UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

ARTHUR BUENO BERTUCCI

APLICAÇÕES PARA ÁGUA DE REUSO EM INDÚSTRIAS: UMA REVISÃO SOBRE O TEMA

Sorocaba
2026

ARTHUR BUENO BERTUCCI

APLICAÇÕES PARA ÁGUA DE REUSO EM INDÚSTRIAS: UMA REVISÃO SOBRE O TEMA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Orientador(a): Leandro Cardoso de Morais

Sorocaba

2026

Bertucci, Arthur Bueno

B552a

Aplicações para água de reuso em indústrias: uma revisão sobre o tema / Arthur Bueno Bertucci. -- Sorocaba, 2026

57 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Ambiental) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Leandro Cardoso de Morais

1. Água – Reúso. 2. Águas residuais Aspectos ambientais. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Dados fornecidos pelo autor(a).

ARTHUR BUENO BERTUCCI

Aplicações para água de reuso em indústria: uma revisão sobre o tema

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia Ambiental.

Data de aprovação: 02/06/2026

Trabalho aprovado por meio de parecer, homologado pelo Conselho de Curso em reunião de 02 de junho de 2026.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus por ter me concedido força, sabedoria e perseverança ao longo de toda a minha trajetória acadêmica, permitindo a conclusão desta importante etapa da minha vida.

Aos meus pais, Eduardo Aparecido Bertucci e Magali Rodrigues Bueno Bertucci, expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional, incentivo constante e por sempre acreditarem em mim durante toda a graduação.

Ao meu orientador, Leandro Cardoso de Morais, agradeço a orientação, dedicação e pelos conhecimentos compartilhados no desenvolvimento deste trabalho. Estendo também meus agradecimentos a todos os professores do campus, que contribuíram significativamente para minha formação acadêmica e profissional.

A Ana Clara Azevedo Ivamoto pela amizade, companhia, apoio e carinho durante todo o período de graduação.

Por fim, agradeço aos meus colegas e amigos da graduação pelos momentos compartilhados, pelas experiências vividas e pelo apoio mútuo ao longo desses anos.

RESUMO

Este trabalho apresenta uma revisão sobre o uso de água de reúso em sistemas industriais, focando nos setores alimentício, de papel e celulose e têxtil. A pesquisa foi feita a partir da análise de artigos científicos, normas técnicas e documentos institucionais publicados majoritariamente entre 2020 e 2025. O objetivo desse estudo é discutir benefícios, desafios e potencial de ampliação da água de reúso nas indústrias e produtos selecionados. É adotada uma abordagem de revisão bibliográfica sistematizada por meio de *strings* de busca em bases de dados nacionais e internacionais de periódicos. De forma introdutória, são apresentadas classificações sobre reúso de água com base no seu nível de potabilidade, além do histórico da legislação brasileira sobre gestão de recursos hídricos e economia circular. O estudo aborda sistemas de utilidades industriais como torres de resfriamento, caldeiras e recuperação de condensado para todas as indústrias analisadas. Nos setores analisados, constatou-se que a alta demanda de água e a geração de efluentes incentivam o uso de tecnologias de tratamento avançado para reutilização de água. Isso inclui processos com membranas, osmose reversa e oxidação avançada. Dentre as conclusões, reúso de água se destaca como uma estratégia em crescimento no país principalmente em locais com pouco acesso a recursos hídricos e em locais com abundância para minimizar impactos ambientais. No entanto, sua expansão ainda depende de avanços tecnológicos, viabilidade econômica e do desenvolvimento de regulamentações mais específicas para aplicações industriais.

Palavras-chave: reúso de água; efluentes industriais; sustentabilidade; tratamento de efluentes; legislação ambiental.

ABSTRACT

This work presents a review on the use of reclaimed water in industrial systems, focusing on the food, paper and pulp, and textile sectors. The research was conducted through the analysis of scientific articles, technical standards, and institutional documents published mainly between 2020 and 2025. The objective of this study is to discuss the benefits, challenges, and potential for expanding the use of reclaimed water in the selected industries and products. A systematic bibliographic review approach is adopted using search strings in national and international periodical databases. Introductory classifications of water reuse based on its potability level are presented, in addition to the history of Brazilian legislation on water resource management and the circular economy. The study addresses industrial utility systems such as cooling towers, boilers, and condensate recovery for all the industries analyzed. In the sectors analyzed, it was found that the high demand for water and the generation of effluents encourage the use of advanced treatment technologies for water reuse. This includes processes using membranes, reverse osmosis, and advanced oxidation. Among the conclusions, water reuse stands out as a growing strategy in the country, mainly in locations with limited access to water resources and in locations with abundant water to minimize environmental impacts. However, its expansion still depends on technological advancements, economic viability, and the development of more specific regulations for industrial applications.

Keywords: water reuse; industrial wastewater; sustainability; wastewater treatment; environmental legislation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 9
2. OBJETIVOS 13
3. METODOLOGIA 14
3.1 Estratégia de busca 14
3.2 Critérios de inclusão e exclusão 16
4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 17
4.1 Reuso de água 17
4.2 Legislação brasileira referente a recursos hídricos 18
4.3 Economia Circular 20
4.4 Sistemas de utilidades industriais 21
4.4.1 Torres de Resfriamento, trocadores de calor e *chillers* 23
4.4.2 Caldeiras e purga 26
4.4.3 Recuperação de condensado 26
4.5 Industria Alimenticia 27
4.5.1 Panorama do Setor 27
4.5.2. Processo Produtivo e geração de efluentes 28
4.5.3 Tecnologias de tratamento no setor 29
4.5.4 Aplicações De Reuso 31
4.6 Indústria Papel Celulose 33
4.6.1 Panorama do Setor 33
4.6.2 Processo produtivo e geração de efluentes 34
4.6.3 Tecnologias tratamento no setor 36
4.6.4 Aplicações de reúso 37
4.7 Indústria Têxtil 39
4.7.1 Panorama do setor 39
4.7.2 Processo produtivo e geração de efluentes 40
4.7.3 Tecnologias Aplicadas ao tratamento de efluente e melhoria de processos 42
4.7.4 Aplicações de reuso 45
5. DISCUSSÃO 47
5.1 Comparativo entre indústrias 47
5.2 Desafios para o reúso no Brasil 49
6. CONCLUSÃO 50
REFERÊNCIAS 52

1. INTRODUÇÃO

A crescente demanda por recursos hídricos, associada ao crescimento populacional, à expansão urbana e à intensificação das atividades industriais, tem ampliado a pressão sobre os sistemas de abastecimento de água em diferentes regiões do mundo. Segundo a UNESCO, aproximadamente 4 bilhões de pessoas vivem em condições de escassez hídrica severa durante pelo menos um mês ao ano, enquanto a demanda global por água continua aumentando em cerca de 1% ao ano desde a década de 1980, impulsionada principalmente pelo crescimento industrial, agrícola e energético (UNESCO, 2024).

No Brasil, apesar da elevada disponibilidade hídrica em comparação a outras regiões do mundo, a distribuição geográfica desigual dos recursos hídricos e o aumento da demanda em setores urbanos e industriais tornam a gestão da água um desafio crescente. Diante desse cenário, práticas voltadas ao reúso de água e à recirculação hídrica têm sido utilizadas como estratégias para redução da captação de água potável e mitigação dos impactos ambientais associados à geração de efluentes industriais (UNESCO, 2024).

Apesar dos avanços observados na legislação brasileira relacionada à gestão de recursos hídricos desde a instituição da Política Nacional de Recursos Hídricos em 1997, os instrumentos regulatórios específicos voltados ao reúso de água, especialmente para aplicações industriais, ainda permanecem limitados e relativamente recentes, como, por exemplo, a SES/SIMA 2020, que estabelece os critérios necessários para o reúso não potável de água. A ausência de políticas públicas consolidadas para diferentes modalidades de reúso industrial representa um dos principais desafios para ampliação dessas práticas no país (BRASIL, 2020).

Considerando essa problemática, diversas indústrias têm adotado princípios da economia circular em seus processos produtivos. Nesse modelo, por meio de abordagens como o 5R da sustentabilidade, buscasse repensar, recusar, reduzir e então reutilizar os recursos hídricos, sendo este um dos últimos recursos. Além disso, a transição do modelo linear de produção para o modelo circular evidencia a necessidade de desenvolvimento de políticas públicas e instrumentos regulatórios

capazes de viabilizar essa mudança de forma mais eficiente e sustentável (FERNANDES; CUNHA MARQUES, 2023).

Entre os setores industriais que demandam elevado consumo hídrico e que apresentam grande potencial para aplicação de práticas associadas à economia circular, destaca-se a indústria alimentícia. Esse setor é uma das maiores consumidoras de água potável, pois antes mesmo de iniciar o seu processo produtivo já estão sendo utilizados recursos hídricos na agricultura. Além disso, apresenta elevada variabilidade quanto ao consumo de água e à geração de efluentes, uma vez que cada segmento produtivo possui características operacionais específicas, diferentes demandas hídricas e composições distintas de efluentes gerados ao longo do processo industrial (SAWADOGO et al., 2018).

Nesse contexto, o setor cervejeiro foi selecionado como objeto representativo da indústria alimentícia devido à elevada demanda hídrica presente em praticamente todas as etapas do processo produtivo, especialmente em operações de enxágue, limpeza, resfriamento e processos como a mosturação. Ademais, a água constitui um dos principais componentes da cerveja, representando aproximadamente 60% a 90% da composição do produto. O Brasil ocupa posição de destaque no mercado mundial de cerveja, sendo um dos maiores consumidores e produtores globais, atrás apenas da China e dos Estados Unidos, o que reforça a relevância econômica, cultural, ambiental e industrial do setor (ROMÃO et al., 2026).

Outro setor importante é o de papel e celulose; possui grande relevância econômica e estratégica tanto no cenário nacional quanto mundial, sendo responsável pela produção de materiais amplamente utilizados no cotidiano e por forte participação na cadeia industrial. No Brasil, o setor destaca-se entre os maiores produtores e exportadores mundiais de celulose, impulsionado pela elevada produtividade florestal, investimentos tecnológicos e condições favoráveis de clima e solo. Entretanto, o processo produtivo apresenta elevada demanda por água e energia, especialmente nas etapas de cozimento da madeira, lavagem da polpa, branqueamento e formação da folha de papel, além da geração de grandes volumes de efluentes contendo matéria orgânica, sólidos suspensos e compostos derivados da lignina (HUNG et al., 2024).

