



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



ANA VITÓRIA COUTO LACERDA ALLIPRANDINI

APLICAÇÕES COMERCIAIS DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

UBERLÂNDIA

2026

ANA VITÓRIA COUTO LACERDA ALLIPRANDINI

APLICAÇÕES COMERCIAIS DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Química.

Orientadora: Profa. Dra. Miria Hespanhol
Miranda Reis

UBERLÂNDIA

2026

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU com dados informados
pelo(a) próprio(a) autor(a).

A437 Alliprandini, Ana Vitória Couto Lacerda, 2000-
2026 APLICAÇÕES COMERCIAIS DOS PROCESSOS DE
SEPARAÇÃO POR
MEMBRANAS [recurso eletrônico] / Ana Vitória Couto Lacerda
Alliprandini. - 2026.

Orientadora: Miria Hespanhol Miranda Reis .
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Uberlândia, Graduação em Engenharia Química.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia química. I. , Miria Hespanhol Miranda
Reis, 1978-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2: Gizele Cristine

Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ANA VITÓRIA COUTO LACERDA ALLIPRANDINI

APLICAÇÕES COMERCIAIS DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Faculdade de Engenharia
Química da Universidade Federal de
Uberlândia como requisito parcial para
obtenção do título de bacharel em
Engenharia Química.

Uberlândia, 05 de agosto de 2026

Banca examinadora:

Prof.^a Dr.^a Miria Hespanhol Miranda Reis (FEQUI/UFU)

Ma. Lorraine Marins Gonçalves (Doutoranda PPGEQ/UFU)

Sabrina Bento Luis Intato (Doutoranda PPGEQ/UFU)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais, Geysa Telma Couto de Lacerda e Paulo Alliprandini Filho, os quais me ajudaram durante toda minha trajetória acadêmica e me deram forças mesmo quando eu aparentava não ter nenhuma, ajudaram a transformar meu sonho em realidade com carinho, compreensão, incentivo e fizeram com que essa conquista acontecesse.

Sou extremamente grata aos meus sobrinhos de coração, Gael Lacerda Franco e Luca Lacerda franco que foram grandes motivações e inspirações para que eu continuasse a batalhar todos os dias naquilo que eu desejava.

Quero demonstrar minha gratidão a toda minha família, que foi essencial nessa trajetória. Em especial, meus avós Telmo e Leda e minha avó Maria da Penha, que foram e são luzes no meu caminho e iluminaram todos os momentos difíceis.

Agradeço, também, a todos os meus amigos que fiz durante o curso e deixaram a graduação um processo mais leve. Em especial, agradeço a Ana Luísa, Janderson, Lucas Isaias, Luiz Felipe, Yasmin e Giovanna Kely, que foram rede de apoio durante o processo árduo de escrita e forneceram ajuda sempre que precisei.

À Profa. Dra. Miria Hespanhol Miranda Reis, meus sinceros agradecimentos pela orientação competente e pelo incentivo durante todo o processo.

Finalmente, deixo minha gratidão à Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Química por viabilizarem esta importante etapa da minha formação.

RESUMO

Membranas são barreiras semipermeáveis que separam duas fases e restringem a passagem de uma ou mais espécies químicas entre as fases, por isso se tornaram um grande atrativo dentro do cenário de processos de separação, além de possuírem baixo custo de consumo e manutenção. Os estudos na área dos processos de separação por membranas acarretaram avanços que fazem com que estes processos sejam cada vez mais aplicados em diferentes setores comerciais. O presente trabalho se propõe a fazer uma breve revisão bibliográfica sobre o processo de separação por membranas e suas aplicações para posteriormente ser feito um estudo com maior detalhamento das aplicações comerciais dos processos de separação por membranas.

Palavras-chave: membranas, processos de separação por membranas, aplicações comerciais; redução de consumo energético.

ABSTRACT

Membranes are semipermeable barriers that separate two phases and restrict the passage of one or more chemical species between them. Consequently, they have emerged as a highly attractive alternative in the field of separation processes, further supported by their low operating and maintenance costs. Research in the area of membrane separation processes has yielded advances that allow these technologies to be increasingly adopted across diverse commercial sectors. The present work aims to conduct a brief literature review on membrane separation processes and their applications, providing the foundation for a subsequent, more detailed study focused on their commercial applications.

Keywords: Membranes; membrane separation processes; commercial applications; energy consumption reduction.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- CLASSIFICAÇÃO DE MEMBRANAS EM RELAÇÃO A MORFOLOGIA.	11
FIGURA 2- PLANTA DE PERVAPORAÇÃO UTILIZANDO MEMBRANAS.	14

LISTA DE SÍMBOLOS

Π	Permeância
g	Fator geométrico
r_p	Raio do poro
$\bar{p}$	Gradiente de pressão
R	Constante universal dos gases
T	Temperatura
δ	Espessura da membrana
η	Viscosidade dinâmica
D^{Kn}	Número de Knudsen
J_i	Fluxo do permeado
$* D_{mi}$	Coeficiente de autodifusão de i na mistura
C_i	Concentração de i na mistura
μ_i	Potencial químico de i

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	9
1.1	OBJETIVO GERAL.....	10
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
2.1	DEFINIÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DAS MEMBRANAS E OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	11
2.2	MECANISMOS E CONFIGURAÇÕES DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	12
2.3	CENÁRIO COMERCIAL DOS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	13
3	METODOLOGIA.....	15
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
4.1	APLICAÇÃO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS EM PROCESSOS DE DESSALINIZAÇÃO.....	16
4.2	APLICAÇÃO DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS NA INDÚSTRIA ALIMENTÍCIA	19
4.3	APLICAÇÕES DO PROCESSO DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA TRATAMENTO DE ÁGUAS PARA ABASTECIMENTO E RESIDUAIS	22
5	CONCLUSÃO	25
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27

1 INTRODUÇÃO

Os processos de separação por membranas (PSM), ainda em discussão, tornou-se uma alternativa aos processos convencionais de separação pelo fato de precisarem de menos energia para acontecerem (BITTER, 1991). As principais aplicações industriais do processo de separação por membranas surgiram, inicialmente, na indústria de alimentos, em meados de 1960. Ao longo dos anos, mais estudos foram realizados e assim, as aplicações industriais expandiram-se para outras indústrias de processos, como em tratamento de efluentes, nas indústrias petroquímica e farmacêutica (HABERT; BORGES; NÓBREGA, 2006).

