



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



BRUNA VILARINHO DE SANTIS

**REÚSO INDUSTRIAL DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE ÓLEO DE SOJA EM
TORRES DE RESFRIAMENTO E CALDEIRAS: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE
A APLICAÇÃO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO, ULTRAFILTRAÇÃO E
OSMOSE REVERSA**

Uberlândia – MG

2026

BRUNA VILARINHO DE SANTIS

**REÚSO INDUSTRIAL DE ÁGUA A PARTIR DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE
ÓLEO DE SOJA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A APLICAÇÃO DA
FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO, ULTRAFILTRAÇÃO E OSMOSE REVERSA**

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: Prof.^a Thamyne Valadares de Oliveira.

Uberlândia – MG

2026



ATA DE DEFESA - GRADUAÇÃO

Curso de Graduação em:	Engenharia Química				
Defesa de:	Trabalho de Conclusão de Curso - 1451BIS (Turma C28- 2026/1)				
Data:	03/08/2026	Hora de início:	14h00 min	Hora de encerramento:	14:50
Matrícula do Discente:	12021EQU013				
Nome do Discente:	BRUNA VILARINHO DE SANTIS				
Título do Trabalho:	REÚSO INDUSTRIAL DE ÁGUA A PARTIR DE EFLUENTES DA INDÚSTRIA DE ÓLEO DE SOJA: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA SOBRE A APLICAÇÃO DA FLOTAÇÃO POR AR DISSOLVIDO, ULTRAFILTRAÇÃO E OSMOSE REVERSA				

A defesa do Trabalho de Conclusão de Curso ocorreu no **Auditório Giulio Massarani - Sala 1K228** e a Banca Examinadora foi assim composta: **Prof. Dr. Ubirajara Coutinho Filho - FEQUI/UFU, Doutorando Matheus Martins da Silveira - FEQUI/UFU e Prof.ª Dr.ª Thamayne Valadares de Oliveira - FEQUI/UFU**, orientadora da discente.

Iniciando os trabalhos, a presidente da mesa, **Thamayne Valadares de Oliveira - FEQUI/UFU**, apresentou a Comissão Examinadora e a discente, e concedeu a esta a palavra para a exposição de seu trabalho. A duração da apresentação da discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do curso.

A seguir, a senhora presidente concedeu a palavra, em ordem e sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir a discente. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, em sessão secreta a Banca atribuiu o resultado, considerando o discente:

Aprovada. Nota: 100 (cem pontos).

Nada mais havendo a tratar, foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que, após lida e achada conforme, foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Thamayne Valadares de Oliveira, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/08/2026, às 14:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Ubirajara Coutinho Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/08/2026, às 14:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **MATHEUS MARTINS DA SILVEIRA, Usuário Externo**, em 03/08/2026, às 14:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **7550926** e o código CRC **E7F75687**.

Referência: Processo nº 23117.052522/2026-22

SEI nº 7550926

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer, primeiramente, à minha família, que me deu todo o suporte necessário para que eu pudesse seguir meus caminhos e crescer. À minha mãe, Cristiana, por nunca deixar que me faltasse nada, por me proporcionar o melhor e por me ensinar a ser mulher e engenheira. À minha irmã, Júlia, por estar ao meu lado e por tantas vezes ter enfrentado caminhos mais difíceis para que os meus fossem mais leves. Às minhas avós, Ana e Maria Augusta, por me ensinarem a ser determinada e a enfrentar duras batalhas. Às minhas tias, Daniela, Ana Lúcia e Michele, por sua presença e carinho. Em resumo, agradeço a todas as mulheres da minha vida, que são meu exemplo e minha base.

Ao meu companheiro, Kaio, agradeço por tornar esse processo mais leve, pelas incontáveis horas de conversa, pelo apoio e por permanecer ao meu lado.

Aos meus amigos e parceiros de curso, agradeço pelas ajudas, pelos estudos em conjunto e por terem vivido comigo a graduação do início ao fim.

Por fim, agradeço aos docentes do curso de Engenharia Química e, em especial, à minha orientadora, Thamayne, pelo conhecimento, dedicação e por fazer parte deste trabalho tão importante para o encerramento da graduação.

A todos vocês, o meu mais sincero obrigada. Esta caminhada foi mais leve e especial porque pude contar com cada um.

RESUMO

A crescente demanda por água e a recorrência de períodos de escassez hídrica têm ampliado a necessidade de alternativas que reduzam a captação de recursos naturais pelo setor industrial. Nesse contexto, este estudo teve como objetivo avaliar a viabilidade técnica do reúso de água a partir de efluentes gerados na indústria de processamento de óleo de soja, considerando a aplicação integrada das tecnologias de flotação por ar dissolvido, ultrafiltração e osmose reversa. A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica qualitativa, exploratória e descritiva, com base em artigos científicos, livros, dissertações, teses, normas e publicações técnicas relacionadas ao tratamento de efluentes e ao reúso industrial. Foram analisadas as características dos efluentes gerados durante o processamento da soja, especialmente na etapa de refino, na qual podem ocorrer elevadas concentrações de matéria orgânica, óleos e graxas, sólidos suspensos, partículas coloidais e sais dissolvidos. A flotação por ar dissolvido, associada à coagulação e à floculação, apresenta elevada capacidade de remoção de óleos e graxas, turbidez, sólidos suspensos e parte da carga orgânica. A ultrafiltração complementa esse tratamento pela retenção de partículas finas, coloides, macromoléculas e microrganismos, produzindo uma alimentação mais adequada para a osmose reversa, responsável pela redução de sais dissolvidos, dureza, sílica e condutividade. Concluiu-se que a integração dessas tecnologias apresenta potencial técnico para a produção de água destinada ao reúso em torres de resfriamento e sistemas de alimentação de caldeiras. Entretanto, sua aplicação deve considerar a caracterização do efluente, os critérios de qualidade do uso final, os ensaios de tratabilidade, o controle operacional e a viabilidade econômica e ambiental de cada unidade industrial.

PALAVRAS-CHAVE: reúso, efluente, flotação por ar dissolvido, ultrafiltração, osmose reversa, torre de resfriamento, caldeira, água.

ABSTRACT

The growing demand for water and the recurrence of water scarcity periods have heightened the need for alternatives to reduce the industrial dependence on natural water sources. In this context, this study evaluated the technical feasibility of water reuse from soybean oil processing effluents using an integrated treatment system composed of dissolved air flotation, ultrafiltration, and reverse osmosis. A qualitative, exploratory, and descriptive literature review was conducted drawing on scientific articles, books, dissertations and theses, regulations, and technical publications concerning effluent treatment and industrial water reuse. The characteristics of soybean processing effluents were analyzed, particularly from the refining stage, which may contain high concentrations of organic loads, oils and grease, suspended solids, colloidal particles, and dissolved salts. Dissolved air flotation, combined with coagulation and flocculation, effectively removes oils and grease, turbidity, suspended solids, and part of the organic load. Ultrafiltration enhances this treatment by retaining fine particles, colloids, macromolecules, and microorganisms, producing a suitable feed stream for reverse osmosis, which removes dissolved salts, hardness, silica, and conductivity. The integrated system demonstrates technical potential for producing reclaimed water suitable for cooling towers and boiler feed systems. Nevertheless, its implementation requires careful evaluation of effluent characteristics, target quality standards, treatability tests, operational control, and site-specific economic and environmental feasibility.

KEYWORDS: water reuse, effluent, dissolved air flotation, ultrafiltration, reverse osmosis, cooling tower, boiler, water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Evolução da retirada de água por uso setorial no Brasil entre 1970 e 2040	18
Figura 2 – Fluxograma do processamento da soja para obtenção de óleo e farelo	22
Figura 3 – Pirâmide dos 3Rs	29
Figura 4 – Exemplo de rota de tratamento de água para diferentes usos industriais.....	35
Figura 5 – Exemplo de funcionamento de uma torre de resfriamento	36
Figura 6 – Esquema simples de um sistema de caldeira	39
Figura 7 – Equipamento Jar Test compacto analógico 3 provas modelo JTC Milan	42
Figura 8 – Representação esquemática dos processos de coagulação e floculação	43
Figura 9 – Esquema de sistemas de flotação por ar dissolvido sem reciclagem	44
Figura 10 – Princípio operacional das membranas semipermeáveis	48
Figura 11 – Tipos de sistemas de membranas e suas características.....	49
Figura 12 – Comparação entre o fluxo normal ou convencional e o fluxo tangencial.....	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Consumo de água no processo de crushing de soja.....	19
Tabela 2 – Consumo de insumos no refino de óleo de soja	19
Tabela 3 – Valores típicos de efluentes dos processos de extração e refino de óleo de soja	24
Tabela 4 – Principais parâmetros de controle em torres de resfriamento e sua relação com problemas operacionais	37
Tabela 5 – Exemplos de padrões de qualidade recomendados para águas de reposição em sistemas de resfriamento com recirculação	38
Tabela 6 – Parâmetros de qualidade da água recomendados pela ASME para consumo em caldeiras à vapor em função da classe de pressão	40
Tabela 7 – Caracterização do efluente e eficiências de remoção obtidas por coagulação, floculação e FAD	47
Tabela 8 – Desempenho da ultrafiltração no tratamento de efluentes petroquímicos para reúso industrial	53
Tabela 9 – Qualidade dos permeados da osmose reversa e comparação com os requisitos de reúso industrial	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
CEB	Chemical Enhanced Backwash
CIP	Clean in Place
CNI	Confederação Nacional da Indústria
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FIESP	Federação das Indústrias do Estado de São Paulo
FAD	Flotação por Ar Dissolvido
MF	Microfiltração
NF	Nanofiltração
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
O&G	Óleos e Graxas
OR	Osmose Reversa
PAC	Policloreto de Alumínio
pH	Potencial Hidrogeniônico
SDI	Índice de Densidade de Sedimentação
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
SSV	Sólidos Suspensos Voláteis
UF	Ultrafiltração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo geral.....	15
2.2	Objetivos específicos.....	15
3	METODOLOGIA.....	16
4	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
4.1	Consumo hídrico no setor industrial	17
4.2	Indústria de processamento de óleo de soja	20
4.3	Características dos efluentes gerados no processamento de óleo de soja.....	23
4.4	Tecnologias convencionais de tratamento de efluentes de oleaginosas.....	25
4.5	Reúso de água industrial.....	27
4.5.1	Conceito e principais aplicações de reúso	27
4.5.2	Motivações e benefícios para a indústria.....	29
4.5.3	Tecnologias para reúso industrial	31
4.5.4	Desafios relacionados a sistemas de reúso industrial	32
4.6	CrITÉRIOS de qualidade da água de reúso para aplicações industriais.....	33
4.6.1	Torres de resfriamento.....	35
4.6.2	Caldeiras	38
4.7	Sistema de flotação por ar dissolvido.....	40
4.7.1	Coagulação	41
4.7.2	Floculação.....	42
4.7.3	Flotação.....	43
4.8	Sistemas de separação por membranas	47
4.8.1	Ultrafiltração.....	51

4.8.2 Osmose reversa.....	53
5 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS.....	58

1 INTRODUÇÃO

A poluição ambiental constitui um dos principais desafios da sociedade contemporânea, pois decorre, em grande parte, das atividades antrópicas e afeta os ecossistemas, a disponibilidade de recursos naturais e a saúde humana (Braga *et al.*, 2015). Entre suas diferentes formas, a poluição hídrica corresponde à alteração das características físicas, químicas ou biológicas da água, comprometendo sua qualidade e seus usos. Embora seja um recurso renovável, sua distribuição desigual e a crescente pressão sobre os mananciais tornam a disponibilidade hídrica um desafio relevante (Tundisi, J. G.; Tundisi, T. M., 2011). Além disso, a elevada demanda dos diferentes setores, a ocorrência de eventos críticos e a necessidade de conciliar quantidade, qualidade e múltiplos usos reforçam a importância da gestão integrada e do uso eficiente dos recursos hídricos (ANA, 2026).

Os resíduos líquidos gerados pelas atividades industriais são denominados efluentes industriais e apresentam características variadas conforme o processo produtivo, podendo conter substâncias orgânicas e inorgânicas, óleos e graxas e metais pesados (Metcalf; Eddy, 2016). O descarte inadequado desses efluentes intensifica a poluição hídrica, causando impactos ambientais, sociais e econômicos (Von Sperling, 2014). A legislação brasileira determina que seu lançamento em corpos d'água ocorra somente após tratamento adequado, conforme parâmetros definidos para o corpo receptor (Brasil, 2011). Assim, diante das exigências ambientais e da escassez hídrica, o tratamento de efluentes tornou-se essencial para garantir o retorno seguro da água ao meio ambiente ou sua reutilização nos processos produtivos.

Entre os segmentos associados ao agronegócio, a produção e o refino de óleo de soja apresentam elevada demanda hídrica e geração de efluentes com composição complexa. As etapas de processamento podem produzir correntes com elevada demanda química de oxigênio (DQO), óleos e graxas (O&G), sólidos dissolvidos totais (SDT) e sólidos suspensos totais (SST), cuja presença aumenta o potencial de impacto ambiental quando o tratamento é insuficiente (Alther, 2008; Yang, 2007). Essas características justificam a combinação de operações capazes de remover contaminantes com propriedades distintas.

Paralelamente, a elevada demanda hídrica do setor industrial intensifica os desafios relacionados à disponibilidade e ao uso sustentável da água. Segundo a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA, 2019), os usos industriais da água estão entre os principais usos consuntivos no Brasil, juntamente com o abastecimento urbano e a agricultura irrigada,

evidenciando a relevância da gestão eficiente dos recursos hídricos para o setor produtivo. Nesse contexto, a indústria de processamento de óleo de soja caracteriza-se pelo uso intensivo de água em operações como geração de vapor, trocas térmicas, torres de resfriamento, lavagem de equipamentos e limpeza industrial, tornando-se um segmento de elevada demanda hídrica (CETESB, 2008; ANA, 2019).

Diante desse cenário, iniciativas voltadas ao reúso de água, por meio do tratamento e reaproveitamento de efluentes industriais, vêm sendo adotadas com maior frequência a fim de reduzir a captação de água bruta e mitigar impactos ambientais (ANA, 2019). Nas indústrias de processamento de óleo de soja, destaca-se o potencial de aplicação da água de reúso em torres de resfriamento e sistemas de alimentação de caldeiras, unidades de elevada demanda hídrica que requerem rigoroso controle dos parâmetros da água para prevenir incrustação, corrosão e deposição de sólidos. Entretanto, embora as Estações de Tratamento de Efluentes (ETEs) sejam eficientes na remoção de contaminantes e atendam aos padrões de descarte ambiental, geralmente não produzem efluentes com qualidade suficiente para aplicações de reúso, tornando necessária a adoção de tecnologias complementares de tratamento avançado (Habert; Borges; Nóbrega, 2006).

No tratamento de efluentes e na separação sólido-líquido, a flotação por ar dissolvido (FAD) destaca-se pela elevada eficiência na remoção de óleos e graxas (O&G), sólidos suspensos e turbidez, além do atrativo custo-benefício (Rubio; Souza; Smith, 2002). Nos processos de separação por membranas, a ultrafiltração (UF) retém sólidos suspensos, coloides, macromoléculas e parte da matéria orgânica residual, reduzindo o potencial de incrustação nas etapas subsequentes (Habert; Borges; Nóbrega, 2006). Já a osmose reversa (OR) remove sais dissolvidos, compostos orgânicos e contaminantes de baixa massa molecular, produzindo água adequada para aplicações industriais mais exigentes, como sistemas de resfriamento e alimentação de caldeiras (Garnier *et al.*, 2023; Silva; Santos; Duarte, 2013).

Diante desse contexto, este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo realizar uma revisão bibliográfica sobre o reúso industrial de água proveniente de efluentes da indústria de óleo de soja, abordando a integração entre a flotação por ar dissolvido, a ultrafiltração e a osmose reversa como tecnologias capazes de produzir água com qualidade adequada para aplicações industriais, como torres de resfriamento e sistemas de geração de vapor. Além de apresentar os princípios de funcionamento dessas tecnologias, o trabalho discute seus benefícios, limitações e potencial de aplicação na gestão sustentável dos recursos hídricos da indústria.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste Trabalho de Conclusão de Curso é realizar uma revisão bibliográfica sobre as tecnologias empregadas no reúso industrial de água proveniente de efluentes da indústria de processamento de óleo de soja, com ênfase na flotação por ar dissolvido (FAD), na ultrafiltração (UF) e na osmose reversa (OR). Busca-se avaliar a aplicação dessas tecnologias no tratamento do efluente para seu reaproveitamento em torres de resfriamento e sistemas de alimentação de caldeiras, com foco na redução do consumo hídrico industrial proveniente de fontes naturais.