A indústria de papel e celulose destaca-se entre os principais setores industriais brasileiros, ocupando posição de relevância no cenário mundial de produção de celulose e papel. Entretanto, o setor caracteriza-se pelo elevado consumo de água

nas etapas de produção da polpa, lavagem, branqueamento e formação da folha, apresentando grande variabilidade de consumo hídrico conforme o tipo de produto e tecnologia empregada. Além da elevada demanda por recursos hídricos, o processo produtivo gera grandes volumes de efluentes contendo alta carga orgânica e intensa coloração, tornando o tratamento e o reúso da água estratégias fundamentais para redução dos impactos ambientais e aumento da eficiência hídrica industrial. Nesse contexto, sistemas de recirculação e reaproveitamento interno de água vêm sendo amplamente adotados como alternativas para redução da captação de água fresca e fortalecimento de práticas associadas à sustentabilidade e à economia circular no setor (HOLKAR et al., 2016).

Por fim, foi selecionada a indústria têxtil como o terceiro objeto comparativo para o estudo devido ao extensivo uso de recursos hídricos e à significativa geração de efluentes industriais principalmente em etapas como lavagem, tingimento e acabamento de tecidos. Dentre os produtos, o tecido jeans mais conhecido como denim se destaca pelo maior consumo de água, de forma similar à produção de cerveja; a produção envolve o cultivo de algodão que apresenta elevado consumo de água para irrigação, segundo o Comitê Consultivo Internacional do Algodão (ICAC) para a produção de 1 quilo de fiapo de algodão são necessários cerca de 8.920 L de água, desses 2344 litros provêm da irrigação (ICAC, 2025).

Apesar dos avanços tecnológicos observados nos últimos anos, a implementação do reúso industrial ainda enfrenta importantes desafios relacionados à qualidade dos efluentes, custos operacionais, controle sanitário e ausência de regulamentações específicas para determinadas aplicações industriais. Além disso, as características dos efluentes variam significativamente entre os diferentes setores produtivos, exigindo abordagens específicas de tratamento e gestão hídrica. Dessa forma, compreender as principais tecnologias aplicadas, suas limitações e as possibilidades de reutilização da água em diferentes processos industriais tornam-se fundamental para o desenvolvimento de estratégias mais sustentáveis de uso dos recursos hídricos (SILVA FILHO et al., 2021).

A pesquisa foi desenvolvida por meio de revisão bibliográfica baseada na análise de artigos científicos, normas técnicas, legislações e documentos institucionais publicados principalmente entre as datas de janeiro de 2020 e dezembro de 2025. Durante o desenvolvimento do trabalho, observou-se como principal

dificuldade a limitação de estudos específicos relacionados às aplicações práticas de reúso em determinados setores industriais, especialmente no contexto brasileiro. Assim, o objetivo geral deste trabalho consiste em avaliar práticas de reúso de efluentes industriais e aplicações a fim de discutir as problemáticas e meios de redução do consumo hídrico industrial.

2. OBJETIVOS

Avaliar, com base em revisão bibliográfica, as tecnologias, aplicações e legislações relacionadas à água de reuso nos setores alimentício, papel e celulose e têxtil a fim de discutir benefícios, desafios e potencial de ampliação.

Objetivos específicos:

a) Descrever as tecnologias de tratamento empregadas para viabilizar o reúso industrial;
b) Analisar os aspectos legais que influenciam a implementação do reúso de água no Brasil;
c) Discutir benefícios ambientais e econômicos associados a adoção do reúso em indústrias;
d) Analisar principais desafios e limitações para ampliação dessa prática.

3. METODOLOGIA

Esta pesquisa se caracteriza como uma revisão bibliográfica sistematizada, de natureza qualitativa, com abordagem exploratória e descritiva. O estudo foi desenvolvido a partir da análise de artigos científicos, normas técnicas, legislações e documentos institucionais relacionados ao reúso de água em sistemas industriais, com foco nos setores alimentício, de papel e celulose e têxtil.

A escolha desses setores ocorreu em função da elevada demanda hídrica, significativa geração de efluentes e relevância econômica no cenário industrial nacional e internacional. Além disso, os segmentos selecionados apresentam diferentes características quanto à composição dos efluentes e às possibilidades de aplicação do reúso de água, permitindo uma análise comparativa entre distintas realidades industriais.

O recorte temporal adotado compreende estudos publicados entre janeiro de 2020 e dezembro de 2025, com o objetivo de contemplar avanços tecnológicos recentes, aplicações industriais contemporâneas e discussões atuais relacionadas ao reúso de água e à economia circular. Entretanto, alguns estudos anteriores ao período delimitado também foram utilizados devido à sua relevância conceitual e ampla utilização na literatura científica.

3.1 Estratégia de busca

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados ScienceDirect, Scopus, Web of Science e Portal de Periódicos CAPES, sendo complementada por consultas ao Google Acadêmico para identificação de literatura adicional relevante.

A estratégia de busca foi estruturada a partir da combinação de palavras-chave relacionadas ao reúso de água, tratamento de efluentes industriais, economia circular e setores industriais específicos, utilizando operadores booleanos (AND e OR). Foram empregadas palavras-chave em inglês e português, priorizando termos amplamente utilizados na literatura internacional.

Entre os principais descritores utilizados destacam-se: “water reuse”, “wastewater reuse”, “industrial effluent”, “circular economy”, “industrial wastewater treatment”, “textile wastewater”, “pulp and paper wastewater”, “water recycling”, “cooling systems” e “membrane processes”.

A Tabela 1 apresenta as principais cadeias de pesquisa utilizadas durante a busca bibliográfica, bem como algumas das referências utilizadas como base para definição dos descritores.

Tabela 1. Palavras-chave para a sequência de pesquisa.

Palavras-chave	**Cadeia de pesquisa**	**Fontes**
Reúso de água	“Recycled water” OR “Reclaimed Water” OR “Wastewater” or “Water Recycling” or “Water Reuse”	SANTOS et al, 2021; HU et al, 2025; MOURA et al, 2020
Economia Circular	("circular economy" OR "circular water use" OR "water reuse")	KOSTAKIS, 2025; ÇAGLAR ALP, 2025; ALMEIDA et al, 2022
Sistema de Utilidades Industriais	("cooling systems" OR "heat exchanger" OR "cooling tower") AND ("water reuse" OR "reclaimed water”)	SALIMI, 2023; OMRAN., 2024; BATOUTA et al, 2024
Indústria têxtil	("denim wastewater" OR "textile wastewater" OR "jeans industry effluent"); ("treatment" OR "advanced treatment" OR "membrane process" OR "MBR" OR "reverse osmosis"); ("industrial application" OR "washing process" OR "dyeing" OR "wet processing")	BIDART et al, 2024; MADHU, 2024; NAYAK et al, 2022
Indústria alimentícia	("brewery wastewater" OR "beer industry effluent" OR "brewery effluent"); ("treatment" OR "advanced treatment" OR "membrane process" OR "MBR" OR "reverse osmosis"); ("industrial application" OR "cleaning" OR "CIP" OR "cooling system")	SHRIVASTAVA et al. (2022); MARIA et al. (2023); VIEGAS et al. (2025); JIN et al. (2025)

Indústria papel e celulose	("pulp and paper wastewater" OR "paper mill effluent" OR "pulp industry effluent"); ("treatment" OR "advanced treatment" OR "membrane process" OR "reverse osmosis") ("industrial application" OR "process water")	ESMAEELI et al. (2023); LIANG et al. (2023); JAVEED et al. (2023); PATEL et al. (2021)

3.2 Critérios de inclusão e exclusão

A seleção dos estudos foi realizada em duas etapas. Inicialmente, foram analisados os títulos e resumos das publicações identificadas nas bases de dados. Em seguida, os trabalhos considerados relevantes foram avaliados integralmente.

Foram incluídos artigos científicos, normas técnicas, legislações e documentos institucionais que abordavam aplicações de reúso de água, tecnologias de tratamento de efluentes industriais, sistemas de recirculação hídrica, economia circular e aspectos regulatórios relacionados aos setores industriais analisados.

Foram excluídos trabalhos duplicados, estudos que não apresentavam relação direta com o tema e publicações que não disponibilizavam acesso ao texto completo.

O gerenciamento das referências bibliográficas foi realizado com o auxílio do software Mendeley, utilizado para organização, armazenamento e padronização das citações e referências.

A sistematização da literatura permitiu a realização de uma análise comparativa entre os diferentes setores industriais estudados, possibilitando a identificação de padrões técnicos, desafios operacionais, limitações regulatórias e oportunidades relacionadas à ampliação das práticas de reúso de água na indústria.

Por fim, destaca-se que a pesquisa apresenta limitações relacionadas ao recorte temporal adotado, às bases de dados consultadas e à disponibilidade de estudos específicos sobre aplicações práticas de reúso industrial, especialmente no contexto brasileiro.

4 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

4.1 Reuso de água

O reúso de água constitui uma prática essencial para a gestão sustentável dos recursos hídricos, especialmente diante do aumento da demanda e da crescente pressão sobre fontes hídricas naturais. Essa prática pode ser classificada segundo diferentes critérios, como o nível de potabilidade, a origem do efluente e o ambiente de aplicação. Nesse contexto, a adoção de terminologias padronizadas torna-se fundamental para garantir a uniformidade conceitual e a adequada implementação das estratégias de reúso, sobretudo em setores industriais que apresentam elevado consumo de água (SANTOS; LIMA, 2022)

De acordo com a CETESB, o reúso potável direto ocorre quando a água, após tratamento avançado, é inserida diretamente no sistema de abastecimento público, sem lançamento prévio em corpos hídricos, podendo ainda passar por etapas complementares de tratamento antes do consumo. Já o reúso potável indireto envolve a descarga do efluente tratado em corpos hídricos, como rios e reservatórios, que passam a atuar como uma etapa adicional de atenuação de contaminantes, antes de sua captação e posterior tratamento em estações de tratamento de água. Por sua vez, o reúso não potável corresponde à aplicação direta da água tratada em atividades que não envolvem consumo humano, como usos industriais, urbanos e agrícolas (CETESB, 2026).

