; SUBRATA BORGOHAIN GOGOI, 2024). Nos últimos anos, os processos de oxidação avançada tornaram-se cada vez mais populares devido à sua alta eficiência, facilidade de automação, versatilidade e simplicidade nas condições operacionais (FENG *et al*., 2023). Esses processos incluem técnicas como a oxidação com o reagente de Fenton, fotólise ultravioleta (UV) e sonólise, e são capazes de degradar os poluentes orgânicos em temperatura e pressão ambientes. Os contaminantes orgânicos são comumente oxidados a CO_2 (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024).

2.4.3 Tratamentos Biológicos

O tratamento biológico baseia-se na capacidade dos microrganismos de decompor substâncias orgânicas complexas presentes na água, transformando-as em compostos mais simples, como dióxido de carbono, água e biomassa. Esse processo ocorre principalmente por meio de dois tipos de processos biológicos (SINGH *et al*., 2024):

- Aeróbico: Nesse processo, os microrganismos utilizam oxigênio para degradar os compostos orgânicos.
- Anaeróbico: Quando não há oxigênio disponível, os microrganismos anaeróbicos utilizam outros compostos como aceitadores de elétrons, realizando a degradação de poluentes orgânicos mais complexos. Esse método é geralmente mais eficaz para compostos mais recalcitrantes e em águas com concentrações elevadas de óleo e outros poluentes.

2.4.3.1 Filtros Biológicos

Os Filtros Biológicos são dispositivos que utilizam uma combinação de material filtrante e microrganismos para tratar a água produzida. À medida que a água passa através do filtro, os poluentes são retidos e degradados por uma microbiota adaptada (PURNIMA *et al*., 2023).

2.4.3.2 Biorreatores

Os Biorreatores são sistemas biológicos onde a água é passada por uma matriz onde microrganismos podem se aderir e degradar os poluentes. No caso do leito fixo, a matriz é estacionária, enquanto no leito móvel, os microrganismos podem se mover livremente dentro do sistema. Esses biorreatores podem ser projetados para operar de forma aeróbica ou anaeróbica, dependendo das condições necessárias (GHAFOORI *et al*., 2022).

2.4.3.3 Pântano construído

O pântano construído (Constructed wetland) é uma técnica amplamente utilizada para o tratamento de águas residuais agrícolas, industriais e municipais. Ela apresenta várias vantagens, como alta eficiência energética, menores custos de

investimento e manutenção, operação conveniente e ecológica, além de alta eficiência na remoção de efluentes, mas necessita de muito espaço (SINGH *et al*., 2024).

2.4.3.4 Célula de Combustível Microbiana

A Célula de Combustível Microbiana (Microbial fuel cell) é uma tecnologia que utiliza microrganismos para converter energia química presente em compostos orgânicos em eletricidade. Este processo é possível devido à capacidade de certos microrganismos de transferir elétrons diretamente para um eletrodo durante a oxidação de substâncias orgânicas (SINGH *et al*., 2024). A célula de combustível microbiana consiste basicamente em dois eletrodos, um ânodo e um cátodo, que são separados por uma membrana iônica (ou membrana de troca iônica). No ânodo, os microrganismos, geralmente bactérias, degradam substâncias orgânicas presentes em resíduos, como águas residuais ou lodo, liberando elétrons e prótons. Os elétrons gerados no processo de oxidação dos substratos são transferidos para o ânodo, e daí seguem para o cátodo através de um circuito externo, gerando eletricidade. Os prótons, por sua vez, atravessam a membrana iônica até o cátodo, onde se combinam com oxigênio e elétrons, formando água (OJHA; PRADHAN, 2024). Como as águas residuais de campos de petróleo contêm altas concentrações de hidrocarbonetos e várias substâncias recalcitrantes, seria difícil remediar a água usando apenas as Células de Combustível Microbiana (GONG; QIN, 2012).

Os métodos biológicos para tratar águas produzidas utilizando microalgas, fungos e bactérias em sistemas aeróbicos e anaeróbicos são benéficos devido ao baixo custo operacional e menores exigências de energia. No entanto, em concentrações elevadas de petróleo, os métodos biológicos falham devido à inibição do crescimento da biomassa (PURNIMA *et al*., 2023).

3 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Os processos de separação por membranas são tecnologias de separação baseadas no uso de uma membrana semipermeável que permite a passagem seletiva de determinadas substâncias, enquanto retém outras, com base em propriedades como tamanho das partículas, carga, polaridade ou até mesmo características químicas. Esses processos são amplamente utilizados em várias indústrias, incluindo

a de água e esgoto, alimentos e bebidas, farmacêutica, petroquímica e biotecnologia (HABERT, 2006).

As membranas sintéticas foram desenvolvidas com o intuito de reproduzir as propriedades das membranas naturais, especialmente no que diz respeito às suas características distintivas de seletividade e permeabilidade. (HABERT, 2006).

A tecnologia de membranas proporciona uma abordagem promissora para aproveitar ao máximo a água produzida. Esse tipo de operação tem sido utilizado para realizar diferentes tipos de separação no processo de tratamento da água produzida. Os principais benefícios do uso de operações com membranas incluem a redução no consumo de energia, a possibilidade de realizar uma grande variedade de separações, o design compacto, o baixo peso, a menor incidência de problemas de corrosão e a facilidade de ampliação da capacidade (ALI *et al*., 2018).

A separação por membranas pode ser classificada de acordo com o mecanismo de separação e as características do material da membrana, incluindo o tamanho dos poros. As principais tecnologias de separação por membranas incluem a osmose inversa (Reverse Osmosis, ou RO), ultrafiltração (UF), microfiltração (MF), nanofiltração (NF), entre outras.