2.2 Objetivos específicos

Visando atingir o objetivo geral, os objetivos específicos são:

- a) apresentar as características dos efluentes gerados no processamento de óleo de soja, destacando os principais contaminantes e parâmetros físico-químicos presentes;
- b) descrever os princípios de funcionamento da flotação por ar dissolvido, da ultrafiltração e da osmose reversa aplicadas ao tratamento de efluentes industriais;
- c) analisar os resultados reportados na literatura sobre a eficiência dessas tecnologias na remoção de óleos e graxas, sólidos suspensos, matéria orgânica e sólidos dissolvidos;
- d) discutir o potencial da integração entre flotação por ar dissolvido, ultrafiltração e osmose reversa para produção de água destinada ao reúso industrial;

3 METODOLOGIA

A metodologia aplicada neste trabalho consiste em uma pesquisa qualitativa, de caráter exploratório e descritivo, voltada à análise de conteúdos científicos relacionados às tecnologias aplicadas ao reaproveitamento da água em ambientes industriais, visando à identificação de alternativas para a redução do consumo hídrico na atualidade.

Para a elaboração da revisão bibliográfica, o tema foi dividido em subtópicos, de forma a permitir uma pesquisa mais organizada e aprofundada. Inicialmente, foram pesquisados artigos científicos, dissertações, teses e demais publicações acadêmicas nas plataformas Google Acadêmico, SciELO, Science Direct e Portal de Periódicos da CAPES. Para direcionar a busca, foram utilizadas palavras-chave relacionadas ao tema, tais como “reúso de água”, “tratamento de efluentes”, “consumo de água industrial”, “flotação por ar dissolvido”, “ultrafiltração”, “osmose reversa”, entre outras. Também foram consideradas publicações em português e inglês, com o objetivo de ampliar a base de consulta e possibilitar uma análise mais completa sobre o assunto.

Em uma segunda etapa, os materiais encontrados foram filtrados de acordo com a relevância para o tema proposto, dando preferência a estudos relacionados ao setor industrial, especialmente aqueles voltados ao agronegócio, à indústria de processamento de oleaginosas e à gestão hídrica. Posteriormente, as informações foram organizadas conforme os principais tópicos abordados no trabalho. Foram priorizadas publicações mais recentes, principalmente artigos publicados entre os anos de 2018 e 2025, a fim de embasar a pesquisa em estudos atuais, sem desconsiderar referências clássicas consideradas importantes para a compreensão dos processos de tratamento e reúso de água.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

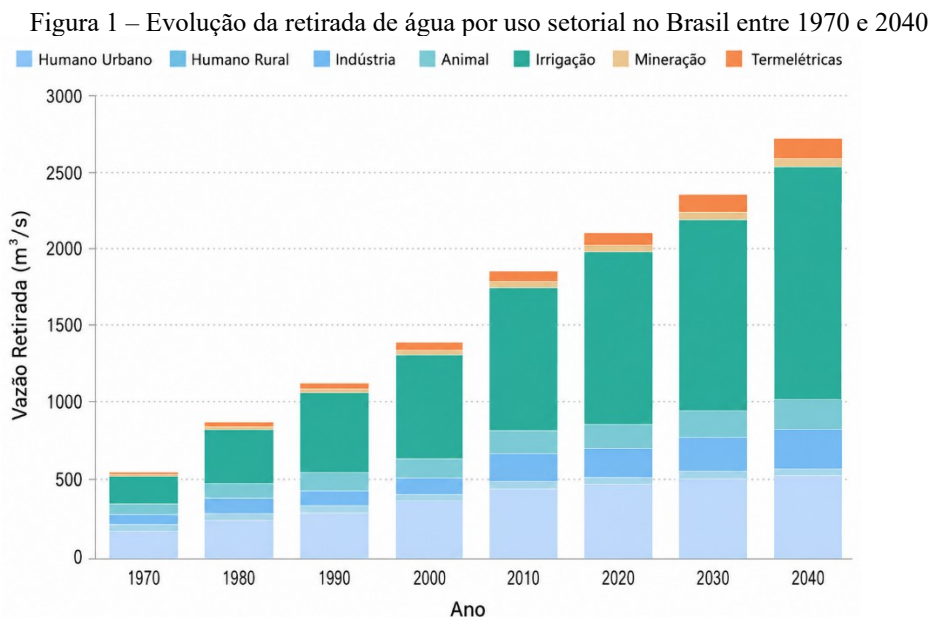
4.1 Consumo hídrico no setor industrial

A água é considerada um recurso renovável por integrar o ciclo hidrológico, no qual ocorre sua movimentação contínua entre a atmosfera, a superfície terrestre e o subsolo, por meio de processos como evaporação, precipitação, escoamento superficial, recarga de aquíferos e evapotranspiração. De acordo com a Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO, [s. d.]), a parcela da precipitação que não retorna à atmosfera por evapotranspiração é convertida em escoamento superficial e águas subterrâneas, compondo os recursos hídricos renováveis disponíveis para uso. Entretanto, essa renovabilidade não representa disponibilidade ilimitada, pois a água precisa estar acessível em quantidade suficiente, no local adequado e com qualidade compatível com o uso pretendido. Nesse sentido, a escassez hídrica pode estar relacionada tanto ao aumento da demanda quanto à redução da quantidade ou da qualidade da água disponível (UN-Water, [s. d.]). Dessa forma, a existência de água em determinado território não garante, necessariamente, sua disponibilidade para atender às demandas humanas, ambientais e produtivas.

O Brasil apresenta uma das maiores disponibilidades hídricas do mundo, concentrando cerca de 12% da água doce superficial disponível no planeta (Serviço Geológico do Brasil, 2025). Entretanto, essa condição não significa distribuição uniforme no território nacional. Segundo a Confederação Nacional da Indústria, a Região Hidrográfica Amazônica concentra aproximadamente 80% da água nacional e apenas 9,2% da população, enquanto o Sudeste, região de elevada concentração populacional e industrial, possui menos de 2% da disponibilidade hídrica do país (CNI, 2020). Esses dados demonstram que a disponibilidade hídrica deve ser analisada não apenas pelo volume total existente, mas também pela distribuição espacial da água e sua relação com os principais centros consumidores.

Considerando os usos consuntivos da água no Brasil, em 2025, a retirada total dos usos setoriais foi de aproximadamente 2.138,0 m³/s. A irrigação apresentou a maior participação na retirada de água, seguida pelo abastecimento humano urbano e pelo setor industrial. Juntos, esses três setores correspondem a quase 83% da retirada total anual do país (ANA, 2026). A projeção apresentada na Figura 1 indica tendência de aumento da demanda hídrica até 2040, principalmente em função da expansão da agricultura irrigada, do crescimento populacional e da intensificação

das atividades produtivas. Esse comportamento reforça a necessidade de planejamento e de práticas voltadas ao uso eficiente da água, especialmente nos setores de maior retirada.



Fonte: Adaptado de Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (2026).

Embora não seja o maior usuário de água no cenário nacional, o setor industrial apresenta participação significativa na retirada hídrica. A água é empregada como matéria-prima, no preparo de soluções químicas, em lavagens, na geração de energia e vapor, no aquecimento, no resfriamento, em usos sanitários e em sistemas de combate a incêndio. A quantidade e a qualidade requeridas variam conforme o processo produtivo, o produto fabricado e a tecnologia empregada (CNI; Federação das Indústrias do Estado de São Paulo, 2017). Entre os segmentos industriais, destacam-se os setores alimentício, de bebidas, celulose e papel, derivados de petróleo e biocombustíveis, produtos químicos e metalurgia, que representam aproximadamente 90% do consumo de água pela indústria brasileira (Agência Nacional de Águas, 2017). Essas características indicam que a gestão hídrica industrial deve considerar não apenas a redução do consumo, mas também a adequação da qualidade da água às exigências específicas de cada aplicação.

Nesse contexto, a agroindústria demanda atenção específica por envolver processos com elevada necessidade de água e geração de efluentes. No processamento industrial da soja, a demanda hídrica está relacionada às etapas de extração, refino, geração de vapor, resfriamento, limpeza de equipamentos e demais operações auxiliares. Em levantamento realizado nos Estados

Unidos pela National Oilseed Processors Association (NOPA), foram avaliados dados operacionais referentes ao ano de 2023 de plantas de processamento de soja que empregavam extração com solvente. Os dados de consumo de água no processo de esmagamento foram disponibilizados por 46 unidades, resultando em consumo médio ponderado de 152 galões por tonelada métrica de soja processada, equivalente a aproximadamente 576 L/t, conforme apresentado na Tabela 1 (NOPA, 2024).

Tabela 1 – Consumo de água no processo de <i>crushing</i> de soja	
Unidade	Valor
Galões/libra de soja	0,069
Galões/tonelada curta de soja	138
Galões/tonelada métrica de soja	152
Litros/tonelada métrica de soja	576

Fonte: Adaptado de National Oilseed Processors Association (2024).

No refino do óleo de soja, além do consumo de energia, são utilizados insumos como hidróxido de sódio, terra clarificante e água. Conforme apresentado na Tabela 2, os dados referentes ao consumo de água foram fornecidos por 13 plantas, indicando consumo médio de aproximadamente 300 L por tonelada métrica de óleo refinado. Os consumos médios de hidróxido de sódio e terra clarificante, obtidos a partir de informações fornecidas por 22 plantas, foram equivalentes a 1,72 e 2,61 kg por tonelada métrica de óleo refinado, respectivamente (NOPA, 2024, p. 6). Esses valores reforçam a relevância das operações de refino na demanda por água e outros insumos industriais.

Tabela 2 – Consumo de insumos no refino de óleo de soja		
Material	Número de plantas	Quantidade por libra de óleo refinado
Hidróxido de sódio	22	1,72 kg/t de óleo refinado
Terra clarificante	22	2,61 kg/t de óleo refinado
Água	13	300 L/t de óleo refinado

Fonte: Adaptado de National Oilseed Processors Association (2024).

No contexto brasileiro, o Relatório de Sustentabilidade 2025 da C.Vale – Cooperativa Agroindustrial apresenta um indicador recente relacionado à eficiência hídrica de sua unidade de esmagamento de soja. Segundo o documento, o consumo por tonelada processada é monitorado diariamente e avaliado mensalmente por meio de indicadores de desempenho. Com base nos resultados operacionais de 2025, a meta de consumo hídrico da unidade foi revisada de 417 para 260 L por tonelada de soja esmagada, correspondendo a uma redução de 37,65% (C.Vale, 2026). O relatório foi publicado oficialmente em julho de 2026.

O indicador apresentado pela C.Vale não deve ser interpretado como consumo médio do setor brasileiro, pois corresponde a uma meta interna estabelecida para uma unidade industrial específica. Da mesma forma, sua comparação direta com os dados da NOPA deve ser realizada com cautela, uma vez que os levantamentos apresentam abrangências, limites operacionais e bases metodológicas distintas. Enquanto a NOPA apresenta uma média ponderada obtida a partir de diferentes plantas norte-americanas, a C.Vale informa a revisão de uma meta operacional com base no desempenho de uma unidade brasileira.

Ainda assim, ambas as referências demonstram que o processamento industrial da soja apresenta oportunidades para redução da demanda hídrica por meio do monitoramento de indicadores, da otimização das operações, da recirculação de correntes e do reúso de efluentes tratados. Dessa forma, a avaliação do consumo de água não deve se limitar à comparação entre valores absolutos, mas considerar as características do processo, o limite adotado no levantamento, as tecnologias empregadas e as práticas de gestão hídrica existentes em cada unidade industrial.

4.2 Indústria de processamento de óleo de soja

O setor de óleos vegetais apresenta significativa importância no segmento agroalimentar, devido à sua ampla utilização como matéria-prima em diferentes processos industriais e produtos de consumo. Esses óleos podem ser obtidos a partir de fontes como soja, girassol, algodão, colza, gergelim e azeitona (Gupta, 2017). No Brasil, a soja se destaca como uma das principais matérias-primas para fabricação de óleos vegetais, embora apresente teor médio de aproximadamente 20% de óleo. Sua transformação ocorre em indústrias de processamento responsáveis pela produção de farelo, óleo bruto, óleo refinado e, em alguns casos, biodiesel (D'Arce, 2006).

A relevância econômica dessa cadeia também evidencia sua importância produtiva. De acordo com o CEPEA e a ABIOVE, a cadeia da soja e do biodiesel apresentou, em 2025, valor estimado de PIB de R\$ 722 bilhões, correspondente a 5,7% do PIB brasileiro, enquanto a safra 2024/2025 alcançou produção recorde de 172,1 milhões de toneladas (CEPEA; ABIOVE, 2025). Esses dados demonstram a expressividade do setor e justificam a análise de seus processos industriais, especialmente quanto ao consumo de água e à geração de efluentes.

Para compreender o processamento industrial da soja, é necessário observar suas principais divisões até a obtenção do óleo bruto, do óleo refinado e do farelo de soja. De forma geral, o processo pode ser organizado nos seguintes setores: recebimento e armazenamento dos grãos,

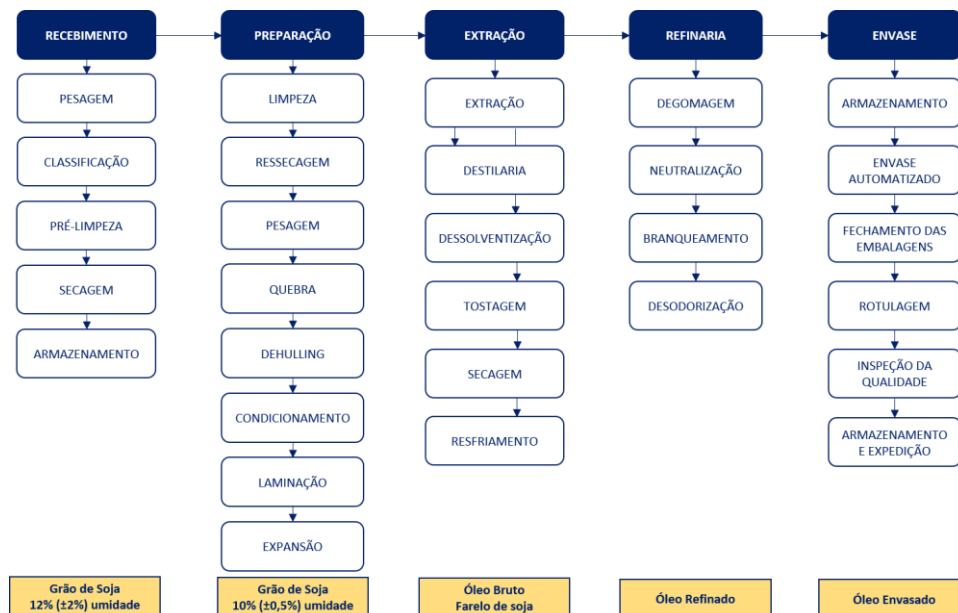
preparação, extração, refinaria e envase. As principais etapas são apresentadas de forma resumida a seguir (Mandarino; Roessing, 2001).

- I. **Recebimento e armazenamento dos grãos:** a soja recebida é pesada e classificada quanto à umidade, impurezas e grãos defeituosos. Em seguida, passa por pré-limpeza para remoção de pedras, gravetos, palhas e materiais finos. Após a secagem, os grãos são armazenados em silos, geralmente com umidade próxima de 12%, conforme os critérios operacionais adotados pela indústria.
- II. **Preparação:** essa etapa tem como finalidade adequar os grãos para aumentar o rendimento da extração. A soja passa por limpeza, ajuste de umidade, pesagem, quebra e descascamento. Na separação, a casca, com menor teor de óleo e proteína, pode ser incorporada ao farelo destinado à alimentação animal. Na sequência, os cotilédones são condicionados por aquecimento e ajuste de umidade, laminados para ampliar a área de contato e, em alguns processos, expandidos para favorecer a penetração do solvente.
- III. **Extração:** o óleo é extraído com utilização de solvente, que entra em contato com a massa preparada em fluxo contrário ao material sólido. O solvente solubiliza o óleo, formando a micela, composta por óleo e hexano. Após a separação, a micela segue para destilação, na qual o solvente é recuperado e retorna ao processo, obtendo-se o óleo bruto. A fração sólida, denominada farelo branco, passa por dessolventização e tostagem para remoção do hexano residual e inativação de fatores antinutricionais. Posteriormente, o farelo é seco, resfriado e destinado principalmente à alimentação animal.
- IV. **Refinaria:** o refino tem como objetivo adequar o óleo bruto ao consumo, reduzindo sua acidez e removendo impurezas que afetam aparência, odor, sabor e estabilidade. O processo envolve, principalmente, as etapas de degomagem, neutralização, branqueamento e desodorização.
 - a) **Degomagem:** remove fosfatídeos e substâncias coloidais por meio da adição de água ao óleo aquecido, seguida de agitação e separação centrífuga. As gomas removidas são aproveitadas na produção de lecitina.
 - b) **Neutralização:** ocorre pela adição de ácido fosfórico e soda cáustica, promovendo a remoção de fosfatídeos residuais e a neutralização dos ácidos graxos livres. Após centrifugação, forma-se uma borra composta por sabões, ácidos graxos, fosfolipídeos e outras impurezas.