Além da classificação quanto à potabilidade, o reúso de água também pode ser diferenciado pela origem do efluente. As águas cinzas são provenientes de atividades domésticas que não envolvem esgoto sanitário, podendo ser classificadas em cinza clara, oriunda de lavatórios, chuveiros e máquinas de lavar, e cinza escura, proveniente de pias de cozinha e máquinas de lavar louça, conforme estabelecido pela NBR 16783 (ABNT, 2019). Devido à sua menor carga poluidora, essas águas apresentam elevado potencial de reúso, sendo utilizadas em diferentes aplicações como alternativa para a redução do consumo de água potável.

Por outro lado, as águas negras são provenientes de descargas sanitárias e apresentam maior complexidade, devido à presença de elevada carga orgânica, nutrientes como fósforo e nitrogênio, além de microrganismos patogênicos. Dessa forma, seu reúso exige tratamentos mais avançados e rigoroso controle sanitário (ABNT, 2019; HU et al., 2025)

O reúso de água também pode ser classificado de acordo com o ambiente de aplicação, definido pela resolução CNRH nº 54/2005. O reúso urbano é geralmente aplicado em atividades não potáveis, como irrigação de áreas verdes, lavagem de vias, construção civil e combate a incêndios. O reúso industrial, por sua vez, abrange aplicações como água de processo, limpeza de equipamentos e operações. Já o reúso agrícola é amplamente empregado na irrigação, devendo considerar os requisitos sanitários e a qualidade da água conforme o tipo de cultura (BRASIL, 2005).

Além disso, é mencionado o reúso para aquicultura, aplicado na criação de animais e produção de plantas que necessitam estar submersas na água como o arroz. Por fim, o reúso ambiental envolve aplicações voltadas à recuperação de ecossistemas, como recarga de aquíferos, manutenção de áreas alagadas e aumento da vazão de corpos hídricos (MOURA et al., 2020).

4.2 Legislação brasileira referente a recursos hídricos

A legislação brasileira relacionada aos recursos hídricos está estruturada em diferentes níveis normativos e reflete a importância estratégica da água para os diversos setores da sociedade. Nesse contexto, o conjunto de instrumentos legais busca não apenas regular o uso da água, mas também promover sua conservação, controle e gestão sustentável (MIERZWA et al, 2005).

No âmbito federal, destaca-se a Lei nº 9.433/1997, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH). Essa legislação introduziu princípios fundamentais, como a adoção da bacia hidrográfica como unidade de gestão, a descentralização e participação dos usuários, além do reconhecimento da água como bem público dotado de valor econômico. Esses elementos representam avanços significativos na forma de gestão dos recursos hídricos no país (BRASIL, 1997).

A Lei nº 9.984/2000 estabeleceu a Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), autarquia federal integrante do SINGREH responsável pela regulamentação do uso da água, definição de padrões para outorgas, apoio na criação dos comitês de bacia hidrográfica e estabelecimento de normas para regulação dos serviços públicos de saneamento básico (BRASIL, 2000).

> [...] Art. 4º-A. A ANA instituirá normas de referência para a regulação dos serviços públicos de saneamento básico por seus

> titulares e suas entidades reguladoras e fiscalizadoras, observadas as diretrizes para a função de regulação estabelecidas na Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007.
>
> § 1º Caberá à ANA estabelecer normas de referência sobre:
>
> IX - Reúso dos efluentes sanitários tratados, em conformidade com as normas ambientais e de saúde pública.

No âmbito estadual, a gestão dos recursos hídricos é conduzida por diferentes órgãos responsáveis pela regulamentação, licenciamento e fiscalização, como a CETESB, o DAEE, a SEMIL e o Conselho Estadual de Recursos Hídricos no estado de São Paulo. A legislação estadual complementa as diretrizes federais, adaptando-as às características regionais e às demandas locais.

O Estado de São Paulo estabelece diretrizes para o aproveitamento sustentável de recursos hídricos. A Lei Nº 16.337, de 14 de dezembro de 2016, cria o Plano Estadual de Recursos Hídricos - PERH que divide o estado em 22 unidades hidrográficas, chamadas UGRHIs, a fim de melhorar a gestão de recursos hídricos considerando as características socioambientais de cada local, em relação à água de reúso, ele promove:

> [...] Artigo 9º - São objetivos e diretrizes gerais que cabe ao PERH promover:
>
> d) o incentivo à recirculação e reuso como medida de promoção do uso eficiente e da conservação da água.

A Instrução Técnica DPO nº 13/2017 estabelece exigências do DAEE para obtenção da Declaração Sobre Viabilidade de Implantação e outorga de uso de recursos hídricos para ETEs públicas. Segundo a instrução, o produtor de água de reúso direto deve apresentar projeto técnico, definir a modalidade de uso, comprovar a qualidade da água e implementar controle e rastreabilidade.

Assim como em ETEs públicas, o reúso da água em indústrias deve ser feito com base na formalidade no licenciamento ambiental pela CETESB na autorização do uso da água pelo DAEE. Esse processo exige comprovação técnica, submissão à

Vigilância Sanitária e controle ambiental adequado (CETESB., 2025). As exigências regulatórias aplicáveis ao setor privado são equivalentes às impostas ao setor público.

Por outro lado, a resolução SES/SIMA Nº 01/2020 estabelece os critérios necessários para o reúso não potável de água, proveniente de ETE's públicas ou privadas e de origem predominante doméstica. Apesar de ser para fins urbanos, a legislação se enquadra em atividades também demandadas em plantas industriais, como irrigação paisagística, lavagem de veículos e combate a incêndio, informando os padrões de qualidade que a água tratada pela ETE deve possuir (SÃO PAULO, 2020).

Além disso, o artigo 11 desta resolução (SES/SIMA Nº 01/2020) ressalta a necessidade de minimizar os riscos ao meio ambiente e à saúde durante a aplicação da água de reúso, como por exemplo, através da distância mínima de 70 metros de poços de captação de água potável, de modo a prevenir alterações de qualidade da água subterrânea (parágrafo 4º), ou em horário com menor circulação de pessoas (parágrafo 2º, I) (SÃO PAULO, 2020).

Apesar dos avanços em relação à legalização, ainda existem poucas legislações que abordam critérios e padrões para água de reúso de fins industriais. Isso pode ocorrer devido à diversidade de processos que variam conforme a indústria e a produção específica de cada produto, impossibilitando a padronização de critérios de qualidade. Dessa forma, a expansão do reúso industrial depende não somente dos avanços tecnológicos, mas também do apoio das diretrizes regulatórias e padrões mais claros e específicos.

4.3 Economia Circular

O conceito de economia circular baseia-se na manutenção dos recursos materiais e energéticos em ciclos contínuos, reduzindo a extração de matérias-primas e a geração de resíduos ao longo dos processos produtivos. No setor industrial, essa abordagem está associada à otimização do uso de insumos, à redução dos impactos ambientais e ao aumento da eficiência operacional, contribuindo para a competitividade das empresas (MARCHI DE ALMEIDA et al., 2022).

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos incorpora princípios alinhados à economia circular por meio da política dos 5 Rs: reduzir, repensar, reaproveitar, reciclar e recusar (BRASIL, 2010). Esses conceitos vêm sendo progressivamente adaptados à gestão de recursos hídricos, especialmente no setor

industrial, no qual a água deixa de ser considerada apenas um insumo e passa a ser tratada como um recurso passível de recirculação e reaproveitamento dentro do próprio sistema produtivo.

Nesse contexto, os princípios associados aos “5R’s” aplicados ao reúso de água envolvem diferentes estratégias de gestão hídrica industrial. A redução está relacionada à minimização do consumo de água por meio da otimização de processos, controle de perdas e aumento da eficiência operacional. O reúso consiste na utilização de correntes hídricas em aplicações secundárias dentro da planta industrial, reduzindo a demanda por água potável. Já a reciclagem da água envolve a aplicação de tratamentos que permitem o retorno da água ao mesmo processo produtivo, atendendo aos requisitos específicos de qualidade. A recuperação refere-se ao aproveitamento de recursos presentes nos efluentes, como nutrientes, energia ou compostos químicos de interesse industrial. Por fim, a restauração está associada ao retorno da água ao meio ambiente em condições adequadas de qualidade, contribuindo para a preservação dos ecossistemas aquáticos e para a sustentabilidade dos recursos hídricos (FERNANDES; CUNHA MARQUES, 2023; ÇAĞLAR; ALP, 2026).

A tecnologia e a inovação são pilares para a consolidação da economia circular aplicada ao reúso de água, a integração de soluções de análises de dados, somadas a tratamentos avançados e soluções baseadas na natureza, permite a recuperação e reutilização de água com maior eficiência. Contudo, fatores geográficos e econômicos são uma das principais barreiras para o desenvolvimento dessas tecnologias, principalmente em países em desenvolvimento, o valor do recurso recuperado dita a viabilidade do investimento (ÇAĞLAR; ALP, 2026).

4.4 Sistemas de utilidades industriais

Os sistemas de utilidades industriais compreendem o conjunto de infraestruturas responsáveis por fornecer insumos essenciais ao funcionamento das plantas produtivas, como vapor, água de resfriamento, ar comprimido, energia elétrica e fluidos térmicos. Esses sistemas não necessariamente participam diretamente da transformação do produto, porém são indispensáveis para a viabilidade operacional dos processos industriais e representam uma parcela significativa do consumo total de água na indústria.

Tratando-se de reúso de água, pode-se aplicar em sistemas de geração de vapor (caldeiras), torres de resfriamento, trocadores de calor e, em menor escala, em sistemas de refrigeração como *chillers*.

A adequação da água de reúso para essas aplicações em sistemas de utilidades depende do atendimento a critérios específicos de qualidade, desse modo, a água é condicionada a parâmetros físico-químicos rigorosos, uma vez que a qualidade da água influencia diretamente na eficiência operacional e na integridade dos equipamentos. A tabela 2 retirada da edição mais recente do guia técnico da água da NALCO, apresenta os principais parâmetros avaliados para diferentes fontes de água que possam ser utilizados em indústrias (NALCO WATER, 2017).