3.1 Características das Membranas

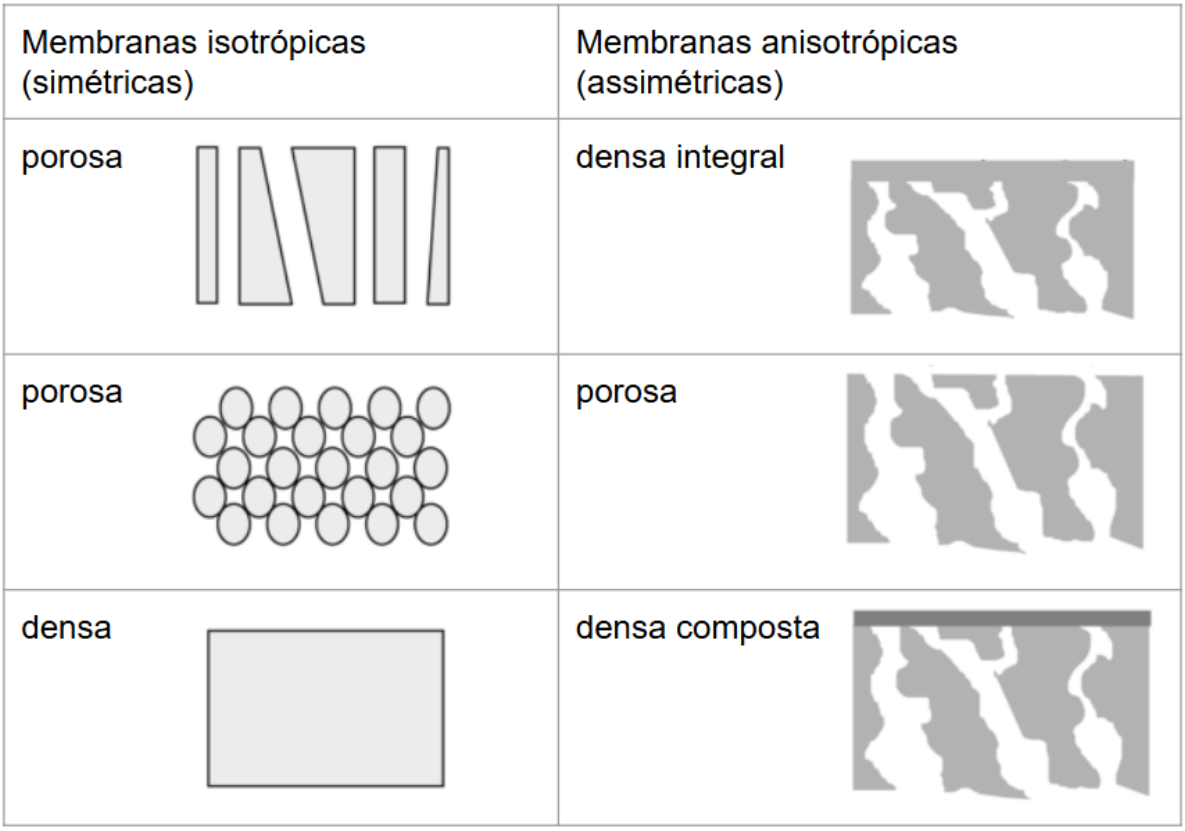
De maneira geral, as membranas podem ser divididas em duas principais categorias: densas e porosas. A escolha entre uma membrana porosa ou densa depende das características da superfície da membrana que entra em contato com a solução a ser separada (HABERT, 2006).

Com base no material de construção, as membranas podem ser classificadas como membranas orgânicas e inorgânicas. As membranas orgânicas são fabricadas utilizando polímeros orgânicos sintéticos, como polietileno, acetato de celulose, politetrafluoretileno, etc. As membranas inorgânicas são construídas utilizando materiais como metais, zeólitas, cerâmicas, etc. (SINGH et al., 2024). Entre as membranas inorgânicas, as membranas cerâmicas têm sido amplamente utilizadas no tratamento de águas residuais. Elas apresentam várias vantagens em relação a outras membranas, como alta resistência mecânica e compatibilidade química, longa

vida operacional, estabilidade térmica suficiente e baixo custo ao longo do ciclo de vida (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024).

As membranas, tanto densas quanto porosas, podem ser isotrópicas ou anisotrópicas, ou seja, podem ou não apresentar as mesmas propriedades morfológicas em toda a sua espessura. As membranas anisotrópicas possuem uma camada superior muito fina (cerca de 1 µm), que pode ser mais fechada, com ou sem poros, conhecida como pele, e é sustentada por uma estrutura porosa. Quando ambas as camadas são feitas do mesmo material, a membrana é classificada como anisotrópica integral. Se diferentes materiais forem utilizados para formar cada camada, a membrana será considerada anisotrópica composta (HABERT, 2006). As principais categorias de membranas são mostradas na Figura 5.

Figura 5 - Categorias Principais de Membranas Sintéticas.



Fonte: adaptado de Habert, 2006.

Para que ocorra o transporte através de uma membrana, é necessário que haja uma força motriz atuando sobre ela. Como os processos envolvendo membranas são, em sua maioria, atérmicos, o gradiente de potencial químico pode ser descrito apenas em termos do gradiente de pressão e concentração (ou pressão parcial). A estrutura

da membrana também determina os princípios que fundamentam sua capacidade seletiva. Em processos que utilizam membranas porosas, essa seletividade está diretamente relacionada à comparação entre o tamanho das espécies presentes e o tamanho dos poros da membrana. Para membranas porosas, dependendo do tipo de força motriz aplicada, o transporte das substâncias pode ocorrer de maneira convectiva ou difusiva (HABERT, 2006).

Nos processos que utilizam membranas densas, sejam compostas ou não, a capacidade seletiva está intrinsecamente relacionada à afinidade das diferentes espécies com o material da membrana, um aspecto que pode ser compreendido sob a ótica termodinâmica. Além disso, a difusão dessas espécies através do filme polimérico desempenha um papel crucial no desempenho do processo. O fluxo permeado é predominantemente difusivo, independente do tipo de força motriz aplicada, dado que a membrana não apresenta poros próximos à sua superfície de contato com a solução a ser tratada, como mostrado na Figura 6 (HABERT, 2006).

Figura 6 - Relação entre Força Motriz, Morfologia e Seletividade.



Fonte: adaptado de Habert *et al*., 2006.

3.2 Microfiltração

A microfiltração (MF) é o processo de separação com membranas mais próximo da filtração clássica. Utiliza membranas porosas com poros na faixa entre 0,1 e 10 μm (100 e 10.000 nm), sendo, portanto, indicado para a retenção de materiais em suspensão e emulsão (HABERT, 2006).

Os sistemas de MF geralmente foram integrados com uma etapa de pré-tratamento ou pós-tratamento para reduzir o entupimento da membrana e alcançar a qualidade desejada do permeado, respectivamente. A MF também foi estudada como etapa de pré-tratamento para outras operações de membranas, como ultrafiltração e nanofiltração, para o tratamento de água produzida. Além de partículas suspensas e turbidez, a MF também foi aplicada para a remoção de óleo da água antes do descarte final ou de um tratamento subsequente (ALI *et al*., 2018).

3.3 Ultrafiltração

A ultrafiltração (UF) é um processo de separação por membranas utilizado quando se deseja purificar e fracionar soluções contendo macromoléculas. As membranas de UF apresentam poros na faixa entre 1 e 100 nm, portanto mais fechadas do que as membranas de MF (HABERT, 2006).

O processo de filtração por membranas UF (ultrafiltração) é utilizado para remover contaminantes inorgânicos, como metais pesados, sólidos suspensos (SS), óleos e graxas (O&G) de águas residuais de petróleo e gás. A UF é um método mais eficaz do que a MF (microfiltração) para a remoção de hidrocarbonetos, sólidos suspensos e constituintes dissolvidos na água produzida (RAJBONGSHI; GOGOI, 2024).

3.4 Nanofiltração

As membranas de nanofiltração possuem poros na faixa de 1 a 10 nanômetros, o que as torna altamente eficazes para a remoção de compostos como cálcio, magnésio e outros íons divalentes, além de algumas substâncias orgânicas e micro-organismos patogênicos. No entanto, ao contrário da osmose reversa, a nano filtração não retém a maioria dos monovalentes, como o sódio, permitindo que eles passem através da membrana, o que pode ser vantajoso em algumas aplicações, como no tratamento de águas e em processos industriais onde a retenção de sais precisa ser controlada (HABERT, 2006).

A NF apresenta um desempenho intermediário entre a UF e a OI, exibindo propriedades de retenção melhores (rejeitando eficazmente íons de sais polivalentes

e compostos orgânicos de baixo peso molecular) do que a UF, enquanto não requer uma pressão de operação tão alta quanto a RO (XIA *et al*., 2023).

