

Renan dos Reis Hernandes

Uso De Membranas Para Tratamento De Efluentes
Industriais: Uma Revisão

São Paulo

2024

Renan dos Reis Hernandes

**Uso De Membranas Para Tratamento De Efluentes
Industriais: Uma Revisão**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para a obtenção
do diploma de Engenheiro de Químico.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Denise Crocce
Romano Espinosa.

São Paulo

2024

AGRADECIMENTOS

Dedico este trabalho aos meus familiares que me apoiaram em todas as minhas escolhas durante o curso, aos meus professores, que me deram a oportunidade de aprender mais do que somente o ensinado em sala de aula e aos meus amigos que me acompanharam durante todo o percurso.

E à Escola Politécnica da USP, que, com seus desafios e oportunidades, me formou o profissional que posso dizer que sou hoje

Está autorizada a reprodução parcial ou total desta obra, desde que citada a fonte. Proibido uso com fins comerciais".

Ficha catalográfica

Hernandes, Renan dos Reis

Uso De Membranas Para Tratamento De Efluentes

Industriais: Uma Revisão/ R.d.R. Hernandes – São Paulo, 2024.

42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1 Revisão de artigos científicos. 2 Tratamento de efluentes. 3 Tratamento com membranas. 4 Osmose Reversa. 5 Eletrodiálise.

Sumário

Introdução	9
Formas de Aplicação.....	12
Tipos de membrana.....	14
Membranas Poliméricas	17
Polímero Natural.....	18
Polímeros Sintéticos	19
Membranas de Matriz Mista de Polímeros	20
Polímero Aprimorado	20
Membrana de inclusão polimérica.....	21
Osmose Reversa.....	23
Funcionamento	23
Usos em efluentes orgânicos.....	24
Usos em efluentes contaminadas com metais	25
Nanofiltração	27
Funcionamento	27
Uso em efluentes orgânicos.....	28
Usos em efluentes contaminadas com metais	30
Ultrafiltração	31
Funcionamento	31
Microfiltração.....	32
Eletrodiálise.....	33
Funcionamento	33
Uso em efluentes orgânicos.....	34
Usos em efluentes contaminadas com metais	35
Recuperação.....	36
Conclusões.....	37
REFERÊNCIAS.....	38

Resumo

A história da humanidade está entrelaçada com a utilização dos recursos naturais, incluindo os rios, que têm sido fonte de vida e desenvolvimento por milênios. Contudo, à medida que as sociedades evoluíram, atividades humanas geraram efluentes contaminados, exigindo cada vez mais processos eficientes de tratamento de água para lidar com essa crescente poluição. A água é um recurso vital para todas as formas de vida e é essencial para a sustentabilidade dos ecossistemas terrestres. No entanto, a gestão inadequada e a poluição têm contribuído para uma crise global de escassez hídrica, afetando negativamente tanto os recursos naturais quanto as comunidades humanas que deles dependem. Diante desse cenário desafiador, os processos de tratamento de efluentes desempenham um papel fundamental na preservação da qualidade da água e na mitigação dos impactos ambientais. Dentre esses processos, a filtração por membranas tem se destacado como uma tecnologia promissora e eficaz. A osmose reversa, em particular, demonstrou ser altamente eficiente na remoção de contaminantes, incluindo metais, em efluentes industriais. A rápida urbanização e industrialização têm aumentado exponencialmente o consumo de água, tornando imperativo o desenvolvimento de tecnologias avançadas de tratamento de efluentes. As membranas oferecem uma solução viável e sustentável para esse desafio, sendo capazes de tratar uma variedade de efluentes industriais, como os provenientes da indústria têxtil, alimentícia e farmacêutica. Além de seu papel na preservação ambiental, os processos de tratamento de efluentes via membranas também contribuem para a economia de recursos hídricos e materiais, possibilitando o reaproveitamento de água tratada e a recuperação de materiais valiosos retidos nos processos de filtragem. Essa abordagem integrada não só reduz o impacto ambiental das atividades industriais, mas também promove a sustentabilidade e a resiliência dos sistemas hídricos globais.

Palavras-chave: Revisão de artigos científicos. Tratamento de efluentes. Tratamento com membranas. Osmose Reversa. Eletrodiálise.

Abstract

The history of humanity is intertwined with the utilization of natural resources, including rivers, which have been sources of life and development for millennia. However, as societies have evolved, human activities have generated contaminated effluents, increasingly demanding efficient water treatment processes to address this growing pollution. Water is a vital resource for all forms of life and is essential for the sustainability of terrestrial ecosystems. Nevertheless, improper management and pollution have contributed to a global water scarcity crisis, negatively impacting both natural resources and the human communities dependent on them. Faced with this challenging scenario, effluent treatment processes play a fundamental role in preserving water quality and mitigating environmental impacts. Among these processes, membrane filtration has emerged as a promising and effective technology. Reverse osmosis, in particular, has proven highly efficient in removing contaminants, including metals, from industrial effluents. Rapid urbanization and industrialization have exponentially increased water consumption, making it imperative to develop advanced effluent treatment technologies. Membranes offer a viable and sustainable solution to this challenge, capable of treating a variety of industrial effluents, including those from the textile, food, and pharmaceutical industries. In addition to their role in environmental preservation, membrane-based effluent treatment processes also contribute to the conservation of water and material resources, enabling the reuse of treated water and the recovery of valuable materials retained in filtration processes. This integrated approach not only reduces the environmental impact of industrial activities but also promotes the sustainability and resilience of global water systems.

Keywords: Literature review. Effluent treatment. Membrane treatment. Reverse osmosis. Electrodialysis.

Introdução

Desde os primórdios a humanidade utiliza recursos naturais como ferramentas, os leitos de rios não foram exceção, havendo registros de ocupação humana próxima de efluentes a mais de 6 mil anos, como consequência da dependência de água para diversos processos da história muitas atividades humanas geram rejeitos em efluentes, isso acarreta na necessidade crescente de processos de tratamento dessas águas, que por sua vez podem estar contaminadas com os mais diversos tipos de poluentes, desde matérias orgânicas e inorgânicas simples como esgoto doméstico e detritos de entulhos, além de rejeitos minerais de atividades de extração e compostos químicos.

A água é essencial para a vida em nosso planeta, sendo um recurso indispensável para todas as formas de vida. É graças à água e à atmosfera que a Terra é o único lugar conhecido onde a vida pode prosperar. A disponibilidade de água é crucial não apenas para nossa sobrevivência, mas também para o funcionamento saudável dos ecossistemas terrestres. Sem ela, seria impossível imaginar a existência da vida como a conhecemos.

No entanto, apesar da importância da água, estamos enfrentando uma crise global de escassez hídrica devido ao uso irresponsável e à poluição desenfreada. A má gestão dos recursos hídricos, juntamente com a crescente demanda por água, está levando a uma diminuição constante dos lençóis freáticos e à degradação da qualidade da água em muitas partes do mundo. Isso representa uma séria ameaça não apenas para os ecossistemas naturais, mas também para a saúde e o bem-estar das comunidades humanas que dependem desses recursos.

Contudo o crescimento populacional e os avanços tecnológicos exigem cada vez mais recursos e geram cada vez mais rejeitos, isso levou a humanidade à necessidade de tratar a água utilizada, pois os tratamentos naturais do ciclo da água já não eram mais suficientes para o aumento da demanda

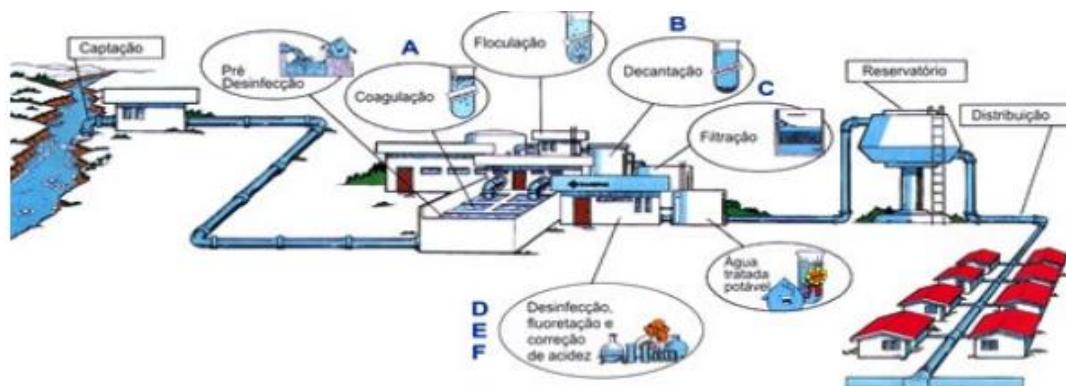


Imagen 1: processo de tratamento moderno convencional [1]

Dentre os principais métodos desenvolvidos até hoje, se destacam principalmente a filtração, a cloração, a ozonização, a coagulação e floculação, a decantação, a desinfecção por UV, a adsorção, a troca iônica, a Osmose Reversa e a precipitação. Cada um desses métodos possui suas próprias características e aplicações específicas, contribuindo de maneira significativa para o tratamento eficiente e seguro da água em diversas situações e contextos.

Os métodos estudados serão aqueles que utilizam membranas pois elas possuem uma variedade de tópicos de interesse. Dentre os principais métodos desenvolvidos até hoje, destacam-se principalmente a análise do desempenho das membranas de nanofiltração e Osmose Reversa no tratamento de efluentes ácidos contaminados com metais, bem como a avaliação da estabilidade dessas membranas após exposição a diferentes tipos de efluentes. Além disso, há um foco na investigação da seletividade das membranas em relação aos íons metálicos e ácidos, assim como na influência dos parâmetros operacionais, como pressão, temperatura e concentração, no desempenho dessas membranas. Outros temas relevantes incluem a avaliação do potencial de reutilização de efluentes tratados e o desenvolvimento de membranas mais resistentes e estáveis para aplicações específicas, como o tratamento de efluentes industriais.

Os processos de filtração por membranas permitem a separação de solutos dissolvidos em correntes de solventes, tal como os materiais flutuantes, e a separação de misturas gasosas. Em sua maioria, esses processos utilizam o escoamento tangencial, o que os diferencia da filtração convencional, onde a separação ocorre entre partículas sólidas em suspensão e as correntes líquidas ou gasosas em escoamento frontal. A membrana atua como uma barreira permeável e seletiva, restringindo a transferência de massa entre as fases, conforme mostrado na figura 2.