Tabela 2 - Parâmetros de qualidade da água para diferentes fontes.

Source	Ground Water	Surface Water	Municipal Wastewater	Refinery Wastewater	Sour Water Stripper Bottoms
Aluminum (Al)	<0.1	<2	0.1–0.5	<0.1	0.1–0.5
Iron (Fe)	<5	<2	0.1–1	0.1–2	0–10
Phosphate (PO_4)	<2	<3	6–12	1–10	0–3
Sulfate (SO_4)	10–100	5–50	100–200	100–2000	1–300
Chloride (Cl)	5–100	5–50	100–400	300–700	2–300
Nitrate (NO_3)	<2	<4	2–11	0–4	<3
Ammonia (NH_3)	<1	<1	5–25	0–20	5–70
Hydrogen sulfide (S)	0–2	<0.1	<0.1	<1	0–50
Phenols (C_6H_5OH)	<0.1	<0.1	<0.1	<0.1	200–400
Conductivity µS/cm	<1000	<500	1200–1600	2000–6000	200–1100
Suspended solids (Total at 105°C)	<2	1–25	<5	10–110	<2
COD(C)	<2	<5	20–80	20–280	430–4300
TOC(C)	<2	<10	10–20	10–130	65–1200

Fonte: The Nalco Water Handbook 4ª Ed (2017)

Em complemento, a Tabela 3 apresenta alguns dos principais fenômenos indesejados que podem comprometer o desempenho de sistemas que utilizam água de reúso em seus processos, bem como os parâmetros de monitoramento empregados para avaliar e controlar tais ocorrências.

Tabela 3- Fenômenos indesejados X Parâmetros

Fenômenos Indesejados	Parâmetros
Corrosão	Cloreto, Sulfato, Amônia, Sulfeto
Incrustração	Cálcio, Magnésio, Silica
Disposição de Sólidos	Ferro, Magnésio, Alumínio ou compostos orgânicos
Crescimento Microbiológico	Fosfato, amônia e compostos orgânicos

Fonte: The Nalco Water Handbook 4ª Ed (2017) (Adaptado)

4.4.1 Torres de Resfriamento, trocadores de calor e *chillers*

As torres de resfriamento são equipamentos cuja função é dissipar o calor gerado nos processos produtivos por meio da transferência térmica entre a água aquecida e o ar ambiente. O sistema pode operar em circuito fechado ou semiaberto, promovendo a recirculação da água. Devido à natureza do seu funcionamento, apresentam perdas contínuas de cerca de 60% a 70% do total da água circulante no sistema passa por evaporação e por purga, o que aumenta significativamente o consumo de água da indústria (MARQUES et al., 2022).

Estudos recentes têm investigado a viabilidade do uso de água de chuva como alternativa para abastecimento dessas torres, buscando reduzir o consumo de água potável e aumentar a eficiência hídrica do processo. Por meio de uma revisão sistemática foi demonstrado que o aproveitamento é viável e pode apresentar benefícios econômicos, porém a variabilidade da sazonalidade das precipitações pode apresentar desafios relevantes, mostrando que a sua implementação depende de aspectos geográficos (BANBOUKIAN et al., 2025).

Paralelamente, pesquisas vêm explorando a adoção de sistemas cíclicos para reposição de água em torres de resfriamento, nos quais a água que seria descartada como efluente é tratada e inserida no sistema para ser utilizada novamente no processo. Nesses modelos, usualmente é utilizada a água clarificada que com o tempo é reposta, nomeada água de Make-Up. A qualidade dessa corrente deve apresentar baixas concentrações de sais, reduzidos teores de sólidos suspensos e controle microbiológico adequado, parâmetros essenciais para evitar incrustação, corrosão, bioincrustação e outros danos (Biedunkova; Kuznietsov; Korbutiak, 2024).

Aplicações práticas desse tipo de estratégia já vêm sendo implementadas em escala industrial. A empresa DOW, reconhecida mundialmente por iniciativas relacionadas à sustentabilidade hídrica, implantou sistemas de reúso de água nas

plantas de Terneuzen (Holanda), Böhlen (Alemanha) e Tarragona (Espanha). Entre os projetos desenvolvidos destaca-se o reúso de efluente municipal tratado na unidade holandesa, posteriormente bombeado para a fábrica e utilizado em processos industriais e no abastecimento de torres de resfriamento (DOW, 2026).

No Brasil, a multinacional Veolia está desenvolvendo um projeto pioneiro em escala mundial. Inspirado em iniciativas de reúso de efluentes municipais já aplicadas na Holanda, o projeto será implementado em Vitória (ES) por meio da instalação de uma Estação de Produção de Água de Reúso (EPAR). Diferentemente de outras experiências internacionais, a unidade brasileira será integrada à estação municipal já existente, aproveitando sua infraestrutura. De acordo com o planejamento, a EPAR utilizará tecnologias avançadas, como biorreatores de membrana de alto desempenho e sistemas de osmose reversa (VEOLIA, 2025).

Entretanto, a viabilidade da aplicação de água de reúso em torres de resfriamento depende diretamente de fatores como o tipo de indústria, a carga poluidora do efluente e as condições específicas de operação. Dessa forma, cada aplicação deve ser avaliada individualmente, considerando os requisitos de qualidade da água e os riscos operacionais associados.

Outro equipamento amplamente empregado em diferentes setores industriais são os trocadores de calor, dispositivos projetados para promover a transferência de energia térmica entre fluidos separados por superfícies metálicas. Existem diversos modelos disponíveis no mercado, como os trocadores do tipo heat pipe, placas, duplo tubo e shell and tube, sendo este último amplamente utilizado em operações que demandam altas pressões e temperaturas (EDREIS; PETROV, 2020).

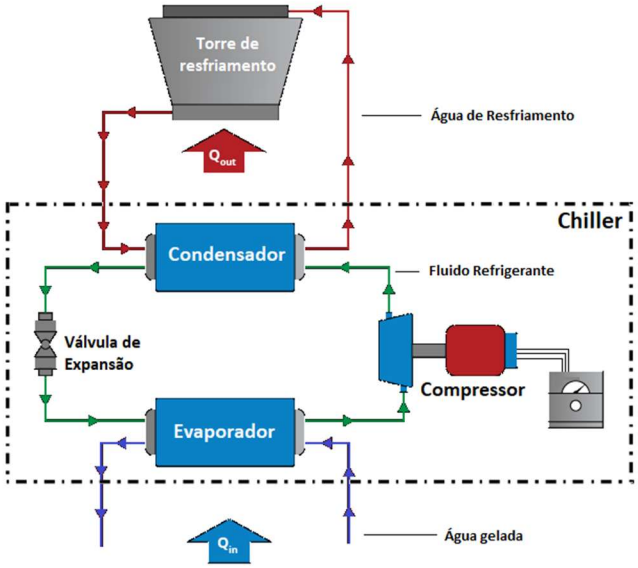
Os trocadores de calor geralmente operam em conjunto com as torres de resfriamento, formando sistemas integrados responsáveis pela dissipação térmica dos processos industriais. Nesse ciclo, a água absorve calor nos trocadores e posteriormente é resfriada nas torres para retornar ao processo.

Nos últimos anos, tem se tornado cada vez mais comum substituir a água potável por água de reúso nesse tipo de aplicação. Essa escolha traz vantagens significativas, como a redução do consumo de recursos hídricos e a diminuição do volume de efluentes descartados, além de atender às exigências ambientais de sustentabilidade (EDREIS; PETROV, 2020).

Em menor escala, os *chillers*, equipamentos projetados para retirar calor de um fluido e garantir estabilidade térmica em diferentes processos industriais, são utilizados em setores que requerem controle constante de temperatura (NEDELCU, 2024).

Os *chillers* de condensação a água operam por meio do ciclo de refrigeração por compressão de vapor, no qual o fluido refrigerante circula entre compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador, promovendo a remoção de calor da água utilizada no sistema.

Figura 1 – Esquema de Funcionamento de *Chiller* Industrial



Fonte: CubiEnergia (2025).

Contudo, a utilização de água de reúso em sistemas de *Chillers* exigiria um tratamento avançado capaz de remover a maior parte dos sais, sólidos dissolvidos e nutrientes, uma vez que esses componentes intensificam processos de incrustação, corrosão e bioincrustação nos circuitos de resfriamento (NEDELCU, 2024).

A norma ISO 22449-1:2020 destaca que a operação com água recuperada requer polimento rigoroso e controle químico contínuo para evitar falhas prematuras e perda de eficiência. Em função desses requisitos técnicos e dos custos associados ao tratamento contínuo e à elevação da demanda energética, análises atuais sobre reúso em sistemas de resfriamento industrial indicam que essa prática frequentemente se torna economicamente inviável para grande parte das indústrias (ISO, 2020).

4.4.2 Caldeiras e purga

Além das torres de resfriamento, outro importante consumidor de água são os sistemas de geração de vapor, especialmente as caldeiras flamotubulares e aquatubulares. Ambas utilizam sistemas de purga para controle de pressão e qualidade da água, com o intuito de evitar incrustações e aumento na frequência de atividades de manutenção.

A estimativa da quantidade de água perdida por purga pode ser estimada a partir de estudos recentes de auditoria e otimização de sistemas de vapor. Segundo Salimi et al. (2023), foi reportada uma vazão de purga da ordem de 221 kg, equivalente a aproximadamente 1,2% da água de alimentação da caldeira. Considerando uma operação industrial de cerca de 300 dias por ano (equivalente a 7.200 h/ano), já descontando paradas para manutenção elétrica, feriados e possíveis manutenções na caldeira, essa vazão representaria uma perda anual aproximada de 1591 t/ano, o que corresponde a uma perda anual de 1,59 milhão de litros de água (SALIMI et al., 2023).

Esses valores evidenciam que, mesmo quando a purga representa um pequeno percentual da vazão de alimentação, o impacto acumulado anual pode se tornar significativo, reforçando aplicações de reúso de água. Diante desse cenário, estratégias voltadas ao tratamento de reúso de purga mostram-se uma boa estratégia para aumento da eficiência hídrica e energética de sistemas de vapor.