A nanofiltração é amplamente utilizada para o tratamento de água, porque a membrana é capaz de remover sais dissolvidos de forma eficaz. Membranas assimétricas à base de polímero, como o polietersulfona, são preferíveis devido às suas excelentes características, como resistência a produtos químicos, robustez, tolerância a altas temperaturas e alta estabilidade dimensional sob diversas condições (KUSWORO *et al*., 2018).

3.5 Osmose inversa

A osmose inversa (OI) é um processo de separação com membranas usado quando se deseja reter solutos de baixa massa molar, tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose. Por esse motivo, as membranas de OI devem ser mais fechadas (poros menores), apresentando, portanto, uma maior resistência à permeação e, consequentemente, pressões de operação mais elevadas do que as utilizadas em UF. Na verdade, as membranas de OI apresentam características intermediárias entre as membranas porosas usadas em MF e UF e as membranas densas empregadas em pervaporação e permeação de gases. O nome Osmose Inversa se deve ao fato de que neste tipo de processo o fluxo permeado é no sentido inverso do fluxo osmótico normal (HABERT, 2006).

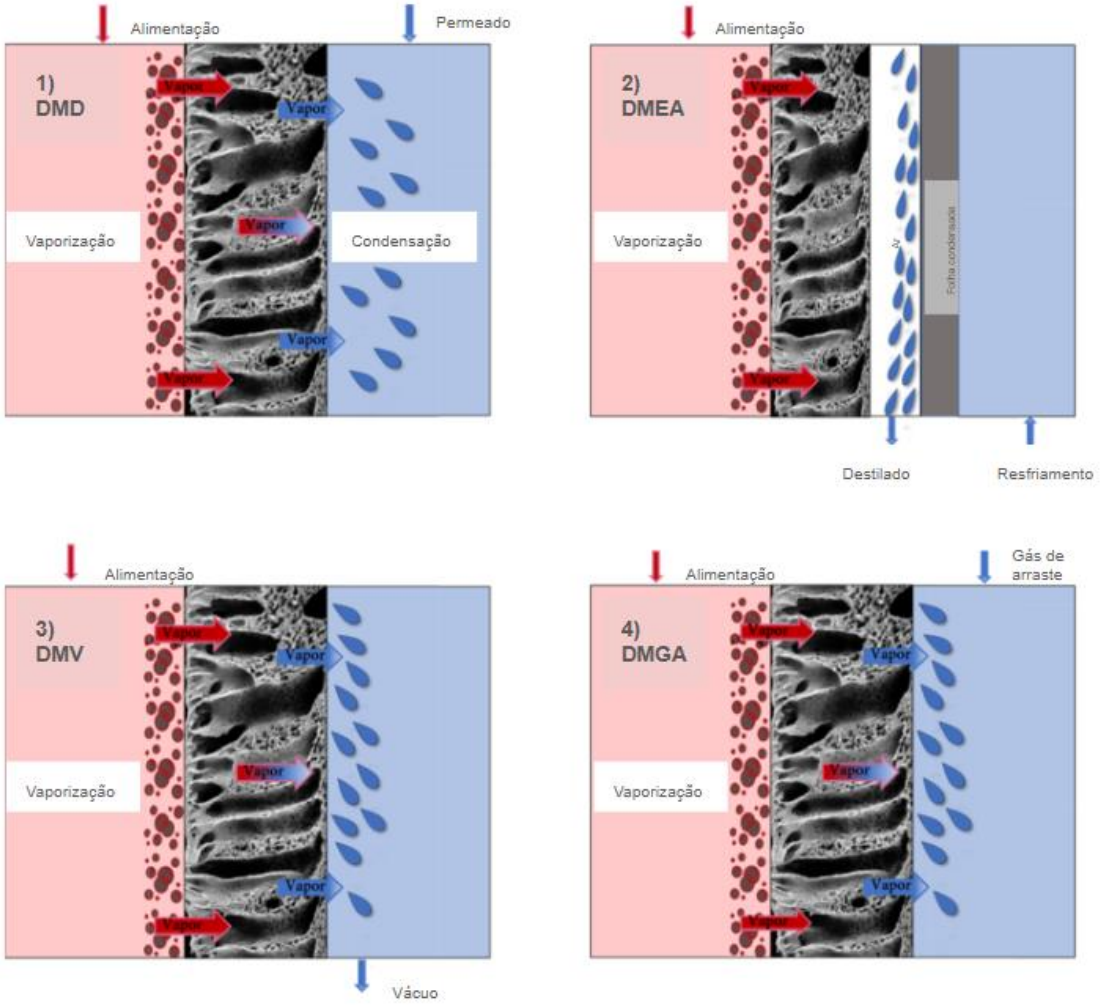
3.6 Destilação por membranas

A destilação por membranas é uma tecnologia de separação térmica baseada no uso de membranas hidrofóbicas para permitir a passagem de vapor de água, enquanto retém solutos e partículas, como sais ou contaminantes, no lado líquido da membrana (GHAFOORI *et al*., 2022). Essa técnica opera utilizando um gradiente de temperatura entre os dois lados de uma membrana. Um lado da membrana é aquecido, e o outro permanece em temperatura mais baixa. O gradiente térmico provoca a vaporização da água no lado quente, sendo o vapor transportado através da membrana hidrofóbica para o lado mais frio, onde condensa-se, resultando em água destilada (EL-BADAWY *et al*., 2021).

As configurações e modos de operação para a tecnologia de destilação por membranas variam com base na maneira como o calor é fornecido e como o vapor é condensado. Os principais tipos são (Figura 7) (EL-BADAWY *et al*., 2021):

- Destilação por Membrana Direta (DMD): O fluido a ser destilado entra em contato direto com a membrana aquecida. O vapor gerado atravessa a membrana e se condensa no lado frio.
- Destilação por Membrana com Espaço de Ar (DMEA): A membrana é mantida em uma configuração onde há um espaço de ar (gap) entre a membrana e a superfície de condensação. O vapor gerado no lado quente se move através desse espaço de ar e condensa-se na superfície fria.
- Destilação por Membrana a Vácuo (DMV): Um vácuo parcial é aplicado no lado frio da membrana, o que ajuda a melhorar a diferença de pressão e a promover a transferência de vapor d'água. Essa configuração pode ser mais eficiente em termos de consumo de energia.
- Destilação por Membrana com Gás Arrastador (DMGA): Um fluxo de gás (geralmente ar) é utilizado no lado frio da membrana para arrastar o vapor de água e melhorar o processo de condensação.

Figura 7 - Representação diagramática das configurações populares de DM; a) DMD b) DMEA c) DMV d) DMGA.



Fonte: adaptado de El-badawy *et al*., 2021.

A destilação por membrana (DM) tem ganhado atenção significativa para a dessalinização de água produzida. As principais características do processo, que o tornam interessante para essa aplicação específica, incluem desempenho operacional quase independente da concentração da solução, capacidade de utilizar calor de baixa qualidade geralmente disponível com a água produzida, qualidade de produto ultra purificado e menor potencial de entupimento e formação de incrustações (ALI *et al*., 2018). Em termos de consumo de energia, a MD foi considerada mais eficiente do que a estratégia convencional para o tratamento da água produzida (YAO *et al*., 2018).