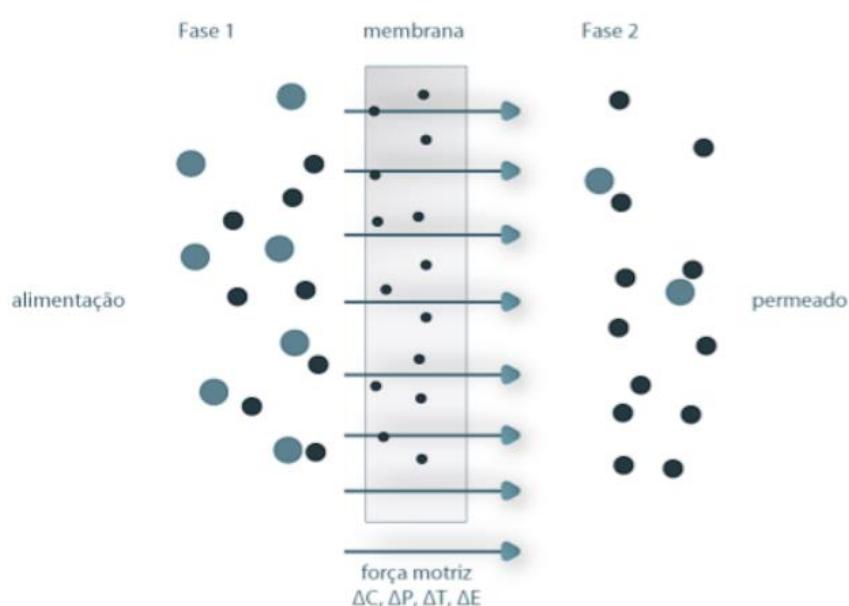


Figura2: funcionamento da membrana(Mulder 1991)

As indústrias desempenham um papel significativo na poluição da água, gerando grandes volumes de efluentes contaminados com uma variedade de substâncias tóxicas, incluindo metais, produtos químicos industriais e resíduos orgânicos. Esses efluentes representam uma séria ameaça para os ecossistemas aquáticos e para a saúde pública, exigindo medidas urgentes para mitigar seus impactos.

Existem tecnologias disponíveis para tratar e reutilizar as águas residuais industriais, ajudando a reduzir a poluição hídrica e conservar os recursos hídricos. Uma dessas tecnologias é a separação por membranas, que inclui processos como Osmose Reversa, ultrafiltração e microfiltração. Esses processos são altamente eficazes na remoção de contaminantes da água, incluindo metais, e podem ajudar a purificar e reutilizar os efluentes industriais de forma sustentável.

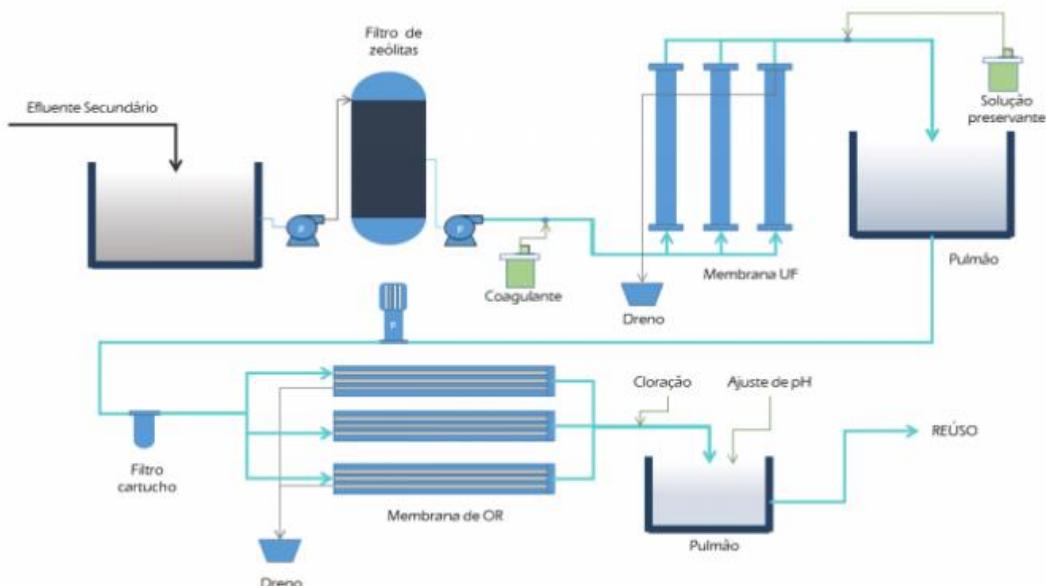


Figura3 Fluxograma usual de Estações de tratamento de efluentes via membranas

A Osmose Reversa, em particular, tem se destacado como uma tecnologia eficaz para o tratamento de efluentes industriais contaminados com metais. Este processo envolve a passagem da água através de uma membrana semipermeável para remover contaminantes, produzindo água limpa que pode ser reutilizada em processos industriais ou descartada com segurança no meio ambiente.

Além da Osmose Reversa, outras tecnologias de separação por membranas, como ultrafiltração e microfiltração, também são amplamente utilizadas no tratamento de águas residuais industriais. Esses processos oferecem uma abordagem sustentável para o tratamento de efluentes, ajudando a reduzir a poluição hídrica e conservar os recursos hídricos.

Em resumo, o tratamento de efluentes industriais é essencial para proteger o meio ambiente e garantir a disponibilidade de água limpa para as gerações futuras. As tecnologias de separação por membranas, como a Osmose

Reversa, desempenham um papel crucial nesse processo, oferecendo uma solução eficaz e sustentável para o tratamento de efluentes industriais contaminados com metais. Essas tecnologias são fundamentais para enfrentar a crise global de escassez hídrica e proteger a saúde e o bem-estar das comunidades humanas e dos ecossistemas naturais.

Abordagem

O presente estudo teve como objetivo principal investigar a aplicação de processos de separação de membranas em efluentes industriais para recuperação dos rejeitos, Eletrodialise e Osmose Reversa (OR), bem como outros processos de separação movidos a gradiente de pressão na produção de água para reuso industrial e na recuperação de metais.

Os objetivos específicos foram: revisitar os métodos de tratamento de agua e avaliar a capacidade da separação de poluentes do permeado, especialmente de cátions metálicos, investigar a eficácia de processos baseados em membranas no tratamento de efluentes industriais, bem como a viabilidade e métodos de recuperação de metais em solução.

Formas de Aplicação

No tratamento de efluentes inorgânicos contaminados com metais, várias técnicas de separação e purificação são empregadas para remover eficazmente esses poluentes e garantir a qualidade da água. Uma das abordagens mais comuns é a ultrafiltração (UF), que utiliza membranas permeáveis para separar metais, macromoléculas e sólidos suspensos com base no tamanho dos poros e no peso molecular dos compostos. Com uma eficiência de remoção que pode superar os 90%, a UF demonstra ser eficaz em uma faixa de pH de 5 a 9,5 e pressões de 2 a 5 bar, embora a incrustação da membrana possa diminuir seu desempenho ao longo do tempo.

Outra técnica importante é a nanofiltração (NF), que, com propriedades únicas entre as membranas de UF e Osmose Reversa (OR), pode tratar efluentes inorgânicos com concentrações de metal de até 2000 mg/L. As membranas de NF podem atingir eficiências de remoção entre 90% e 99%, operando em uma faixa de pH de 3 a 8 e pressões de 3 a 4 bar, embora ainda seja menos investigada em comparação com a UF e a OR para a remoção de metais.

Por sua vez, a Osmose Reversa (OR) é altamente eficaz na remoção de metais, alcançando taxas de rejeição de mais de 97% para concentrações de metal variando de 21 a 200 mg/L. Este processo, impulsionado por pressão, permite que a água passe através da membrana enquanto retém os metais, e é vantajoso por sua alta taxa de fluxo de água, resistência química e estabilidade mecânica.

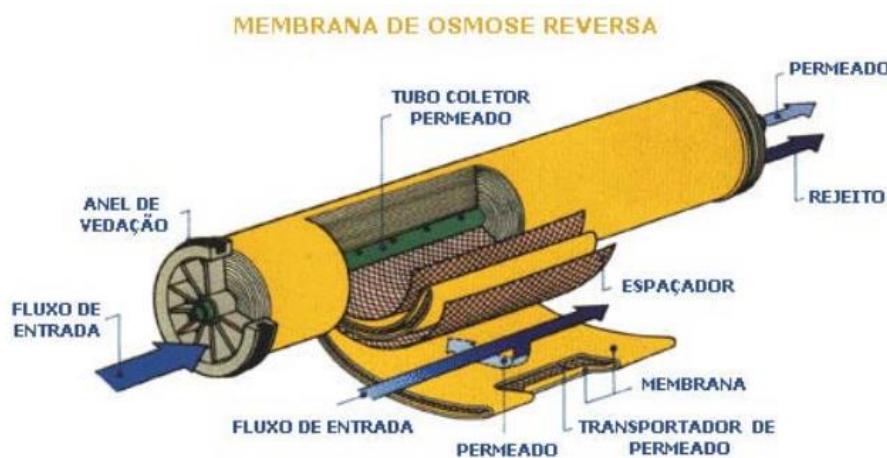


Figura 4: Esquema de membrana de OR[3]

Além disso, a troca iônica é uma técnica comum que envolve uma troca reversível de íons entre uma resina e uma solução eletrolítica. Eficiente na remoção de metais em concentrações que variam de menos de 10 mg/L a mais de 100 mg/L, a troca iônica é especialmente eficaz em condições ácidas, com pH de 2 a 6, devido à seletividade dos ligantes nas resinas.

Embora menos discutidas no texto, e menos presentes nas estações de tratamento de agua, bem como em pesquisas, técnicas de tratamento eletroquímico, como a eletrodialise, também podem ser utilizadas para remover metais, e facilitam sua recuperação, dependendo das condições operacionais e das características das membranas. Em suma, a escolha do método de tratamento mais adequado depende das propriedades específicas do efluente, dos requisitos de remoção e das condições de operação, bem como as necessidades que o processo visa atender.

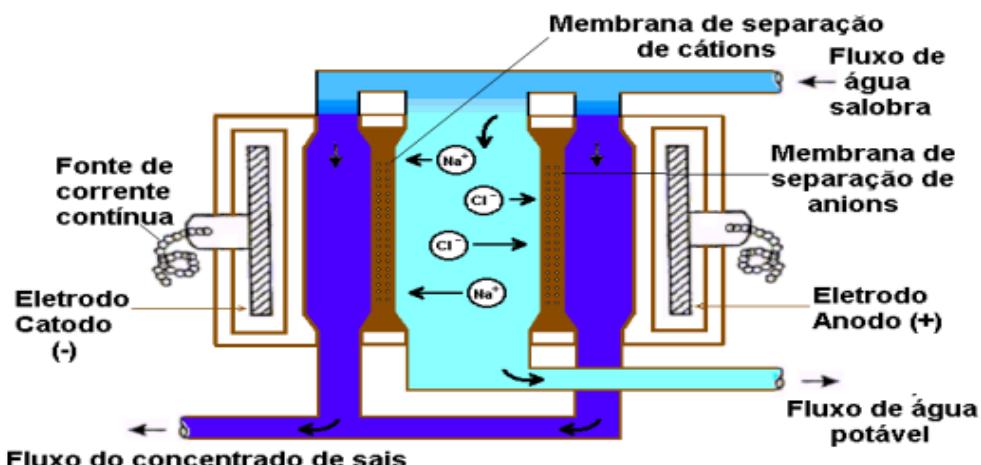


Figura 4: esquemática de funcionamento de eletrodiálise[4]

Tipos de membrana

A tecnologia de separação por membrana é uma forma eficaz e ecologicamente sustentável de tratar águas residuais. Em 1907, Behold introduziu filmes de nitrocelulose com poros avaliados, e o método foi refinado por outros desde então. Filmes colódio microporosos tornaram-se disponíveis comercialmente até meados da década de 1930.