Estudos recentes têm avaliado a aplicação da osmose reversa em alta temperatura (high-temperature reverse osmosis – HTRO) para o tratamento direto da purga de caldeiras, demonstrando viabilidade técnica do processo. Foi verificado que o permeado produzido apresenta qualidade compatível com a água de reposição de caldeiras, além de permitir o aproveitamento da energia térmica do efluente quente. Além disso, o estudo demonstrou que operações em temperaturas mais elevadas podem trazer benefícios econômicos, embora existam limitações técnicas em relação ao limite da temperatura podendo promover desgaste nos equipamentos (MINIER-MATAR et al., 2025).

4.4.3 Recuperação de condensado

O condensado é formado a partir da condensação do vapor gerado nos sistemas de caldeiras industriais. Embora parte dessa corrente ainda seja descartada em alguns processos, ela retém quantidade significativa da energia térmica utilizada na geração de vapor. Em sistemas adequadamente projetados, o condensado pode

ser coletado, tratado e reinserido como água de alimentação da caldeira. Dessa forma, a recuperação de condensado constitui uma das estratégias mais empregadas para redução do consumo hídrico em sistemas industriais de geração de vapor (OMRAN, 2024).

Do ponto de vista operacional, o condensado apresenta características favoráveis ao reúso, como elevada temperatura, baixa concentração de sólidos dissolvidos e reduzida dureza, uma vez que já passou previamente por tratamentos antes da vaporização. Essas propriedades diminuem a necessidade de tratamento químico complementar e reduzem a demanda energética para aquecimento da água de reposição, contribuindo também para maior estabilidade do controle químico da caldeira (OMRAN, 2024).

Além dos benefícios relacionados ao consumo hídrico e energético, o reúso de condensado contribui para minimizar processos de incrustação e corrosão nos sistemas de geração de vapor, aumentando a vida útil dos equipamentos e reduzindo intervenções de manutenção. Como o condensado retorna ao sistema em temperaturas elevadas, há menor demanda térmica para atingir novamente o ponto de ebulição, reduzindo o consumo de combustível e, consequentemente, as emissões associadas à geração de vapor (IBN BATOUTA; AOUHASSI; MANSOURI, 2024).

Entretanto, a recuperação de condensado depende do controle adequado da qualidade da corrente retornada, especialmente em indústrias químicas, nas quais pode ocorrer contaminação por compostos orgânicos, óleos ou substâncias de processo. Nesses casos, torna-se necessário o monitoramento contínuo e, quando aplicável, a adoção de tratamentos complementares antes da reinserção do condensado na caldeira (IBN BATOUTA; AOUHASSI; MANSOURI, 2024).

4.5 INDUSTRIA ALIMENTICIA

4.5.1 Panorama do Setor

A indústria alimentícia brasileira ocupa posição de destaque no cenário industrial devido à sua relevância econômica, social e elevada participação no Produto Interno Bruto (PIB). O setor apresenta forte integração com a cadeia agropecuária e ampla participação no mercado internacional, mantendo crescimento de produção e faturamento mesmo diante de pressões econômicas recentes (ABIA, 2026).

Além de sua importância econômica, a indústria alimentícia caracteriza-se pelo elevado consumo de água ao longo das etapas produtivas, especialmente em

operações de processamento, lavagem e higienização. Estudos baseados em dados da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) demonstram que grandes indústrias do setor estão entre os maiores consumidores de recursos hídricos e geradores de efluentes do país. Entre as empresas avaliadas, a Ambev destacou-se entre os maiores volumes de geração de efluentes industriais, evidenciando a elevada demanda hídrica associada à produção de bebidas e alimentos (ROMÃO et al., 2026)

O consumo de água no setor varia significativamente conforme o tipo de produto, escala produtiva e nível de automação industrial. Além disso, operações de higienização, especialmente os sistemas Cleaning in Place (CIP), representam uma parcela significativa da demanda hídrica das plantas industriais, devido à necessidade de frequentes procedimentos de limpeza e sanitização para garantia da segurança alimentar (SHRIVASTAVA et al., 2022).

Diante desse cenário, cresce a necessidade de adoção de práticas voltadas ao uso eficiente da água e à redução da geração de efluentes, especialmente por meio da implementação de tecnologias de tratamento e reúso hídrico. Essas estratégias tornam-se cada vez mais relevantes em função da pressão sobre os recursos hídricos e das exigências ambientais associadas à sustentabilidade industrial.

4.5.2. Processo Produtivo e geração de efluentes

O processo produtivo inicia-se a partir da higienização e sanitização dos equipamentos e superfícies, fundamentais para garantir a qualidade do produto. Primeiramente é removido todo e qualquer tipo de sujidade passando por um procedimento de lavagem com água, seguida a aplicação de agentes sanitizantes, como soluções de hipoclorito de sódio (2%) ou iodo, com o objetivo de remover micro-organismos patogênicos (BICALHO et al, 2020; CARLOS et al, 2018)

Na sequência, ocorre a moagem do malte, etapa essencialmente seca que promove a ruptura do grão, facilitando a ativação das enzimas contidas no grão nas etapas seguintes. Em seguida, é feita a mosturação ou brassagem onde é adicionado água a uma temperatura controlada, geralmente entre 60 ºC e 65 ºC, possibilitando a conversão do amido em açúcares fermentáveis, etapa importante para a formação da espuma ideal (BICALHO et al, 2020).

Posteriormente, é realizada a etapa de filtração, onde o bagaço é lavado de acordo com a quantidade de cerveja produzida por ciclo, seguida pela fervura para

retirar componentes amargos e aromáticos do lúpulo e pela evaporação da água dos componentes (CARLOS et al, 2018).

De acordo com a CETESB, segundo uma pesquisa realizada no ano de 2005, a distribuição do consumo de água no processo cervejeiro, mostra que cerca de 20% do total de água é utilizado na etapa de preparo do mosto, as outras porcentagens estão distribuídas em 11% relacionados a resfriamento, 25% na produção de vapor, uso doméstico e perdas e 44% em operações de limpeza e desinfecção (CASADO et al, 2026).

Ademais, o produto denominado mosto passa pela etapa mais importante de produção, a fermentação, onde os açúcares serão transformados em etanol e gás carbônico por meio da levedura *Saccharomyces* em um ambiente na ausência de oxigênio, transformando o produto na cerveja. Por fim, o produto passa por uma etapa denominada *priming* para a carbonatação da cerveja e em seguida é envasada (BICALHO et al, 2020).

A geração de efluentes ocorre ao longo de praticamente todas as etapas do processo produtivo, destacando-se especialmente nas operações de limpeza e sanitização de equipamentos, como nas lavadoras de garrafas, na higienização de filtros-prensa e nos descartes provenientes da etapa de pasteurização. Dentre as etapas produtivas, o envase se sobressai como uma das principais fontes de geração de efluentes, podendo apresentar resíduos como fragmentos de rótulos, perdas de produto fora do prazo de validade, além de pequenas quantidades de óleos e graxas (MARIA et al, 2023).

Os efluentes gerados caracterizam-se por elevada carga orgânica, apresentando altos valores de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO), fósforo total, nitrogênio total e sólidos: totais, voláteis e suspensos. Devido à alta variação das características específicas do efluente não há um tratamento padronizado, essas dependem de métodos de produção, ingredientes utilizados e práticas de manejo adotadas na indústria (MARIA et al, 2023).

4.5.3 Tecnologias de tratamento no setor

O reúso de água na indústria alimentícia, especialmente na produção de cerveja, está diretamente relacionado à aplicação de tecnologias de tratamento capazes de adequar a qualidade do efluente aos requisitos de cada uso. De modo geral, essas tecnologias atuam na redução da carga poluidora, na remoção de

contaminantes dissolvidos e, em níveis mais avançados, na produção de água com qualidade compatível para reúso interno.

Entre essas tecnologias, destacam-se os processos biológicos, amplamente utilizados devido à elevada carga orgânica dos efluentes cervejeiros. A digestão anaeróbia tem se consolidado como uma alternativa eficiente, permitindo simultaneamente o tratamento do efluente e a geração de energia na forma de biogás, em função das altas concentrações de carbono e nitrogênio presentes. Além de contribuir para a redução da carga orgânica, essa tecnologia pode gerar benefícios econômicos, sendo o biogás aproveitado para produção de eletricidade ou energia térmica em sistemas de utilidades, como caldeiras e torres de resfriamento (MARIA et al, 2023)

No Brasil, iniciativas já utilizam essa abordagem tanto para geração elétrica quanto térmica, ampliando o uso de fontes renováveis no setor. Adicionalmente, o resíduo gerado pode ser empregado como substituto de fertilizantes minerais, embora essa aplicação exija avaliações ecotoxicológicas rigorosas, especialmente diante das lacunas regulatórias ainda existentes no país (MARIA et al, 2023)

Para aplicações de reúso mais exigentes, especialmente aquelas que demandam maior qualidade da água, torna-se necessária a integração de processos físico-químicos e de separação por membranas. Nesse sentido, a combinação de tecnologias como ultrafiltração (UF), ozonização (O_3), filtração por carvão ativado biológico (BAC) e osmose reversa (OR) tem sido amplamente investigada, como demonstrado por estudos recentes (Viegas et al, 2025). A ozonização atua como etapa de pré-tratamento, promovendo a oxidação de compostos orgânicos complexos e aumentando sua biodegradabilidade. Em seguida, a filtração por carvão ativado biológico contribui para a remoção de compostos dissolvidos remanescentes por meio de mecanismos combinados de adsorção e biodegradação (DREWNOWSKI et al, 2023).

As tecnologias de membranas, por sua vez, desempenham papel fundamental no polimento final da água. A ultrafiltração é frequentemente utilizada como etapa intermediária, removendo sólidos suspensos, coloides e parte da matéria orgânica, além de atuar como pré-tratamento da osmose reversa, reduzindo o potencial de incrustação. Já a osmose reversa é responsável pela remoção de sais dissolvidos e compostos de baixo peso molecular, possibilitando a produção de água com qualidade

elevada, adequada para reúso em sistemas industriais. Estudos demonstram que a combinação UF-OR é altamente eficiente, promovendo reduções significativas de parâmetros como DQO, carbono orgânico total (TOC) e cor, além de garantir condições operacionais adequadas para sistemas de membranas (DREWNOWSKI et al, 2023).