O potencial da destilação por membrana para concentrar soluções até atingirem seus níveis de saturação, sem que haja uma redução significativa no

desempenho, tem sido amplamente investigado e aplicado na cristalização por membrana. Nesse processo, denominado cristalização por membrana (CrM), ocorre a extração simultânea de cristais e água doce a partir de uma solução saturada. Os cristalizadores baseados em membranas oferecem diversas vantagens em comparação aos cristalizadores de última geração, incluindo a manutenção de uma saturação uniforme ao longo de toda a solução durante o processo, a separação eficaz das etapas de evaporação e cristalização, a obtenção de uma distribuição de tamanhos de cristais mais homogênea, e a capacidade de ajustar de forma precisa a morfologia dos cristais formados (ALI *et al*., 2018).

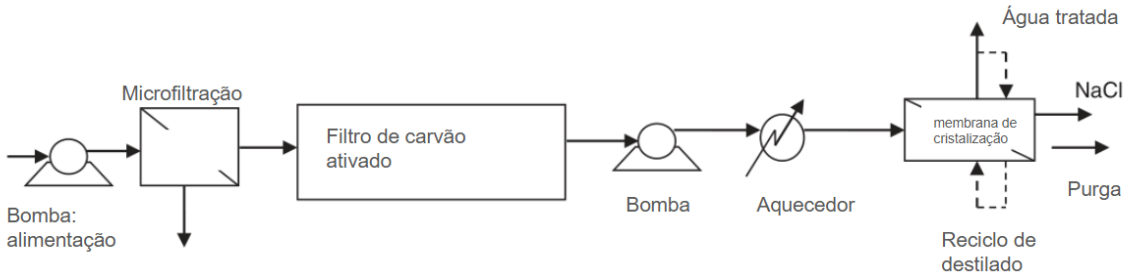
4 METODOLOGIA

Para este estudo, foi adotada a metodologia de pesquisa bibliográfica, utilizando artigos científicos. Essa abordagem permitiu compilar e analisar as principais pesquisas e contribuições sobre o tema em questão, além de fazer uma análise sobre pontos interessantes relacionados à aplicação de membranas.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ali *et al*. (2018) analisa o uso de processos integrados de microfiltração (MF) e destilação/cristalização por membrana (DM/CrM) para o tratamento da água produzida. O estudo combina análises experimentais e teóricas para explorar a recuperação de água doce e minerais valiosos a partir de águas residuais altamente salinas. No experimento, MF foi utilizada para remoção de partículas suspensas e compostos oleosos, enquanto DM/CrM concentrou a solução, resultando em cristais de NaCl de alta pureza (>99,9%). O esquema da configuração do equipamento é mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Diagrama de fluxo do processo analisado.



Fonte: adaptado de Ali *et al*., 2018.

Simulações termodinâmicas utilizando o software PHREEQC mostraram boa concordância com os dados experimentais, validando a capacidade de recuperação de sais, como cloreto de sódio e sulfato de bário.

No estudo, também, foi comparado o sistema integrado com tecnologias convencionais, como destilação multiestágios (DME), utilizando métricas de intensificação de processos. Os resultados demonstraram que os processos de membranas são mais compactos e eficientes em termos de produtividade por peso e tamanho, tornando-os adequados para aplicações *offshore*. No entanto, a eficiência energética da DM ainda requer aprimoramentos para se tornar competitiva com tecnologias já consolidadas.

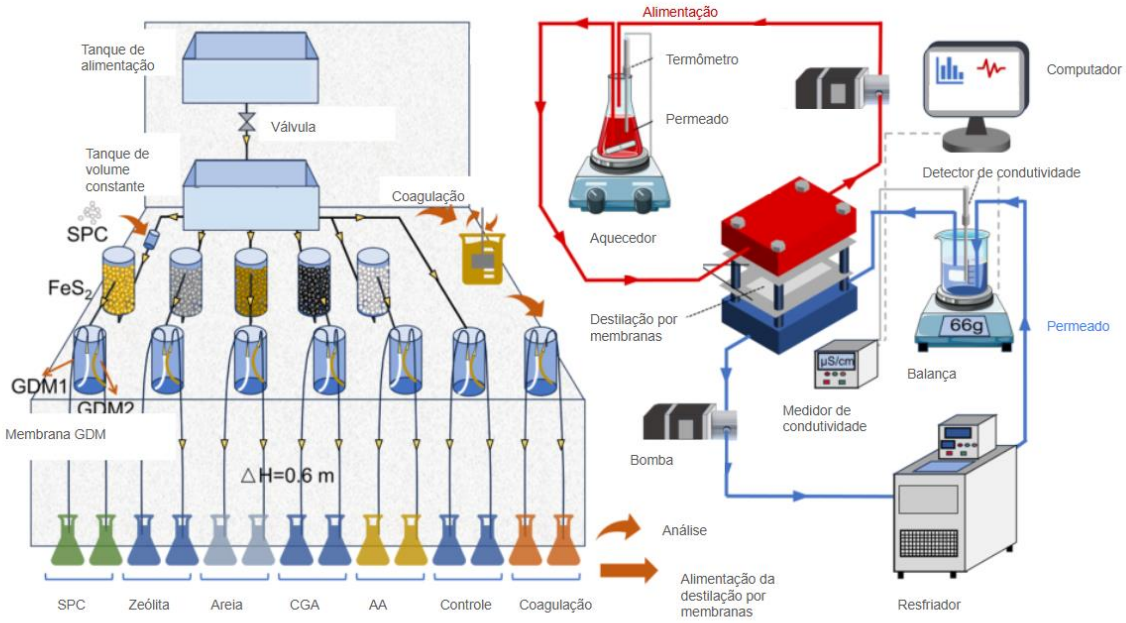
Em conclusão, o trabalho destaca o potencial de sistemas integrados de membranas para o tratamento sustentável da água produzida, minimizando o descarte de resíduos e recuperando recursos valiosos. No entanto, são necessárias melhorias em configurações energéticas e separação de cristais para ampliar sua viabilidade comercial e operacional.

Ji *et al*. (2024) apresentam uma abordagem inovadora para o tratamento da água produzida durante a exploração de gás de xisto, utilizando um processo integrado de membranas movidas por gravidade (MMG) e destilação por membrana (DM). Essa integração busca resolver problemas, como incrustação, deterioração de permeado, entre outros comumente encontrados na destilação por membrana. A exploração de gás de xisto, um setor que enfrenta desafios ambientais significativos devido à geração de grandes volumes de águas residuais altamente contaminadas.

Este processo integrado foi combinado com diferentes tipos de pré tratamento. Na Figura 9 é apresentado um esquema da configuração instrumental utilizada.

O estudo oferece uma solução promissora e econômica para o tratamento de águas residuais de gás de xisto, permitindo operações descentralizadas em locais remotos de exploração. A combinação de baixa necessidade energética do MMG com alta eficiência de rejeição do DM é uma solução técnica robusta para cenários descentralizados. A análise econômica mostrou que o processo MMG-DM reduz custos operacionais em até 55% em comparação com métodos tradicionais.

Figura 9 - Diagrama esquemático do sistema MMG-DM: (a) MMG e (b) DM. Métodos de pré-tratamento, incluindo oxidação SPC, filtração granular (zeólita, areia de sílica, CGA e AA), assim como coagulação, foram aplicados.



Fonte - adaptado de Ji *et al*. 2024.

O artigo introduz a interação entre métodos de pré-tratamento (coagulação, oxidação e filtração granular) e o desempenho das membranas, elucidando os efeitos da morfologia das camadas de incrustação. E a viabilidade do uso de calor residual em processos descentralizados demonstra o potencial do sistema para operações economicamente viáveis e sustentáveis.