- c) **Branqueamento:** o óleo neutralizado recebe argilas ativadas ou outros materiais adsorventes para remoção de pigmentos, peróxidos, metais, sabões residuais e demais contaminantes. Ao final, o adsorvente é retirado por filtração.
- d) **Desodorização:** é realizada sob vácuo, com aplicação de vapor e temperaturas elevadas, visando remover compostos voláteis, odores, sabores indesejáveis e ácidos graxos livres remanescentes. Ao final, obtém-se o óleo refinado.
- V. **Envase:** ocorre em unidades que comercializam o óleo embalado. O produto refinado é armazenado em tanques e direcionado às linhas de enchimento, geralmente automatizadas. O processo inclui envase, fechamento, rotulagem, identificação de lote e validade, inspeção de qualidade e armazenamento para expedição.

O processamento da soja pode variar conforme a configuração da fábrica, os equipamentos disponíveis e o produto desejado. De modo geral, entretanto, compreende as etapas de recebimento, preparação, extração, refino e, quando aplicável, envase, conforme apresentado na Figura 2. Essa sequência permite visualizar os principais pontos de transformação da matéria-prima e auxilia na identificação das etapas associadas ao uso de água, vapor, solventes e geração de efluentes.

Figura 2 – Fluxograma do processamento da soja para obtenção de óleo e farelo



Fonte: Elaborado pela autora.

Outro setor importante no processamento industrial da soja é o de utilidades, embora não faça parte diretamente das etapas de produção de óleo e farelo. Esse departamento é essencial para

a operação da indústria, pois está relacionado à geração de vapor em caldeiras, ao fornecimento de água tratada, aos sistemas de resfriamento, geralmente por torres de resfriamento, e ao encaminhamento dos efluentes às estações de tratamento. Assim, os principais pontos de consumo de água estão associados ao uso de vapor, à água de resfriamento e às lavagens operacionais. Na preparação e na extração, esse consumo ocorre principalmente de forma indireta, por meio de caldeiras, trocadores de calor e condensadores. Já na refinaria, além do uso de vapor e resfriamento, há consumo direto de água em etapas como lavagem do óleo, neutralização, sistemas de vácuo e limpeza industrial (Cecchet, 2007). Dessa forma, identificar as etapas de maior demanda hídrica é fundamental para avaliar oportunidades de redução do consumo e, posteriormente, compreender as características dos efluentes gerados.

4.3 Características dos efluentes gerados no processamento de óleo de soja

Os efluentes gerados por indústrias de processamento de oleaginosas estão diretamente relacionados à matéria-prima utilizada, às etapas existentes na planta e às tecnologias empregadas. No caso das fábricas de processamento e refino de óleo de soja, as principais correntes líquidas podem ser geradas nas etapas de extração, refino, lavagens operacionais e sistemas de utilidades (Cecchet, 2007). Assim, conhecer o processo produtivo é essencial para compreender a composição dos rejeitos líquidos e definir tecnologias de tratamento compatíveis com suas características.

Na indústria de processamento de óleo de soja, as correntes líquidas de maior relevância estão associadas às etapas de extração e refino, porém apresentam composições distintas (Dorsa, 2004). Segundo Dorsa (2004), o efluente da extração tende a apresentar pH próximo da neutralidade, baixo teor de óleo, carga orgânica moderada e menor concentração de sólidos voláteis em suspensão. Já o efluente do refino costuma ser mais crítico, devido aos maiores teores de matéria orgânica, óleos e graxas, sólidos suspensos voláteis e variação de pH. Essa diferença pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores típicos de efluentes dos processos de extração e refino de óleo de soja

Parâmetros	Unidade	Extração	Refino
pH	-	6,6	4,3 – 9,0
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	mgO ₂ /L	350	4500 – 12000
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO)	mgO ₂ /L	185	2000 – 4500
Óleos e graxas (O&G)	mg/L	25	800 – 2000
Sólidos Suspensos Totais (SST)	mg/L	40	450 – 1000
Sólidos Suspensos Fixos (SSF)	mg/L	10	30 – 100
Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)	mg/L	30	420 – 900

Fonte: Adaptado de Dorsa (2004).

Os dados da Tabela 3 evidenciam que os efluentes do refino apresentam carga poluidora superior àqueles gerados na extração, especialmente em relação à DQO, DBO, óleos e graxas e sólidos suspensos. Esse comportamento está associado ao uso de reagentes químicos, à formação de sabões, à presença de óleo emulsionado e às etapas de lavagem, fatores que tornam essa corrente mais complexa e justificam a necessidade de tecnologias de tratamento mais robustas (Dorsa, 2004; Cecchet, 2007).

Além da maior carga poluidora, o refino também pode contribuir com maiores volumes de efluente, principalmente nas etapas que utilizam água de lavagem e sistemas de vácuo. Na extração, a vazão do efluente contaminado tende a ser menor, normalmente inferior a 3,0 m³/h. Em contrapartida, no refino, a água de lavagem pode representar de 10% a 20% da vazão de óleo processado, contendo cerca de 1.000 ppm de matéria graxa; na desodorização, a água excedente do sistema de vácuo pode atingir aproximadamente 72 kg por tonelada de óleo (Dorsa, 2004).

De acordo com Willey (2001 *apud* Cecchet, 2007), as principais fontes de efluentes no refino estão associadas à neutralização, devido à água ácida gerada na quebra dos sabões, e à água do poço barométrico, utilizada na desodorização e em outros sistemas de vácuo. Também existem correntes de menor volume, como lavagem de pisos, lavagem da terra de branqueamento, condensados e drenagens de tanques. Dessa forma, o efluente da refinaria resulta da mistura de diferentes rejeitos líquidos, o que explica sua variabilidade.

Na neutralização, o óleo degomado recebe solução alcalina, geralmente hidróxido de sódio, para remoção dos ácidos graxos livres e de outras impurezas (Dorsa, 2004). Essa reação forma sabões, separados do óleo por centrifugação. Entretanto, parte dessa corrente pode carregar óleo neutro, fosfatídeos, sabões e matéria orgânica, contribuindo para o aumento da carga poluidora do efluente (Mandarino; Hirakuri; Roessing, 2015). Após essa etapa, a lavagem do óleo remove sabões residuais, gerando águas com matéria graxa e alcalinidade elevada.

No branqueamento, o óleo entra em contato com terra clarificante ou outros adsorventes para remoção de pigmentos, peróxidos, metais e sabões residuais. Embora gere principalmente resíduo sólido, a terra de branqueamento usada pode reter quantidade significativa de óleo, devendo ser considerada no gerenciamento de resíduos (Dorsa, 2004). Já na desodorização, realizada sob vácuo e com vapor direto, podem ser arrastados gotículas de óleo e compostos voláteis, contribuindo para a contaminação da água dos sistemas de vácuo (Willey, 2001 *apud* Cecchet, 2007).

De forma geral, os efluentes do processamento de óleo de soja podem apresentar elevada carga orgânica, altos valores de DQO e DBO, óleos e graxas, sólidos suspensos, sólidos dissolvidos e compostos alcalinos (Alther, 2008; Yang, 2007). Essas características indicam que a escolha do tratamento deve considerar a remoção de matéria orgânica, óleos, sólidos e compostos coloidais.

Quando lançados sem tratamento adequado, esses efluentes podem comprometer a qualidade dos corpos receptores. A elevada carga orgânica favorece o consumo de oxigênio dissolvido, enquanto óleos e graxas dificultam a transferência de oxigênio entre a atmosfera e a água. Além disso, sólidos suspensos e compostos coloidais aumentam a turbidez e alteram as condições do ambiente aquático (ANA, 2026). Portanto, a caracterização dos efluentes é fundamental para selecionar tecnologias capazes de atender ao descarte ambiental ou possibilitar o reúso industrial.

4.4 Tecnologias convencionais de tratamento de efluentes de oleaginosas

A seleção do tratamento depende da composição do efluente, da vazão, da variabilidade operacional e da qualidade requerida para descarte ou reúso. Em geral, os sistemas combinam processos físicos, químicos e biológicos, pois cada grupo atua sobre contaminantes específicos (Metcalf; Eddy, 2016).

Os processos físicos estão relacionados à remoção e separação de materiais presentes no efluente, como sólidos grosseiros, areia, partículas suspensas, frações oleosas e graxas. Os processos químicos envolvem a adição de produtos capazes de promover reações ou favorecer a remoção de contaminantes, como coagulantes, floculantes, alcalinizantes, ácidos, cloro, entre outros. Por fim, a etapa biológica utiliza a ação de microrganismos para degradar a matéria orgânica biodegradável, transformando-a em compostos mais simples, biomassa e gases (Metcalf; Eddy, 2016). De forma simplificada, o tratamento é organizado nas seguintes etapas:

- a) **Tratamento Preliminar:** corresponde à etapa inicial do sistema e tem como objetivo proteger os equipamentos posteriores, removendo materiais mais grosseiros. Essa etapa envolve principalmente processos físicos, como gradeamento, peneiramento, remoção de areia e, em alguns casos, equalização da vazão e das características do efluente. A equalização é importante porque permite reduzir variações bruscas de carga, vazão e pH, melhorando a estabilidade das etapas seguintes;
- b) **Tratamento Primário:** consiste na remoção de parte dos sólidos suspensos, óleos e graxas e materiais que podem ser separados por processos físicos ou físico-químicos. Entre as tecnologias mais comuns estão a sedimentação, a flotação, a centrifugação e os processos de coagulação e floculação;
- c) **Tratamento Secundário:** etapa constituída principalmente por processos biológicos, aplicados com o objetivo de reduzir a matéria orgânica biodegradável presente no efluente. Os microrganismos são responsáveis por utilizar a matéria orgânica como fonte de energia, promovendo a redução de parâmetros como DBO e DQO. Entre as tecnologias mais eficientes e comuns, destacam-se as lagoas anaeróbias e aeróbias, os sistemas de lodos ativados e a aeração prolongada;
- d) **Tratamento Terciário/Avançado:** utilizado principalmente como etapa de polimento final, aplicado em casos nos quais são necessários parâmetros mais restritivos e rigorosos para atendimento às legislações ambientais, como no lançamento do efluente em corpo hídrico, ou quando se deseja implantar um sistema de reúso. Essa etapa pode incluir filtração, carvão ativado, desinfecção e processos por membranas, como nanofiltração, ultrafiltração e osmose reversa.

O tratamento, por causa das características dos efluentes de oleaginosas, geralmente exige a combinação dessas etapas. As fases físico-químicas são importantes para a remoção inicial de óleos e graxas, sólidos suspensos e partículas coloidais, enquanto a etapa biológica contribui para a degradação da matéria orgânica biodegradável (Metcalf; Eddy, 2016).

Nos efluentes da extração, sistemas aeróbios, como lodos ativados e aeração prolongada, podem apresentar bom desempenho devido à maior presença de compostos biodegradáveis (Von Sperling, 2012; Dorsa, 2004 *apud* Cecchet, 2007). Já o efluente do refino tende a exigir maior atenção, pois contém óleos livres e emulsificados, sólidos de baixa sedimentabilidade e elevada carga orgânica. Nesse caso, a flotação por ar dissolvido (FAD), associada à coagulação e à

floculação, é uma das tecnologias mais utilizadas, podendo atingir remoções de até 95% de DBO e reduzir óleos e graxas para valores inferiores a 50 mg/L (Matiolo, 2003; Dorsa, 2004).

Dessa forma, em indústrias de processamento de óleo de soja, o tratamento deve priorizar a corrente da refinaria, por sua maior criticidade e vazão. O uso exclusivo de lagoas aeradas pode não ser suficiente, pois óleos, graxas e compostos coloidais dificultam a transferência de oxigênio e prejudicam a eficiência biológica (Dorsa, 2004). Assim, o tratamento físico-químico torna-se uma etapa fundamental para reduzir a carga inicial e preparar o efluente para processos posteriores de tratamento ou reúso.

Além da eficiência técnica e do custo-benefício, a escolha do tratamento deve considerar as exigências ambientais aplicáveis. No Brasil, a Resolução CONAMA nº 430/2011 estabelece condições e padrões para lançamento de efluentes, enquanto a Resolução CONAMA nº 357/2005 define a classificação dos corpos d'água e seus usos predominantes (Brasil, 2006; Brasil, 2011). Portanto, a tecnologia adotada deve considerar não apenas a composição do efluente, mas também o destino da água tratada, seja para lançamento, fertirrigação ou reúso industrial.

4.5 Reúso de água industrial

O reúso de água industrial consiste no aproveitamento de efluentes, tratados ou não, para atender demandas da própria unidade industrial ou de outros usos compatíveis com sua qualidade (Mierzwa; Hespanhol, 2005). Essa prática pode contribuir para o controle da poluição, a redução da vazão de efluentes descartados e a diminuição da captação de água de fontes naturais, como rios, represas e poços (Mancuso, 1988). Em setores com elevado consumo hídrico, como o agronegócio, sua implantação também pode trazer benefícios econômicos, ao reduzir custos associados à captação e ao tratamento de água bruta, ao descarte de efluentes e à vulnerabilidade operacional em períodos de escassez hídrica (CNI, 2020).

4.5.1 Conceito e principais aplicações de reúso

O termo reúso de água pode apresentar diferentes nomenclaturas e classificações conforme a referência adotada. De forma geral, Mierzwa e Hespanhol (2005) definem o reúso como o uso de efluentes, tratados ou não, para fins benéficos, como irrigação, aplicações industriais e usos urbanos não potáveis. De modo complementar, a Resolução CNRH nº 54/2005 considera o reúso uma prática capaz de reduzir a descarga de poluentes em corpos receptores, conservar recursos

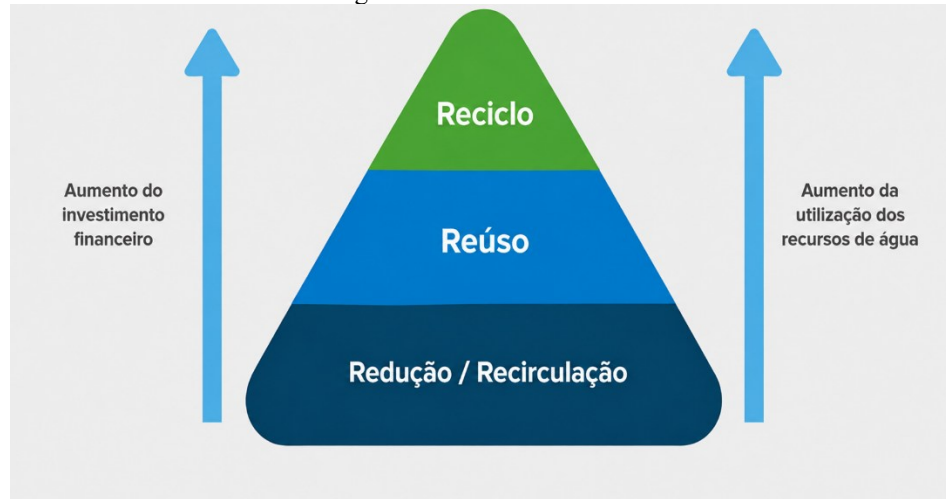
hídricos e contribuir para a proteção ambiental. A resolução também diferencia conceitos importantes, como água residuária, reúso de água, água de reúso e reúso direto, sendo este último entendido como o uso planejado da água de reúso sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos (Brasil, 2005). Essa distinção é relevante porque evidencia que o reúso deve ser planejado de acordo com a qualidade da água e a finalidade pretendida.

No setor industrial, a Confederação Nacional da Indústria e a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo diferenciam o reúso macroexterno e o macrointerno. O reúso macroexterno ocorre quando a água reutilizada é proveniente de fontes externas à indústria, como estações municipais de tratamento de esgoto ou efluentes tratados de outras unidades. Já o reúso macrointerno ocorre quando a própria indústria reaproveita o efluente gerado em suas atividades, com ou sem tratamento prévio (CNI; FIESP, 2017).

O reúso macrointerno pode ocorrer em cascata ou por meio do reaproveitamento de efluente tratado. No reúso em cascata, o efluente de um processo é utilizado em uma etapa posterior, geralmente com menor exigência de qualidade, permitindo reduzir simultaneamente o consumo de água e o volume de efluente gerado. Já o reúso de efluente tratado é aplicado quando a água precisa atender a requisitos mais restritivos, como em sistemas de resfriamento, geração de vapor, lavagem de equipamentos ou preparo de soluções químicas (CNI; FIESP, 2017). Dessa forma, a escolha entre essas alternativas depende da compatibilidade entre a qualidade da corrente disponível e os requisitos do processo receptor.