Apesar desses avanços, o permeado da ultrafiltração ainda pode conter contaminantes dissolvidos e microrganismos, o que reforça a necessidade de etapas adicionais de desinfecção ou polimento. Assim, a eficiência global dos sistemas de tratamento está diretamente relacionada à integração adequada das tecnologias e ao controle de variáveis operacionais, como pH e tipo de coagulante, que influenciam a formação de flocos e o desempenho das membranas. Dessa forma, observa-se que o reúso de água na indústria cervejeira não depende de uma tecnologia isolada, mas sim da combinação estratégica de diferentes processos, ajustados conforme a qualidade requerida para cada aplicação.

4.5.4 Aplicações De Reuso

O reúso de efluentes industriais no setor alimentício encontra uma de suas principais aplicações nos processos de limpeza, etapa praticamente intrínseca a esse tipo de indústria e fundamental para a garantia da segurança dos alimentos, assegurando a qualidade do produto e a conformidade com as normas sanitárias vigentes.

Nesse contexto, destaca-se o sistema *Cleaning in Place* (CIP), que opera por meio da circulação controlada de soluções de limpeza no interior de equipamentos, tubulações e tanques, sem a necessidade de desmontagem. Essas soluções são geralmente compostas por água, agentes alcalinos, ácidos e sanitizantes, tornando o processo responsável por um consumo significativo de água e pela geração de efluentes com elevada carga orgânica e química (VAN ASSELT et al, 2025).

De forma geral, o ciclo de limpeza envolve etapas sequenciais de pré-enxágue, lavagem alcalina, enxágue intermediário, lavagem ácida, novo enxágue e, por fim, sanitização. A eficiência da remoção de resíduos em superfícies em contato com matérias-primas exige sistemas altamente integrados e automatizados, com múltiplos circuitos, sensores e controle rigoroso de parâmetros operacionais. Além disso, a frequência e o volume de água utilizados variam conforme o tipo de processo produtivo e as exigências sanitárias; na indústria de laticínios, por exemplo, o CIP

pode ser realizado ao menos uma vez ao dia, devido à elevada suscetibilidade do leite ao crescimento microbiológico, o que demanda padrões rigorosos de higienização (VAN ASSELT et al, 2025). Adicionalmente, a eficácia e o desempenho dos sistemas CIP estão diretamente relacionados às características da unidade produtiva, como escala, tipo de produto e nível de automação, fatores que influenciam o grau de controle operacional e a flexibilidade do processo (JIN et al, 2025).

A partir de uma busca na base SCOPUS utilizando a string (“cleaning in place” OR CIP) AND (“water reuse” OR “wastewater reuse” OR recycling OR “reclaimed water”) AND (industry OR industrial), observa-se que ainda são escassos os estudos que abordam diretamente a aplicação de água de reúso em sistemas CIP. Entre as estratégias identificadas, destaca-se a reutilização da água do enxágue final (terceiro enxágue) para o enxágue inicial do ciclo subsequente, por meio da utilização de tanques de água recuperada (PEREIRA; HANSEN, 2020). Essa abordagem permite reduzir significativamente o consumo de água e a geração de efluentes, sem comprometer, em princípio, a eficiência do processo.

Entretanto, a limitada quantidade de estudos pode ser explicada, em parte, pelas dificuldades inerentes à validação da eficácia do CIP. Diferentemente de outras operações industriais, a eficiência da limpeza não pode ser verificada integralmente por inspeção direta, sendo assegurada principalmente por meio de rigoroso controle de processo, baseado em parâmetros como tempo, temperatura, ação química e ação mecânica (JIN et al, 2025). Nesse cenário, a introdução de água de reúso pode gerar incertezas adicionais quanto à presença de contaminantes residuais e à variabilidade da qualidade da água, o que tende a reforçar uma postura conservadora tanto na indústria quanto na produção científica.

Além disso, observa-se que muitas das melhorias implementadas em sistemas CIP estão associadas à otimização operacional e à automação do processo, como ajustes em parâmetros de tempo, temperatura e condutividade, bem como modificações em softwares de controle e estratégias de recuperação de soluções. Tais medidas, apesar de apresentarem alta complexidade técnica, podem ser implementadas com maior facilidade, frequentemente apresentam maior viabilidade econômica quando comparadas à incorporação de sistemas de reúso de água, o que pode contribuir para a priorização dessas alternativas em detrimento de soluções baseadas em reúso (JIN et al., 2025; PEREIRA; HANSEN, 2020).

Para além dos sistemas de limpeza, o reúso de água na indústria cervejeira pode ser explorado diretamente no processo produtivo, por meio do reúso potável direto (DPR). Essa estratégia, ainda se encontra em estágio inicial, sendo explorada tanto em estudos científicos quanto em iniciativas demonstrativas. Do ponto de vista científico, destaca-se o projeto *B-WaterSmart*, que avalia, em escala piloto, a viabilidade do uso de água de reúso tratada por tecnologias avançadas, como ultrafiltração, ozonização, filtração por carvão ativado biológico e osmose reversa, para a produção segura de cerveja (VIEGAS et al, 2025).

De forma paralela, destaca-se a *Pure Water Brewing Alliance*, uma iniciativa que reúne cervejeiros, empresas de engenharia e fornecedores de tecnologia com o objetivo de demonstrar a viabilidade técnica e promover a aceitação do uso de água reciclada na produção de bebidas. A água empregada nesses projetos é proveniente do tratamento avançado de efluentes, como no caso do programa *Pure Water San Diego*, que busca ampliar a segurança hídrica por meio do reúso potável direto. Essas iniciativas evidenciam não apenas a viabilidade técnica do reúso potável, mas também seu papel estratégico na diversificação das fontes de abastecimento e na promoção de soluções sustentáveis no setor de bebidas (Water Environment Federation, 2026).

No que se refere à regulamentação dessa prática, observa-se que sua aplicação ainda depende fortemente do contexto regional. Em geral, as diretrizes se baseiam em referências consolidadas, como o *Water Reuse Action Plan* e as recomendações da Organização Mundial da Saúde. No entanto, a ausência de uma padronização global para o reúso potável direto em alimentos e bebidas faz com que sua implementação permaneça condicionada a regulamentações locais, o que ainda representa um dos principais entraves para a ampla adoção dessa prática (VIEGAS et al, 2025).

4.6 Indústria Papel Celulose

4.6.1 Panorama do Setor

A indústria de papel e celulose constitui um dos principais segmentos da cadeia de base florestal, abrangendo desde a produção de polpa celulósica a partir da extração de madeira até a fabricação de papéis e embalagens destinados a diversos setores da economia.

No cenário internacional, o Brasil ocupa posição de destaque, consolidando-se como um dos principais produtores globais. De acordo com o relatório publicado pela

Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em parceria com a *International Energy Agency* (IEA), o país figura como o segundo maior produtor mundial de celulose, respondendo por mais de 11% da produção global. Em relação ao papel, o Brasil também se destaca, se posicionando entre os dez maiores produtores do mundo (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2023).

Apesar dessa relevância econômica, o setor de papel e celulose caracteriza-se como um dos mais intensivos no uso de recursos hídricos, em função dos elevados volumes de água demandados nas etapas de preparação da polpa, lavagem, branqueamento e formação da folha. O consumo de água nesse setor apresenta elevada variabilidade, podendo atingir valores entre 10 e 300 m³ por tonelada produzida, dependendo de fatores como o tipo de processo produtivo, a tecnologia empregada e o nível de recirculação adotado (ESMAEELI et al., 2023).

Essa variabilidade pode ser observada também entre diferentes tipos de produtos, uma vez que papéis destinados a embalagens tendem a apresentar menor consumo hídrico, cerca de 20 m³/t, enquanto a produção de polpa de mercado e papéis mais processados demanda 2,5 vezes mais volume de água. (ESMAEELI et al., 2023).

Esse consumo expressivo gera considerável volume de efluentes, cujas características predominantes incluem alta carga orgânica e coloração intensa, exigindo tratamento adequado tanto para a redução dos impactos ambientais quanto para a viabilização de estratégias de reúso. O reúso de água tem se consolidado como uma estratégia essencial para a redução do consumo hídrico no setor, a elevada geração de efluentes, somada às exigências específicas de qualidade da água em diferentes etapas do processo produtivo, favorece a adoção de sistemas de recirculação e reaproveitamento interno (HUNG et al, 2024).

4.6.2 Processo produtivo e geração de efluentes

O processo produtivo da indústria de papel e celulose inicia-se com a preparação da madeira, envolvendo etapas de corte, descascamento e picagem dos cavacos, seguida pela polpação. Essa etapa pode ocorrer por processos de alto rendimento, como os métodos mecânicos, termomecânicos e semiquímicos, ou por processos exclusivamente químicos (SOUZA, 2024)

Dentre estes, o processo kraft é o mais amplamente utilizado, devido à sua elevada eficiência na remoção da lignina e à possibilidade de recuperação dos

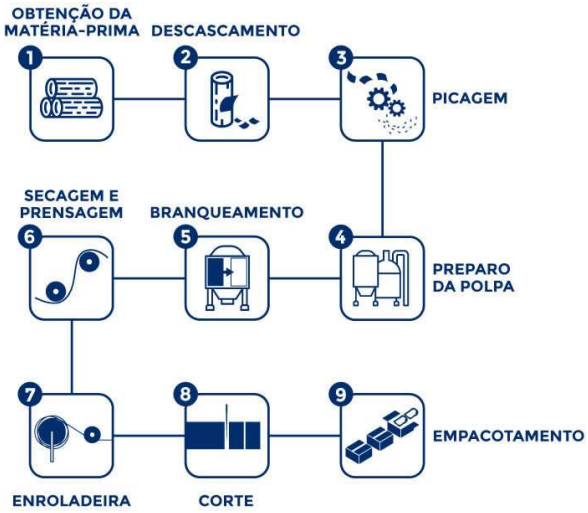
reagentes químicos empregados. Contudo, esse processo apresenta desvantagens, como o elevado custo de implementação, maior consumo energético em determinadas etapas e a emissão de compostos reduzidos de enxofre, responsáveis por odores desagradáveis e potenciais impactos ocupacionais (SOUZA, 2024).