Este método inicial de microfiltração foi ampliado para diversos polímeros nas três décadas seguintes, com destaque para as membranas derivadas de acetato de celulose, cuja técnica de preparo foi desenvolvida por Loeb e Saurian através de uma abordagem de inversão de fases.

Tabela 1: Correlação entre íons metálicos e tipo de processo requerido.
[NO_PRINTED_FORM] [3]

Ions Metálicos	Origem da Solução	Tipo de Membrana	Eficiência de Remoção
Ni ²⁺ , Cu ²⁺	Solução Aquosa com corantes e metais	Nanofiltração	Ni = 95.8%, Cu = 96%
Hg ²⁺ , Zn ²⁺ , Pb ²⁺	Soluções aquosas	Membranas com polímero enxertado de p-estirenosulfonato de sódio e polissulfona	95%
Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Pb ²⁺ , Cd ²⁺	Soluções aquosas	Copolímero pentabloco	>98%
Zn ²⁺ , Fe ²⁺ , Pb ²⁺ , Ni ³⁺ , Mn ²⁺ , Cu ²⁺	Solução aquosa contendo íons metálicos	Membranas PES/B-Cur	Zn = 99.51%, Fe = 99.88%, Pb = 99.61%, Ni = 99.11%, Mn = 99.31%, Cu = 98.72%
Cd ²⁺ , Mg ²⁺ , Pb ²⁺	Águas residuais	Membrana de fibra oca de dupla camada de nanofiltração	Mg = 98%, Cd = 95%, Pb = 93%
Cu ²⁺ , Cd ²⁺ , Pb ²⁺	Solução aquosa com corantes e íons metálicos	Membrana de nanofiltração	Cu = 97.6%, Cd = 98.8%, Pb = 98.0%
As ⁺⁵ , Pb ²⁺ , Cd ²⁺	Águas residuais	Membranas de Polissulfona (PSF)	As = 70.0%, Pb = 95.0%, Cd = 80.0%
Pb ²⁺ , Cu ²⁺	Águas residuais	Membrana de papel de bucky	Pb = 91.0%, Cu = 94.0%
Pb ²⁺ , Cd ²⁺ , Cu ²⁺	Águas residuais industriais	Membrana de matriz mista feita de polivinilideno fluoreto (PVDF) e fosfato de zircônio-alfa (PVDF-ZrP)	Pb = 91.2%, Cd = 42.8%, Cu = 93.0%
Ni ²⁺ , Pb ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺	Águas residuais	Membrana de filme fino de nanocompósito (TFN)	Ni = 90.4%, Pb = 91.2%, Cu = 92.7%, Zn = 93.3%
Cu ²⁺ , Ni ²⁺ , Cd ²⁺	Águas residuais industriais	Membrana de osmose reversa em espiral	Cu = 96.5%, Ni = 98.5%, Cd = 97.5%
Cr, Cu, Ni	Águas residuais de eletrodeposição	Membrana de fibra oca com camada interna de filme de poliamida	Cu = 95.33%, Cr = 95.76%, Ni = 94.99%
Cu, Fe	Soluções aquosas à base de água	Membrana de ultrafiltração reativa de fibra oca	Alta taxa de ejeção
Cu, Fe	Soluções à base de água	Membrana que cria poros de polietileno de sulfona (PVP)	Alta eficiência de remoção
Pb ²⁺ , As ⁺⁵	Águas residuais	Membrana de matriz mista de óxido de alumínio dopado com zinco/polissulfona	Pb = 98.4%, As = 87.0%
Cu ²⁺ , Pb ²⁺ , Cd ²⁺	Águas residuais	Membrana de Mxene	99.5%

A Tabela 1 apresenta um resumo recente dos estudos sobre remoção de metais utilizando tecnologias de membrana. Filmes isotrópicos e anisotrópicos, ou simétricas e assimétricas, representam dois tipos de membranas.

Os filmes isotrópicos possuem uma estrutura uniforme tanto quimicamente quanto fisicamente, podendo ser microporosos, com poros pequenos e numerosos, ou densos, sem poros, o que limita sua utilidade devido à baixa permeabilidade.

Em contrapartida, as membranas de microfiltração geralmente são compostas por filmes isotrópicos microporosos. Por outro lado, as membranas anisotrópicas possuem uma superfície não uniforme, sendo compostas por várias camadas com diferentes topografias e composições, em que uma camada mais espessa e permeável sustenta uma camada fina e seletiva.

Quando utilizadas em técnicas como a Osmose Reversa, essas membranas demonstram eficácia. As membranas são classificadas como orgânicas ou inorgânicas com base nos materiais de sua composição. Os polímeros orgânicos sintéticos são comumente utilizados na fabricação de membranas orgânicas, especialmente em processos de separação impulsionados por pressão, como microfiltração, nanofiltração, Osmose Reversa e ultrafiltração. Alguns dos polímeros orgânicos sintéticos frequentemente utilizados incluem acetato de celulose, politetrafluoretileno (PTFE), polipropileno e polietileno (PP). Por sua vez, as membranas inorgânicas são compostas por materiais como cerâmica, metal, zeólito e sílica.

O avanço na tecnologia de membranas possibilitou a produção de membranas assimétricas, amplamente comercializadas e fabricadas a partir de uma variedade de materiais poliméricos. Relatórios indicam que o mercado global de equipamentos e filmes de membrana cruzada cresceu significativamente nos últimos anos, passando de US\$ 6,8 bilhões em 2005 para US\$ 9 bilhões em 2008. Existem dois tipos principais de membranas: poliméricas e inorgânicas.

Quanto ao tamanho do poro, há quatro tipos de membranas comumente utilizadas: osmose reversa, nanofiltração, ultrafiltração e microfiltração. Ajustar o tamanho do poro da membrana de osmose reversa é fundamental para purificar a água, especialmente para remover partículas pequenas e, ocasionalmente, solúveis, como arsênio. No entanto, a purificação da água por osmose reversa pode resultar na exclusão de minerais essenciais, como cálcio e magnésio, que são importantes para a saúde humana quando consumidos através da água potável.

O desenvolvimento de filmes híbridos e adsorventes, que combinam técnicas de adsorção e separação por membrana, tem recebido uma atenção considerável e é objeto de estudo prolongado. A ideia central por trás da separação de poluentes da água e da remoção de metais utilizando membranas envolve a criação de uma barreira que bloqueia alguns componentes enquanto permite a passagem de outros.

O permeado refere-se às correntes processadas e coletadas, enquanto o retentado é o componente rejeitado. A seletividade de uma membrana é medida pela quantidade de um produto químico que ela retém em uma corrente de alimentação.

A remoção por partição de membrana ocorre através de mecanismos como rejeição de tamanho, bloqueio estérico, proibição de Donnan e propriedades adsorventes em relação a poluentes, sendo amplamente aplicada em processos como ultrafiltração e microfiltração devido à sua estabilidade química, mecânica e térmica.

Diferentes métodos, incluindo processos dependentes e independentes do equilíbrio, bem como processos baseados em pressão e outras forças motrizes, são empregados para a obtenção de material através de membranas.

Membranas Poliméricas

Embora as membranas adsorventes tenham surgido como uma opção para eliminar partículas metálicas, as escolhas economicamente viáveis são restritas a polímeros inertes, como polietileno (PE), polipropileno (PP), nylon PSF e PVDF, devido à ausência de grupos funcionais reativos.

Para contornar essa limitação, técnicas de modificação de superfície são necessárias, como a copolimerização de enxerto induzida por radiação, para introduzir monômeros responsivos, como ácido acrílico, acrilamida, acrilonitrila e monômeros contendo epóxi (por exemplo, divinilbenzeno e metacrilato de glicidila), na camada externa do filme adsorvente. Outro exemplo é a ligação de diversos agentes de coloração e corantes de alta massa molecular, a membranas poliméricas hidrofílicas, como polivinilbutiral, poli (metacrilato de 2-hidroxietila), celulose, polivinilálcool e filmes de derivados de acetato de celulose.

No entanto, apesar dos esforços para aumentar a capacidade de adsorção de partículas metálicas por meio de ajustes na membrana, as membranas pré-modificadas frequentemente falham devido a modificações químicas ou físicas severas na superfície, ou porque os produtos químicos usados para modificação não são viáveis economicamente para aplicações diárias de remoção de partículas metálicas. Além disso, a modificação da superfície pode levar a dificuldades na manutenção do tamanho do poro da membrana, resultando em uma perda significativa de desempenho da membrana no fluxo de permeado.

Os tipos predominantes de membranas poliméricas incluem as seguintes categorias:

Polímero Natural: Membranas derivadas de fontes naturais, como celulose, quitosana ou algas. Essas membranas são conhecidas por sua biodegradabilidade e baixo custo de produção.

Polímeros Sintéticos: Membranas fabricadas a partir de polímeros criados em laboratório, como polissulfona, poliéster ou poliamida. Elas oferecem uma ampla gama de propriedades ajustáveis e são frequentemente utilizadas em aplicações industriais devido à sua resistência e durabilidade.

Membranas de Polímeros de Matriz Misturada: Combinam diferentes tipos de polímeros para obter propriedades específicas, como maior seletividade ou resistência química. Essas membranas são altamente versáteis e podem ser adaptadas para uma variedade de aplicações.

Polímero Aprimorado: Membranas que passaram por modificações para melhorar suas propriedades, como resistência à corrosão, capacidade de separação ou permeabilidade. Essas melhorias são alcançadas por meio de técnicas de engenharia de materiais ou modificação química.

Membrana de Inclusão Polimérica: Membranas que utilizam uma abordagem de inclusão de substâncias químicas específicas para aumentar sua seletividade ou capacidade de adsorção. Essas membranas são frequentemente usadas em aplicações de separação seletiva, como a remoção de íons metálicos de soluções aquosas.[43]

Polímero Natural

A conexão de várias substâncias químicas coloridas a camadas de polímero hidrofílico, como polivinilbutíral, poli(metacrilato de 2-hidroxietila), poli(álcool vinílico), derivado de ácido acético de celulose e filme de celulose, exemplifica a integração de técnicas de adsorção e separação por membrana. Apesar das tentativas de aumentar a capacidade de adsorção de partículas metálicas em membranas poliméricas, muitas vezes a membrana pré-arranjada sofre colapso devido à severidade do material. Uma desvantagem adicional da modificação superficial é a dificuldade de manter o tamanho dos poros da membrana, resultando em uma redução crítica na eficiência do fluxo de permeação.