Outra abordagem utilizada na gestão hídrica industrial é a lógica dos “3Rs”, baseada nos conceitos de redução, reúso e reciclo. Segundo a Beverage Industry Environmental Roundtable, essa hierarquia orienta projetos de eficiência hídrica priorizando, inicialmente, a redução do consumo; em seguida, o reúso de correntes com pouca ou nenhuma alteração de qualidade; e, por fim, o reciclo de correntes que exigem tratamento ou acondicionamento adicional (BIER, 2020). Esse entendimento é importante porque demonstra que o reúso não deve ser analisado isoladamente, mas como parte de uma estratégia mais ampla de conservação da água.

Figura 3 – Pirâmide dos 3Rs



Fonte: Adaptado de Nalco Water (2022).

No setor industrial, as aplicações do reúso dependem diretamente da qualidade requerida para cada uso. Segundo Blum (2003), a água de reúso pode ser aplicada em sistemas de resfriamento, alimentação de caldeiras, água de processo, lavagem de pisos e equipamentos, proteção contra incêndios e descargas sanitárias. De forma complementar, Hespanhol (2008) destaca seu uso como agente de resfriamento ou aquecimento, matéria-prima, fluido auxiliar e meio de geração de energia. Essas aplicações demonstram que o potencial de reúso é amplo, porém condicionado ao controle dos parâmetros de qualidade da água.

Em indústrias de processamento de óleo de soja, uma prática comum de reaproveitamento é o retorno de condensado para o sistema de geração de vapor, pois essa corrente tende a apresentar melhor qualidade em comparação a outros efluentes industriais e recuperação operacional mais simples (Nalco Water, 2022). Para sistemas mais amplos de reúso, o efluente tratado pode ser direcionado às torres de resfriamento, devido ao elevado consumo de água desses sistemas. Em situações que exigem maior grau de polimento, essa água também pode ser destinada à alimentação de caldeiras (Blum, 2003; Moreira, 2017; CNI, 2020). Assim, a definição da aplicação mais adequada deve considerar a qualidade do efluente tratado, os riscos operacionais e o nível de tratamento necessário para cada finalidade.

4.5.2 Motivações e benefícios para a indústria

Diante da intensificação da pressão sobre os recursos hídricos e do aumento da demanda por água nos diferentes setores produtivos, alternativas voltadas à redução do consumo e ao

reaproveitamento de efluentes vêm sendo cada vez mais adotadas pelas indústrias. Os principais benefícios do reúso de água industrial incluem a preservação de fontes de água de melhor qualidade, a redução da captação de água bruta, a proteção ambiental e a geração de benefícios econômicos e sociais (Hespanhol, 2008; CNI, 2020). Além disso, o reúso contribui para aumentar a segurança hídrica das unidades industriais, principalmente em regiões sujeitas à escassez, restrições de captação ou maior competição pelo uso da água (ANA, 2026).

Além desses fatores, o custo de captações de água e tarifas de abastecimento tende a aumentar em função da escassez hídrica, como também o custo de descarte do efluente para tratamento externo, como em concessionárias. Dessa forma, a água de reúso pode se tornar uma alternativa economicamente atrativa, principalmente quando produzida a partir do tratamento do próprio efluente gerado pela indústria (Hespanhol, 2008; CNI, 2020). Entretanto, essa viabilidade deve ser avaliada considerando não apenas o preço direto da água, mas o custo total envolvido em sua utilização, incluindo energia, produtos químicos, manutenção, tratamento, transporte interno e custos associados ao lançamento de efluentes (BIER, 2020).

No setor industrial, o investimento em sistemas de reúso pode ser motivado por diferentes fatores técnicos, econômicos e ambientais. Entre os principais incentivos, destacam-se (CNI, 2020):

- a) reutilizar efluentes tratados em aplicações não potáveis, como lavagens, refrigeração e geração de vapor;
- b) aumentar a segurança hídrica das indústrias durante períodos de escassez;
- c) reduzir custos relacionados à captação e à cobrança pelo uso dos recursos hídricos;
- d) obter benefícios econômicos pelo reaproveitamento dos efluentes gerados no próprio processo industrial;
- e) incentivar o uso de efluentes urbanos tratados em processos industriais, reduzindo o volume lançado pelas Estações de Tratamento de Esgoto;
- f) facilitar o atendimento às exigências técnicas e legais de órgãos ambientais;
- g) conservar os recursos hídricos e promover a sustentabilidade dos empreendimentos;
- h) contribuir para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), principalmente os ODS 6, 9 e 12, relacionados à água, à industrialização sustentável e ao consumo responsável.

4.5.3 Tecnologias para reúso industrial

A definição da tecnologia utilizada em um sistema de reúso industrial depende da qualidade da água esperada para o uso final, da quantidade e da qualidade do efluente gerado, dos critérios de segurança operacional e dos investimentos necessários para implantação e operação, normalmente avaliados em termos de CAPEX e OPEX (Hespanhol, 2008; CNI, 2020). Ou seja, quanto maior for a exigência de qualidade da água desejada para o reaproveitamento, maior tende a ser a complexidade do sistema de tratamento e, conseqüentemente, maior será o investimento.

Aplicações menos restritivas, como lavagem de pisos, limpeza de áreas externas e irrigação podem demandar tratamentos mais simples, como etapas convencionais associadas à filtração comum e processos de desinfecção. Para aplicações em processos mais específicos, como sistemas de utilidades, incluindo torres de resfriamento e caldeiras, por se tratar de equipamentos de maior complexidade, exige-se maior controle da qualidade da água, devido aos riscos de incrustação, corrosão, deposição de sólidos e crescimento microbiológico (Blum, 2003; CNI; FIESP, 2017).

Como a composição do efluente influencia diretamente o arranjo de tratamento, diferentes etapas podem ser combinadas em sistemas de reúso industrial. Os processos físico-químicos, como coagulação, floculação, sedimentação e flotação, são empregados principalmente para remoção de sólidos suspensos, óleos e graxas, além de fração de matéria orgânica. Quando há necessidade de remoção de matéria orgânica biodegradável, podem ser utilizados processos biológicos, como lodos ativados, lagoas aeradas, reatores biológicos com membranas (MBR) e reatores de biofilme com leito móvel (MBBR) (Metcalf; Eddy, 2016; CNI; FIESP, 2017; CNI, 2020).

Em sistemas mais complexos, quando necessário polimento final, as tecnologias mais utilizadas na produção de água de reúso para fins industriais são os processos de separação por membranas devido à capacidade de retenção de partículas e contaminantes em diferentes faixas de tamanho, de acordo com a Confederação Nacional da Indústria (2020). Dentre elas, destacam-se a microfiltração, a ultrafiltração, a nanofiltração e a osmose reversa, que diferem principalmente quanto à faixa de separação (Rubim, 2016 *apud* CNI, 2020).

No caso de efluentes gerados em indústrias de processamento de óleo de soja, a presença relevante de matéria orgânica, óleos e graxas, sólidos suspensos e compostos coloidais torna necessária a adoção de um tratamento físico-químico, como a flotação por ar dissolvido (Dorsa, 2004; Cecchet, 2007). Entretanto, para o desenvolvimento de sistemas de reúso destinados a

aplicações em torres de resfriamento e caldeiras, apenas o tratamento físico-químico pode não ser suficiente, sendo necessária a adoção de etapas complementares de polimento.

Nesse contexto, a integração entre flotação por ar dissolvido, ultrafiltração e osmose reversa apresenta coerência técnica para sistemas de reúso que buscam maior qualidade final da água. A flotação por ar dissolvido contribui para a remoção de óleos, graxas e sólidos suspensos; a ultrafiltração atua como barreira física para redução de turbidez, partículas finas e microrganismos; e a osmose reversa promove a remoção de sais dissolvidos, permitindo a obtenção de água com qualidade mais elevada para aplicações industriais (Dorsa, 2004; Cecchet, 2007; CNI, 2020; Moreira, 2017).

Assim, a qualidade da água de reúso não deve ser avaliada de maneira isolada, mas sim em função da compatibilidade entre o efluente disponível, as tecnologias de tratamento adotadas e os requisitos da aplicação industrial pretendida.

4.5.4 Desafios relacionados a sistemas de reúso industrial

A implantação de sistemas de reúso industrial exige planejamento técnico, pois a água reutilizada pode conter sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, matéria orgânica, óleos e outros contaminantes capazes de comprometer os processos. Assim, um dos principais desafios é definir o tratamento compatível com a qualidade do efluente e a finalidade pretendida, podendo envolver desde filtração e flotação até tecnologias mais complexas, como ultrafiltração e osmose reversa (CNI; FIESP, 2017; CNI, 2020; Matthiensen *et al.*, 2024). Embora ampliem as possibilidades de reaproveitamento, essas tecnologias podem apresentar custos elevados, especialmente quando se exige maior grau de polimento (CNI, 2020; Matthiensen *et al.*, 2024).

Outro desafio está relacionado à disponibilidade de estudos específicos para cada setor produtivo. Apesar do avanço das pesquisas, ainda existem lacunas quanto aos critérios de qualidade, à segurança operacional e à viabilidade técnica em diferentes aplicações industriais (Matthiensen *et al.*, 2024). Dessa forma, o reúso deve ser analisado como uma estratégia integrada, considerando qualidade da água, riscos ao processo, custos e requisitos ambientais.

No Brasil, a ausência de legislação federal específica para reúso industrial também gera incertezas. A Lei nº 9.433/1997 estabelece princípios gerais para a gestão dos recursos hídricos, mas não define padrões para reúso industrial (Brasil, 1997). Já a Resolução CNRH nº 54/2005 apresenta diretrizes gerais para o reúso direto não potável, incluindo fins industriais, porém sem

limites detalhados de qualidade para cada aplicação (Brasil, 2006). Quando há descarte em corpos receptores, devem ser atendidas as Resoluções CONAMA nº 357/2005 e nº 430/2011, relacionadas à classificação dos corpos d'água e aos padrões de lançamento de efluentes (Brasil, 2006; Brasil, 2011). Esse cenário demonstra que a implantação do reúso ainda depende de análises caso a caso.

Nas indústrias de processamento de óleo de soja, esses desafios são intensificados pelas características do efluente, principalmente no refino. A presença de elevada carga orgânica, óleos e graxas, sólidos suspensos e compostos coloidais exige sistemas bem projetados, sobretudo quando a água de reúso é destinada a torres de resfriamento ou caldeiras. Além do investimento inicial, devem ser considerados custos de operação, limpezas, manutenção, mão de obra especializada e monitoramento de parâmetros como pH, DQO, SST e O&G (Dorsa, 2004; Cecchet, 2007; Moreira, 2017). Assim, a viabilidade do reúso deve considerar retorno financeiro, segurança hídrica, redução da captação de água e estabilidade operacional da indústria.

4.6 Critérios de qualidade da água de reúso para aplicações industriais

Devido ao seu elevado calor específico, a água é amplamente utilizada em processos industriais, principalmente como fluido de troca térmica em sistemas de resfriamento, aquecimento e geração de vapor. Além disso, por dissolver diferentes substâncias, pode carregar sais, gases, sólidos e contaminantes que influenciam diretamente sua qualidade e aplicação nos processos industriais (CNI; FIESP, 2017; Nalco Water, 2018).

A captação de água para uso industrial pode ocorrer a partir de fontes superficiais ou subterrâneas. As águas superficiais, provenientes de rios, lagos e represas, tendem a apresentar maior presença de sólidos suspensos e variação de qualidade, principalmente em função de chuvas e sazonalidade. Já as águas subterrâneas, captadas por poços, costumam ser mais constantes, porém podem conter maiores concentrações de sólidos dissolvidos, como bicarbonatos, cálcio, magnésio, sílica, cloretos, sulfatos e sódio (CNI; FIESP, 2017; Metcalf; Eddy, 2016; Nalco Water, 2022).

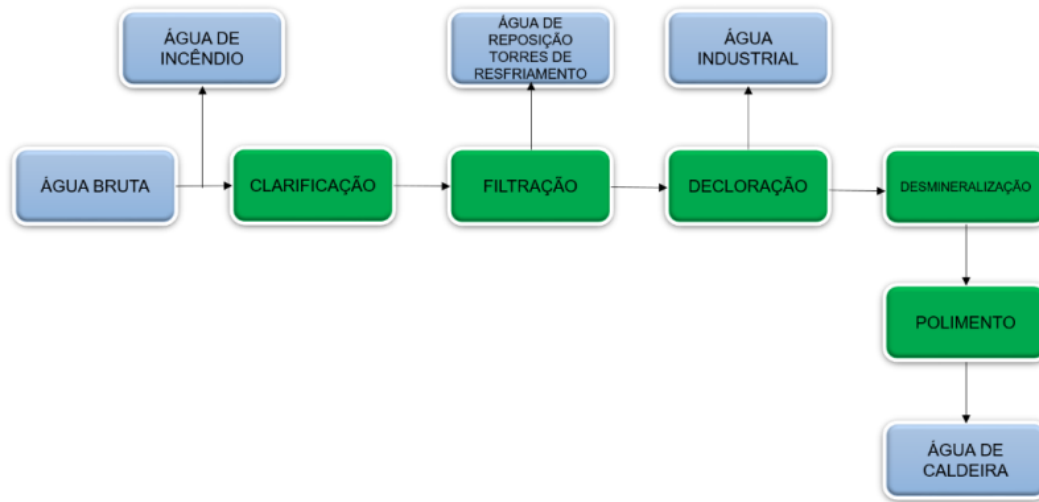
Os sólidos dissolvidos correspondem às substâncias solubilizadas na água, principalmente sais e minerais, influenciando parâmetros como condutividade, dureza, alcalinidade e sólidos dissolvidos totais; em concentrações elevadas, podem favorecer incrustação e corrosão. Já os sólidos suspensos são partículas não dissolvidas, como matéria orgânica, produtos de corrosão, lodos biológicos e outros materiais particulados, podendo causar turbidez, deposição e obstrução de equipamentos (Nalco Water, 2018, 2022).

No tratamento de água industrial, os principais desafios estão relacionados à incrustação, corrosão, deposição e crescimento microbiológico, pois esses problemas podem reduzir a eficiência térmica, elevar custos operacionais, comprometer equipamentos e diminuir a confiabilidade do sistema (Nalco Water, 2022). De forma geral, esses processos podem ser definidos como:

- a) **incrustação:** ocorre quando sais minerais dissolvidos precipitam e formam depósitos rígidos em tubulações, equipamentos e superfícies de troca térmica. Pode ser favorecida por elevada concentração de minerais, aumento de pH e temperatura, baixa velocidade da água e presença de sólidos suspensos;
- b) **corrosão:** corresponde à deterioração das superfícies metálicas em contato com a água, podendo ocorrer de forma localizada ou generalizada. Entre os fatores que favorecem esse processo estão pH inadequado, oxigênio dissolvido, sais, depósitos e atividade microbiológica. Suas consequências incluem perda de material, formação de produtos de corrosão, vazamentos e redução da vida útil dos ativos;
- c) **deposição:** está associada ao acúmulo de sólidos suspensos, matéria orgânica, produtos de corrosão e outras impurezas nas superfícies internas dos sistemas. Esse acúmulo pode reduzir a transferência de calor, prejudicar o escoamento da água e favorecer corrosão localizada;
- d) **crescimento microbiológico:** ocorre pela presença e multiplicação de bactérias, algas e fungos, podendo formar biofilmes, intensificar depósitos e favorecer a corrosão microbiologicamente influenciada. O controle envolve monitoramento da qualidade da água e aplicação de biocidas oxidantes, não oxidantes e biodispersantes, quando necessário.

Dessa forma, destaca-se a importância das Estações de Tratamento de Água (ETA) para adequar a água bruta às diferentes aplicações industriais. A Figura 4 apresenta um exemplo de rota de tratamento, indicando que usos menos restritivos podem utilizar água com menor nível de tratamento, enquanto aplicações mais exigentes, como alimentação de caldeiras, requerem etapas adicionais (Moreira, 2017).

Figura 4 – Exemplo de rota de tratamento de água para diferentes usos industriais



Fonte: Moreira, 2017

Assim, as iniciativas de reúso de água voltadas para alimentação de torres de resfriamento e caldeiras também devem atender aos mesmos critérios de qualidade exigidos para a água normalmente utilizada nesses sistemas. Entretanto, por ser proveniente do tratamento de efluentes, essa água provavelmente apresentará maior concentração de contaminantes residuais, exigindo monitoramento mais rigoroso e etapas mais complexas de polimento final (MOREIRA, 2017).