O alto consumo de energia em processos tem aumentado as preocupações do setor industrial recentemente, tendo em vista, principalmente, a preocupação com a atual crise climática. No Brasil, o setor industrial representava, em 2022, 32% do consumo total de energia no país (Empresa de Pesquisa Energética, 2023). Em aspectos mundiais, no mesmo ano, o consumo de eletricidade pelas indústrias representava cerca de 43% do consumo total mundial (International Energy Agency, 2023). Dessa forma, o setor industrial, por ser um dos principais consumidores de energia, estão cada vez mais preocupadas em reduzir este consumo. Visto que parte significativa deste consumo industrial se deve aos processos de separação, a implementação dos processos de separação por membranas torna-se fundamental para o auxílio da redução do consumo energético industrial (JUNG et al., 2023).

Apesar das vantagens quanto a economia de energia, os processos de separação por membranas apresentam algumas desvantagens quando comparados aos processos de separação convencionais, como destilação, centrifugação e outros. Por isto, em aspectos industriais, as membranas ainda são menos utilizadas em relação a outros equipamentos de separação. Apesar desse contexto de menor utilização, devido aos avanços dos estudos na área, os PSM vêm crescendo em termos comerciais, sendo cada vez mais aplicados em escalas industriais, pode-se encontrar plantas industriais com áreas de membranas expostas com mais de 200 m² e com capacidades de processamento de mais de 800 L/h (ARMOA, M.H.; JAFELICCI JR., M. 2011). Assim, o estudo das aplicações comerciais dos processos de separação por membranas é de suma importância para que estes sejam cada vez

mais aplicados com finalidade de reduzir o consumo de energia, além de garantir uma eficiência satisfatória para a indústria.

Diante desse cenário, torna-se importante compreender não apenas os fundamentos dos processos de separação por membranas, mas principalmente a forma como essas tecnologias vêm sendo incorporadas aos diferentes setores industriais. A análise das aplicações comerciais permite identificar o grau de maturidade desses processos, seus benefícios em termos de eficiência e redução do consumo energético, bem como os desafios que ainda limitam sua adoção em larga escala. Espera-se que este estudo contribua para ampliar o entendimento sobre a aplicação dos PSM no cenário industrial atual e forneça uma visão integrada das principais áreas em que essa tecnologia vem sendo empregada.

1.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como principal objetivo estudar, através de revisão bibliográfica e pesquisas em bases de dados científicas, as principais aplicações comerciais dos processos de separação por membranas, analisando sua utilização em diferentes setores industriais.

1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Pesquisar sobre as principais aplicações comerciais dos processos de separação por membranas por setor;
- Investigar os impactos causados pela implementação dos PSM em aspectos econômicos e em relação à eficiência, além de comparar estes impactos com os causados pelos processos de separação convencionais.

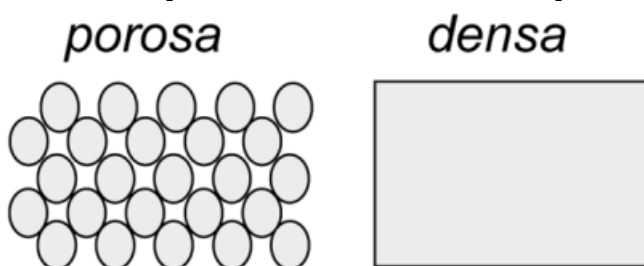
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Definição e caracterização das membranas e os processos de separação por membranas

Em resumo, uma membrana pode ser definida como uma barreira que separa duas fases, ao restringir, de forma total ou parcial, o transporte das espécies químicas presentes nas fases (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006). Essa possibilidade de permeabilidade fez com que as membranas se tornassem um atrativo para uma forma alternativa de realizar uma separação.

As membranas podem ser caracterizadas em função da composição química, onde dividem-se em orgânicas, geralmente constituídas por polímeros orgânicos e em inorgânicas, compostas, em sua maioria, por óxidos como sílica, titânia, alumina e outros (HENRIQUE ARMOA; JAFELICCI JR, 2011). Além disso, as membranas podem ser classificadas quanto a sua morfologia, podendo ser porosas ou densas, como é possível visualizar na Figura 1. Ressalta-se que as membranas porosas são utilizadas em processos como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e diálise, enquanto membranas densas são mais empregadas na osmose reversa e permeação de gases (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Figura 1- Classificação de membranas em relação a morfologia.



Fonte: Adaptada de Habert (2006).

Membranas porosas com poros entre 0,1 e 1 nm são adequadas para separação de gases, osmose reversa e nano filtração, enquanto para poros entre 1 e

100 nm são utilizadas para ultrafiltração, e a microfiltração é aplicada para tamanhos de poros maiores que 100 nm (BHAVE, 1991). Por isso, é essencial caracterizar as membranas, para que assim possam ser aplicadas no processo que melhor se adequa às suas características.