No entanto, a maioria dos estudos até então restringiu o uso de quitosana a flocos, pó e grânulos de gel, dificultando sua aplicação prática devido à adsorção cinética lenta. Como a quitosana apresenta resistência química e mecânica, esforços significativos têm sido dedicados ao desenvolvimento de membranas de quitosana de alta densidade de embalagem, como membranas planas ou de fibras ocas, para diversas aplicações, incluindo a remoção de íons metálicos. A principal limitação da quitosana pura como membrana adsorvente é sua baixa resistência mecânica.

Para abordar esse desafio, pesquisadores têm explorado diferentes estratégias. O uso de quitosana como compósito de filme fino, juntamente com

um suporte adequado, surge como uma solução para o problema mecânico encontrado nas membranas planas de quitosana. Outra abordagem promissora envolve a incorporação de nanobiomateriais para melhorar a resistência mecânica das membranas. A criação de membranas compostas utilizando quitosana como suporte também demonstrou melhorias, apesar das dificuldades relacionadas à uniformidade do revestimento de quitosana na membrana de suporte.

A combinação de quitosana com outros materiais poliméricos se mostra uma alternativa viável para superar as limitações da quitosana pura, proporcionando benefícios adicionais, como estabilidade química aprimorada e maior resistência mecânica. Avanços significativos foram alcançados na construção de membranas adsorventes de quitosana, como a utilização de polímeros derivados de polissulfona para a produção de membranas de ultrafiltração. A pesquisa sobre a remoção de biomoléculas e íons metálicos utilizando membranas mistas de quitosana tem produzido resultados promissores, especialmente na troca de íons trivalentes por íons metálicos.

O desenvolvimento de nanopartículas de quitosana e sua fusão na matriz polimérica têm sido áreas de interesse crescente, com o objetivo de melhorar as propriedades das membranas mistas de quitosana. A eficiência de adsorção de íons cobre (II) em membranas de fibra oca de quitosana demonstrou resultados notáveis, impulsionando avanços significativos na área.[44][45]

Polímeros Sintéticos

O poliacrilonitrila (PAN) se destaca entre os polímeros sintéticos devido à sua excelente estabilidade em solventes, custo acessível e durabilidade mecânica. Apesar de sua obtenção anteriormente ser desafiadora, processos específicos, como a hidrólise e a cicloadição [3 + 2] em altas temperaturas, podem modificar facilmente os grupos nitrila (dCN) do PAN para permitir a adsorção de íons metálicos.

Um estudo conduzido por Kumar et al. ilustra essa capacidade ao criar uma membrana adsorvente de ultrafiltração a partir de um polímero sintético (PVT-co-PAN) poliviniltetrazol-copoliacrilonitrila. A abordagem de separação de fases induzida por não solvente (NIPS) foi empregada para produzir as membranas neste estudo. Os fragmentos de PVT presentes influenciam as características da membrana, como tamanho de poro, carga e hidrofilicidade.

A presença de PVT na membrana a torna menos hidrofílica e mais negativamente carregada, além de servir como um importante local de ligação para partículas de Cu (II) durante a adsorção. Essas descobertas destacam o papel crucial dos fragmentos de PVT na modificação das propriedades da membrana.

Estudos adicionais mostraram que a adição de acetato de celulose às membranas modificadas reduziu sua hidrofilicidade, enquanto micrografias de

SEM revelaram padrões elásticos preenchidos com acetato de celulose denso e grandes poros nas superfícies das membranas compostas, o que aumenta a eficiência na movimentação da água. Em resumo, as membranas mistas PU-CA1 apresentam-se como uma promissora opção para o tratamento de águas residuais na indústria têxtil.[45][46]

Membranas de Matriz Mista de Polímeros

Nos últimos anos, a tecnologia de membranas de matriz mista (MMM) deu um salto significativo com o desenvolvimento das membranas de matriz mista (MMM). Estas membranas combinam o processo de separação por membranas com as excelentes capacidades de adsorção de adsorventes, muitas vezes materiais inorgânicos. Qualquer tipo de nanomaterial pode ser utilizado como aditivo para superar as limitações das membranas poliméricas convencionais. As propriedades intrínsecas dos nanomateriais melhoram ainda mais as características das membranas, como a hidrofilicidade aprimorada, tamanho de poro menor, capacidade adsorvente aumentada e maior porosidade, resultando em um melhor fluxo de água sem comprometer a eficiência de remoção. O método mais comum para adicionar nano-enchimentos é por meio de uma simples técnica de mistura, utilizando copolímeros, biomateriais, argila e óxidos metálicos para criar MMMs adsorventes.

A adição de nanopartículas às membranas melhora suas características físico-químicas, resultando em maior eficácia na remoção, como mostrado em vários estudos. Por exemplo, Ladhe et al. (2009) desenvolveram uma MMM para a captura de Ag⁺ usando sílica, polissulfona e acetato de celulose. Yilmaz Yurekli (2016) investigou a adsorção de metais, utilizando nanopartículas de zeólita implantadas em uma membrana de polissulfona. Gohari et al. usaram membranas de UF de PES com óxido de manganês hidratado (HMO) para remover Pb(II) de soluções aquosas. Além disso, alguns estudos exploraram a combinação de polímeros mistos para produzir MMMs com penetração de água adequada ou maior confiabilidade mecânica/química.

Além disso, a capacidade do adsorvente de se ligar ao adsorbato está associada à remoção de contaminantes, como corantes e metais, por meio do processo de adsorção. A adsorção de metais é influenciada pela presença de grupos funcionais ativos, como fenólicos, carboxílicos e hidroxilas. A combinação de componentes inorgânicos com membranas poliméricas pode alterar a composição da membrana híbrida, resultando em maior capacidade de adsorção. Por exemplo, Zhang et al. (2024) descreveram duas técnicas de fabricação de membranas usando PVDF e óxido de zinco (ZnO). Essas membranas híbridas apresentaram uma capacidade de adsorção significativamente maior do que as membranas originais de PVDF.[47][48][49]

Polímero Aprimorado

O indivíduo que opera um sistema de Ultrafiltração Aprimorada com Adição de Polímero (PEUF) deve considerar várias nuances do processo. O PEUF, desenvolvido por um pequeno grupo de cientistas, é um método eficaz para extrair metais do tratamento de água, utilizando princípios semelhantes aos do MEUF. No entanto, o PEUF difere na formação de um composto com partículas metálicas usando polímeros solúveis em água, como ácido poliacrílico (PAA), polietilenimina (PEI), poliamina de vinilo (PVAm) e outros. A eficácia do PEUF é notável, proporcionando alta eficiência na remoção de metais e na produção de extratos altamente concentrados.

A interação entre diferentes polímeros e metais, juntamente com a quantidade de polímero e os níveis de pH, afeta a eficiência da remoção de metais no processo PEUF. Por exemplo, uma proporção maior de polímero para metal tende a aumentar a eficácia na remoção de partículas de metal pesado. Além disso, o pH influencia a rejeição de metais, sendo mais eficaz em níveis neutros a elevados.

A escolha da membrana para a ultrafiltração aprimorada por polímero também é crucial. Diferentes membranas apresentam características específicas que afetam a eficiência do processo. Por exemplo, as membranas de nanofibra têm sido usadas para remover íons Cd²⁺ por meio de quelatação, demonstrando altas taxas de remoção de metais.

Além disso, é importante considerar a aplicabilidade de diferentes técnicas de filtração de membrana, como a ultrafiltração (UF) e a Osmose Reversa (OR), no tratamento de águas residuais contaminadas com metais. Enquanto a RO é mais eficaz na remoção de metais, mesmo com uma taxa de rejeição de 97%, a NF pode ser uma opção mais econômica, especialmente em situações de baixo fluxo de água.

Em resumo, o PEUF oferece uma abordagem eficiente para a remoção de metais do tratamento de água, com potencial para produzir extratos altamente concentrados. No entanto, a escolha adequada de polímeros, membranas e condições operacionais é essencial para maximizar a eficácia do processo. [50][51][52][55]

Membrana de inclusão polimérica

As Membranas de Inclusão de Polímeros (PIMs) são altamente vantajosas devido à sua capacidade seletiva na extração de íons metálicos, sua versatilidade e eficiência econômica. Elas desempenham um papel crucial na separação de íons metálicos específicos em misturas complexas, sendo aplicadas em uma variedade de áreas, como mineração, tratamento de águas residuais e processos hidrometalúrgicos. No entanto, algumas limitações das PIMs incluem estabilidade limitada em condições extremas de pH ou temperatura, bem como o risco de obstrução.

Apesar dessas limitações, as PIMs são amplamente preferidas devido à sua eficácia, seletividade e capacidade de reduzir a geração de resíduos em comparação com métodos convencionais. Elas se tornaram ferramentas valiosas no combate à contaminação por metais, especialmente em contextos onde precisão e sustentabilidade são essenciais. Normalmente, as PIMs são fabricadas na forma de filmes finos e estáveis, feitos a partir de uma mistura de polímeros, surfactantes de membrana e um agente transportador.

Enquanto o material base da membrana oferece estabilidade mecânica, os plastificantes conferem flexibilidade à membrana e a tornam compatível com os componentes. O transporte de íons dentro da PIM é fortemente influenciado pelo tipo de polímero base utilizado. O tributirato de celulose (CTB) e o cloreto de polivinila (PVC) são os materiais de membrana mais comumente empregados em PIMs devido à sua estabilidade mecânica e compatibilidade com a maioria dos agentes transportadores.

Para facilitar o transporte de íons metálicos, frequentemente são adicionados plastificantes à solução de moldagem, a fim de diminuir a temperatura de transição vítreia e produzir membranas mais flexíveis e menos quebradiças. Os plastificantes comerciais mais comuns incluem o éter pentílico de 2-nitrofenil (NPPE) e o éter octílico de 2-nitrofenil (NPOE), ambos amplamente acessíveis e com diversas aplicações industriais.

O agente transportador, que pode ser um polímero ou um trocador de íons, desempenha um papel crucial na eficiência do processo de PIM, influenciando a concentração e as capacidades de extração. Existem diferentes tipos de agentes transportadores, incluindo aqueles básicos, quelantes, ácidos, macrocíclicos e macromoleculares, e neutros.

Comparadas aos métodos de extração tradicionais, as PIMs oferecem vantagens como velocidade de extração rápida, alta seletividade, baixo custo e baixo consumo de energia. Além disso, as PIMs apresentam resistência mecânica superior em comparação com as membranas líquidas, embora possuam menor fluxo inicial e coeficientes de permeabilidade.[53][54]

Osmose Reversa

Funcionamento

A Osmose Reversa (OR) é o mecanismo principal usado para tratamento de efluentes com membranas, responsável pelo funcionamento de membranas de ultra e nanofiltração, além de estar presente nos processos de eletrodialise como um mecanismo paralelo. Nesse método, uma pressão maior que a pressão osmótica é aplicada à solução mais concentrada, revertendo o fluxo do solvente para o meio menos concentrado, o que resulta na produção de água potável a partir de fontes salobras ou marinhas.

É um processo comumente utilizado também para dessalinização, empregado na separação de solutos de baixa massa molar, como sais inorgânicos dissolvidos e pequenas moléculas orgânicas, também é amplamente utilizado para obtenção de água potável em países do Oriente Médio.