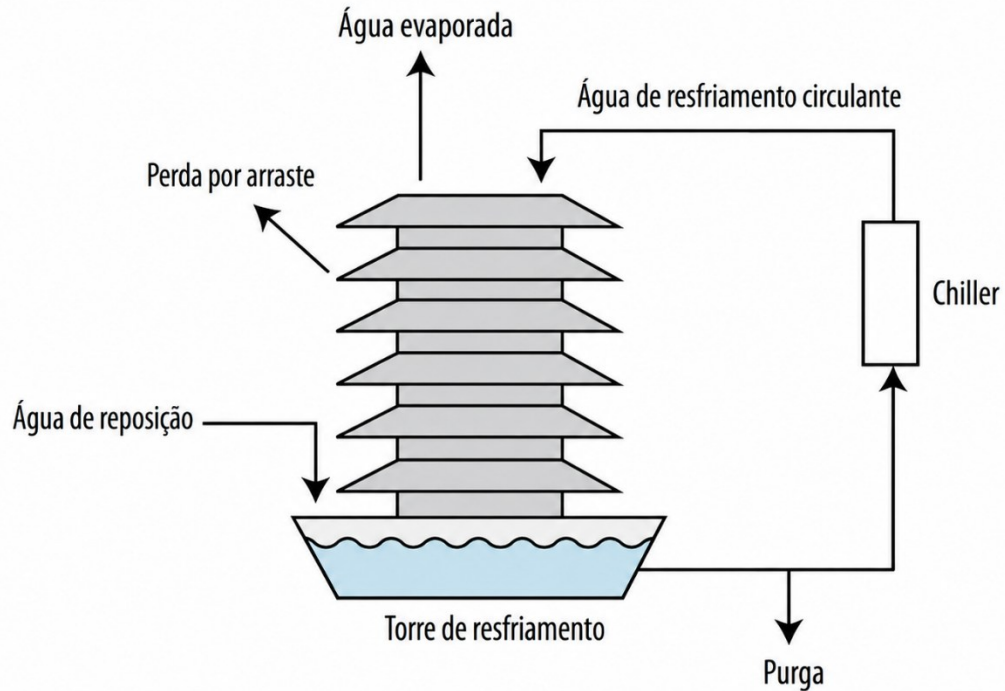
4.6.1 Torres de resfriamento

Os sistemas de torres de resfriamento são classificados, em geral, como sistemas evaporativos com recirculação aberta, sendo amplamente utilizados na indústria para remover calor de equipamentos e correntes de processo de forma eficiente (Nalco Water, 2022; Mancuso; Santos, 2003). Nesses sistemas, a água aquecida em trocadores de calor é direcionada à torre, entra em contato com o ar ambiente e perde calor principalmente por evaporação, retornando resfriada ao circuito. Entretanto, parte da água é perdida por evaporação, arraste, respingos e purga. A purga é uma descarga intencional utilizada para controlar a concentração de sais, pois, durante a evaporação, apenas a água é removida, enquanto sais e impurezas permanecem no sistema (USEPA, 2012; Mancuso; Santos, 2003).

A água de reposição, também denominada *make-up*, corresponde à vazão adicionada ao sistema para compensar essas perdas. Já os ciclos de concentração indicam a relação entre a concentração de sólidos dissolvidos na água recirculante ou na purga e a concentração desses

mesmos sólidos na água de reposição (Nalco Water, 2022; Mancuso; Santos, 2003). Esse controle é importante porque influencia diretamente a frequência de purga, o consumo de água e os riscos operacionais da torre. A Figura 5 apresenta, de forma simplificada, o funcionamento de uma torre de resfriamento.

Figura 5 – Exemplo de funcionamento de uma torre de resfriamento



Fonte: Adaptado de USEPA (2012, tradução nossa).

Nas torres de resfriamento, os principais problemas operacionais estão associados à incrustação, corrosão, deposição e crescimento microbológico. A incrustação ocorre pela precipitação de sais, como dureza, alcalinidade e sílica, formando depósitos nas superfícies de troca térmica. A corrosão pode ser favorecida por pH inadequado, cloretos, sólidos dissolvidos, oxigênio dissolvido e agentes oxidantes. Além disso, a presença de matéria orgânica, nutrientes, temperatura adequada e exposição à luz pode intensificar o crescimento microbológico, com formação de biofilmes e lodo. Esses fatores reduzem a eficiência térmica, dificultam o escoamento e podem favorecer corrosão localizada (CNI; FIESP, 2017; Mancuso; Santos, 2003; Cecchet, 2007). A Tabela 4 resume os principais parâmetros de controle.

Tabela 4 – Principais parâmetros de controle em torres de resfriamento e sua relação com problemas operacionais

Parâmetro	Principal relação no sistema	Possíveis problemas associados
pH	Influencia equilíbrio químico da água e eficiência dos produtos químicos	Corrosão em pH baixo; incrustação em pH
Condutividade	Indica concentração de sais dissolvidos e ciclos de concentração	Aumento do risco de corrosão e necessidade de purga
Sólidos dissolvidos totais (SDT)	Representam sais e minerais concentrados no sistema	Corrosão, incrustação e aumento da condutividade
Dureza	Relacionada principalmente a cálcio e magnésio	Formação de incrustações
Alcalinidade	Relacionada ao equilíbrio carbonato/bicarbonato	Formação de carbonatos e alteração do pH
Sílica	Pode precipitar em determinadas condições	Depósitos de difícil remoção
Cloretos	Aumentam o potencial corrosivo da água	Corrosão localizada e corrosão sob tensão
Sólidos suspensos	Partículas não dissolvidas presentes na água	Deposição, obstrução e corrosão sob depósito
Turbidez	Indica presença de partículas finas	Deposição e redução da eficiência de troca térmica
Ferro	Pode indicar corrosão ou contaminação	Depósitos e incrustações associadas a produtos de corrosão
Matéria orgânica (DQO)	Fonte de nutrientes para microrganismos	Biofilme, lodo microbiológico e biocontaminação
Nitrogênio e fósforo	Nutrientes para crescimento microbiológico	Formação de biofilme e lodo
Cloro residual	Controle microbiológico	Excesso pode aumentar corrosão; falta pode favorecer biofilme

Fonte: Elaborado pela autora, com base em CNI e FIESP (2017), Mancuso e Santos (2003) e Cecchet (2007).

Assim, o bom desempenho das torres depende do acompanhamento rotineiro da água, especialmente de parâmetros como pH, condutividade, sólidos suspensos, turbidez, DQO e cloretos. Esse monitoramento auxilia no controle dos ciclos de concentração, da purga e da reposição, contribuindo para maior vida útil dos equipamentos e menor custo de manutenção (CNI; FIESP, 2017). Quando a água de reposição é proveniente de reúso, esse controle deve ser ainda mais rigoroso, pois efluentes tratados podem conter maiores concentrações de matéria orgânica, sólidos suspensos e microrganismos (Mancuso; Santos, 2003; Cecchet, 2007).

Como referência, a Tabela 5 apresenta valores orientativos para água de reposição em sistemas de resfriamento com recirculação. Esses limites devem ser interpretados conforme o tipo de torre, materiais dos equipamentos, programa químico adotado, ciclos de concentração,

qualidade da água de reposição e recomendações do fornecedor (Cecchet, 2007; Mancuso; Santos, 2003).

Tabela 5 – Exemplos de padrões de qualidade recomendados para águas de reposição em sistemas de resfriamento com recirculação

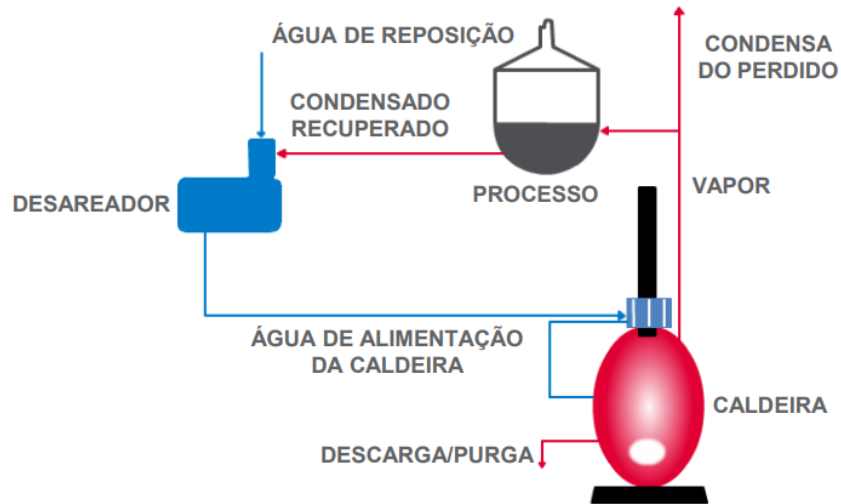
Parâmetro	Unidade	Padrão (limite máximo)
Cloretos	mg/L Cl ⁻	500
SDT	mg/L	500
Dureza	mg/L CaCO ₃	650
Alcalinidade	mg/L CaCO ₃	350
pH	un.	6,0 – 9,0
DQO	mg/L O ₂	75
SST	mg/L	100
Turbidez	UNT	50
DBO	mg/L O ₂	25
Nitrogênio Amonical	mg/L N	1,0
Fosfatos	mg/L PO ₄	4
Sílica	mg/L SiO ₂	50
Alumínio	mg/L Al	0,1
Ferro	mg/L Fe	0,5
Manganês	mg/L Mn	0,5
Cálcio	mg/L Ca	50
Magnésio	mg/L Mg	0,5
Bicarbonatos	mg/L CaCO ₃	24
Sulfatos	mg/L SO ₄	200

Fonte: Elaborado pela autora, com base em Cecchet (2007) e Mancuso e Santos (2003).

4.6.2 Caldeiras

As caldeiras são equipamentos utilizados para transformar água líquida em vapor por meio da transferência de calor gerada pela queima de combustíveis, sendo empregadas em processos de aquecimento, geração de vapor e suporte à produção industrial (CNI; FIESP, 2017; Nalco Water, 2022). Após o uso no processo, parte do vapor pode retornar como condensado, reduzindo a necessidade de água nova de reposição. Como o vapor gerado não carrega a maior parte dos sais dissolvidos, esses compostos permanecem na caldeira e se concentram ao longo da operação, exigindo purga para controle dos sólidos dissolvidos totais (CNI; FIESP, 2017; Nalco Water, 2022). A Figura 6 representa um esquema simplificado do sistema.

Figura 6 – Esquema simples de um sistema de caldeira



Fonte: NALCO WATER (2022).

A qualidade da água de alimentação é essencial para a segurança e a eficiência das caldeiras, pois impurezas podem causar incrustação, corrosão, deposição, arraste e contaminação do vapor (CNI; FIESP, 2017; Nalco Water, 2022). A dureza, associada aos íons cálcio e magnésio, favorece incrustações nas superfícies aquecidas, reduzindo a transferência de calor e aumentando o risco de superaquecimento dos tubos. Em caldeiras de maior pressão, pequenas concentrações de ferro, cobre e sílica também podem formar depósitos em pontos críticos, tornando o controle da água mais rigoroso conforme aumenta a pressão de operação (Nalco Water, 2022; Moreira, 2017).

Além da dureza e da sílica, devem ser monitorados parâmetros como pH, alcalinidade, condutividade, oxigênio dissolvido, sólidos dissolvidos totais, ferro, matéria orgânica e óleos. O pH e a alcalinidade influenciam a corrosão e a formação de depósitos; a condutividade e os sólidos dissolvidos auxiliam no controle da purga; o oxigênio dissolvido favorece corrosão nas linhas de alimentação, no desaerador, no economizador e na caldeira; e a presença de matéria orgânica ou óleo pode causar espuma, arraste e instabilidade na qualidade do vapor (CNI; FIESP, 2017).

Dessa forma, o uso de água de reúso em caldeiras exige qualidade mais restritiva que outras aplicações industriais, devido aos riscos operacionais envolvidos. Para essa finalidade, o tratamento deve reduzir sólidos suspensos, matéria orgânica, dureza, sílica, sais dissolvidos e demais contaminantes que comprometam a geração de vapor. Tecnologias como ultrafiltração, osmose reversa e tratamento químico complementar tornam-se importantes para o polimento final e para o atendimento aos padrões exigidos (CNI; FIESP, 2017; Moreira, 2017). A Tabela 6

apresenta valores de referência para água de alimentação de caldeiras em diferentes faixas de pressão.

Tabela 6 – Parâmetros de qualidade da água recomendados pela ASME para consumo em caldeiras à vapor em função da classe de pressão

Água de alimentação da caldeira						
Pressão do Tambor (psi)	Ferro (ppm Fe)	Cobre (ppm Cu)	Dureza Total (ppm CaCO ₃)	Sílica (ppm SiO ₂)	Alcalinidade Total (ppm CaCO ₃)	Condutividade (μS/cm)
0 – 300	0,1	0,05	0,3	150	700	7000
301 – 450	0,05	0,025	0,3	90	600	6000
451 – 600	0,03	0,02	0,2	40	500	5000
601 – 750	0,025	0,02	0,2	30	400	4000
751 – 900	0,02	0,015	0,1	20	300	3000
901 – 1000	0,02	0,015	0,05	8	200	2000
1001 – 1500	0,01	0,01	0	2	0	150
1501 - 2000	0,01	0,01	0	1	0	100

Fonte: Boilers for Power and Process, 2009, p.155.

4.7 Sistema de flotação por ar dissolvido

A flotação por ar dissolvido (FAD) é uma tecnologia de tratamento físico-químico utilizada para remoção de óleos e graxas, sólidos suspensos, partículas coloidais, turbidez e parte da matéria orgânica presente em efluentes industriais. Sua aplicação é especialmente relevante quando as partículas apresentam baixa velocidade de sedimentação, baixa densidade ou dimensões que dificultam a remoção por decantação convencional (Matiolo, 2003; Edzwald, 2010; Metcalf; Eddy, 2016).

No contexto da indústria de processamento de óleo de soja, a FAD é aplicada principalmente ao tratamento de efluentes do refino, que podem conter óleos livres e emulsificados, sabões, fosfatídeos, sólidos suspensos, coloides, elevada carga orgânica e variações de pH (Dorsa, 2004; Cecchet, 2007). Essas características justificam a associação da FAD às etapas de coagulação e floculação, responsáveis pela desestabilização das emulsões e formação de flocos capazes de interagir com as microbolhas. Segundo Dorsa (2004), essa combinação pode promover remoção de DBO₅ superior a 95% e reduzir óleos e graxas para valores inferiores a 50 mg L⁻¹, desde que as condições químicas e operacionais sejam adequadamente definidas.

4.7.1 Coagulação

A coagulação é uma etapa físico-química destinada à desestabilização de partículas coloidais e emulsões presentes no efluente, favorecendo sua aglomeração e posterior remoção (Metcalf & Eddy, 2016). Os coloides apresentam pequenas dimensões e permanecem dispersos no meio líquido devido às forças de repulsão entre cargas superficiais, geralmente negativas, o que dificulta sua sedimentação natural (Edzwald, 2010; Metcalf; Eddy, 2016).

Nos efluentes de refino de óleo vegetal, as gotículas de óleo emulsificado podem se comportar de forma semelhante às partículas coloidais. Cecchet (2007) relata que essas gotículas podem apresentar carga superficial negativa em ampla faixa de pH, dificultando sua coalescência. Dessa forma, a adição de coagulantes, normalmente de carga positiva, reduz as forças eletrostáticas, permitindo a aproximação das partículas e a formação de pequenos agregados.

Entre os coagulantes mais utilizados estão sulfato de alumínio, cloreto férrico e policloreto de alumínio (PAC), além de coagulantes orgânicos, como poliaminas, poliDADMAC e taninos. A escolha deve considerar as características do efluente, o tipo de contaminante, a faixa de pH, a geração de lodo, o custo do produto e a eficiência obtida (Cecchet, 2007; Metcalf; Eddy, 2016). Nesse processo, o pH é um parâmetro fundamental, pois interfere na carga das partículas, na forma química do coagulante e na formação dos compostos responsáveis pela desestabilização.

A dosagem do coagulante deve ser suficiente para desestabilizar os contaminantes, sem provocar excesso de sólidos químicos, reversão de carga ou aumento desnecessário do lodo gerado. Por esse motivo, a seleção do produto e de sua dosagem deve ser apoiada por ensaios de tratabilidade, como o Jar Test, retratado na Figura 7, que permite avaliar diferentes condições de pH, mistura, tipo e concentração de produtos químicos. Parâmetros como turbidez, cor, DQO, óleos e graxas e sólidos suspensos podem ser utilizados para comparar os resultados e definir a condição mais adequada (Cecchet, 2007).

Figura 7 – Equipamento Jar Test compacto analógico 3 provas modelo JTC Milan



Fonte: Elaborada pela autora.