Dentre as etapas de processo, a polpação e as etapas de lavagem de polpa destacam-se como uma das principais geradoras de efluentes, pois demandam grande quantidade de água para a remoção do licor residual. Este possui compostos orgânicos e lignina dissolvida, resultando em efluente gerado que apresenta alta Demanda Química de Oxigênio (DQO), cor e sólidos dissolvidos. Em seguida, a polpa passa pelo processo de branqueamento, cujo objetivo é remover o residual de lignina e tornar o produto mais claro. Essa etapa envolve a aplicação de substâncias oxidantes, como o oxigênio, dióxido de cloro e ozônio. O branqueamento assim, como a etapa de polpa gera efluentes com elevada carga orgânica e presença de compostos organoclorados (HUNG et al, 2024).

Por fim, o processo inclui operações de formação da folha, prensagem, secagem e empacotamento. Quando comparadas às etapas de polpação e branqueamento, essas operações apresentam menor geração de efluentes, sendo comum a adoção de sistemas de recirculação de água de processo com o objetivo de otimizar o consumo hídrico industrial (LIANG et al., 2023).

Os efluentes gerados ao longo do processo de produção de papel e celulose contêm compostos orgânicos provenientes da degradação de carboidratos, lignina dissolvida e extrativos da madeira. Além disso, etapas de branqueamento que utilizam compostos à base de cloro podem gerar organoclorados, substâncias associadas a impactos ambientais e maior complexidade no tratamento dos efluentes (ESMAEELI et al., 2023).

Figura 2 – Esquema da produção de papel e celulose



Fonte: Thermomatic (2026)

4.6.3 Tecnologias tratamento no setor

Diante das características complexas dos efluentes gerados nas diferentes etapas do processo produtivo de celulose, diferentes tecnologias têm sido desenvolvidas e aplicadas com o objetivo de reutilizar o efluente em etapas do próprio processo industrial.

O tratamento de efluentes na indústria de papel e celulose geralmente inicia-se por etapas de tratamento primário, que envolvem operações físicas e físico-químicas como remoção de areia, peneiramento e gradeamento, responsáveis principalmente pela remoção de sólidos suspensos. Em seguida, em geral o efluente passa por um decantador primário e processos biológicos, como sistemas de lodos ativados e lagoas aeradas, responsáveis pela remoção da maior parte da matéria orgânica biodegradável (LIANG et al., 2023).

Entretanto, para o efluente poder ser reutilizado no sistema, são necessárias etapas adicionais de tratamento, pois podem ainda permanecer com elevada carga orgânica, coloração intensa e significativa concentração de compostos organoclorados e dioxinas provenientes principalmente da degradação da lignina durante as etapas de polpação e branqueamento (PATEL et al, 2021).

Nesse contexto, tecnologias complementares, como sistemas de membranas e processos de oxidação avançada, têm sido amplamente investigadas e aplicadas para aumentar a eficiência do tratamento.

Um exemplo relevante é a aplicação de sistemas baseados em biorreatores de membranas (MBR), que integram processos biológicos com tecnologias de separação

por membranas, como a ultrafiltração. A empresa Veolia implementou essa tecnologia em uma fábrica de produção de celulose branqueada de eucalipto em Portugal, com capacidade superior a 200.000 toneladas anuais. O objetivo do projeto foi atender às regulamentações ambientais e, simultaneamente, possibilitar o aumento da produção (VEOLIA, 2022).

A adoção dessa solução permitiu elevar a eficiência do tratamento, reduzir o volume de efluentes descartados e melhorar significativamente a qualidade da água tratada. Adicionalmente, a água tratada foi submetida a processos complementares, como a osmose reversa, possibilitando sua reutilização como água de processo na própria indústria, contribuindo para a redução do consumo hídrico (VEOLIA, 2022).

Processos de oxidação avançada também têm sido aplicados no tratamento de efluentes da indústria de papel e celulose, especialmente para a remoção de compostos derivados da lignina responsáveis pela coloração característica desses efluentes. Tecnologias como ozonização, processo Fenton e sistemas UV/H_2O_2 têm demonstrado elevada eficiência na redução de parâmetros como DQO, cor e compostos fenólicos, sendo frequentemente empregadas como etapa complementar ao tratamento biológico convencional. A integração de diferentes tecnologias de tratamento tem se mostrado uma estratégia eficaz para melhorar a qualidade do efluente tratado e viabilizar sua reutilização em diferentes etapas do processo industrial (JAVEED et al, 2023).

4.6.4 Aplicações de reúso

A água proveniente do tratamento de efluentes pode ser inserida no processo produtivo por meio do reúso, sendo frequentemente utilizada na irrigação de plantações de eucalipto, principal matéria-prima das indústrias brasileiras de papel e celulose. Além do fornecimento de água, esses efluentes tratados podem conter matéria orgânica e nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, que contribuem para a fertilidade do solo. Entretanto, estudos indicam que a aplicação contínua dessa água no solo pode provocar alterações em suas propriedades físicas, incluindo redução da resistência estrutural, diminuição da condutividade hidráulica e desagregação dos agregados do solo (LIANG et al, 2023).

Além das aplicações no setor florestal, os efluentes tratados também podem ser reutilizados diretamente nas operações industriais da própria fábrica. A recirculação interna de água representa uma das principais estratégias de reúso na

indústria de papel e celulose, sendo baseada na reintegração de correntes hídricas entre diferentes etapas do processo produtivo (LIANG et al, 2023).

Nesse contexto, correntes de água provenientes de etapas do processo, como a lavagem de polpa e a formação da folha, podem ser reutilizadas em operações subsequentes, como diluição de polpa, transporte de fibras e limpeza de equipamentos, desde que apresentem qualidade compatível com o uso pretendido (LIANG et al, 2023).

Essa recirculação ocorre por meio de circuitos internos de água de processo, frequentemente associados ao reaproveitamento da chamada *whitewater* ou água de processo que provém da folha de papel úmida na seção de formação. Para garantir a qualidade dessa água recirculada, são empregadas unidades internas de tratamento, separadas em três diferentes circuitos.

No primeiro o filtrado clarificado com menor concentração de sólidos suspensos é utilizado em operações que não demandam alta qualidade da água, como diluição da polpa, a água resultante é recirculada novamente no sistema de filtração e direcionada para unidades de tratamento conhecidas como *save-all*, responsáveis pela separação sólido-líquido e recuperação de fibras e materiais particulados. Esses sistemas utilizam operações como filtração, sedimentação e flotação, sendo os filtros de disco amplamente empregados devido à elevada eficiência na clarificação da água e recuperação de fibras para reinserção no processo produtivo (JAVEED et al, 2023).

A alteração da matéria-prima é outro fator relevante na redução dos recursos hídricos estudos apontam que ao substituir papéis comuns por papéis reciclados há uma redução de 9% de água e até 70% de energia. Além disso para cada um dos tipos de papéis produzidos possuem uma taxa de reaproveitamento de água em alguns casos como em embalagens de papelão cerca de 95% do sistema é composto por água reaproveitada (JAVEED et al, 2023).

Entretanto, o aumento da recirculação interna pode levar ao acúmulo progressivo de contaminantes, como sólidos dissolvidos, compostos orgânicos e substâncias derivadas da lignina, os quais podem interferir na eficiência do processo e na qualidade do produto. Dessa forma, a implementação exige controle operacional rigoroso, incluindo monitoramento contínuo da qualidade da água e, quando necessário, a adoção de etapas complementares de tratamento (LIANG et al, 2023).

Dessa forma, o reúso de efluentes tratados se apresenta como uma estratégia eficaz para a otimização do uso da água na indústria de papel e celulose, sendo amplamente adotado em conjunto com sistemas de recirculação interna e tecnologias avançadas de tratamento, contribuindo para a sustentabilidade hídrica do setor.

Entretanto, o fechamento de circuitos hídricos apresenta desafios operacionais relevantes, principalmente relacionados ao acúmulo de contaminantes ao longo do sistema. A concentração de sólidos dissolvidos, matéria orgânica e compostos derivados da lignina pode comprometer a estabilidade do processo, favorecer a formação de incrustações, corrosão e bioincrustação, além de impactar a qualidade do produto (ESMAEELI et al, 2023).

Dessa forma, a implementação de circuitos fechados exige a integração de tecnologias avançadas de tratamento e estratégias de controle operacional, como purgas controladas e monitoramento contínuo da qualidade da água. Apesar dessas limitações, o fechamento de ciclos hídricos representa uma das abordagens mais eficazes para a redução do consumo de água fresca e da geração de efluentes, estando diretamente alinhado aos princípios da economia circular e à sustentabilidade industrial (LIANG et al, 2023).

4.7 Indústria Têxtil

4.7.1 Panorama do setor

A indústria têxtil possui elevada relevância econômica em escala mundial, destacando-se pela geração de empregos e elevada capacidade produtiva. No Brasil, o setor figura entre os cinco maiores produtores têxteis do mundo e ocupa a quarta posição no segmento de vestuário, além de possuir uma cadeia produtiva completa, desde a produção de fibras até o varejo. Apesar de sua importância econômica, a indústria enfrenta desafios relacionados à competitividade frente aos produtores asiáticos, devido a fatores como elevados custos de produção e baixo investimento em inovação tecnológica (CAVALCANTI; DOS SANTOS, 2022).

A indústria têxtil é reconhecida como uma das atividades industriais de maior consumo hídrico, principalmente devido às operações de beneficiamento úmido, como lavagem, tingimento e acabamento dos tecidos. Essas etapas demandam grandes volumes de água e utilizam diversos produtos químicos, incluindo corantes, ácidos, álcalis, surfactantes, agentes dispersantes e compostos oxidantes, resultando na geração de efluentes com elevada carga poluidora. Estima-se que fábricas têxteis de

médio porte consumam aproximadamente 200 litros de água por quilograma de tecido processado diariamente (HOLKAR et al, 2016).