Apesar dos avanços, o sistema MMG-DM com pré-tratamentos múltiplos pode se mostrar relativamente complexo para implementação em locais remotos, devido a variáveis, como disponibilidade de materiais e controle operacional. E embora o

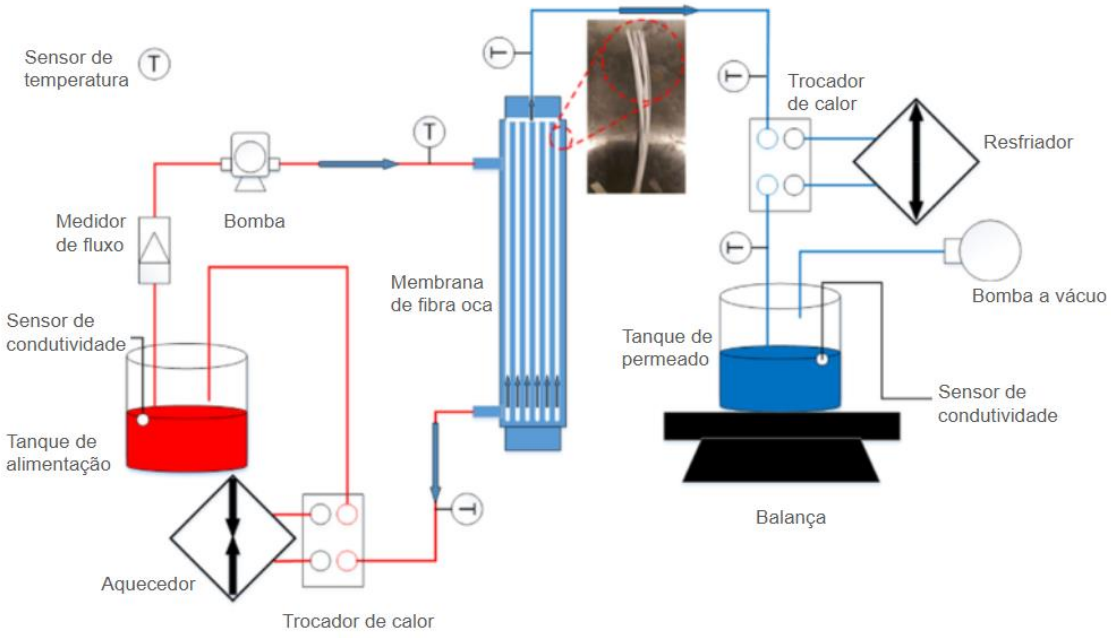
estudo mostre estabilidade ao longo de 80 dias, faltam avaliações de desempenho em condições reais prolongadas ou sob flutuações de qualidade do fluxo de água produzida.

Mesmo com as limitações, as descobertas oferecem um caminho promissor para o desenvolvimento de sistemas sustentáveis, econômicos e descentralizados. O estudo de Ji *et al*. (2024) é uma contribuição significativa para o campo do tratamento de águas residuais, destacando soluções inovadoras para problemas específicos da exploração de gás de xisto.

Yao *et al*. (2018) investigam o impacto de compostos orgânicos voláteis (COVs) na recuperação de água de rejeitos industriais, utilizando destilação por membranas a vácuo (DMV). Os COVs analisados (ácido acético, etileno glicol, álcool isopropílico e 2-butoxietanol) são comuns na água produzida por processos de fraturamento hidráulico (técnica que permite a extração de recursos que estão presos em formações geológicas de baixa permeabilidade onde um fluido de fraturamento, composto principalmente de água, areia e produtos químicos, é injetado no poço sob alta pressão. Isso cria pequenas fraturas nas rochas, e assim, o petróleo ou gás liberado através das fraturas é bombeado para a superfície).

O estudo avaliou os parâmetros de fluxo de permeado, rejeição de sal, transferência de massa de COVs e ângulo de contato das membranas, utilizando membranas de fibra oca de Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) em um sistema de DMV, operado com soluções sintéticas contendo diferentes COVs (ácido acético, etileno glicol, álcool isopropílico, 2-butoxietanol), em uma configuração instrumental representada pela Figura 10.

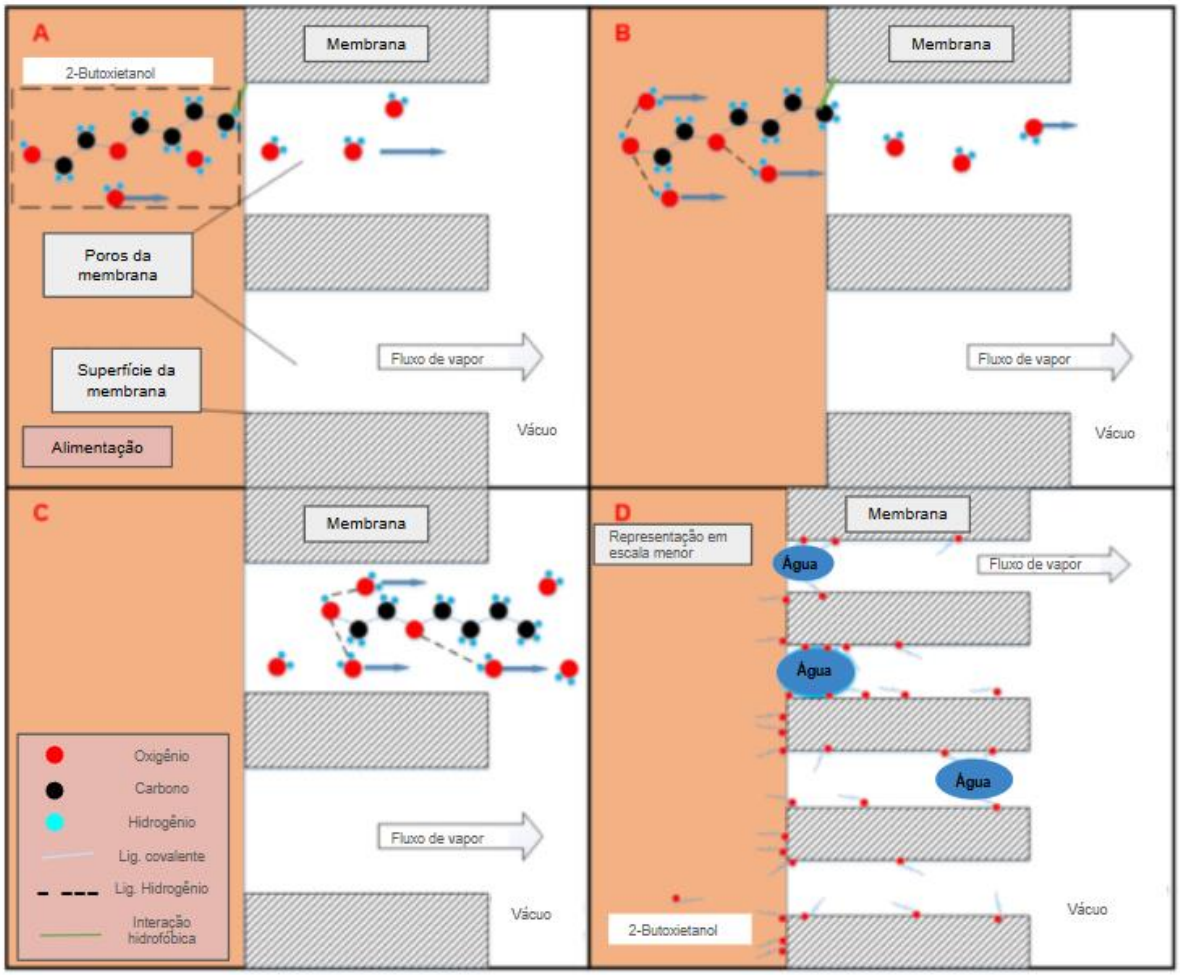
Figura 10 - Diagrama esquemático da destilação por membrana a vácuo usado no estudo.