Figura 5: equipamento de osmose reversa industrial

A OR é uma tecnologia altamente eficaz, encontrando aplicações diversas, desde a produção de água ultrapura para indústrias eletrônicas e farmacêuticas até a dessalinização de água para uso em navios e plataformas de extração de petróleo.

A eficiência da Osmose Reversa é avaliada por meio de parâmetros como rejeição ao soluto, fluxo permeado e recuperação. A rejeição ao soluto mede a capacidade da membrana em reter os solutos indesejados, enquanto a recuperação expressa a eficiência do processo em relação à quantidade de água purificada produzida em relação à água de alimentação. Esses parâmetros são cruciais para determinar a viabilidade econômica e operacional da OR em diversas aplicações industriais e de tratamento de água.

As membranas utilizadas na Osmose Reversa podem ser caracterizadas quanto à sua permeabilidade hidráulica, rejeição ao soluto e recuperação. A permeabilidade hidráulica da membrana determina o fluxo de água através dela, enquanto a rejeição ao soluto indica a capacidade da membrana em reter os solutos indesejados. Já a recuperação descreve a eficiência do processo em relação à quantidade de água purificada produzida em relação à água de alimentação. A compreensão desses parâmetros é fundamental para o desenvolvimento e otimização de sistemas de Osmose Reversa.

Um processo é classificado como Osmose Reversa caso o gradiente de pressão esteja na faixa de 15-80 atm e a membrana seja impermeável a todos os solutos do meio, obtendo apenas os solventes como material permeado em elevada pureza.[1][20][28][36]

Usos em efluentes orgânicos

A Osmose Reversa, por definição, foi idealizada para possuir recuperação próxima à total para todos os tipos de efluentes, como exemplos para uso em recuperação de efluentes com efluentes orgânicos em (E. K. Schoenell and N. Hamburgo 2020) de 75% de recuperação do permeado, incluindo remoção completa de coliformes fecais de água de esgoto e remoção de outros compostos orgânicos até níveis aceitáveis para descarte de recursos hídricos legalmente requeridos.

Para o processo de tratamento da água de fabricação de jeans[35], um efluente com diversos corantes e compostos orgânicos, entre outros, e referenciado por Fortino (2012), o processo de coagulação e floculação pode ser empregado para facilitar a aplicação de procedimentos de filtragem.

O equipamento de Osmose Reversa utilizado no estudo de (E. K. Schoenell and N. Hamburgo 2020) possuía a capacidade de utilizar até 4 módulos de membrana (vasos de pressão). Utilizou-se um módulo contendo uma membrana de poliamida modelo BW 30-4040 (Dow Filmtec), com uma área de 7,2 m². O sistema incluía também um filtro de poliéster plissado, com capacidade de retenção de 5 µm, posicionado antes da entrada do efluente na membrana.

O sistema de Osmose Reversa foi operado em modo de recirculação total em diferentes pressões de trabalho: 6, 8, 10 e 12 bar, por 1 hora cada pressão. Após determinar a pressão de trabalho ideal, levando em consideração diversos parâmetros operacionais, como vazão do permeado, consumo energético, ajuste de parâmetros físico-químicos e conformidade com a legislação, o sistema foi operado com recirculação do concentrado para avaliar diferentes taxas de recuperação de permeado.

As vazões do permeado foram medidas e amostras foram coletadas para cada pressão e concentração aplicada. A vazão de saída do concentrado para todos os ensaios foi de 0,17 L/s. O índice de densidade de sedimentos (SDI) no esgoto e nos concentrados gerados foi calculado de acordo com o Protocolo D-4189 da ASTM, utilizando uma membrana de 47 mm com poros de 0,45 µm e

aplicando 30 psi de pressão. Os resultados obtidos foram representados pela tabela 2 abaixo.

Tabela 2: Caracterização média do esgoto inicial e do permeado para as pressões aplicadas na OR (6, 8, 10 e 12 bar).[20]

Parâmetros	Unidade	Média Esgoto Inicial	Média Permeado 6 Bar	Média Permeado 8 Bar	Média Permeado 10 Bar	Média Permeado 12 Bar	Resolução CONAMA nº 430/2011	Resolução CONSEMA nº 355/2017
Carbono Total	mg.L ⁻¹	63,5	3,0	2,8	2,5	2,2	n.e.	n.e.
Carbono Inorgânico	mg.L ⁻¹	37,1	3,0	2,8	2,5	2,2	n.e.	n.e.
Carbono Orgânico Total	mg.L ⁻¹	26,4	0	0	0	0	n.e.	n.e.
DBO ₅	mg O ₂ .L ⁻¹	88,3	5,0	5,0	5,0	5,0	120 ou 60% eficiência	40 – 120 (conforme vazão)
DQO	mg O ₂ .L ⁻¹	224,8	3,1	3,1	3,1	3,1	n.e.	150 – 330 (conforme vazão)
Cor	mg Pt.Co.L ⁻¹	38,0	1,5	1,5	1,5	1,5	n.e.	n.e.
Turbidez	NTU	4,0	0,4	0,3	0,2	0,3	n.e.	n.e.
pH		7,2	7,3	7,0	6,7	7,6	5 - 9	6 – 9
Temperatura	°C	22,0	23,5	24,5	25,5	28,5	< 40°C ou ≠ 3°C do corpo receptor	40°C
Fósforo Total	mg.L ⁻¹	3,9	0,015	0,021	0,012	0,026	n.e.	1 – 4 (conforme vazão) ou 75% eficiência
Nitrito	mg.L ⁻¹ N em NO ₃ ⁻	0,5	0,7	0,5	0,4	0,3	n.e.	n.e.
Nitrito	mg.L ⁻¹ N em NO ₂ ⁻	6,6	0,016	0,018	0,02	0,017	n.e.	n.e.
Nitrogênio Amoniacal	mg.L ⁻¹	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.e.	20
Nitrogênio Total Kjeldahl	mg.L ⁻¹	9,8	5,2	3,5	1,4	1,4	n.e.	n.e.
Sólidos Dissolvidos Fixos	mg.L ⁻¹	214,5	38,5	9,0	11,5	19,5	n.e.	n.e.
Sólidos Dissolvidos Totais	mg.L ⁻¹	409,0	158,5	35,5	134,5	144,5	n.e.	n.e.
Sólidos Dissolvidos Voláteis	mg.L ⁻¹	194,5	120,0	26,5	123,0	125,0	n.e.	n.e.
Sólidos Sedimentáveis	mL.L ⁻¹	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 1	< 1
Sólidos Suspensos Fixos	mg.L ⁻¹	3,8	1,0	1,0	1,0	1,0	n.e.	n.e.
Sólidos Suspensos Totais	mg.L ⁻¹	42,2	1,1	1,4	1,0	2,2	n.e.	50 – 140 (conforme vazão)
Sólidos Suspensos Voláteis	mg.L ⁻¹	38,9	1,1	1,4	1,0	2,2	n.e.	n.e.

Após cada ensaio, a membrana foi limpa com água da torneira e uma solução de hidróxido de sódio (NaOH) 0,1%, conforme o manual do equipamento. Foi realizada análise de cloro na água de limpeza para garantir que não houvesse resíduos que pudessem danificar a membrana. A permeabilidade da membrana foi avaliada antes e após a limpeza, aceitando-se uma diferença de até 10% do valor inicial.

Para a recuperação de metais e sais em (B. Caroline Ricci) e (L. Scapini 2007), indicando recuperação de metais e sais em solução acima de 95% para membranas TFC-HR e SEPA – 97 em condições de trabalho de 10bar para ambos.

Comumente para facilitar o procedimento o efluente tratado passa por pre-tratamento em processos de micro, ultra e nanofiltração, para diminuir a pressão necessária na etapa de OR, facilitar manutenção e prolongar o tempo de operação entre as limpezas[35].

Usos em efluentes contaminadas com metais

Análogo ao procedimento realizado em (E. K. Schoenell and N. Hamburgo 2020), (J. C. Mierzwa and H. G. Riella) realizou ensaios parecidos, sintetizaram um efluente para ensaios, feito aos moldes do rejeito gerado pela instalação Nuclear de Água pressurizada, 12,73mg/L de cromo, 13,20 mg/L de manganês, 14,43 mg/L de ferro, 5,96mg/L de Cério, 13,13 mg/L de molibdênio, 971 mg/L de sólidos dissolvidos, 1500mg/L de surfactantes, 541,3mg/L de demanda química de oxigênio(DQO),e 1,48 mg/L de prata, o efluente passou por tratamentos auxiliares de coagulação, e estabelecendo recuperação de 90%, aplicando 15bar de pressão, como possível notar na tabela 4 a seguir, obteve-se separações elevadas dos metais contaminantes inicialmente presentes.

Tabela 3:caracterização do efluente tratado

Contaminante	Concentração (mg/L)	Remoção (%)
Fósforo Cromo	N/A	--X--
1,33	89,6%	
Manganês	0,06	99,5%
Ferro	<0,05	> 99,7%
Prata	0,06	95,9%
Cério	0,41	93,1%
Cálcio	591,18	--X---
Molibdênio	9,68	26,3 %
Iodo	N/A	--X---
DOO	66,9	87,70 %
Condutividade	4,58 mmho/cm	--X---
pH	7,00	--X---

Como é possível analisar pelos resultados obtidos pelo estudo, a redução dos metais dissolvidos foi suficiente para o efluente tratado alem de se adequar para reuso atingiu especificações próprias para consumo.

Entretanto o maior empecilho do uso amplo de osmose reversa para tratamentos de águas poluídas é o gasto elevado energético para a separação, esses gastos são mitigados com o uso de pré-tratamentos, como coagulação, micro e nanofiltrações, essas operações ajudam também a prolongar a vida útil do equipamento e reduzir a necessidade de limpezas das membranas.