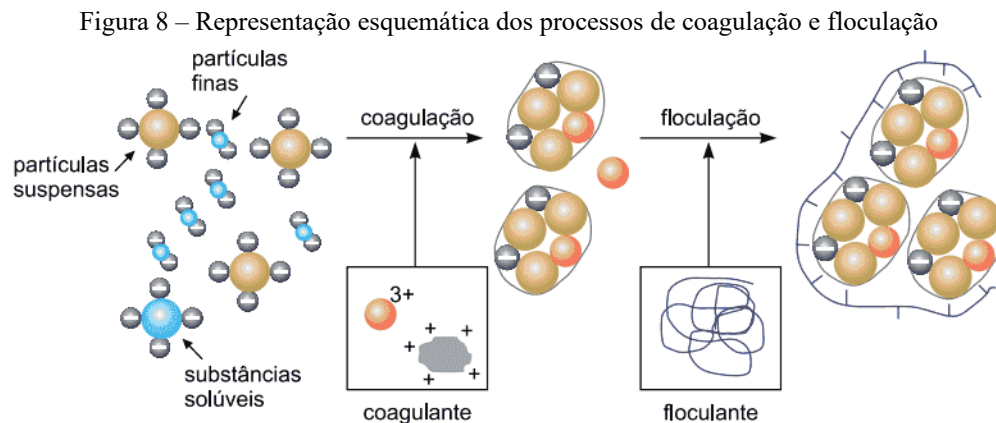
4.7.2 Floculação

A floculação ocorre após a coagulação e tem como finalidade promover o contato entre partículas desestabilizadas, favorecendo a formação de flocos maiores e mais resistentes. Para isso, podem ser adicionados polímeros de elevado peso molecular, também chamados de polieletrólitos ou floculantes, que atuam na formação de pontes entre partículas. Nessa etapa, o efluente é submetido à mistura lenta e controlada, suficiente para promover colisões entre agregados, mas sem romper os flocos formados (Cecchet, 2007; Metcalf; Eddy, 2016).

Os polímeros podem ser classificados como aniônicos, catiônicos ou não iônicos, conforme a carga predominante em sua estrutura. A escolha depende da carga das partículas, do coagulante utilizado, das condições do meio e das características desejadas para os flocos. Em sistemas de FAD, os flocos não precisam apresentar elevada velocidade de sedimentação, mas devem possuir tamanho e resistência adequados para aderir às microbolhas de ar e ascender à superfície (Edzwald, 2010).

A eficiência da floculação depende do tempo de contato, do gradiente de velocidade, da concentração de sólidos, do pH, da temperatura, do tipo de coagulante e da dosagem de polímero. O preparo do polímero também influencia o desempenho do processo, pois produtos em pó precisam ser dispersos e maturados antes da aplicação, enquanto produtos em emulsão exigem diluição adequada. Dosagens insuficientes podem formar flocos pequenos, enquanto dosagens

excessivas podem aumentar a turbidez residual e o consumo de produto. Dessa forma, a seleção do polímero deve ser realizada experimentalmente, considerando sua interação com o coagulante e com o efluente avaliado.



Fonte: Adaptado de Kurita ([s.d.]).

4.7.3 Flotação

A flotação pode ser definida por um processo de separação sólido-líquido no qual bolhas de gás são utilizadas para transportar partículas, flocos e gotículas de óleo até a superfície do líquido. Na flotação por ar dissolvido, uma corrente de água é colocada em contato com ar sob pressão dentro de uma câmara de saturação. Nessas condições, parte do ar se dissolve na água. Quando a corrente pressurizada é liberada no flotador por meio de uma válvula ou dispositivo de depressurização, a redução repentina da pressão diminui a solubilidade do ar e provoca a formação de grande quantidade de microbolhas (Cecchet, 2007; Edzwald, 2010; Metcalf; Eddy, 2016).

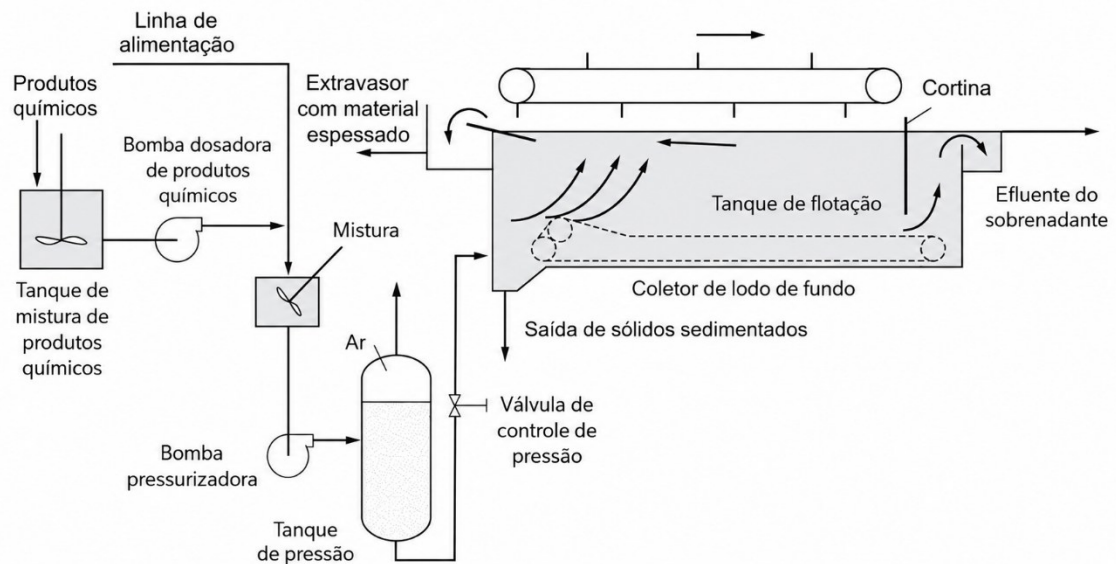
Em instalações industriais, normalmente uma parcela do efluente já clarificado é recirculada para a câmara de saturação, onde recebe o ar e é mantida sob pressão. Em seguida, essa água saturada retorna à entrada do flotador e se mistura ao efluente previamente coagulado e floculado. Essa configuração evita que os flocos passem diretamente pela bomba de pressurização, reduzindo sua ruptura e permitindo controlar a quantidade de ar introduzida no sistema por meio da vazão de recirculação (Edzwald, 2010; Metcalf; Eddy, 2016).

Após a depressurização, as microbolhas entram em contato com os flocos e com as gotículas de óleo presentes no efluente. A união pode ocorrer pela colisão e aderência das bolhas à superfície dos contaminantes, pelo aprisionamento das microbolhas no interior dos flocos ou pela formação dos agregados na presença do ar. À medida que as bolhas se fixam, a densidade aparente

do conjunto formado por partículas, flocos e ar torna-se menor que a da água, fazendo com que esse material se desloque para a superfície do equipamento (Cecchet, 2007; Edzwald, 2010).

A superfície do flotador possui um sistema de raspagem, capaz de retirar e separar a camada de lodo presente, composta por sólidos, óleos, matéria orgânica e resíduos dos produtos químicos utilizados. Esse lodo é removido e encaminhado para tratamento, adensamento ou desaguamento. O efluente clarificado é coletado na região inferior ou intermediária do flotador, enquanto uma parcela pode retornar à câmara de saturação e o restante segue para a próxima etapa do tratamento (Metcalf; Eddy, 2016). A Figura 9 representa o funcionamento do sistema de flotação por ar dissolvido sem reciclagem.

Figura 9 – Esquema de sistemas de flotação por ar dissolvido sem reciclagem



Fonte: Metcalf e Eddy (2016).

A principal diferença entre flotação e sedimentação está no sentido do movimento das partículas. Na sedimentação, os sólidos se deslocam em direção ao fundo devido à ação da gravidade, sendo favorecidos aqueles com maior densidade e velocidade de queda. Na flotação, o material é transportado para a superfície, o que permite a remoção de óleos, graxas, algas, partículas de baixa densidade e flocos que apresentariam sedimentação lenta. Essa característica pode permitir unidades mais compactas e tempos de separação menores, desde que a coagulação, a floculação e a geração de microbolhas sejam adequadamente controladas (Metcalf; Eddy, 2016).

A eficiência da flotação depende diretamente das características dos flocos formados nas etapas de coagulação e floculação. A importância destas etapas químicas é demonstrada por Hartal *et al.* (2024), que avaliaram o tratamento de efluente de refinaria de óleo vegetal, que apresentava

pH inicial próximo de 4,5, turbidez média de aproximadamente 3.754 NTU e concentração de sólidos suspensos totais de cerca de 16.060 mg L⁻¹, evidenciando elevada presença de material particulado. No estudo, foram analisadas as respostas de remoção de turbidez, DQO e polifenóis, enquanto o pH, a dosagem de cloreto férrico, a dosagem de quitosana e o tempo de agitação foram considerados variáveis de entrada do processo. A condição otimizada foi obtida com pH 6, dosagem de cloreto férrico de 1,6 g L⁻¹, dosagem de quitosana de 13,4 mg L⁻¹ e tempo de agitação de 26 minutos, resultando em remoções de 100% de turbidez, 86% de DQO e 90% de polifenóis (Hartal *et al.*, 2024).

Apesar de o estudo não ter foco especificamente na FAD, seus resultados são relevantes para esse processo, visto que a qualidade dos flocos formados antes da flotação determina sua interação com as microbolhas e, conseqüentemente, a eficiência de separação. Além disso, também é demonstrado que o uso de um floculante natural, como a quitosana, pode representar uma alternativa aos polímeros sintéticos, desde que as condições de pH, dosagem e mistura sejam corretamente definidas (Hartal *et al.*, 2024).

Além das condições químicas, o desempenho da FAD é influenciado pela pressão da câmara de saturação, eficiência de dissolução do ar, razão de recirculação, tamanho das microbolhas, relação entre a massa de ar e a massa de sólidos, taxa de aplicação superficial, carga de sólidos e velocidade de remoção do lodo. Esses parâmetros estão relacionados entre si e devem ser ajustados conforme a vazão e as características do efluente, pois o aumento isolado da pressão ou da recirculação não garante necessariamente maior eficiência e pode elevar o consumo de energia do sistema (Cecchet, 2007; Metcalf; Eddy, 2016).

A relação ar-sólidos, representada por A/S, expressa a quantidade de ar disponibilizada em relação à massa de sólidos presente no efluente. Quando a quantidade de ar é insuficiente, os flocos podem não receber microbolhas suficientes para alcançar a superfície. Em contrapartida, uma quantidade excessiva de ar pode aumentar o consumo energético e a turbulência, sem proporcionar melhoria proporcional na qualidade do efluente tratado. A razão de recirculação também influencia a quantidade de ar introduzida, pois determina o volume de água clarificada que retorna à câmara de saturação (Cecchet, 2007; Metcalf; Eddy, 2016).

Outro parâmetro importante é a taxa de aplicação superficial, definida pela relação entre a vazão tratada e a área horizontal do flotor. Esse parâmetro está relacionado à capacidade da unidade em separar os agregados antes que eles alcancem a saída do equipamento. Taxas muito

elevadas permitem unidades menores, mas podem favorecer o arraste de sólidos para o efluente clarificado, principalmente quando os flocos apresentam baixa velocidade de ascensão ou pouca aderência às microbolhas (Cecchet, 2007).

Nos ensaios conduzidos com efluente bruto de refinaria de óleo de soja, coletado nos tanques de equalização da indústria Diplomata S/A, Cecchet et al. (2010) avaliaram a associação entre coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido em duas condições de tratamento. O efluente estudado correspondia à mistura homogeneizada das correntes provenientes do processo de neutralização do óleo, do condensado do poço barométrico e da lavagem de pisos da unidade industrial. A primeira bateria utilizou o coagulante PE 019 combinado ao polieletrólito aniônico F11, enquanto a segunda empregou o coagulante PC 2700 associado a um polieletrólito não iônico. Em ambas as condições, foram adotadas pressão de saturação de 450 kPa, razão de recirculação de 30% e velocidade ascensional de $1,67 \text{ cm min}^{-1}$. Também foram fixados o tempo de mistura rápida em 1 minuto, com gradiente de velocidade de 150 s^{-1} , e a floculação foi dividida em duas etapas: 10 minutos a 40 s^{-1} e 5 minutos a 20 s^{-1} (CECCHET et al., 2010).

Os resultados apresentados na Tabela 9 demonstram elevada eficiência na remoção dos contaminantes analisados, principalmente na segunda bateria de ensaios. A turbidez foi reduzida de 34.500 para 209 NTU na primeira condição e de 37.667 para 141 NTU na segunda, correspondendo a remoções de 99,4% e 99,6%, respectivamente. Para óleos e graxas, as concentrações diminuíram de 3.660 para 212 mg L^{-1} e de 3.900 para $7,8 \text{ mg L}^{-1}$, com eficiências de 94,2% e 99,8%. A DQO apresentou reduções de 65.528 para 4.128 mg L^{-1} na primeira bateria e de 60.300 para 2.942 mg L^{-1} na segunda, representando remoções de 93,7% e 95,1%. Apesar do elevado desempenho do tratamento, as concentrações residuais de DQO permaneceram superiores ao valor de 75 mg L^{-1} adotado pelos autores como referência para reúso em torres de resfriamento, indicando a necessidade de tratamento complementar (Cecchet *et al.*, 2010). Esses dados podem ser melhor analisados na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 – Caracterização do efluente e eficiências de remoção obtidas por coagulação, floculação e FAD

Variáveis	Efluente Bruto		Efluente Tratado		Remoção (%)	
	1º Bateria	2º Bateria	1º Bateria	2º Bateria	1º Bateria	2º Bateria
Temperatura (°C)	13,0 – 17,5	13,2 – 16,2	-	-	-	-
pH	~8,5	~8,5	~4,5	~4,5	-	-
Turbidez (NTU)	34500	37667	209	141	99,4	99,6
SST (mg/L)	2777	220	733	155	73,6	92,9
SSV (mg/L)	2640	1970	353	36	86,6	98,2
O&G (mg/L)	3660	3900	212	7,8	94,2	99,8
DQO (mg/L)	65528	60300	4128	2942	93,7	95,1

Fonte: Adaptado de Cecchet *et al.* (2010, p. 85).

Dessa forma, no sistema integrado abordado neste trabalho, a FAD atua na redução inicial de óleos e graxas, turbidez, sólidos suspensos, coloides e parte da carga orgânica. Entretanto, para atingir padrões compatíveis com reúso em torres de resfriamento e caldeiras, torna-se necessária a complementação por tecnologias de polimento, como ultrafiltração e osmose reversa.

4.8 Sistemas de separação por membranas

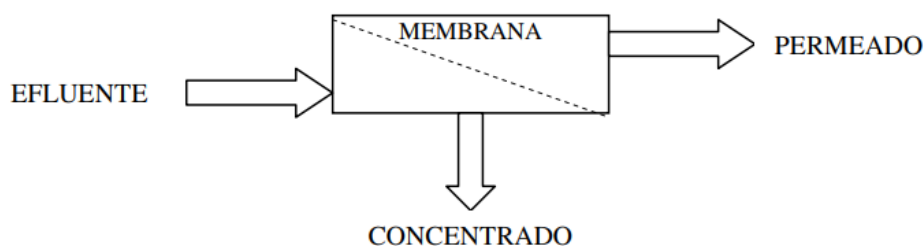
Os sistemas de reúso industrial destinados ao aproveitamento de água em aplicações mais restritivas, como torres de resfriamento e caldeiras, geralmente necessitam de etapas de polimento capazes de produzir uma água com qualidade compatível com os requisitos do processo. Como observado no tópico anterior, o tratamento físico-químico apresenta elevada eficiência na remoção de óleos e graxas, sólidos suspensos, coloides e parte da matéria orgânica, mas possui capacidade limitada para remover partículas muito finas e substâncias dissolvidas. Nesse contexto, os processos de separação por membranas são empregados no tratamento avançado de efluentes devido à sua capacidade de reter contaminantes em diferentes faixas de tamanho e produzir água com qualidade mais elevada para reúso industrial (CNI, 2020; Garnier *et al.*, 2023). Os processos de membranas acionados por pressão são estudados como alternativas para o condicionamento de águas e efluentes da indústria alimentícia, especialmente quando integrados a etapas anteriores de tratamento

Nos processos de separação por membranas, a membrana pode ser definida como uma barreira seletiva que separa duas fases e permite a passagem preferencial de determinados componentes, enquanto restringe total ou parcialmente outros constituintes presentes na corrente de alimentação (Habert; Borges; Nóbrega, 2006). Nos processos aplicados ao tratamento de água, a diferença de pressão entre os lados da membrana atua como força motriz para promover a

passagem da água através da barreira seletiva. Dependendo das características da membrana e do processo utilizado, podem ser retidos sólidos suspensos, partículas coloidais, microrganismos, macromoléculas, compostos orgânicos, íons e sais dissolvidos (Metcalf; Eddy, 2016; Baker, 2023).