Sobre os PSM citados anteriormente, destaca-se a osmose reversa, que apresenta um mecanismo diferente dos outros. Em suma, esse mecanismo faz o uso de membranas semipermeáveis, as quais permitem a passagem de espécies selecionadas (CURTO; FRANZITTA; GUERCIO, 2021). Naturalmente, as duas soluções com diferentes concentrações são separadas por uma membrana semipermeável, o solvente flui da solução mais diluída para a mais concentrada, contudo, esse fluxo pode ser reduzido se um gradiente de pressão externo for aplicado sobre a membrana (CURTO; FRANZITTA; GUERCIO, 2021). Para parar o fluxo do solvente, é necessário aplicar uma pressão específica, chamada de pressão osmótica, se a pressão externa aplicada for maior que a pressão osmótica, então, o fluxo do solvente é invertido, tornando-o, assim, capaz de ser extraído da solução de maior concentração (HELFER; LEMCKERT; ANISSIMOV, 2014).

2.2 Mecanismos e configurações dos processos de separação por membranas

Além da caracterização das membranas, conhecer a força motriz que favorece o processo de separação é de extrema importância para que a eficiência do processo seja a melhor possível. As forças motrizes mais comuns dos PSM são os gradientes de: pressão de vapor, pressão, temperatura, concentração e potencial químico. (BITTER, 1991).

Ao conhecer a força motriz do processo, conhece-se, também, a natureza do fluxo do permeado, por exemplo, processos onde as forças motrizes são gradiente de pressão e concentração possuem, respectivamente, fluxos de natureza convectiva e difusiva (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Destaca-se a presença de casos especiais, como a difusão de Knudsen, sendo este mecanismo caracterizado pela colisão das moléculas nas paredes e não entre as moléculas, como no caso da difusão molecular (MORAIS; PEREIRA; OLIVEIRA,

2021). As Equações (1) e (2) apresentam como a permeância (Π) é calculada para fluxos viscosos e para a difusão de Knudsen, respectivamente (NISHIYAMA et al., 2001).

$$\Pi = \frac{1}{RT} \frac{g}{\delta} \frac{r_p^2}{8\eta} \bar{p} \quad (1)$$

$$\Pi = \frac{1}{RT} \frac{g}{\delta} D^{Kn} \quad (2)$$

Nota-se que, para processos em que ocorre a difusão de Knudsen a permeância não depende do gradiente de pressão, permitindo, assim, que esta seja função somente da espessura da membrana, e de características intrínsecas das espécies químicas. Para melhor avaliar e aplicar o processo de separação por membranas é necessário também conhecer o fluxo do permeado, que pode ser calculado por meio da Equação (3) (BITTER, 1991).

$$J_i = - \frac{* D_{im} C_i}{RT} \text{grad} \mu_i \quad (3)$$

A versatilidade que as membranas apresentam em relação a estrutura e as possíveis configurações de fluxo permite uma maior gama de aplicações em diferentes contextos, a depender do objetivo do processo, da eficiência desejada e recursos disponíveis.

2.3 Cenário comercial dos processos de separação por membranas

No final da década de 50, os Estados Unidos investiram em pesquisas que tinham como objetivo principal a dessalinização da água, e estes estudos resultaram em descobertas como a melhoria na seletividade das membranas, o que fez com que

os PSM deixassem de ser apenas um estudo de laboratório e passassem a ser aplicados dentro do cenário comercial (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Atualmente, os processos de separação por membranas possuem um alto mercado, sendo estimado em cerca de \$22,1 bilhões no ano de 2021, sendo que se acredita num crescimento ainda maior deste mercado uma vez que as legislações ambientais de diversos países estão mais rígidas e exigem cada vez mais a redução do consumo de energia, fazendo com que grandes indústrias procurem formas alternativas de cumprir com a lei e encontrem uma possível solução no mercado de membranas sem que a eficiência do processo seja prejudicada (Grand View Research, 2021).

Isto posto, diversas indústrias passaram a utilizar membranas em suas plantas industriais. A Process Technology, por exemplo, estabeleceu uma parceria com a Sulzer Chemtech onde planejam plantas industriais modulares de destilação, cristalização entre outros processos, em que grande parte destas plantas utilizam do processo de separação por membranas, como é possível visualizar na Figura 2, onde membranas são utilizadas para o processo de pervaporação.

Figura 2- Planta de pervaporação utilizando membranas.



Fonte: Sulzer Chemtech ([2025], p. 7).

3 METODOLOGIA

O trabalho espera cumprir os objetivos propostos, por meio de revisão bibliográfica e levantamento de dados em bases científicas. Utilizou-se de pesquisas em periódicos, teses e livros, publicados em sua maioria nos últimos cinco anos, para realizar a revisão bibliográfica. As bases de dados utilizadas para realização da pesquisa bibliográfica foram, principalmente, ScienceDirect, Google Scholar e Web of Science. A escolha do recorte temporal de cinco anos foi utilizada para filtrar a quantidade de artigos, com o intuito de priorizar o encontro de aplicações e tecnologias mais recentes dos processos de separação por membranas no setor comercial.

Ademais, ao pesquisar sobre as aplicações comerciais dos processos de separação por membranas, encontrou-se três grandes áreas onde havia o maior número de estudos publicados: dessalinização, indústria alimentícia e tratamento de águas para abastecimento e residuais. Por isso, escolheu-se focar nessas áreas para realizar a revisão bibliográfica.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Aplicação do processo de separação por membranas em processos de dessalinização

De acordo com estudos recentes, estima-se que cerca de 4 bilhões de pessoas no mundo sofrem com escassez hídrica em, no mínimo, uma parte do ano (UNESCO, 2025). Sabe-se que apesar da abundância de água presente no planeta, a maior parte dessa é salgada e imprópria para consumo, correspondendo a cerca de 97,5% da água existente no mundo (ANA, [s.d.]). Por esses motivos, o processo de dessalinização é cada vez mais estudado, sendo que, em sua maioria, são feitos utilizando-se de membranas.