Nanofiltração

Funcionamento

A nanofiltração é uma técnica de separação com membranas que se posiciona entre a Osmose Reversa e a ultrafiltração. É frequentemente empregada para separar solutos orgânicos de baixo peso molecular, permitindo passagem de moléculas no intervalo de 200-2000 daltons, e para a desmineralização parcial de correntes líquidas, visando à remoção de sais polivalentes. [9][10]

Os mecanismos de transporte que ocorrem na nanofiltração incluem difusão, exclusão molecular e interações eletrostáticas, permitindo a remoção seletiva de íons polivalentes. Esta técnica é amplamente aplicável em diversos setores industriais, oferecendo uma alternativa eficiente para a purificação de líquidos e a remoção de impurezas.[26][40]

A eficácia da nanofiltração é influenciada não apenas pela constituição da membrana, poros de 0,5-5nm, mas também por parâmetros operacionais, gradiente de pressão entre 5 e 25 atm, e pela dinâmica de circulação da alimentação. Os sistemas de nanofiltração são frequentemente projetados em módulos, que consistem em invólucros contendo suportes para as membranas e condutos para distribuição da alimentação e coleta do permeado. Esta abordagem modular possibilita uma configuração flexível em série ou paralelo de diferentes módulos, facilitando a manutenção e adaptação do sistema de acordo com as necessidades específicas do processo.[17][29][37]

Na indústria, diversos tipos de módulos são empregados na nanofiltração, como os de pratos planos, tubulares, em espiral e de fibras ocas. Cada tipo de módulo possui características específicas em termos de compactação, preço, facilidade de limpeza e controle da transferência de massa adjacente à membrana. Esta diversidade de opções permite uma seleção mais precisa do tipo de módulo mais adequado para cada aplicação específica, seja na indústria alimentícia, farmacêutica, de tratamento de água ou em outras áreas.[35][43]

Uso em efluentes orgânicos

O uso em curtume, tal como descrito em (Streit 2011) deu-se com o uso de uma solução sintética preparada com base nos efluentes estudados anteriormente

Tabela 4: propriedades da solução antes do tratamento

Parâmetro	Sol. Sint.
DQO (mgO ₂ .L ⁻¹)	907
COT (mg.L ⁻¹)	290
N total (mg.L ⁻¹)	270
N amoniacal (mg.L ⁻¹)	99,0
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	8,35
Sódio (mg.L ⁻¹)	950
Magnésio (mg.L ⁻¹)	998
Cloreto (mg.L ⁻¹)	3342
Sulfato (mg.L ⁻¹)	1989

Com base no uso de membranas sintéticas NF 200(Dow), de poliamida, trabalhando com pressões de 8 atm, obtendo:

Tabela 5: propriedades da solução depois do tratamento

Parâmetro	Sol. Sint. Tratada
DQO (mgO ₂ .L ⁻¹)	28,0
COT (mg.L ⁻¹)	15,0
N total (mg.L ⁻¹)	112
N amoniacal (mg.L ⁻¹)	51,0
Condutividade (mS.cm ⁻¹)	4,88
Sódio (mg.L ⁻¹)	413
Magnésio (mg.L ⁻¹)	335
Cloreto (mg.L ⁻¹)	819
Sulfato (mg.L ⁻¹)	761

Nas condições deste estudo, a nanofiltração demonstrou uma eficácia notável na remoção de diversos componentes indesejados, apresentando altas taxas de rejeição para matéria orgânica, polifenóis, sais e diferentes formas de nitrogênio. Com taxas de rejeição de até 94% para matéria orgânica e 99% para polifenóis, essa técnica se mostra promissora para o tratamento de efluentes em diversos setores industriais, proporcionando uma purificação significativa do líquido.

O permeado resultante da nanofiltração exibiu características que o tornam adequado para o reuso em processos produtivos específicos, como no caso da indústria de curtumes. Especialmente em etapas onde a qualidade da água não é um fator crítico para o desempenho dos processos, o permeado pode ser reintegrado ao ciclo produtivo, contribuindo para a sustentabilidade e a eficiência dos sistemas industriais. Além disso, a capacidade da nanofiltração em reter matéria orgânica a torna uma escolha valiosa como pré-tratamento para outras técnicas de purificação, como a eletrodiálise, ampliando ainda mais suas aplicações potenciais.

Usos em efluentes contaminadas com metais

Para usos visando a remoção de metais de efluentes, tal como em (B. Caroline Ricci 2015), onde foi estudado para efluentes de processo de extração de ouro, onde, com o auxilio de membranas comerciais MPF-34, o efluente utilizado nesse caso foi proveniente diretamente da planta de beneficiamento de ouro de Minas Gerais

Tabela 6: Caracterização físico-química do efluente do processo de oxidação sob pressão

Parâmetro	Unidade	Valor
pH	-	1,46
Conduтивidade	mS.cm^-2	28,07
Fe	mg.L^-1	571
SST	-	2561
SDT	-	436,5
Cu	mg.L^-1	105,5
Co	mg.L^-1	348
Ni	mg.L^-1	34,6
Ca	mg.L^-1	40,01
Mn	mg.L^-1	23.973
Al	mg.L^-1	156,8
As	mg.L^-1	487,6
Acidez total	gCaCO ₃ .L^-1	10,28
Acidez livre	gCaCO ₃ .L^-1	6,89
SO ₄ ^2-	mg.L^-1	21.480

Os ensaios de filtração, realizados com gradientes de pressão de 4 a 12bar, observasse nesse estudo que a membrana de nanofiltração não foi eficiente para reter os ácidos presentes em solução, isto é, acido sulfúrico, entretanto, apresentou retenção próxima a 90% dos ions metálicos presentes na solução, se mostrando um processo eficiente para reduzir

E também, em (A. E. D. Mahmoud and E. Mostafa 2023), onde foram avaliados os usos para remoção de metais, tais como Cd As Cu Mn Pb, as membranas utilizadas foram as da Dow, NF 270.

A solução de trabalho, sintetizada para diferentes concentrações usando metais comumente encontrados em efluentes de rejeitos industriais, condições de operação variadas para diversos pH, pressão, registraram desempenho na

remoção de cobre, alcançando quase 100% de rejeição em várias condições de pH e pressão. No entanto, sua eficácia diminuiu com concentrações mais altas de cobre. Além disso, a membrana mostrou boa remoção de cádmio, manganês e chumbo, mas não conseguiu reter arsênio devido à sua porosidade. O fluxo do permeado aumentou com a pressão, mas a diminuição do fluxo pode ser atribuída a fatores como adsorção na superfície da membrana. A diferença na eficácia de retenção entre soluções únicas e multicomponentes foi mínima, indicando que a composição da solução teve pouco impacto na eficiência da membrana.

Ultrafiltração

Funcionamento

O processo de ultrafiltração (UF) utiliza membranas porosas com poros na faixa de 2 a 100 nm para separar espécies nanométricas com base em gradientes de concentração e pressão aplicada. Essas membranas são amplamente empregadas na purificação de águas residuais e em diversos setores industriais, como laticínios, farmacêutico, alimentício e de tratamento de águas residuais. Elas são capazes de separar sólidos suspensos, matérias orgânicas, partículas coloidais e macromoléculas, incluindo proteínas, sedimentos sólidos, plásticos, nanopartículas e microrganismos. [8][59]

As membranas de ultrafiltração (UF) são encontradas em diferentes configurações, incluindo filmes porosos assimétricos, membranas de fibra oca e sistemas de placa e estrutura. A escolha entre esses tipos de membrana depende das condições operacionais específicas, como gradientes de concentração, pressões de alimentação e temperatura.[20][58]

Em termos de materiais, as membranas UF podem ser classificadas como inorgânicas ou poliméricas. As membranas inorgânicas oferecem boa estabilidade química e térmica, porém seu alto custo limita sua aplicabilidade em algumas situações. Por outro lado, as membranas poliméricas, feitas de materiais como PVDF, PSF, PES, PAN e CA, são amplamente preferidas devido às suas propriedades de permeação e ao custo mais baixo de fabricação. Esses materiais poliméricos são escolhas comuns em aplicações industriais devido à sua eficácia na separação de componentes nanométricos e à sua disponibilidade comercial.[38][40][47]

Nos últimos anos, houve um interesse crescente na incorporação de nanopartículas em membranas poliméricas para melhorar suas propriedades de separação. Isso inclui o uso de nanotubos de carbono, zeólitos, nanopartículas metálicas e óxidos metálicos. Essas melhorias visam aumentar a eficiência e a seletividade das membranas UF.[23][50][49]

Em resumo, as membranas UF desempenham um papel crucial em uma variedade de aplicações industriais, oferecendo uma solução eficaz e econômica para a separação de espécies nanométricas em líquidos.

Juang e Shiau (2000) realizaram testes de ultrafiltração utilizando efluentes sintéticos contendo íons de níquel II, cobre II, cádmio II, zinco II, cromo III e IV. Eles empregaram concentrações relatadas na época pelos órgãos de saúde pública e proteção ambiental dos EUA, Hong Kong e Tailândia. Entre os métodos utilizados, estava a ultrafiltração com várias membranas comerciais disponíveis na época, resultando em separações superiores a 95% para a maioria dos testes. Isso indica um potencial uso da tecnologia, desde que o grau de pureza da água requerido seja compatível com o efluente tratado.

Em Qin e Kolkman (2004), foi estudada a aplicação da UF como pré-tratamento de esgoto doméstico para Osmose Reversa (OR), visando alcançar padrões mínimos de tratamento para reduzir os custos com a Osmose Reversa posteriormente para uso industrial. O uso da ultrafiltração superou as expectativas, entregando água em condições melhores que as requeridas para o processo de OR a um custo reduzido.

Microfiltração

A microfiltração é o processo de separação por membranas movido à pressão menos eficiente para fins de tratamento de água, uma vez que os poros são na faixa de 100 a 1000 nm, operando com gradiente de pressão de 0,1 a 1bar, tendo suas principais aplicações como etapas de remoção de partículas flotantes como pré-tratamento de efluentes para outros processos, principalmente com a ajuda de floculantes, e além disso, possui usos na indústria alimentícia, como produção de proteínas isoladas do leite. [40][60]

Eletrodiálise

Funcionamento

A eletrodiálise constitui uma técnica de separação que emprega membranas iônicas para facilitar a translocação de íons entre soluções mediante um campo elétrico. Nesse procedimento, os íons são transferidos através das membranas de uma solução para outra, gerando duas novas soluções: uma mais diluída e outra mais concentrada em relação à solução inicial. Uma unidade típica de eletrodiálise é formada por membranas iônicas (positivas e negativas) arranjadas de forma intercalada em uma disposição semelhante a um filtro prensa, com espaçadores entre elas para estimular um fluxo turbulento. [2][5]

Os eletrodos são localizados nas extremidades da unidade e estão em contato com uma solução de lavagem. Quando um campo elétrico é ativado, os íons positivos (cátions) se dirigem ao cátodo, enquanto os íons negativos (ânions) migram para o ânodo. Esse processo resulta na formação de um compartimento mais concentrado e outro mais diluído em íons. Uma pilha típica de eletrodiálise industrial é composta por 200 a 500 membranas positivas e negativas. Cada par de membranas é capaz de transferir uma quantidade definida de eletrólito de um compartimento diluído para um concentrado. A utilização de múltiplos pares de membranas aumenta a eficácia do procedimento. [14][39]

A resistência elétrica total do sistema é determinada pelos eletrodos, membranas e soluções entre elas, que são separadas por espaçadores de trajetória sinuosa ou de fluxo regular. A disposição das membranas pode ser alterada ou exclusivamente positiva ou negativa, dependendo das exigências de separação. No deslocamento dos íons metálicos, todos os íons presentes na solução competem pela transferência, sendo a mobilidade iônica afetada pelo raio iônico e carga do íon. Os íons H⁺ exibem alta mobilidade devido ao seu diminuto raio atômico, atravessando as membranas positivas com facilidade e modificando o pH da solução por meio do mecanismo de Grotthus.[12][17]

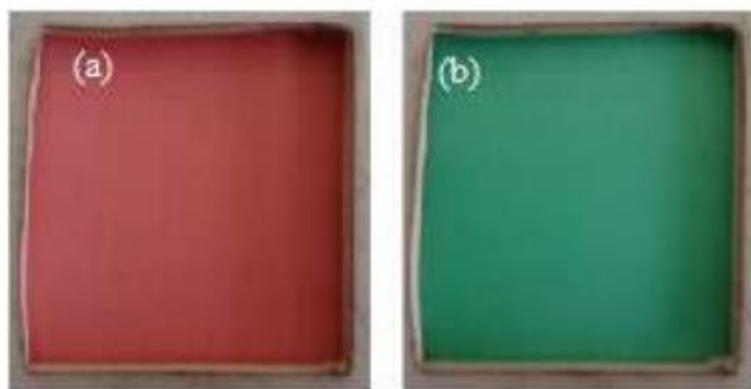


Figura 6: – (a) Membrana catiônica – HDX 100; (b) Membrana aniônica – HDX 200.[17]

Uso em efluentes orgânicos

O uso de métodos para tratar efluentes orgânicos é um dos aspectos mais importantes no setor de tratamento de água, devido ao seu impacto no meio ambiente, à crescente demanda por água nas indústrias e às regulamentações cada vez mais rigorosas em relação à qualidade dos resíduos industriais. Apesar de os métodos atualmente utilizados para o tratamento de água em larga escala lidarem com a maioria dos poluentes orgânicos, existe uma necessidade específica nas indústrias farmacêuticas e têxteis de métodos mais eficazes para lidar com esses tipos de poluentes.