A corrente que entra no sistema é denominada alimentação e, após o contato com a membrana, é dividida em duas correntes principais, conforme a Figura 10. A parcela que atravessa a membrana é chamada de permeado e apresenta menor concentração dos contaminantes retidos. A corrente que permanece no lado da alimentação recebe o nome de concentrado ou rejeito, pois apresenta maior concentração dos constituintes rejeitados pela membrana (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Metcalf; Eddy, 2016). A corrente de rejeito não é necessariamente descartada, podendo ser recirculada ou ter outra destinação.

Figura 10 – Princípio operacional das membranas semipermeáveis



Fonte: Adaptado de Mancuso e Santos (2003).

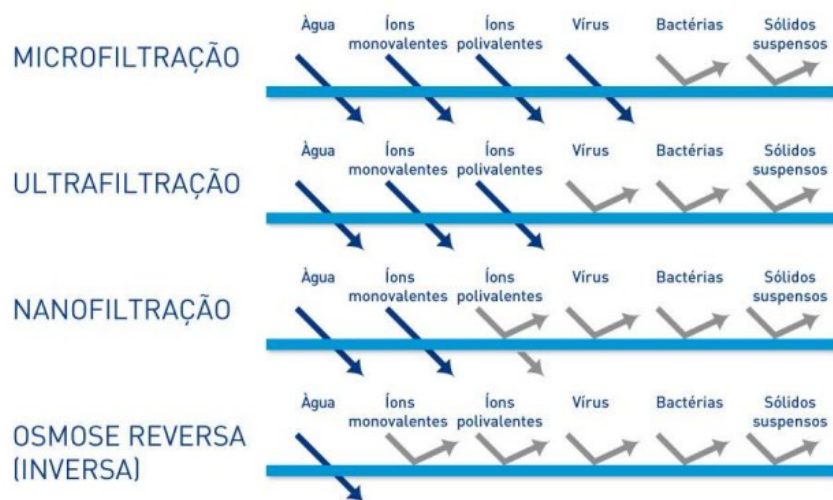
As principais tecnologias de separação por membranas utilizadas no tratamento de águas e efluentes são a microfiltração (MF), a ultrafiltração (UF), a nanofiltração (NF) e a osmose reversa (OR). A diferença entre esses processos está relacionada principalmente à faixa de separação, às características da membrana, ao mecanismo de retenção dos contaminantes e à pressão necessária para a operação (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Baker, 2023). A microfiltração e a ultrafiltração utilizam membranas porosas e operam, geralmente, com menores pressões, sendo a separação determinada principalmente pelo tamanho das partículas. A nanofiltração e a osmose reversa apresentam maior seletividade e demandam pressões mais elevadas para promover a passagem da água através da membrana (Rubim, 2016 *apud* CNI, 2020; Baker, 2023).

A microfiltração é aplicada principalmente na remoção de sólidos suspensos, partículas coloidais e bactérias. A ultrafiltração apresenta menor tamanho de poro e pode reter partículas mais finas, macromoléculas, coloides, bactérias e parte dos vírus presentes na alimentação. A nanofiltração permite a retenção de moléculas orgânicas de menor massa molar e parte dos sais

dissolvidos, apresentando maior rejeição de íons multivalentes, como cálcio e magnésio. A osmose reversa, por sua vez, é o processo de maior seletividade entre os apresentados, sendo capaz de remover grande parte dos íons, sais dissolvidos e compostos orgânicos de baixa massa molar, possibilitando a produção de água com maior grau de pureza (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; CNI, 2020; Baker, 2023).

De forma geral, quanto maior for o grau de separação exigido, maior tende a ser a complexidade do sistema, bem como a necessidade de controle operacional, consumo de energia e custos de implantação e manutenção. Entretanto, a escolha da tecnologia não deve ser baseada apenas no nível de retenção da membrana, mas também nas características do efluente de alimentação, na qualidade exigida para o permeado, na vazão a ser tratada e na recuperação de água pretendida (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Metcalf; Eddy, 2016). A Figura 11 apresenta uma comparação entre os principais processos e os constituintes que podem ser retidos em cada faixa de separação.

Figura 11 – Tipos de sistemas de membranas e suas características



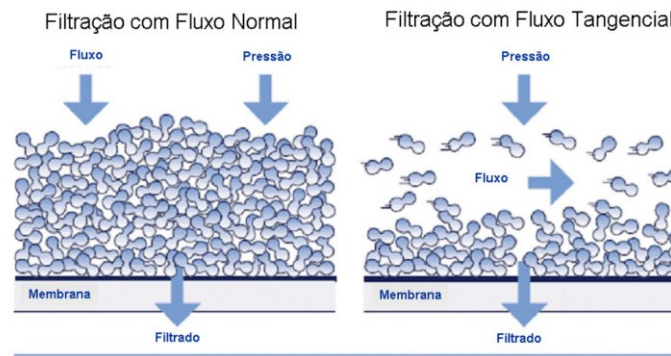
Fonte: Adaptado de *Water Quality & Treatment* (2011 apud MOREIRA, 2017, p. 46).

O desempenho dos sistemas de membranas pode ser avaliado por fluxo de permeado, recuperação, rejeição de contaminantes e fator de concentração. O fluxo representa o volume de permeado produzido por área de membrana em determinado tempo; a recuperação indica a parcela da alimentação convertida em permeado e a rejeição corresponde à capacidade da membrana de impedir a passagem de determinado contaminante. Esses parâmetros variam conforme o tipo de

membrana, a pressão aplicada, a temperatura, o pH e a composição da alimentação (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Baker, 2023).

Quanto ao modo de escoamento, os sistemas podem operar em fluxo frontal (*dead-end*) ou tangencial (*cross-flow*), representados na Figura 12. No fluxo frontal, toda a alimentação é direcionada perpendicularmente à superfície da membrana, o que favorece maior acúmulo de partículas. No fluxo tangencial, a alimentação escoia paralelamente à membrana, reduzindo a formação da camada de contaminantes e contribuindo para maior estabilidade operacional (Metcalf; Eddy, 2016).

Figura 12 – Comparação entre o fluxo normal ou convencional e o fluxo tangencial



Fonte: Adaptado de Santos Neves, Lacerda e Silva-Filho (2011).

Apesar das vantagens, a operação pode ser afetada pela polarização por concentração e pela colmatação das membranas, também denominada *fouling*. Esses fenômenos estão associados ao acúmulo de sais, partículas, coloides, matéria orgânica, microrganismos ou precipitados na superfície ou nos poros da membrana, reduzindo o fluxo de permeado e aumentando a necessidade de limpezas (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Metcalf; Eddy, 2016; Baker, 2023).

Por esse motivo, a qualidade da corrente de alimentação e a adoção de um pré-tratamento adequado são fatores fundamentais para a estabilidade e a vida útil das membranas. No sistema abordado neste trabalho, a flotação por ar dissolvido atua antes das etapas de membranas, reduzindo óleos e graxas, sólidos suspensos, turbidez, coloides e parte da carga orgânica. Essa remoção inicial diminui a quantidade de contaminantes direcionada à ultrafiltração e à osmose reversa, contribuindo para reduzir a colmatação e a necessidade de limpezas frequentes (Metcalf; Eddy, 2016; Garnier *et al.*, 2023).

Neste estudo serão detalhadas a ultrafiltração e a osmose reversa, por serem os processos de interesse para a rota de tratamento analisada e apresentarem funções complementares na

produção de água de reúso industrial. A ultrafiltração atua principalmente na retenção de partículas finas, sólidos suspensos, coloides, macromoléculas e microrganismos, contribuindo também para a proteção da etapa seguinte. A osmose reversa promove a remoção de sais e demais substâncias dissolvidas, possibilitando a obtenção de água com maior qualidade para aplicações em torres de resfriamento e, principalmente, sistemas de alimentação de caldeiras (CNI, 2020; Moreira, 2017; Garnier *et al.*, 2023).

4.8.1 Ultrafiltração

A ultrafiltração (UF) é um processo de separação por membranas acionado por diferença de pressão, utilizado principalmente para a remoção de sólidos suspensos, partículas coloidais, macromoléculas e microrganismos presentes na corrente de alimentação. As membranas de UF são porosas e apresentam, normalmente, faixa de separação entre aproximadamente 0,001 e 0,1 μm , intermediária entre a microfiltração e a nanofiltração. Nessa condição, a água e os compostos de menor tamanho atravessam a barreira seletiva, formando o permeado, enquanto os contaminantes retidos permanecem na corrente concentrada ou sobre a superfície da membrana (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Metcalf; Eddy, 2016; Baker, 2023).

O principal mecanismo de separação da UF é a exclusão por tamanho, também chamada de peneiramento. Dessa forma, partículas maiores que os poros da membrana são retidas, enquanto a água e grande parte dos compostos dissolvidos conseguem atravessá-la. Além desse mecanismo, a adsorção de substâncias na superfície, o bloqueio dos poros e a formação de uma camada de sólidos também podem contribuir para a retenção de contaminantes. Por esse motivo, a UF apresenta elevada eficiência na redução de turbidez, sólidos suspensos totais, partículas coloidais, bactérias e parte dos vírus, mas possui capacidade limitada para remover sais dissolvidos, dureza, sílica, cloretos e condutividade, não sendo considerada como tecnologia de desmineralização da água (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Konradt-moraes, 2009).

As membranas de ultrafiltração podem ser produzidas com materiais poliméricos ou cerâmicos e instaladas em diferentes configurações, como módulos tubulares, multicanais e de fibras ocas. Os módulos de fibras ocas são amplamente utilizados no tratamento de água e efluentes por apresentarem elevada área de filtração em um equipamento compacto. Nessa configuração, a filtração pode ocorrer de dentro para fora das fibras, denominada *inside-out*, ou de fora para dentro, chamada *outside-in*. Além disso, quanto ao sentido de escoamento, a ultrafiltração utiliza

convencionalmente o fluxo tangencial, visto que, devido à alimentação fluindo paralelamente, arrasta sólidos que teriam a tendência de se acumular na superfície da membrana (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Metcalf; Eddy, 2016; Konradt-Moraes, 2009).

Durante a operação da ultrafiltração, os materiais retidos podem se acumular sobre a superfície ou no interior dos poros da membrana, fenômeno denominado colmatção ou *fouling*. Esse acúmulo pode estar associado a sólidos suspensos, coloides, matéria orgânica, precipitados inorgânicos e microrganismos, resultando na redução do fluxo de permeado ou no aumento da pressão transmembrana necessária para manter a produção. A intensidade desse processo depende da qualidade da alimentação, das características da membrana e das condições operacionais empregadas (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Metcalf; Eddy, 2016; Baker, 2023).

Para controlar a colmatção, os sistemas de UF operam com diferentes níveis de limpeza. A retrolavagem, conhecida como *backwash*, é uma limpeza física de curta duração na qual permeado ou água tratada atravessa a membrana no sentido contrário ao da filtração, removendo parte dos sólidos depositados. Quando a retrolavagem apenas com água não é suficiente, pode ser realizada a retrolavagem quimicamente intensificada, denominada *chemically enhanced backwash* (CEB), na qual são adicionadas pequenas concentrações de produtos químicos para auxiliar na remoção de depósitos orgânicos, inorgânicos ou microbiológicos. Esses dois procedimentos são realizados com maior frequência e têm como objetivo manter a permeabilidade durante a operação normal do sistema (Metcalf; Eddy, 2016; Baker, 2023).

Quando o fluxo ou a permeabilidade não são recuperados pelo *backwash* e pelo CEB, torna-se necessária uma limpeza química mais intensa, conhecida como *cleaning in place* (CIP). Soluções alcalinas são geralmente aplicadas na remoção de matéria orgânica e biofilmes, enquanto soluções ácidas podem ser utilizadas para depósitos minerais. Agentes oxidantes, como o hipoclorito de sódio, também podem ser empregados para controle microbiológico, desde que sejam compatíveis com o material da membrana e respeitem as definições do fabricante. O CIP apresenta maior duração e consumo de produtos químicos e, por isso, deve ser realizado apenas quando as limpezas de manutenção não forem suficientes (Metcalf; Eddy, 2016; Baker, 2023).

A importância do tratamento anterior à UF foi demonstrada por Konradt-Moraes (2009), que avaliou coagulação e floculação seguidas de microfiltração ou ultrafiltração. A autora utilizou sulfato de alumínio, quitosana e Tanfloc como coagulantes e verificou que a associação entre o tratamento físico-químico e as membranas produziu água com melhor qualidade e menor tendência

de *fouling*. Esses resultados indicam que a remoção prévia de partículas e coloides pode contribuir para a estabilidade da filtração, embora o condicionamento químico deva ser otimizado para evitar que os próprios flocos formados aumentem a resistência sobre a membrana (Konradt-Moraes, 2009).

Em uma aplicação voltada ao reúso industrial, Santos *et al.* (2021) avaliaram uma unidade piloto composta por ultrafiltração seguida de osmose reversa, utilizando três correntes de efluentes petroquímicos. A UF operou durante 45 dias, à pressão de 2,5 bar, com membranas de polietersulfona e massa molar de corte de 10.000 Da. O sistema apresentou elevada eficiência para remoção de turbidez e sólidos suspensos, enquanto a remoção de carbono orgânico total foi mais limitada, demonstrando que compostos orgânicos de menor massa molar pode atravessar a membrana e alcançar a etapa de osmose reversa (Santos *et al.*, 2021). Os principais resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Desempenho da ultrafiltração no tratamento de efluentes petroquímicos para reúso industrial

Corrente	Parâmetro	Alimentação	Permeado da UF	Remoção
LE-1	COT (mg L ⁻¹)	17,10	13,80	19,3%
LE-1	SST (mg L ⁻¹)	6,70	< 2,10	68,6%
LE-1	Turbidez (NTU)	5,15	0,183	96,4%
LE-8	COT (mg L ⁻¹)	8,45	5,00	40,8%
LE-8	SST (mg L ⁻¹)	2,55	< 2,10	17,6%
LE-8	Turbidez (NTU)	23,17	0,45	98,1%
INO	COT (mg L ⁻¹)	24,83	16,70	32,8%
INO	SST (mg L ⁻¹)	12,50	< 2,10	83,2%
INO	Turbidez (NTU)	11,02	0,18	98,4%

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2021, p. 84–86).

Os resultados mostram que a UF foi mais eficiente na remoção de turbidez, com valores superiores a 96%, e de sólidos suspensos do que na redução da matéria orgânica dissolvida. Essa resposta confirma sua função como etapa de clarificação e proteção da OR, reduzindo o potencial de deposição sobre as membranas de maior seletividade. Portanto, a UF complementa a FAD, mas não substitui a OR quando o objetivo é reduzir sais, dureza, sílica e condutividade (Metcalf; Eddy, 2016; Santos *et al.*, 2021).

4.8.2 Osmose reversa

A osmose reversa (OR) é um processo de separação por membranas utilizado para reduzir sais, íons e compostos dissolvidos presentes na água. Diferentemente da UF, que retém

principalmente materiais particulados por exclusão de tamanho, a OR utiliza membranas densas, nas quais o transporte ocorre pela dissolução e difusão da água através da camada seletiva. Por isso, é aplicada na dessalinização, desmineralização e produção de água de maior pureza para reúso industrial, especialmente em sistemas de alimentação de caldeiras (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Moreira, 2017; Baker, 2023).

No processo natural de osmose, a água se desloca do meio menos concentrado para o mais concentrado quando duas soluções são separadas por uma membrana semipermeável. Na osmose reversa, aplica-se pressão superior à pressão osmótica sobre a solução mais concentrada, forçando a água a atravessar a membrana no sentido contrário ao natural. Assim, obtém-se uma corrente de permeado com menor concentração de sais e uma corrente de concentrado, onde permanecem os constituintes rejeitados (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Silva, 2022; Moreira, 2017).

Os elementos de OR são geralmente fabricados em poliamida e instalados em configuração espiral dentro de vasos de pressão. A alimentação percorre os canais da membrana em fluxo tangencial, enquanto parte da água atravessa a camada seletiva e é conduzida ao tubo coletor central. A recuperação de água pode ser aumentada com a organização dos elementos em estágios, porém recuperações elevadas também concentram os solutos no rejeito e aumentam o risco de incrustação (Habert; Borges; Nóbrega, 2006; Metcalf; Eddy, 2016; Baker, 2023).

O desempenho da OR é avaliado por recuperação, rejeição de sais, fluxo de permeado, condutividade do permeado e pressão diferencial. Entre os principais problemas operacionais estão o *scaling*, associado à precipitação de sais pouco solúveis, e o *fouling* coloidal, orgânico e microbiológico. Além disso, membranas de poliamida são sensíveis a agentes oxidantes, principalmente cloro livre, exigindo alimentação com baixa turbidez, baixo teor de sólidos, controle de SDI e ausência de oxidantes residuais (Moreira, 2017; Metcalf; Eddy, 2016; Santos *et al.*, 2021). Esses fatores explicam a importância do pré-tratamento antes da OR.