Fonte: adaptado de Yao *et al*. 2018.

COVs como 2-butoxietanol e ácido acético aumentaram significativamente o fluxo, indicando alta mobilidade através da membrana, mostrando que COVs com propriedades surfactantes, como 2-butoxietanol, penetraram nas membranas, resultando em molhagem parcial dos poros. A molhagem foi confirmada pelo declínio gradual na rejeição de sal e pela redução do ângulo de contato das membranas. Durante 72 horas de operação com 2-butoxietanol, observou-se um aumento na molhagem dos poros, levando a um declínio contínuo no fluxo de permeado e na rejeição de sal.

Figura 11 - Mecanismo de penetração de COVs: A) moléculas de 2-butoxietanol (2-BE) são atraídas e aderem à superfície das membranas devido a interações hidrofóbicas entre a cabeça alquila no 2-BE e a superfície hidrofóbica do polímero da membrana; B) três ligações de hidrogênio são formadas entre o 2-BE e as moléculas de água; C) os vapores de água “empurram” as moléculas de 2-BE avançando através dos poros da membrana; D) a umectação dos poros começa a aparecer devido às propriedades surfactantes do 2-BE.



Fonte: adaptado de Yao *et al*. 2018.

Yao *et al*. propõem um mecanismo de "adsorção-dessorção" (mostrado na Figura 11), no qual COVs como 2-butoxietanol formam ligações de hidrogênio com moléculas de água, facilitando seu transporte através da membrana. A capacidade de formar essas ligações e propriedades surfactantes foram tão importantes quanto a pressão de vapor na determinação da mobilidade dos COVs.

Cerca de 95% de recuperação da salmoura de OI da água produzida de gás foi alcançada através do sistema híbrido OI-DM. Em relação à remoção de sal, a qualidade do permeado foi satisfatória, já que o MD tem, teoricamente, uma taxa de rejeição de 100% para solutos não voláteis (YAO *et al*., 2018).

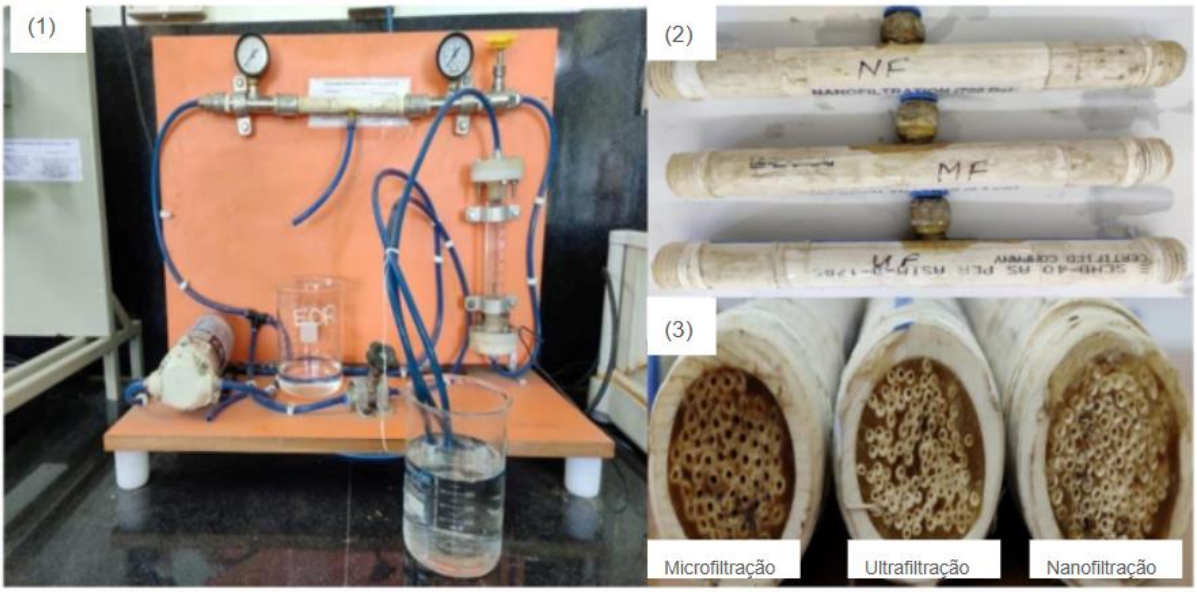
Em conclusão, os COVs podem comprometer o desempenho da DMV e sugerem a implementação de pré ou pós-tratamento para remover esses compostos, garantindo uma melhor qualidade do permeado e a sustentabilidade do sistema.

Rajbongshi e Gogoi (2023) abordam o uso combinado de biorremediação e tecnologias de membranas microfiltração, ultrafiltração e nanofiltração, para tratar águas residuais de campos de petróleo, usando amostras coletadas no campo de Moran, Assam, na Índia. A pesquisa utiliza a bactéria *Pseudomonas aeruginosa* como primeiro tratamento para remover cargas orgânicas antes da filtragem, reduzindo incrustações nas membranas.O estudo destaca a eficiência do tratamento híbrido em regiões com altos volumes de águas residuais.

Os processos de membrana são eficientes, mas sofrem com problemas de incrustação. A incrustação é causada principalmente por óleos, graxas e compostos orgânicos dissolvidos, que aumentam os custos de manutenção. A combinação dos métodos permite investigar o uso da biorremediação para reduzir contaminantes orgânicos e avaliar o desempenho de MF, UF e NF no tratamento.

A bactéria *Pseudomonas aeruginosa* foi usada para degradar hidrocarbonetos ao longo de 7, 14 e 21 dias, com remoções de carga orgânica variando entre 67% a 100%. Após a biorremediação, as águas foram tratadas por MF, UF e NF, utilizando módulos de fibras ocas. O equipamento é mostrado na Figura 12.

Figura 12 - Sistema de filtração por membrana de fibra oca (1) configuração (2) e (3) módulos para MF, UF e NF.



Fonte: adaptado de Rajbongshi; Gogoi, 2023.

A biorremediação foi eficaz na remoção de compostos orgânicos, reduzindo significativamente a incrustação nas membranas. A NF apresentou o melhor desempenho, com remoção de até 86% de salinidade, 99% de óleos e graxas, e 97% de bicarbonato. O efeito de bloqueio por partículas diminuiu, especialmente em NF, que teve menor taxa de formação de camada de partículas.