Para fonte de curtume[17], da indústria de produção de couro, os ensaios em, , verificou-se que o aumento da matéria orgânica diminui o valor limite de corrente aplicada, consequentemente diminui a eficácia da separação, apesar disso se mostra um processo eficaz para reutilização de água em todas as etapas da produção de couro, embora a eletrodialise não remova matéria orgânica as membranas em si filtram ela, gerando acumulo da mesma, é importante ressaltar também que após 400hrs de uso a membrana apresenta quedas na eficiência, de remoção de ions, perdas essas que podem ser parcialmente recuperadas com processos de limpezas, como indicado na tabela 7 a seguir:

Tabela 7: índices de remoção para os principais solutos processos industriais

Parâmetro	Extração (%)		
	Nova Membrana	Membrana Usada	Membrana Após Limpeza
DQO	97 ± 1	96 ± 1	96 ± 1
N. Amon.	34 ± 2	33 ± 3	35 ± 2
Magnésio	50 ± 4	30 ± 4	40 ± 3
Sódio	28 ± 3	24 ± 3	25 ± 2
Cloreto	54 ± 3	42 ± 2	48 ± 2
Sulfato	25 ± 3	15 ± 3	16 ± 3

Usos em efluentes contaminadas com metais

A indústria de acabamento de metais gera grandes volumes de resíduos contaminados, contendo diversos metais e sais, que necessitam de tratamento adequado para evitar danos ambientais. A eletrodiálise (ED) é uma técnica eficaz para esse fim, capaz de recuperar água e concentrar eletrólitos dos efluentes industriais.

Pelo caráter de deslocamento iônico seletivo favorecido pela eletrodialise esse procedimento vem por ser um dos mais promissores para recuperação de metais, em (Deitos Bittencourt 2019), onde foram avaliadas as remoções para alguns dos principais metais presentes em efluentes contaminados por metais em tratamentos de superfícies metálicas, observamos em (Dani Rico Amado) uma análise do comportamento de diversas membranas produzidas pelo grupo, entretanto as membranas comerciais de Nafion obtiveram desempenho superior

O tempo de ensaio utilizado foi de 3 horas, com densidade de corrente de 10mA/cm², a tabela abaixo para a membrana de Nafion 450

Tabela 8: Remoções aferidas pela membrana de Nafion 450

Membrana	Cromo (%)	Sódio (%)	Cálcio (%)	Magnésio (%)
Nafion 450	100	100	85	78

No processo de tratamento de efluentes provenientes do acabamento de metais, a eletrodiálise destaca-se como uma solução eficaz e sustentável. Ao final do tratamento, a água recuperada atende aos padrões de qualidade exigidos para reutilização, acima de 94% de recuperação para todos os metais utilizados comumente na industria, contribuindo para a redução da demanda por água fresca. Além disso, a solução concentrada resultante pode ser reintegrada aos banhos de eletrodeposição, o que não apenas reduz o desperdício, mas também maximiza a eficiência dos recursos disponíveis.

Comparativamente aos métodos convencionais de tratamento, como coagulação e floculação, a eletrodiálise oferece diversas vantagens. Isso inclui a diminuição do descarte de resíduos, bem como a redução dos custos associados à disposição do lodo galvânico, que é uma substância tóxica e requer um tratamento especializado.

Em suma, a eletrodiálise emerge como uma alternativa promissora para o tratamento de efluentes gerados pelo processo de acabamento de metais. Ao proporcionar uma solução sustentável e eficaz para a gestão de resíduos industriais, ela desempenha um papel crucial na preservação dos recursos hídricos e na promoção da sustentabilidade ambiental.

Recuperação

Além do efluente recuperado processos de tratamento de efluentes com membranas também nos fornecem um concentrado chamado de torta de filtrado, que é uma mistura dos solutos, os quais são possíveis de recuperação, entre eles, sais, metais e até matéria orgânica os procedimentos de separação variam de acordo com os materiais presentes no efluente e retirados pelas membranas, os objetos de recuperação estão na torta formada na superfície da membrana removida durante o processo de lavagem, os concentrados de natureza orgânica podem ser reaproveitados para adubagem desde que a concentração de metais e sais presentes neles não exceda limites ecológicos e de sobrevivência do meio adubado.

Para recuperação de sais e metais para fins específicos, como uso em eletrônica e produção de catalizadores, é necessário emprego de técnicas eletroquímicas para conseguir reaproveitar os cátions da solução[17], a eletrodeposição (A. Carolina and M. Costa), é um método viável para tal reaproveitamento, cada elemento terá condições específicas de trabalho, visando obtenção de metais com grau de pureza adequado para serem utilizados novamente, e cada efluente terá suas próprias condições iniciais, implicando que cada condicionamento de meio é particular para cada processo.

É importante lembrar também que as etapas de coagulação retem alguns ions nos complexos de precipitados insolúveis[7], aos quais é necessário aplicação de processos químicos, tratamento com ácidos fortes, HCl e H₂SO₄, para recuperação[] caso sejam esses os metais de interesse, principalmente ferro e alumínio, entre outros com propriedades químicas similares, nesse caso o agente floculante é recuperado parcialmente também.

Devido ao caráter eletroquímico da eletrodiálise os lodos formados já possuem qualidade maior para o uso em recuperação de metais, uma vez que a solução formada do lado do catodo já será concentrada em metais [5] e a matéria orgânica permanece, em sua maioria, no leito de trabalho do efluente

Conclusões

As rápidas industrialização e urbanização aumentaram drasticamente o consumo de água, tornando essencial a conservação desse recurso escasso.

No entanto, muitos processos industriais liberam águas residuais contaminadas por uma variedade de poluentes, das mais diversas origens, o que contribui significativamente para a poluição ambiental.

Devido aos esforços atuais de preservação ambiental, diversos métodos de tratamento de resíduos são constantemente estudados com o objetivo de melhorar a qualidade dos tratamentos, visando reduzir o impacto negativo no meio ambiente causado por nossas atividades como sociedade.

Os processos de tratamento de efluentes via utilização de membranas são métodos promissores, os diversos estudos analisados indicam a versatilidade da tecnologia para múltiplos efluentes em potencial, como esgoto doméstico, rejeitos de galvanoplastia, descarte da indústria têxtil, alimentícia e até farmacêutica.

Processos de tratamento via membrana além de serem, em geral, simples, podem ser combinados com outros processos, que tornem mais viáveis economicamente o reaproveitamento do efluente, o que ajuda a diminuir o consumo global de água das indústrias que puderem aplicar tais métodos.

Há, também, a possibilidade de reaproveitamento e recuperação dos materiais retidos, seja matéria orgânica para uso como fertilizante em produtores rurais, como recuperação eletroquímica.

REFERÊNCIAS

- [1] MAJOP, “Osmose Reversa-Conheça este processo de purificação de água.”
- [2] S. C. Silveira Jucá, “Obtenção de água potável utilizando eletrodiálise solar”.
- [3] Abdullahi Haruna Birniwa and Shehu Habibu, “Membrane technologies for heavy metals removal from water and wastewater: A mini review,” *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, vol. 9, 2024.
- [4] A. Alcaide Francisco, P. Henrique Mazieiro Pohlmann, and M. Antônio Ferreira, “TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUAS PARA ABASTECIMENTO HUMANO: UMA ABORDAGEM TEÓRICA DOS PROCESSOS ENVOLVIDOS E DOS INDICADORES DE REFERÊNCIA.”
- [5] DANIELLA CARDOSO BUZZI “APLICAÇÃO DA ELETRODIÁLISE NO TRATAMENTO DA DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS VISANDO A RECUPERAÇÃO DE ÁCIDO SULFÚRICO,” 2012.
- [6] I. C. de A. Santos, L. P. C. Monteiro, and F. B. Mainier, “TRATAMENTO DE EFLUENTES AQUOSOS CONTENDO CÁDMIO, CHUMBO E COBRE, A PARTIR DA TÉCNICA DE ELETRODEPOSIÇÃO,” *Revista Augustus*, vol. 20, no. 40, Jan. 2016, doi: 10.15202/19811896.2015v20n40p143.
- [7] N. Cunha Guimarães, “Recuperação de Coagulante a partir da Acidificação de Resíduos Gerados na Estação de Tratamento de Água do Rio Manso,” Belo Horizonte, 2005.
- [8] U. W. R. Siagian *et al.*, “High-Performance Ultrafiltration Membrane: Recent Progress and Its Application for Wastewater Treatment,” *Current Pollution Reports*, vol. 7, no. 4. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 448–462, Dec. 01, 2021. doi: 10.1007/s40726-021-00204-5.
- [9] X. L. Wang, W. J. Shang, D. X. Wang, L. Wu, and C. H. Tu, “Characterization and applications of nanofiltration membranes: State of the art,” *Desalination*, vol. 236, no. 1–3, pp. 316–326, Jan. 2009, doi: 10.1016/j.desal.2007.10.082.
- [10] A. E. D. Mahmoud and E. Mostafa, “Nanofiltration Membranes for the Removal of Heavy Metals from Aqueous Solutions: Preparations and Applications,” *Membranes*, vol. 13, no. 9. Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), Sep. 01, 2023. doi: 10.3390/membranes13090789.
- [11] M. Dacanal, “TRATAMENTO DE LIXIVIADO ATRAVÉS DE FILTRO ANAERÓBIO ASSOCIADO A MEMBRANA DE MICROFILTRAÇÃO,” 2006.