Quando ocorre perda de fluxo, aumento de pressão diferencial ou redução da rejeição de sais, realiza-se a limpeza química no próprio equipamento, conhecida como *cleaning in place* (CIP). Soluções alcalinas podem remover matéria orgânica e biofilmes, enquanto soluções ácidas são utilizadas para depósitos minerais. A frequência e a composição das limpezas devem respeitar a compatibilidade da membrana, pois procedimentos inadequados podem reduzir sua vida útil (Moreira, 2017; Metcalf; Eddy, 2016; Baker, 2023).

A utilização da UF antes da OR reduz a entrada de sólidos suspensos, coloides, turbidez e microrganismos no sistema de maior seletividade. Entretanto, como a UF não remove de forma significativa sais, dureza, sílica e condutividade, esses parâmetros devem ser reduzidos pela OR. Dessa forma, as tecnologias apresentam funções complementares: a UF atua na clarificação e proteção das membranas, enquanto a OR promove a desmineralização necessária para aplicações industriais mais restritivas (Silva, 2022; Santos *et al.*, 2021).

Santos *et al.* (2021) avaliaram uma unidade piloto de reúso composta por UF seguida de OR para três correntes de efluentes petroquímicos. A OR utilizou membrana de poliamida BW30, operou por 45 dias, quatro horas diárias, à pressão de 4 bar, recebendo como alimentação o permeado da UF. A corrente LE-8 apresentou maior estabilidade operacional, associada à menor concentração de carbono orgânico, enquanto a corrente inorgânica apresentou queda mais acentuada de fluxo e necessitou de limpeza química após 35 dias (Santos *et al.*, 2021). Os resultados são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Qualidade dos permeados da osmose reversa e comparação com os requisitos de reúso industrial

Parâmetro	Permeado OR LE-1	Permeado OR LE-8	Permeado OR INO	Padrão água clarificada
Cálcio (mg/L)	0,43 ± 0,32	0,10 ± 0,01	0,21 ± 0,12	30
Cloreto (mg/L)	3,77 ± 0,78	3,23 ± 0,16	4,25 ± 3,77	22
Condutividade (µS/cm)	44,04 ± 1,53	23,15 ± 1,51	40,52 ± 30,86	165
Cor (mg Pt-Co/L)	< 6,4	< 6,4	< 6,4	< 10
DQO (mg/L)	< 2,85	< 2,85	3,76 ± 1,29	3,5
Ferro (mg/L)	0,024 ± 0,004	0,020 ± 0,003	0,030 ± 0,010	0,1
Magnésio (mg/L)	0,06 ± 0,018	0,05 ± 0,001	0,06 ± 0,03	0,5
pH	6,25 ± 0,26	6,81 ± 0,17	8,21 ± 1,18	7,0–8,0
SST (mg/L)	< 2,1	< 2,1	< 2,1	2

Fonte: Adaptado de Santos *et al.* (2021, p. 84–86).

Os resultados indicam que a OR reduziu significativamente a condutividade, a dureza e as concentrações de sais nas três correntes avaliadas. Os permeados LE-1 e LE-8 apresentaram DQO inferior ao limite de quantificação de 2,85 mg L⁻¹, enquanto a corrente INO apresentou DQO média de 3,76 mg L⁻¹, ligeiramente superior ao valor de referência. Entre as correntes analisadas, o permeado LE-8 apresentou melhor combinação entre qualidade da água e estabilidade operacional (Santos *et al.*, 2021).

Entre as vantagens da OR destacam-se a elevada remoção de sais, a produção de água com baixa condutividade e a possibilidade de aplicação em torres de resfriamento e caldeiras. Como limitações, devem ser considerados o consumo de energia, a sensibilidade das membranas à

qualidade da alimentação, a necessidade de limpezas químicas e a geração de concentrado. Portanto, a eficiência do sistema depende não apenas da rejeição da membrana, mas também do pré-tratamento, da recuperação adotada e do controle de *fouling* e *scaling* (Metcalf; Eddy, 2016; Moreira, 2017; Baker, 2023).

5 CONCLUSÃO

Diante do aumento da demanda por água e das limitações relacionadas à disponibilidade hídrica em determinadas regiões, o reúso industrial apresenta-se como uma alternativa importante para reduzir a captação de água de mananciais. Na indústria de processamento de óleo de soja, essa prática exige atenção especial devido às características dos efluentes gerados, principalmente durante o refino, que podem apresentar elevadas concentrações de matéria orgânica, óleos e graxas, sólidos suspensos, coloides e sais dissolvidos. Dessa forma, a definição de um sistema de reúso deve partir da caracterização do efluente disponível e dos requisitos de qualidade da aplicação pretendida, uma vez que diferentes usos industriais exigem diferentes níveis de tratamento.

A integração entre flotação por ar dissolvido, ultrafiltração e osmose reversa mostra-se uma alternativa tecnicamente consistente para o tratamento avançado de efluentes da indústria de processamento de óleo de soja. A atuação complementar dessas tecnologias favorece a remoção de diferentes classes de contaminantes, superando limitações das etapas anteriores e possibilitando a produção de água com potencial para reúso em aplicações industriais que demandam maior controle de qualidade.

Portanto, o reúso de água na indústria de processamento de óleo de soja representa uma alternativa alinhada aos princípios de sustentabilidade, uso racional dos recursos hídricos e economia circular, podendo contribuir para a redução dos impactos ambientais e para o aumento da segurança hídrica das unidades industriais. Entretanto, sua implementação deve ser fundamentada em estudos de tratabilidade, análises técnico-econômicas e monitoramento contínuo da qualidade da água produzida, garantindo a confiabilidade operacional do sistema e a adequação às exigências de cada aplicação. Além disso, por se tratar de uma revisão bibliográfica, as conclusões apresentadas baseiam-se em resultados reportados na literatura, não contemplando validação experimental em condições específicas de operação.

Nesse contexto, recomenda-se que estudos futuros avaliem experimentalmente a integração entre FAD, UF e OR utilizando efluentes reais da indústria de processamento de óleo de soja, considerando desempenho, *fouling*, consumo energético e viabilidade econômica em escala piloto ou industrial.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Água na indústria: uso e coeficientes técnicos**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/central-de-publicacoes/f0a7-agua-na-industria-uso-e-coeficientes-tecnicos/@@download/file/Água%20na%20indústria.pdf> . Acesso em: 4 jul. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2026: relatório síntese**. Brasília: ANA, 2026. Disponível em: <https://conjuntura2025.ana.gov.br/>. Acesso em: 30 jun. 2026.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO (ANA). **Manual de usos consuntivos da água no Brasil**. Brasília: ANA, 2019.
- ALTHER, G. Cleaning wastewater: removing oil from water with organoclays. **Filtration+Separation**, Dartford, v. 5, n. 3 p. 22–24, 2008.
- BAKER, Richard W. **Membrane technology and applications**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2023. DOI: 10.1002/9781119686026. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119686026>. Acesso em: 30 jul. 2026.
- BEVERAGE INDUSTRY ENVIRONMENTAL ROUNDTABLE. **Context-Based decision guide for water reuse and recycling**. [S. l.]: BIER, 2020. 24 p.
- BLUM, J. R. C. Critérios e padrões de qualidade da água. In: MANCUSO, P. C.; SANTOS, H. F. S. **Reúso de Água**. . Barueri: Manole, 2003. p. 125–174.
- BRAGA, B. *et al.* **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson, 2015.
- BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 9 mar. 2006.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementando e alterando a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do CONAMA. **Diário Oficial da União**: seção 1, Brasília, DF, n. 92, p. 89–92, 16 maio 2011.
- BRASIL. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 9 jan. 1997.
- CECCHET, Juliana. **Avaliação do desempenho de flotação por ar dissolvido no tratamento de efluente de refinaria de óleo de soja**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2007.

CECCHET, Juliana; GOMES, Benedito M.; COSTANZI, Ricardo N.; GOMES, Simone D. Tratamento de efluente de refinaria de óleo de soja por sistema de flotação por ar dissolvido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 1, p. 81–86, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000100011. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/FFyHvSpq8FZCxsVMthtqnJj/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 30 jul. 2026.

CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS DE ÓLEOS VEGETAIS. **Cadeia da soja e do biodiesel: PIB, empregos e comércio exterior: 3º trimestre de 2025**. Piracicaba: CEPEA/ESALQ-USP; ABIOVE, 2025. Disponível em: https://www.cepea.org.br/upload/kceditor/files/Relat%C3%B3rio%20-%20Cadeia%20da%20Soja%20e%20biodiesel%20-%203T2025_1.pdf. Acesso em: 4 jul. 2026.

Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). **Guia Técnico Ambiental da Indústria de Óleos Vegetais**. São Paulo: CETESB, 2008.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Estudo sobre o impacto econômico dos investimentos de reúso de efluentes tratados de esgoto para o setor industrial**. Brasília: CNI, 2020. 60 p. ISBN 978-65-86075-04-5.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA; FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **O uso racional da água no setor industrial**. 2. ed. Brasília: CNI, 2017. Disponível em: https://static.portaldaindustria.com.br/media/filer_public/47/53/4753d290-7614-4307-9de7-07b7eb08f26c/o_uso_racional_da_agua_no_setor_industrial.pdf. Acesso em: 4 jul. 2026.

C.VALE – COOPERATIVA AGROINDUSTRIAL. **Relatório de sustentabilidade 2025**. Palotina, PR: C.Vale, 2026

D'ARCE, Marisa. O processamento industrial do óleo vegetal e do farelo. **Visão Agrícola**, São Paulo, n. 5, p. 140-141, 2006.

DORSA, Renato. **Tecnologia de óleos vegetais**. 1. ed. Campinas: Editora Gráfica Ideal, 2004. 463 p.

EDZWALD, James K. Dissolved air flotation and me. **Water Research**, v. 44, n. 7, p. 2077–2106, 2010. DOI: 10.1016/j.watres.2009.12.040. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135409008525>. Acesso em: 30 jul. 2026.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **AQUASTAT: water use**. Rome: FAO, [s.d.]. Disponível em: <https://www.fao.org/aquastat/en/overview/methodology/water-use/>. Acesso em: 30 jun. 2026.

GARNIER, Céline; GUIGA, Wafa; LAMELOISE, Marie-Laure; FARGUES, Claire. Water reuse in the food processing industries: a review on pressure-driven membrane processes as

reconditioning treatments. **Journal of Food Engineering**, v. 344, art. 111397, 2023. DOI: 10.1016/j.jfoodeng.2022.111397. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0260877422004514>. Acesso em: 30 jul. 2026.

GUPTA, Monoj K. **Practical guide to vegetable oil processing**. 2. ed. Cambridge: AOCS Press; Elsevier, 2017. Disponível em: <https://shop.elsevier.com/books/practical-guide-to-vegetable-oil-processing/gupta/978-1-63067-050-4>. Acesso em: 4 jul. 2026.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NÓBREGA, R. **Processo de separação por membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. p. 180.

HARTAL, Oussama *et al.* Optimization of coagulation-flocculation process for wastewater treatment from vegetable oil refineries using chitosan as a natural flocculant. **Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management**, v. 22, art. 100957, 2024. DOI: 10.1016/j.enmm.2024.100957. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S221515322400045X>. Acesso em: 30 jul. 2026.

HESPAÑHOL, I. Um novo paradigma para a gestão de recursos hídricos. **Estudos Avançados**, v. 22, n. 63, p. 131–158, 2008. DOI:10.1590/S0103-40142008000200009. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/Zh4fJ3wvVjJ3GsQY8rNYHPm/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 30 jul. 2026.

KONRADT-MORAES, Leila Cristina. **Estudo dos processos de coagulação e floculação seguidos de filtração com membranas para a obtenção de água potável**. 2009. 205 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2009.

KURITA DO BRASIL LTDA. **Tratamento químico para estação de tratamento de água**. São Paulo: Kurita, [s.d.]. Disponível em: <https://kurita.com.br/artigos-tecnicos/tratamento-quimico-para-estacao-de-tratamento-de-agua/>. Acesso em: 19 jul. 2026.

MANCUSO, P. C. S. **Reúso de Água**. São Paulo: Universidade de São Paulo, 1988.

MANCUSO, Pedro Caetano Sanches; SANTOS, Hilton Felício dos. **Reúso de água**. Barueri: Manole, 2003.

MANDARINO, José Marcos Gontijo; HIRAKURI, Marcelo Hiroshi; ROESSING, Antônio Carlos. **Tecnologia para produção do óleo de soja**: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos. 2. ed. Londrina: Embrapa Soja, 2015. 41 p. (Documentos, 171). Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1022058/tecnologia-para-producao-do-oleo-de-soja-descricao-das-etapas-equipamentos-produtos-e-subprodutos>. Acesso em: 5 jul. 2026.

MANDARINO, José Marcos Gontijo; ROESSING, Antônio Carlos. **Tecnologia para produção do óleo de soja**: descrição das etapas, equipamentos, produtos e subprodutos. Londrina: Embrapa Soja, 2001.

MATIOLO, E. **Flotação avançada para o tratamento e reaproveitamento de águas poluídas**. 2003. Trabalho apresentado no XIX Prêmio Jovem Cientista, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

MATTHIENSEN, Alexandre *et al.* Reúso de água na agroindústria de alimentos. **Suinocultura Industrial**, n. 5, p. 16–26, 2024.

METCALF, L.; EDDY, H. P. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2016.

MIERZWA, José Carlos; HESPANHOL, Ivanildo. **Água na indústria: uso racional e reúso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MOREIRA, Ramon Heleno. **Desenvolvimento de um processo de reúso do efluente de refinaria baseado em sistema de osmose reversa combinado com precipitação**. 2017. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

NALCO WATER. **Fundamentos da água: currículo de treinamento**. [S. l.]: Nalco Water, [2022].

NALCO WATER. **The Nalco Water handbook**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

NATIONAL OILSEED PROCESSORS ASSOCIATION. **Life cycle inventory data: soybean processing**. Washington, DC: NOPA, 2024.

RAYAPROLU, Kumar. **Boilers for power and process**. Boca Raton: CRC Press, 2009.

RUBIO, J.; SOUZA, M. L.; SMITH, R. W. Overview of flotation as a wastewater treatment technique. **Minerals Engineering**, v. 15, n. 3, p. 139–155, 2002.

SANTOS, Andréia Barros dos; BARRETO, Aline Silveira; GONÇALVES, Luciano Ribeiro; PIRES, Alessandra Nogueira; GIACOBBO, Alexandre; RODRIGUES, Marco Antônio Siqueira. Reúso industrial de efluentes petroquímicos: um estudo de caso da ultrafiltração e osmose reversa. *In*: SIMPÓSIO SOBRE SISTEMAS SUSTENTÁVEIS, 6., 2021. **Anais [...]**. Toledo: Editora GFM, 2021. v. 2, p. 76–90.

SANTOS NEVES, Joanna Maria da Cunha de Oliveira; LACERDA, Luiz Drude de; SILVA-FILHO, Emmanoel Vieira. Ultrafiltração tangencial como ferramenta no estudo da distribuição de contaminantes em sistemas aquáticos. **Revista Virtual de Química**, v. 3, n. 2, p. 68–77, 2011. DOI: 10.5935/1984-6835.20110012. Disponível em: <https://rvq.sbgq.org.br/default.asp?ed=48>. Acesso em: 30 jul. 2026.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Coisas que você deve saber sobre a água**. Brasília: SGB, [s.d.]. Disponível em: <https://www.sgb.gov.br/coisas-que-voce-deve-saber-sobre-a-agua>. Acesso em: 30 jun. 2026.

SILVA, D. A. C.; SANTOS, É. B.; DUARTE, J. A.. **Utilização de osmose reversa para tratamento de águas**, v.3, n.1, 2013.

SILVA, Marcella Maximiano Viana. **Aplicação de ultrafiltração e osmose reversa para reúso de efluente terciário como pré-tratamento na produção de água desmineralizada em indústria de papel e celulose**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2022.

TUNDISI, J. G.; TUNDISI, T. M. **Recursos hídricos no século XXI**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Guidelines for water reuse**. Washington, DC: EPA, 2012. EPA 600-R-12-618.

UN-WATER. **Water scarcity**. Geneva: UN-Water, [s.d.]. Disponível em: <https://www.unwater.org/water-facts/water-scarcity>. Acesso em: 30 jun. 2026.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2014.

VON SPERLING, Marcos. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: lodos ativados**. 2. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, 2012. v. 4.

YANG, C. L. Electrochemical coagulation for oily water demulsification. **Separation and Purification Technology**, v.54, p.388–395, 2007.