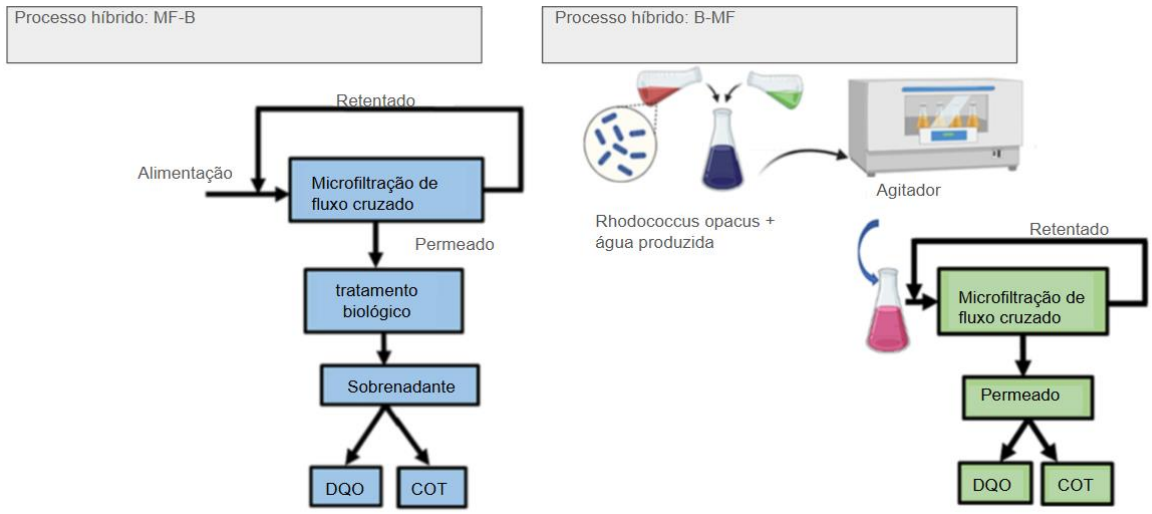
O estudo faz comparação entre as tecnologias de filtração, mostrando que: MF é efetiva na remoção de sólidos suspensos, mas menos eficiente para contaminantes dissolvidos; UF é eficiente na remoção intermediária de salinidade e compostos dissolvidos; NF tem o melhor desempenho geral, sendo capaz de remover contaminantes inorgânicos e orgânicos. Indicando, assim, que a melhor combinação de biorremediação com *Pseudomonas aeruginosa* como pré-tratamento, seguida de NF, foi a solução mais eficiente para tratar águas residuais do campo de Moran, além da redução de custos operacionais, causado pela maior vida útil das membranas.

Purnima *et al*. (2023) apresentam um estudo sobre o tratamento de água produzida em campos petrolíferos terrestres. Ele foca na combinação de microfiltração com membranas cerâmicas de baixo custo, baseada em caulim, e tratamento biológico utilizando a bactéria oleaginosa *Rhodococcus opacus*.

Foi utilizada uma membrana cerâmica tubular fabricada com caulim, quartzo e carbonato de cálcio, avaliada em pressões entre 69 e 345 kPa, e a bactéria *Rhodococcus opacus* foi usada devido à sua capacidade de biodegradar hidrocarbonetos e gerar biomassa rica em lipídios, que pode ser convertida em biocombustível. Quatro estratégias de tratamento foram testadas: apenas microfiltração (MF); apenas tratamento biológico (B); microfiltração seguida de tratamento biológico (MF-B) e tratamento biológico seguido de microfiltração (B-MF). As estratégias MF-B e B-MF são mostradas na Figura 13.

Como resultado, a combinação MF-B foi a mais eficiente, alcançando a remoção de 99% de DQO e COT. A microfiltração sozinha removeu 100% dos sólidos suspensos totais (SST) e turbidez, mas foi menos eficaz para compostos orgânicos dissolvidos e o tratamento biológico isolado teve eficiência limitada (65% de remoção de DQO).

Figura 13 - Representação esquemática das estratégias de tratamento MF-B e B-MF.



Fonte: adaptado de Purnima *et al*. 2023.

O problema de incrustação foi causado principalmente por sólidos suspensos e gotículas de óleo que formaram uma camada na superfície interna da membrana e uma solução combinada de 1% de NaOCl e 0,10% de Dodecil sulfato de sódio (SDS) foi utilizada para limpar a membrana, restaurando 92,6% do fluxo inicial.

A combinação MF-B é uma abordagem sustentável e econômica para o tratamento de águas residuais petrolíferas, promovendo alta eficiência de remoção de

contaminantes, redução de custos com materiais de membranas, e potencial para reaproveitamento da biomassa gerada em aplicações, como produção de bio-óleo.

6 CONCLUSÃO

Seguindo os objetivos do trabalho, os principais contaminantes presentes na água produzida são:

- Hidrocarbonetos e óleos (dissolvidos e dispersos)
- Sais e minerais dissolvidos (especialmente NaCl)
- Metais pesados (como cádmio, chumbo, mercúrio)
- Materiais radioativos (rádio-226 e rádio-228)
- Gases dissolvidos (CO_2, O_2, H_2S, BTEX)
- Sólidos suspensos (argilas, areia, produtos de corrosão)
- Compostos orgânicos recalcitrantes (difíceis de degradar)
- Aditivos químicos (usados durante a extração e tratamento)

Esses contaminantes tornam a água produzida altamente complexa e poluente, exigindo tratamentos específicos para sua remoção ou redução antes do descarte ou reutilização.

Avaliando-se os métodos de tratamento da água produzida, é possível concluir que:

- Tratamentos Físicos: Eficazes para remoção de sólidos e óleos, mas limitados na remoção de contaminantes dissolvidos. São frequentemente utilizados como pré-tratamento.
- Tratamentos Químicos: Eficazes na remoção de metais pesados, compostos orgânicos e sais, mas podem gerar subprodutos e consumir muita energia.
- Tratamentos Biológicos: Sustentáveis e de baixo custo, eficazes na remoção de compostos orgânicos, mas podem ser limitados em águas com alta concentração de petróleo.

A combinação desses métodos, especialmente a integração de processos biológicos com tecnologias de membranas, tem se mostrado uma abordagem promissora para o tratamento eficiente e sustentável da água produzida. No entanto,

desafios como a incrustação de membranas, o alto consumo de energia e a complexidade operacional ainda precisam ser superados para viabilizar a aplicação em larga escala.

Avaliação Geral das Tecnologias de Membranas:

- Pontos Fortes:
    - Eficiência na Remoção de Contaminantes: As tecnologias de membranas são altamente eficazes na remoção de uma ampla gama de contaminantes, incluindo sólidos suspensos, óleos, metais pesados e sais.
    - Versatilidade: Podem ser aplicadas em diferentes etapas do tratamento, desde o pré-tratamento até a remoção de contaminantes dissolvidos.
    - Sustentabilidade: Permitem a recuperação de água doce e recursos valiosos, como sais minerais, alinhando-se com os princípios da economia circular.
- Pontos Fracos:
    - Incrustação: A incrustação das membranas é um desafio significativo, especialmente em águas com alta concentração de sólidos suspensos e óleos.
    - Consumo de Energia: Algumas tecnologias, como a osmose inversa e a destilação por membranas, consomem muita energia, o que pode aumentar os custos operacionais.
    - Complexidade Operacional: A necessidade de pré-tratamentos múltiplos e o controle rigoroso das condições operacionais aumentam a complexidade e os custos de implementação.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os estudos analisados ilustram a aplicação prática das tecnologias de membrana aplicadas ao tratamento de água produzida. Por exemplo, a combinação de microfiltração com destilação por membranas (MD) e cristalização por membrana (MCr) mostrou-se eficaz na recuperação de água doce e minerais valiosos, como o cloreto de sódio, a partir de águas residuais altamente salinas. Outro mostra que a

integração de processos biológicos com tecnologias de membranas, como no caso da biorremediação com *Pseudomonas aeruginosa* seguida de nanofiltração, demonstrou alta eficiência na remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos. Outro estudo destacado é o uso de membranas cerâmicas de baixo custo combinadas com tratamento biológico utilizando a bactéria *Rhodococcus opacus*. Essa abordagem mostrou-se sustentável e econômica, com alta eficiência na remoção de contaminantes e potencial para a produção de biomassa rica em lipídios, que pode ser convertida em biocombustível.