A seletividade da dessalinização utilizando membranas está associada as propriedades do material da membrana e, atualmente, as membranas de dessalinização dependem, em sua maioria, das tecnologias de nanofiltração, osmose reversa e osmose direta (YUAN et al., 2023). Os mecanismos de peneiramento por tamanho e repulsão eletrostática são os principais responsáveis pelo transporte seletivo na dessalinização, sendo que, com a incorporação de nanomateriais, mecanismos diferentes podem existir simultaneamente, dependendo do tamanho dos poros do material de preenchimento (YUAN et al., 2023).

Atualmente, a principal membrana utilizada para a dessalinização é a membrana composta de película fina (TFC), a qual os pesquisadores têm dedicado a aprimorar sua atratividade, além de contribuir para aumentar o desempenho de separação (YUAN et al., 2023). A literatura demonstra que membranas compostas de película fina (TFC) apresentam elevado desempenho na dessalinização. Entre os diferentes materiais desenvolvidos, destacam-se as membranas com plug molecular de sulfonil, capazes de alcançar taxas de rejeição de até 99,57%, evidenciando o potencial desses materiais em aumentar a eficiência da separação (YUAN et al., 2023; LI et al., 2020). Vale ressaltar que um alto percentual de rejeição indica que houve uma maior retenção, obtendo, assim, uma água de alta pureza. Nota-se, então, que

novos materiais e membranas de matriz híbrida de polímeros, são capazes de realizar melhorias significativas na seletividade do permeado (YUAN et al., 2023), e, por consequência, aumentar o desempenho da separação.

Além das membranas de TFC, as membranas de óxido de grafeno (GO) despertaram um interesse significativo na comunidade científica, uma vez que apresentam confiabilidade mecânica, baixo custo, adequações para serem produzidas em escala industrial, tornando-as, assim, forte candidatas para o processo de dessalinização de água (TIWARY et al., 2024). TIWARY et al. (2024) elucidam que a capacidade da membrana de GO realizar a separação depende das propriedades moleculares ou iônicas dela, como tamanho, carga e interações com a membrana. Isto posto, diversas pesquisas que otimizam tais propriedades vêm sendo feitas com o intuito de alcançar um resultado satisfatório que possa ser replicado em escala comercial.

A modificação química de membranas de óxido de grafeno por meio da ionização de grupos funcionais mostrou potencial para aumentar significativamente sua seletividade. Em simulações computacionais foi observada rejeição completa do soluto, com o fluxo de água de 0,071 kg/cm²/s (DAHANAYAKA et al., 2020). Ademais, ao analisar outros estudos, nota-se que, quando utilizado o óxido de grafeno reduzido (rGO) na produção das membranas, essas apresentam uma alta eficácia na separação e um alto fluxo de permeação (TIWARY et al., 2024).

Apesar do elevado desempenho apresentado pelas membranas de óxido de grafeno reduzido (rGO), sua produção em larga escala ainda enfrenta limitações relacionadas ao controle da formação dos nanoporos durante a fabricação. Mesmo assim, esse material continua sendo considerado mais promissor que o grafeno puro para aplicações em dessalinização (TIWARY et al., 2024).

Ainda a respeito das membranas de óxido de grafeno, a intercalação de camadas de GO surgiu como uma nova ideia onde contaminantes são introduzidos propositalmente durante as etapas de síntese e processamento, o que contribui para a estabilidade da membrana (TIWARY et al., 2024). Estratégias de intercalação utilizando nanocamadas de nitreto de boro hexagonal foram capazes de produzir membranas com elevada estabilidade e durabilidade, alcançando fluxo de água pura de 57,84 $\frac{L}{m^2.h.bar}$ sob pressão de 1 bar (YU et al., 2023). Contudo, muitas vezes, torna-se difícil realizar tais intercalações em uma escala maior a baixo custo, por isso, outras

técnicas são propostas, como a deposição por pulverização, a qual permite a fabricação de membranas de GO escaláveis comercialmente.

Ressalta-se que, uma dificuldade na implantação comercial das membranas de óxido de grafeno é o fato de que a maioria das estações de tratamento de água foram construídas para membranas com menor permeabilidade (TIWARY et al., 2024). Apesar disso, inúmeras pesquisas são realizadas a respeito de membranas de GO para a dessalinização e apresentam um avanço significativo na área e incentivando, mesmo que em pequena escala, a implantação comercial de tais membranas.

A osmose reversa, é amplamente reconhecida como a tecnologia de dessalinização mais utilizada (JONES et al., 2019). Nesse contexto da aplicação do mecanismo da RO, encontra-se valores típicos de concentração de sal na água do mar, em uma faixa de 0,51 a 0,68 mol/L, o que ocasiona um valor da pressão osmótica entre 25 e 33 bar, tornando necessário que uma pressão maior que essas seja aplicada para que possa realizar a extração da água pura através da água do mar, o que implica na necessidade de utilização de bombas e, conseqüentemente, uso de energia (CURTO; FRANZITTA; GUERCIO, 2021). Por isso, sistemas que visam reduzir o consumo de energia na osmose reversa são estudados desde 1970, tais estudos, além de focarem na melhoria das propriedades das membranas, visaram introduzir um dispositivo de recuperação de energia para recuperar a energia do fluxo de salmoura (CURTO; FRANZITTA; GUERCIO, 2021). Ademais, os custos com energia para realizar a dessalinização através da osmose reversa são significativamente menores que outros processos, os requerimentos energéticos associados a osmose reversa estão entre 3 e 4 kWh/m³ para água do mar, enquanto uma destilação flash multiestágio usa entre 10 e 16 kWh/m³ (ABID et al., 2023).