- [12] S. Paulo, “GUSTAVO COELHO APLICAÇÃO DA ELETRODIÁLISE PARA CONCENTRAÇÃO DE METAIS DE UMA SOLUÇÃO SINTÉTICA MULTICOMPONENTE DE UMA ROTA DE PROCESSAMENTO DE MINÉRIO LIMONÍTICO VISANDO À RECUPERAÇÃO SELETIVA DE COBALTO,” 2019.
- [13] L. Priscila and A. Silva, “UTILIZAÇÃO DE MEMBRANAS PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTO PARA REÚSO DO PERMEADO E APROVEITAMENTO DOCONCENTRADO.” 2014.
- [14] F. Dani Rico Amado, “Produção e Aplicação de Membranas com Polímeros Convencionais e Polianilina para Uso em Eletrodiálise no Tratamento de Efluentes Industriais,” *Tese para obtenção do título de Doutor*, 2006.
- [15] B. Caroline Ricci Belo Horizonte, “AVALIAÇÃO DO USO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS NA REMOÇÃO DE METAIS, RECUPERAÇÃO DE ÁCIDO SULFÚRICO E NA GERAÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO A PARTIR DE EFLUENTE DE INDÚSTRIA DE MINERAÇÃO DE OURO,” 2015.
- [16] L. DE CARVALHO SILVA, “CERÂMICA VERMELHA, CONCRETO AUTOCLAVADO E COMPOSITO A PARTIR DE CONCRETO AUTOCLAVADO E CIMENTO BRANCO COMO SUBSTRATO EM WETLANDS CONSTRUÍDOS TRATANDO MATÉRIA CARBONÁcea, NUTRIENTES E HORMÔNIOS”.
- [17] K. F. Streit, “PPGE3M ESTUDO DA APLICAÇÃO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO COM MEMBRANAS NO TRATAMENTO DE EFLUENTES DE CURTUME: NANOFILTRAÇÃO E ELETRODIÁLISE.” 2011.
- [18] A. Carolina and M. Costa, “DESENVOLVIMENTO DE MEMBRANAS DE OSMOSE INVERSA RESISTENTES À DEPOSIÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA E BIOINCRUSTAÇÕES.” 2009.
- [19] W. Eykamp, “Membrane Separations Technology. Principles and Applications,” 1995.
- [20] E. K. Schoenell and N. Hamburgo, “APLICAÇÃO DE OSMOSE REVERSA E PROCESSOS OXIDATIVOS AVANÇADOS PARA TRATAMENTO TERCIÁRIO DE ESGOTO,” 2020.
- [21] S. Al Aani, T. N. Mustafa, and N. Hilal, “Ultrafiltration membranes for wastewater and water process engineering: A comprehensive statistical review over the past decade,” *Journal of Water Process Engineering*, vol. 35. Elsevier Ltd, Jun. 01, 2020. doi: 10.1016/j.jwpe.2020.101241.
- [22] X. Zhang, Q. Wang, Z. Yu, J. Wang, Q. Tan, and N. He, “Superhydrophilic/superoleophobic GO@CoSx photocatalytic membranes with excellent antifouling properties for efficient oil-water separation and organic pollutant degradation,” *Diam Relat Mater*, vol. 141, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.diamond.2023.110574.

- [23] A.-S. Jonsson~ and G. Tragbirdh~, "Ultrafiltration Applications," 1990.
- [24] A. J. B. Dutra and F. de A. Lemos, "RECUPERAÇÃO DE METAIS DE EFLUENTES DE CIANÍDRICOS DE MINERAÇÃO DE OURO COM CATODOS DE AÇO INOXIDÁVEL AISI 304 E TITÂNIO," *Tecnologia em Metalurgia e Materiais*, vol. 8, no. 3, pp. 191–196, 2011, doi: 10.4322/tmm.2011.030.
- [25] M. M. MONTEIRO MAIA, "P AVALIAÇÃO DO POTENCIAL ADSORTIVO DOS RESÍDUOS DO COCO PARA REMOÇÃO DE ÓLEO EM EFLUENTES," MOSSORÓ/RN , 2022.
- [26] R. de Almeida *et al.*, "UTILIZAÇÃO DE NANOFILTRAÇÃO E OSMOSE INVERSA NO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRA SANITÁRIO."
- [27] J. Arnaldo Santana Costa, L. Aparecida Fiorini Vermeersch, C. Marcio Paranhos, and L. Antonio Pessan, "CAPÍTULO 7 MEMBRANAS POLIMÉRICAS."
- [28] L. Scapini, "AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA OSMOSE REVERSA E DA TROCA IÔNICA PARA TRATAMENTO DE EFLUENTE DE CURTUME (AIMORÉ COUROS LTDA-ENCANTADO) VISANDO A REUTILIZAÇÃO DA ÁGUA.", 2007.
- [29] C. Onofre De Andrade, N. Coorientador, L. Caroline, and S. Ferreira, "EFICIÊNCIA DE MEMBRANAS FILTRANTES DE NANOFILTRAÇÃO E OSMOSE INVERSA NO PÓS-TRATAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO."
- [30] F. Beltrão, "REMOÇÃO DE CHUMBO E NÍQUEL DE EFLUENTE SINTÉTICO UTILIZANDO MEMBRANA LÍQUIDA EMULSIONADA," 2019.
- [31] A. Sarti and A. J. da Silva, "SULFATE REMOVAL FROM INDUSTRIAL WASTEWATERS IN FIXED FILM ANAEROBIC SEQUENTIAL BATCH REACTOR ARNALDO SARTI," 2008.
- [32] A. R. Passos da Motta and C. Piacsek Borges, "Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão," *Eng Sanit Ambient*, 2013.
- [33] L. Maria and B. Ventura, "Processo de separação por membranas para remoção de sulfato de níquel e zinco de efluente sintético de indústrias metal- mecânicas," 2008.
- [34] M. DA SILVA RODRIGUES, "TÉCNICA DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO COMBINADA COM PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANA, APLICADA AO TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LAVANDERIA DE JEANS," 2023.
- [35] P. Marchetti, L. Peeva, and A. Livingston, "The Selectivity Challenge in Organic Solvent Nanofiltration: Membrane and Process Solutions," 2017, doi: 10.1146/annurev-chembioeng.

- [36] J. C. Mierzwa and H. G. Riella, "Tratamento do efluente da lavanderia quente da INAP, através dos processos de precipitação química e osmose reversa".
- [37] S. Gergely, G. Y. Vatai, and E. Bekassy-Molnar, "ARSENIC, ZINC AND MAGNESIUM ION REMOVAL FROM WATER BY NANOFILTRATION, MODELLING OF REJECTIONS," 2001.
- [38] M. Peter-Varbanets, J. Margot, J. Traber, and W. Pronk, "Mechanisms of membrane fouling during ultra-low pressure ultrafiltration," *J Memb Sci*, vol. 377, no. 1–2, pp. 42–53, Jul. 2011, doi: 10.1016/j.memsci.2011.03.029.
- [39] S. Deitos Bittencourt, "Eletrodiálise: uma tecnologia limpa para o tratamento de efluentes galvânicos."
- [40] M. S. Yorgun, I. A. Balcioglu, and O. Saygin, "Performance comparison of ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis on whey treatment," *Desalination*, vol. 229, no. 1–3, pp. 204–216, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.desal.2007.09.008.
- [41] V. E. Santarosa, F. Peretti, V. Caldart, J. Zoppasb, and M. Zeni, "DESALINATION Study of ion-selective membranes from electrodialysis removal of industrial effluent metals II: Zn and Ni," 2002. [Online]. Available: www.elsevier.com/locate/desal
- [42] M. Mulder, "Basic principle of membrane technology," *Kluwer Academic Publishers*, 1991.
- [43] Y. Qi, et al., Polyethyleneimine-modified Original Positive Charged Nanofiltration Membrane: Removal of Heavy Metal Ions and Dyes, 222, 2019, pp. 117–124.
- [44] E. Salehi, P. Daraei, A.A.J.C.p. Shamsabadi, A Review on Chitosan-Based Adsorptive Membranes, 152, 2016, pp. 419–432.
- [45] M. Khorram, A. Mousavi, N. Mehranbod, Chromium removal using adsorptive membranes composed of electrospun plasma-treated functionalized polyethylene terephthalate (PET) with chitosan, Journal of environmental chemical engineering 5 (3) (2017) 2366–2377, 1.
- [46] G.T.J.I.B. Howard, Biodegradation (4), Biodegradation of polyurethane: a review, 49, 2002, pp. 245–252.
- [47] M. Mondal, et al., A novel ultrafiltration grade nickel iron oxide doped hollow fiber mixed matrix membrane: spinning, characterization and application in heavy metal removal, 188, 2017, pp. 155–166.
- [48] P. Daraei, et al., Novel polyethersulfone nanocomposite membrane prepared by PANI/Fe₃O₄ nanoparticles with enhanced performance for Cu (II) removal from water, 415, 2012, pp. 250–259.

- [49] P. Canizares, ~ A. Pérez, R.J.D. Camarillo (1–3), Recovery of heavy metals by means of ultrafiltration with water-soluble polymers: calculation of design parameters, 144, 2002, pp. 279–285.
- [50] R.J. Gohari, et al. (11), Arsenate removal from contaminated water by a highly adsorptive nanocomposite ultrafiltration membrane, 39, 2015, pp. 8263–8272.
- [51] M. Delavar, et al., F, in: abrication of polycarbonate mixed matrix membranes containing hydrous manganese oxide and alumina nanoparticles for heavy metal decontamination: characterization and comparative study, 120, 2017,pp. 240–253.
- [52] X. Zhang, et al., Developing new adsorptive membrane by modification of supportlayer with iron oxide microspheres for arsenic removal, 514, 2018, pp. 760–768.
- [53] C.-V.I. Gherasim, et al. (1–2), Removal of lead (II) from aqueous solutions by a polyvinyl-chloride inclusion membrane without added plasticizer, 377, 2011, pp. 167–174.
- [54] D.L. Shaffer, et al., Forward osmosis: where are we now?, 356, 2015, pp. 271–284.
- [55] K. Boodhoo, A. Harvey, Process Intensification Technologies for Green Chemistry:Engineering Solutions for Sustainable Chemical Processing, John Wiley & Sons,2013.
- [56] FORTINO, P. C. Pós-tratamento de efluente têxtil usando coagulação/flocação combinado com processos de separação por membranas. 2012.
- [57] Juang, R.S. and Shiau, R.C. (2000) Metal Removal from Aqueous Solutions Using Chitosan-Enhanced Membrane Filtration. Journal of Membrane Science, 165, 159-167.
- [58] Qin, J.J., Oo, M.H., Lee, H. and Kolkman, R. (2004) Dead-End Ultrafiltration for Pretreatment of RO in Reclamation of Municipal Wastewater Effluent. Journal of Membrane Science, 243, 107-113.
- [59] Irshad Kammakakam, Zhiping Lai, Next-generation ultrafiltration membranes: A review of material design, properties, recent progress, and challenges, Chemosphere, Volume 316, 2023,
- [60] Fabian Ostertag, Eva Krolitzki, Sonja Berensmeier, Jörg Hinrichs, Protein valorisation from acid whey – Screening of various micro- and ultrafiltration membranes concerning the filtration performance, International Dairy Journal, Volume 146,2023,