Apesar dos avanços tecnológicos, ainda há desafios significativos no tratamento da água produzida. A incrustação das membranas, o alto consumo de energia em alguns processos e a geração de subprodutos químicos são questões que ainda precisam ser abordadas para melhorar a viabilidade econômica e ambiental dessas tecnologias. A complexidade operacional de alguns sistemas, especialmente em locais remotos de exploração de petróleo e gás, pode limitar sua aplicação. A necessidade de pré-tratamentos múltiplos e o controle rigoroso das condições operacionais são fatores que aumentam a complexidade e os custos de implementação. Outro fator é a necessidade de um sistema compacto, e modular, para uso em plataformas *offshore*.

A integração de métodos biológicos com tecnologias de membranas, como a biorremediação seguida de nanofiltração, emerge como uma abordagem particularmente eficaz e sustentável. Além disso, o uso de membranas cerâmicas de baixo custo e a recuperação de biomassa para produção de biocombustíveis são exemplos de como o tratamento da água produzida pode ser alinhado com os princípios da economia circular.

Em conclusão, o tratamento da água produzida em poços de petróleo é uma área de pesquisa e desenvolvimento em constante evolução. A combinação de diferentes técnicas de tratamento, como processos físicos, químicos, biológicos e de separação por membranas, oferece soluções promissoras para a remoção eficiente de contaminantes e a recuperação de recursos valiosos. No entanto, para que essas tecnologias sejam amplamente adotadas, é necessário superar desafios relacionados à eficiência energética, custos operacionais e complexidade de implementação.

BIBLIOGRAFIA

ALI, A. et al. Evaluation of integrated microfiltration and membrane distillation/crystallization processes for produced water treatment. Desalination, v. 434, p. 161–168, maio 2018.

AMAKIRI, K. T. et al. Review of oilfield produced water treatment technologies. Chemosphere, v. 298, p. 134064, jul. 2022.

AMARJIT RAJBONGSHI; SUBRATA BORGOHAIN GOGOI. A Review on Oilfield Produced Water and Its Treatment Technologies. Petroleum Research, 1 jun. 2024.

AMARJIT RAJBONGSHI; SUBRATA BORGOHAIN GOGOI. Microfiltration, ultrafiltration and nanofiltration as a post-treatment of biological treatment process with references to oil field produced water of Moran oilfield of Assam. Petroleum Research, v. 9, n. 1, p. 143–154, 20 set. 2023.

BAI, Y. et al. Simultaneous removal of silicon impurities and hardness from high-temperature heavy-oil-produced-water by chemical coagulation-assisted electrocoagulation: Performance, kinetics, optimization and operational costs. Desalination and Water Treatment, v. 320, p. 100878, out. 2024.

CÉSAR, S. D.; DE JAGER, D.; NJOYA, M. The role of hydrocyclone and induced gas flotation technologies in offshore produced water deoiling advancements. Petroleum Research, out. 2024.

CHO, M. et al. Salt and Water Transfer in Concentrating Hypersaline Electrolyte Solutions by Electrodialysis. Journal of Membrane Science, p. 123620–123620, 1 dez. 2024.

EL-BADAWY, T. et al. Progress in treatment of oilfield produced water using membrane distillation and potentials for beneficial re-use. Separation and Purification Technology, v. 278, p. 119494, dez. 2021.

FENG, H. et al. The transformation of dissolved organic matter and formation of halogenated by-products during electrochemical advanced oxidation pretreatment for shale gas produced water. Journal of Hazardous Materials, v. 455, p. 131614–131614, 10 maio 2023.

GHAFOORI, S. et al. New advancements, challenges, and future needs on treatment of oilfield produced water: A state-of-the-art review. Separation and Purification Technology, v. 289, p. 120652, maio 2022.

GONG, D.; QIN, G. Treatment of oilfield wastewater using a microbial fuel cell integrated with an up-flow anaerobic sludge blanket reactor. Desalination and Water Treatment, v. 49, n. 1-3, p. 272–280, 1 nov. 2012.

HABERT, A. C. Processos de separação por membranas. [s.l.] Rio De Janeiro: E-Papers, 2006.

HENDGES, L. T. et al. Reducing oil and grease on-site in real offshore oilfield-produced water through feasible adsorption-desorption cycling. Journal of Water Process Engineering, v. 66, p. 105962–105962, 14 ago. 2024.

JI, Z. et al. Gravity-driven membrane integrated with membrane distillation for efficient shale gas produced water treatment. Water Research, v. 266, p. 122332, 25 ago. 2024.

Jiménez, S., Micó, M.M., Arnaldos, M., et al., 2018. State of the art of produced water treatment. Chemosphere 192, 186–208.

KUSWORO, T. D. et al. Oilfield produced water treatment to clean water using integrated activated carbon-bentonite adsorbent and double stages membrane process. Chemical Engineering Journal, v. 347, p. 462–471, set. 2018.

LIU, Yiqian, LU, Hao, LI, Yudong, XU, Hong, PAN, Zhicheng, DAI, Pinyi, WANG, Hualin, YANG, Qiang, 2021. A Review of Treatment Technologies for Produced Water in Offshore Oil and Gas Fields. Science of The Total Environment, p. 145485.

OJHA, R.; PRADHAN, D. The potential of microbial fuel cell for converting waste to energy: an overview. Sustainable Chemistry for the Environment, p. 100196, 25 dez. 2024.

PURNIMA, M. et al. Onshore oilfield produced water treatment by hybrid microfiltration-biological process using kaolin based ceramic membrane and oleaginous Rhodococcus opacus. Chemical Engineering Journal, v. 453, p. 139850, fev. 2023.

SINGH, D. et al. Strategies for biological treatment of waste water: A critical review. Journal of cleaner production, p. 142266–142266, 1 abr. 2024.

SOUZA, Jôsy Suyane de Brito et al. Estudo das Técnicas de Caracterização e Tratamento de Água Produzida de Petróleo Visando sua Reinjeção. 2015. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conepetro/2015/Modalidade_1datahora_02_02_2015_06_19_35_idinscrito_923_e2e7a35cd0306d2368caec4d8096ccc9.pdf. Acesso em: 22 dez. 2024.

THOMAS, José Eduardo. Fundamentos da engenharia do petróleo. 2. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2001.

YAO, M. et al. Effects of volatile organic compounds on water recovery from produced water via vacuum membrane distillation. Desalination, v. 440, p. 146–155, ago. 2018.

ZARKANI, H.M. AL; FADEL, M. EL. Testing a Novel Life Cycle Assessment based Framework for Produced Water Management from Offshore Oilfield Operations. Journal of cleaner production, p. 142799–142799, 1 jun. 2024.