Estudos de 2026 estimam que existam 16 mil usinas de dessalinização atuando em 177 países diferentes, sendo que a utilização da osmose reversa representa cerca de 66% da capacidade mundial (MEDEIROS, 2026). Destaca-se, ainda, a planta de dessalinização chinesa no Parque Industrial Tianjin Nangang inaugurada em 2024 que, em um único módulo de membrana é capaz de produzir 30 mil toneladas por dia, representando a primeira aplicação comercial mundial para tal escala (MEDEIROS, 2026). Ademais, em 2025, os processos de separação por membranas representavam 78,45% da participação em processos de dessalinização, com uma previsão de crescerem ainda em 10,55% até 2031 (MORDOR INTELLIGENCE, 2026). Diante disso, observa-se que os processos de separação por membranas são uma realidade,

em termos comerciais, dentro dos processos de dessalinização, com estudos sendo realizados para aumentar sua eficiência e superar desafios que impedem o aumento de suas aplicações em larga escala.

4.2 Aplicação do processo de separação por membranas na indústria alimentícia

Os processos de separação por membranas têm ganhado maior destaque, principalmente nas últimas décadas, dentro da indústria alimentícia, sendo utilizados, principalmente nas indústrias de laticínios, vinho, cerveja, suco de fruta e açúcar (CHARCOSSET, 2021). Os PSM mais comuns utilizados dentro da indústria alimentícia são: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF), osmose reversa (RO) e eletrodialise (ED) (CHARCOSSET, 2021).

Na indústria de laticínios, as utilizações mais comuns são: remoção de bactérias e esporos, bem como para separação de micelas de caseína e separação e fracionamento de glóbulos de gordura por microfiltração; concentração e desmineralização do soro de leite por osmose reversa, nanofiltração ou eletrodialise; fracionamento das proteínas do soro por ultrafiltração, cromatografia de membrana ou eletrodialise (CHARCOSSET, 2021).

Já nas indústrias de vinho e cerveja uma das principais aplicações é a ultrafiltração destinada a clarificação, assim como nas indústrias de suco de fruta a clarificação também é realizada por ultrafiltração ou microfiltração (CHARCOSSET, 2021). Além da clarificação, outra aplicação muito utilizada nas indústrias de suco de fruta é a concentração por osmose reversa, destilação por membranas, destilação osmótica ou processos integrados (CHARCOSSET, 2021). Enquanto, na indústria de açúcar uma das principais aplicações é a purificação do caldo de cana por ultrafiltração (CHARCOSSET, 2021).

Referente a indústria de laticínio, no tocante a remoção de bactérias e esporos, outras técnicas podem ser empregadas, como a centrifugação. Contudo, tal técnica demanda maior energia elétrica e consegue a remoção de esporos de apenas cerca de 90 a 95% (CHARCOSSET, 2021). Tratamentos em alta temperatura também são

aplicados por mais de 50 anos e se mostram eficientes no extermínio da maior parte da flora microbiana, contudo, células mortas permanecem no leite com enzimas potencialmente ativas que podem causar alterações durante o armazenamento, reduzindo sua validade (CHARCOSSET, 2021). Na indústria de laticínios, a microfiltração mostrou desempenho superior ao processo convencional de pasteurização de curta duração e alta temperatura. Membranas com diâmetros de poro de 1,4 e 0,8 μm promoveram redução aproximada de 3 log na carga microbiana, cerca de 30% superior ao método convencional, além de eliminar completamente os esporos presentes no leite desnatado (LI et al., 2021). Dessa forma, por ser capaz de reduzir uma quantidade significativa de bactérias e esporos sem causar alterações no gosto do leite, além de aumentar seu prazo de validade, a microfiltração tornou-se uma alternativa atrativa para a indústria de laticínios (CHARCOSSET, 2021). Apesar das diversas vantagens que a microfiltração apresenta em relação aos processos convencionais, sua implementação comercial é dificultada, principalmente, pela complexidade operacional e mecânica presentes em suas instalações comparados a simplicidade dos tratamentos em alta temperatura, além de terem sua eficácia historicamente comprovada, o faz com que poucas indústrias estejam dispostas a arriscar um método já consagrado para aplicar um outro ainda em estudo.

No tocante a indústria de vinho destaca-se a importância do processo de clarificação por microfiltração, o qual é um processo de uma única etapa que não necessita de auxílio de centrifugação ou filtração, salienta-se, ainda que a microfiltração não altera as características organolépticas do vinho (CHARCOSSET, 2021). No processo de clarificação de vinhos, membranas de fibra oca com diâmetro de poro de 0,2 μm foram capazes de reduzir a turbidez para valores inferiores a meta desejada de 1 NTU (TREVISAN; GHIDOSI; MOULIN, 2022).

A clarificação também é um processo de extrema relevância dentro da indústria cervejeira, e quando é utilizada a microfiltração para realizar tal processo observa-se um problema: uma incrustação significativa das membranas que leva a baixos fluxos de permeados (CHARCOSSET, 2021). Por isso, o tamanho dos poros é um parâmetro essencial para realizar o controle do fluxo e a qualidade do filtrado durante a clarificação da cerveja (CHARCOSSET, 2021). Para uma cerveja tradicional, Omelchenko et al. (2021), através de membranas de poros de diâmetros de 4 μm , conseguiram reduzir a turbidez de 3,48 para 2,88 NTU, representando uma redução de aproximadamente 17,24%.

Para além das indústrias de vinho e de cerveja, a clarificação também é um processo presente na produção de sucos de fruta, a depender da sua aplicação final, por exemplo, para produção de bebidas límpidas, doces e produtos de confeitaria é necessário que o suco de fruta utilizado seja clarificado (CHARCOSSET, 2021). Nesses casos, o processo de clarificação convencional envolve uma sequência de processos em batelada, como pré-tratamento enzimático, clarificação com bentonita, gelatina ou terra diatomácea, e pasteurização (CHARCOSSET, 2021). Os processos de microfiltração e ultrafiltração por meio de membranas foram introduzidos no final da década de 1970 como uma opção diferente em relação aos processos convencionais supracitados (CHARCOSSET, 2021). Alguma das vantagens resultantes da utilização da microfiltração e ultrafiltração são o aumento do rendimento do suco, a possibilidade de operação em uma única etapa, redução do uso de enzimas, eliminação da necessidade de pasteurização, e a produção em processo contínuo (CHARCOSSET, 2021). Visando a clarificação, estudos indicaram a obtenção de um permeado com apenas cerca de 0,37 NTU por meio da microfiltração com membranas de polissulfona (MEJIA; YÁÑEZ-FERNANDEZ, 2021).

Além da clarificação, as membranas dentro da produção de sucos de fruta também são utilizadas no aumento da concentração, uma vez que esses geralmente são concentrados para facilitar e reduzir os custos de armazenamento, transporte e distribuição, além de garantir uma melhor conservação (CHARCOSSET, 2021). Os métodos clássicos utilizados na concentração de sucos envolvem o emprego de altas temperaturas para remoção da água, o que, conseqüentemente, pode causar mudanças nas propriedades nutricionais e sensoriais do produto, como mudanças na cor e no sabor (CHARCOSSET, 2021). Por esses motivos, encontrou-se a viabilidade da aplicação das membranas, que já são utilizadas a cerca de 40 anos, uma vez que são capazes de concentrar o suco a temperatura ambiente, causando danos mínimos ao produto (CHARCOSSET, 2021).

4.3 Aplicações do processo de separação por membranas para tratamento de águas para abastecimento e residuais

É de conhecimento geral que a água é um recurso indispensável tanto para a sobrevivência humana como para processos industriais. Sabe-se, também, que esse recurso é limitado e tem se tornado cada vez mais escasso. Diante desse cenário, é estudado, nos últimos anos com maior intensidade, o tratamento de água residuais para reuso na indústria assim como para abastecimento da população. Para realizar esse tratamento, as técnicas mais utilizadas compreendem os processos de separação por membranas.

Um dos principais desafios em relação a utilização de membranas aplicadas ao tratamento de água é a necessidade de uma maior seletividade e especificidade na separação por membranas (ZUO *et al.*, 2021). Os principais fatores que favorecem a rápida substituição dos métodos convencionais de tratamento de água e águas residuais pelos processos de separação por membranas são: alta eficiência, design compacto e modular e elevado nível de automação (ZUO *et al.*, 2021).

As águas residuais industriais são muito diversificadas, com algumas podendo conter altas concentrações de compostos tóxicos, mas não necessariamente concentrações salinas elevadas. Para a utilização dessas águas residuais em aplicações não potáveis considera-se desnecessário remover grande quantidade de substâncias químicas que não afetam negativamente seu aproveitamento. Dessa forma, atualmente, as estratégias de tratamento de águas residuais concentram-se em minimizar a contaminação ambiental e realizar a extração da água para fins de reuso (ZUO *et al.*, 2021).

Com a finalidade de minimizar o consumo de energia e a área da membrana, deseja-se obter uma alta permeabilidade no tratamento de água, ao mesmo tempo que, para garantir a qualidade da água tratada, é necessária uma alta seletividade (ZUO *et al.*, 2021). Contudo, para a maioria de materiais de membrana, existe uma troca compensatória entre permeabilidade e seletividade, ou seja, um aumento na permeabilidade leva a uma queda da seletividade (ZUO *et al.*, 2021). Encontrar um material que possa fornecer uma membrana com equilíbrio entre esses dois parâmetros têm sido alvo de estudos recentes.

Nesse sentido, pesquisas significantes têm sido dedicadas em modificar materiais de membranas existentes e, também, no desenvolvimento de novas membranas utilizando materiais avançados (ZUO *et al.*, 2021). É importante ressaltar que para a aplicação de membranas no tratamento de água, a seletividade global é intensamente afetada pelas condições do processo, como a força motriz utilizada, as condições hidrodinâmicas, a composição da fase receptora, e a qualidade da água de alimentação (ZUO *et al.*, 2021).

Dentre os diversos materiais utilizados nessa busca de equilíbrio entre a seletividade e a permeabilidade, destacam-se os materiais a base de carbono, que quando utilizados em membranas apresentam aspectos positivos como a redução de incrustações, a hidrofiliabilidade e a qualidade do permeado (LI *et al.*, 2021). Em relação a permeabilidade, membranas de fibra de carbono apresentam um alto valor desse parâmetro em função da existência de vários grupos funcionais em sua superfície. Já em relação a remoção de matéria orgânica, as membranas de carvão ativado mostram-se promissoras devido à sua elevada área superficial, estrutura micro e macroscópica, e diversos grupos funcionais químicos (LI *et al.*, 2021).

As membranas à base de fibras de carbono despertam interesse desde a década de 1980, quando foi observado que esses materiais apresentavam elevada capacidade de adsorção de poluentes e favoreciam a adesão microbiana (LI *et al.*, 2021). Desde então, diversos avanços vêm sendo obtidos, entre eles, destacam-se as membranas produzidas por eletrofiliação seguida de carbonização, que apresentaram desempenho de adsorção cerca de dez vezes superior, cinética aproximadamente duas vezes mais rápida e permeabilidade seis vezes maior quando comparadas às fontes tradicionais de carvão ativado (RIKA *et al.*, 2017). Além disso, essas membranas demonstraram-se capazes de reduzir o consumo de energia em 87% ao serem implementadas em um processo de tratamento de água (RIKA *et al.*, 2017).

No que diz respeito às membranas de carvão ativado, os principais métodos para esse material ser depositado sobre as membranas são revestimento e imersão (LI *et al.*, 2021). A ação de depositar carvão ativado sobre as membranas possui como finalidade aprimorar o desempenho de separação da membrana durante a remoção de contaminantes de águas residuais (LI *et al.*, 2021). Além disso, diante do objetivo de melhorar ainda mais o desempenho da membrana, o carvão ativado também é utilizado como um material funcional a ser incorporado à matriz da membrana (LI *et*

al., 2021). Membranas híbridas de cerâmica/carbono alcançaram eficiência superior a 99% na remoção de óleo presente em emulsões óleo-água estabilizadas por surfactantes, indicando elevado potencial para aplicação no tratamento de águas residuais oleosas (FARD et al., 2018).

Além da dificuldade de encontrar o equilíbrio entre seletividade e permeabilidade, outro problema crucial da aplicação das membranas em tratamento de águas é sua incrustação. Nesse sentido, novas estratégias para mitigação da incrustação (fouling) vêm sendo amplamente investigadas, uma vez que esse fenômeno representa uma das principais limitações operacionais dos processos de separação por membranas aplicados ao tratamento de água (EL BATOUTI; ALHARBY; ELEWA, 2022). A incrustação das membranas nesses processos, deve-se, em geral, a deposição e acúmulo de substâncias orgânicas, inorgânicas e biológicas em sua superfície, que resulta em uma camada que oferece resistência ao fluxo hidráulico ou, até mesmo, pode ocasionar a perda de desempenho da membrana (EL BATOUTI; ALHARBY; ELEWA, 2022). Dessa forma, observa-se que o avanço dos processos de separação por membranas depende não apenas do desenvolvimento de materiais com maior desempenho, mas também da implementação de tecnologias eficientes para prevenção, limpeza e recuperação das membranas, de modo a aumentar sua vida útil e viabilizar sua aplicação em maior escala no tratamento de água (EL BATOUTI; ALHARBY; ELEWA, 2022).

5 CONCLUSÃO

A revisão da literatura evidencia que os processos de separação por membranas (PSM), devido à sua alta eficiência, baixo custo e à crescente demanda por minimização do consumo de energia, têm sido cada vez mais aplicados em diferentes áreas, como dessalinização, indústria alimentícia e tratamento de água para abastecimento e águas residuais.

No âmbito da dessalinização, os PSM, com destaque para a osmose reversa, mostram-se como principal solução para obtenção de água potável. Para superar os desafios operacionais, é intensamente estudado o desenvolvimento de materiais avançados, como as membranas compostas de película fina (TFC) e as membranas de óxido de grafeno (GO), que, como consequência, fornecem altas taxas de rejeição e fluxos otimizados. Com o intuito de expandir as usinas de dessalinização em escala comercial, é necessário um foco contínuo na redução da pressão osmótica e do consumo energético relacionado a essas tecnologias.

De forma paralela, a aplicação das membranas na indústria alimentícia, em especial os setores de laticínios, cervejas, vinhos, e sucos transformou e otimizou os métodos de clarificação, purificação e concentração. Nesse setor, uma das principais vantagens dos PSM é sua capacidade de operar a temperatura ambiente e em uma única etapa, substituindo tratamentos clássicos que dependem da temperatura ou são feitos em batelada. Dessa forma, a utilização dos PSM não só garantem a esterilização e aumento da vida útil dos produtos como também não comprometem suas características nutricionais.

Em respeito ao tratamento de águas para abastecimento e residuais, o problema central reside em encontrar um equilíbrio adequado entre seletividade e permeabilidade. Como alternativa desenvolvem-se estudos de diferentes tipos de

materiais capazes de sanar esse problema, dentre os principais estudos, destaca-se a utilização de materiais a base de carbono, como fibras de carbono e carvão ativado, em matrizes híbridas, apresentando-se como alternativa de alta eficiência devido a sua elevada área superficial e capacidade de adsorção, que promove a remoção de contaminantes ao mesmo tempo que reduz os custos energéticos operacionais.

Em síntese, englobando todas as áreas analisadas, seja na obtenção de água potável por dessalinização, na otimização de processos da indústria alimentícia ou no tratamento de água para abastecimento ou residual, a literatura atesta plena viabilidade técnica e comercial dos processos de separação por membranas. A intensa dedicação científica ao tema e o crescente número de plantas industriais que utilizam dos PSM evidenciam que essas tecnologias se consolidaram como soluções amplamente aplicadas em escalas globais. A transição contínua dos métodos convencionais para os sistemas de membranas é reflexo de resultados positivos e práticos desses processos e confirma que, ao serem impulsionados por pesquisas constantes e focadas em eficiência e inovação de materiais, os PSM continuarão a expandir sua aplicação não apenas como alternativas, mas sim como ferramentas fundamentais, sustentáveis e economicamente atrativas para os desafios da engenharia moderna.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABID, Monis Bin; WAHAB, Roswanira Abdul; SALAM, Mohamed Abdel; MOUJIDIN, Iqbal Ahmed; GZARA, Lassaad. Desalination technologies, membrane distillation, and electrospinning, an overview. *Heliyon*, v. 9, e12810, 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Água no mundo**. Brasília: ANA, [s.d.]. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>. Acesso em: 7 maio 2026.

ARMOA, M. H.; JAFELICCI JR, M. Princípios e aplicações de processos de separação por membranas inorgânicas. **[Nome da Revista]**, [S. I.], n. 1, p. 80-97, 2011.

BHAVE, R. R. **Inorganic membranes synthesis, characteristics and applications**. [S. I.]: Springer Netherlands, 1991.

BITTER, J. G. A. **Transport mechanisms in membrane separation processes**. New York: Plenum Press, 1991.

CHARCOSSET, C. Classical and recent applications of membrane processes in the food industry. **Food Engineering Reviews**, [S. I.], v. 13, p. 322-343, 2021.

CURTO, D.; FRANZITTA, V.; GUERCIO, A. A review of the water desalination technologies. **Applied Sciences**, [S. I.], v. 11, n. 670, p. 1-36, 2021.

DAHANAYAKA, M.; LIU, B.; SRIKANTH, N.; ZHOU, K. Ionised graphene oxide membranes for seawater desalination. **Desalination**, [S. I.], v. 496, e114637, 2020.

EL BATOUTI, M.; ALHARBY, N. F.; ELEWA, M. M. Review of new approaches for fouling mitigation in membrane separation processes in water treatment applications. **Separations**, [S. I.], v. 9, n. 1, 2022.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional: Síntese 2023**. [S. I.]: EPE, 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-681/BEN_S%C3%ADntese_2023_PT.pdf. Acesso em: 22 fev. 2024.

FARD, A. K.; BUKENHOUDT, A.; JACOBS, M.; MCKAY, G.; ATIEH, M. A. Novel hybrid ceramic/carbon membrane for oil removal. *Journal of Membrane Science*, [S. I.], v. 559, p. 42-53, jul. 2018.

GAN, Q. *et al.* Beer clarification by microfiltration: product quality control and fractionation of particles and macromolecules. **Journal of Membrane Science**, [S. l.], v. 194, p. 185-196, 2001.

GRAND VIEW RESEARCH. **Membrane separation technology market**. [S. l.], [202-?]. Disponível em: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/membrane-separation-technology-market>. Acesso em: 27 fev. 2024.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação por membranas**. [S. l.]: E-papers, 2006.

HELPER, F.; LEMCKERT, C.; ANISSIMOV, Y. G. Osmotic power with pressure retarded osmosis: theory, performance and trends—A review. **Journal of Membrane Science**, [S. l.], v. 453, p. 337–358, 2014.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy statistics data browser**. [S. l.], [202-?]. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20consumption&indicator=ElecConsBySector>. Acesso em: 22 fev. 2024.

JONES, E. *et al.* The state of desalination and brine production: a global outlook. **Science of the Total Environment**, [S. l.], v. 657, p. 1343-1356, 2019.

JUNG, W. *et al.* A practical approach to enhancing energy efficiency in dual-stage membrane processes for various industrial gas separations: membrane combination optimization. **Journal of Membrane Science**, [S. l.], v. 687, 5 dez. 2023.

LI, C. *et al.* Carbon-based membrane materials and applications in water and wastewater treatment: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [S. l.], v. 19, p. 1457-1475, 2021.

LI, Y. *et al.* High boron removal polyamide reverse osmosis membranes by swelling induced embedding of a sulfonyl molecular plug. **Journal of Membrane Science**, [S. l.], v. 597, 2020.

LI, Z. *et al.* Effects of pasteurization, microfiltration, and ultraviolet-c treatments on microorganisms and bioactive proteins in bovine skim milk. **Food Bioscience**, [S. l.], v. 43, p. 101339, 2021.

MEDEIROS, V. **O mundo opera 16 mil usinas de dessalinização em 177 países que bombeiam 95 milhões de metros cúbicos de água do mar por dia**. [S. l.], 2026. Disponível em: <https://clickpetroleoegas.com.br/o-mundo-opera-16-mil-usinas-de-dessalinizacao-em-177-paises-que-bombeiam-95-milhoes-de-metros-cubicos-de-agua-do-mar-por-dia-vml97/>. Acesso em: 28 maio 2026.

MEJIA, J. A. A.; YÁÑEZ-FERNANDEZ, J. Clarification Processes of Orange Prickly Pear Juice (*Opuntia* spp.) by Microfiltration. *Membranes*, Basel, v. 11, n. 5, p. 354, maio 2021.

MORAIS, A. L. S.; PEREIRA, R. S. F.; OLIVEIRA, T. M. Transferência de massa por meio de difusão em corpos porosos: aplicações industriais. *Journal of Exact Sciences - JES*, [S. l.], v. 31, n. 1, p. 5-11, out./dez. 2021.

MORDOR INTELLIGENCE. **Mercado de sistemas de dessalinização – crescimento, tendências e previsões**. [S. l.], 2026. Disponível em: <https://www.mordorintelligence.com/pt/industry-reports/desalination-system-market>.

Acesso em: 28 maio 2026.

NISHIYAMA, N. *et al.* A mesoporous silica (MCM-48) membrane: preparation and characterization. *Journal of Membrane Science*, [S. l.], 2001.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A EDUCAÇÃO, A CIÊNCIA E A CULTURA (UNESCO). **Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2025**: montanhas e geleiras: torres de água: resumo executivo. Perugia: UNESCO, 2025. 11 p. Disponível em: https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000393071_por. Acesso em: 7 maio 2026.

OMELCHENKO, O. *et al.* Determining the influence of membrane treatment process on the quality indicators of beer. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, [S. l.], v. 4, n. 11, p. 66-72, 2021.

RIKA, J.; YONG, Z.; HAO, F.; TODD, J. Electrospun lignin carbon nanofiber membranes with large pores for highly efficient adsorptive water treatment applications. *Journal of Water Process Engineering*, [S. l.], v. 16, p. 240–248, 2017.

SHIMPEI, G. *et al.* **Process for the preparation of carbon fibers**. [S. l.: s. n.], v. 4554148, 1986.

SULZER CHEMTECH. Process plants. [S. l.]: Sulzer, [2025]. Disponível em: https://www.sulzer.com/en/-/media/files/products/separation-technology/brochures/english/process_plants_e10557_en_web.pdf. Acesso em: 24 jul. 2026.

TIWARY, S. K.; SINGH, M.; CHAVAN, S. V.; KARIM, A. Graphene oxide-based membranes for water desalination and purification. *npj 2D Materials and Applications*, [S. l.], v. 8, n. 27, 2024.

TREVISAN, M.; GHIDOSSI, R.; MOULIN, P. Silicon carbide (SiC) membranes in oenology. *Separation and Purification Technology*, [S. l.], v. 284, p. 120276, 2022.

YU, J. *et al.* Graphene oxide nanofiltration membrane for efficient dyes separation by hexagonal boron nitride nanosheets intercalation and polyethyleneimine surface modification. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, [S. l.], v. 656, e130367, 2023.