Além do elevado consumo hídrico, os processos de tingimento e acabamento são responsáveis por parcela significativa da geração de efluentes industriais. Segundo estimativas, essas etapas podem representar cerca de 17 a 20% do total de águas residuais geradas pelo setor industrial. Os efluentes têxteis apresentam elevada concentração de corantes e compostos orgânicos de difícil degradação, além de sólidos suspensos e substâncias potencialmente tóxicas ao meio ambiente (HOLKAR et al, 2016).

Entre os diferentes segmentos da indústria têxtil, destaca-se a produção de denim (jeans), tanto pelo elevado volume de produção quanto pelo intenso consumo de água, especialmente nas etapas de tingimento, lavagem e acabamento. A ampla utilização de produtos químicos e sucessivas etapas de beneficiamento úmido tornam esse segmento um dos principais geradores de efluentes da indústria têxtil, reforçando a necessidade de estratégias voltadas ao tratamento e reúso de água (NAHAR et al, 2024).

4.7.2 Processo produtivo e geração de efluentes

A produção do denim envolve diversas etapas industriais, incluindo preparação das fibras, fiação, tingimento, engomagem, tecelagem, desengomagem e acabamento, cada uma contribuindo de maneira distinta para o consumo hídrico e para a geração de efluentes industriais.

O processo produtivo inicia-se com as etapas de abertura, limpeza, alinhamento e fiação das fibras, operações predominantemente mecânicas que apresentam baixa geração de efluentes líquidos. Em seguida, ocorre o tingimento dos fios de urdume, normalmente realizado com corante índigo por meio de sucessivos ciclos de imersão, oxidação e lavagem. Essa etapa demanda elevado consumo de água e significativa utilização de produtos químicos auxiliares, resultando na geração de efluentes com alta coloração, presença de corantes, sais dissolvidos e elevada demanda química de oxigênio (DQO) (CUNDUBEY; AZGIN, 2024; DAL ET AL, 2024).

Posteriormente, os fios passam pelo processo de engomagem, no qual são aplicados compostos como amido, acrílicos e carboximetilcelulose (CMC), com a finalidade de aumentar a resistência mecânica durante a tecelagem. Após a formação do tecido, realiza-se a desengomagem, etapa responsável pela remoção desses

compostos por meio do uso intensivo de água, gerando efluentes com elevada carga orgânica, aumento da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e significativa concentração de sólidos dissolvidos (CUNDUBEY; AZGIN, 2024; DAL ET AL, 2024).

Entre os processos úmidos da indústria têxtil, o pré-tratamento, o tingimento e o acabamento destacam-se pelo elevado consumo hídrico decorrente das sucessivas etapas de lavagem e enxágue. Além disso, processos como desengomagem e pré-tratamento contribuem significativamente para o aumento da carga orgânica dos efluentes devido à remoção de amidos, surfactantes e compostos químicos utilizados nas etapas anteriores (CUNDUBEY; AZGIN, 2024). Processos de pré-tratamento de tecidos planos podem demandar cerca de 2128 m³/dia de água, enquanto etapas de tingimento e impressão apresentam consumos próximos de 2549 m³/dia. Além do elevado consumo hídrico, essas etapas também apresentam alta carga poluidora, com pegada hídrica cinza de até 3542 L/kg em processos de tingimento de malhas (DAL et al, 2024).

Após a tecelagem e confecção das peças, o denim segue para as etapas de acabamento, responsáveis por conferir características estéticas e funcionais ao tecido. Entre os principais processos destacam-se as lavagens convencionais, *stone wash, bleach wash, enzyme wash* e tratamentos químicos localizados, como aplicação de permanganato de potássio (PP spray), ozônio e agentes oxidantes (SHAMSUZZAMAN et al, 2021). Essas operações utilizam elevados volumes de água, surfactantes, oxidantes e agentes químicos auxiliares, originando efluentes complexos caracterizados por alta turbidez, sólidos suspensos, compostos recalcitrantes e elevada carga orgânica.

Destacam que as etapas de lavagem e acabamento do denim representam importantes fontes de geração de efluentes da indústria têxtil, sendo responsáveis pela liberação de compostos como óleos, graxas, soda cáustica, sais, metais pesados, sulfetos e resíduos de corantes nos corpos hídricos. Os autores também ressaltam que parte significativa dos produtos químicos utilizados nos processos de tingimento e acabamento permanece nos efluentes após o processamento têxtil, contribuindo para o aumento da toxicidade e dificultando o tratamento desses resíduos líquidos (SHAMSUZZAMAN et al, 2021).

De maneira geral, as etapas de tingimento, desengomagem e acabamento concentram a maior parcela do consumo hídrico e da geração de efluentes no setor

têxtil. Os efluentes gerados apresentam características complexas, incluindo elevada coloração, alta demanda química e bioquímica de oxigênio (DQO e DBO), sólidos suspensos totais (SST), sólidos dissolvidos totais (SDT), óleos e graxas, além da presença de compostos recalcitrantes de difícil degradação biológica (SHAMSUZZAMAN et al, 2021).

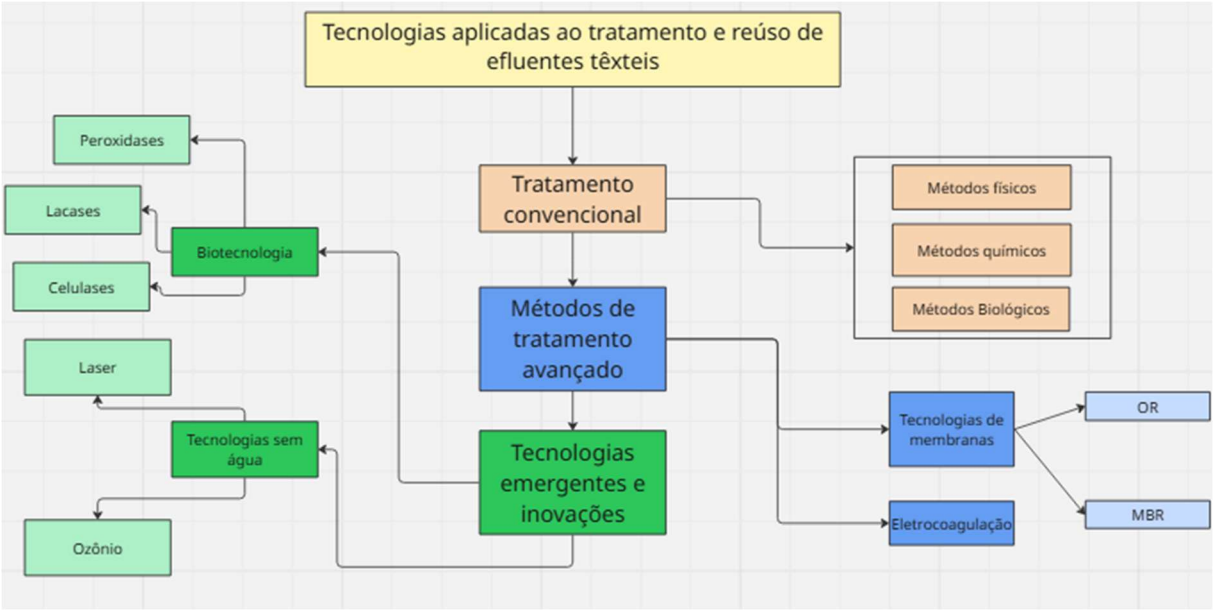
Diante desse cenário, a literatura recente tem enfatizado a adoção de estratégias de produção mais limpa e reúso de água na indústria têxtil. Segundo Dal et al. (2024), técnicas como reutilização de correntes específicas de efluentes, otimização de processos de lavagem, recuperação de água de enxágue, aplicação de membranas de ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (RO), além da implementação de *Best Available Techniques* (BATs), podem promover reduções significativas no consumo hídrico e na geração de efluentes. Os autores estimaram reduções superiores a 60% na pegada hídrica total de processos têxteis mediante a aplicação integrada dessas tecnologias, demonstrando a relevância do reúso de água como estratégia para aumentar a sustentabilidade do setor (DAL et al, 2024).

4.7.3 Tecnologias Aplicadas ao tratamento de efluente e melhoria de processos

Os efluentes provenientes da indústria têxtil apresentam características que tornam seu tratamento particularmente complexo, destacando-se a elevada coloração, alta concentração de sólidos suspensos e sais dissolvidos, além da presença de compostos orgânicos de difícil degradação. Parte dessa complexidade está associada à utilização de corantes sintéticos, especialmente os corantes reativos empregados em processos de tingimento, que possuem elevada estabilidade química e baixa biodegradabilidade. (MIRZA et al, 2020).

A indústria têxtil emprega diferentes tecnologias para o tratamento e reúso de efluentes, variando desde métodos convencionais até tecnologias avançadas e processos emergentes voltados à sustentabilidade e redução do consumo hídrico. De maneira geral, os sistemas de tratamento podem ser divididos em tratamentos convencionais, métodos avançados e tecnologias emergentes e inovadoras, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Mapa mental de tecnologias aplicadas a tratamento de efluentes têxteis



Fonte: Autoria própria (2026)

Além das tecnologias convencionais de tratamento de efluentes, a indústria têxtil tem incorporado estratégias voltadas à redução da geração de resíduos e ao aumento da circularidade dos processos produtivos por meio de tecnologias emergentes. Nesse contexto, destacam-se as tecnologias sem água (*waterless technologies*), como sistemas a laser, ozonização e tratamento por plasma, especialmente nas etapas de acabamento e desbotamento do denim.

A tecnologia a laser permite substituir processos convencionais de desgaste e descoloração do jeans, reduzindo significativamente o consumo de água, energia e produtos químicos, além de minimizar a geração de efluentes industriais. O processo apresenta elevada precisão operacional, possibilidade de automatização computadorizada e maior padronização dos efeitos estéticos quando comparado aos métodos tradicionais de lavagem química e abrasão mecânica (NAYAK et al, 2022).

De maneira semelhante, a aplicação de ozônio atua como alternativa aos processos convencionais de lavagem oxidativa, promovendo a degradação do corante índigo com menor necessidade de água e enxágues sucessivos. Além da redução do consumo hídrico, o ozônio pode atuar como agente oxidante e esterilizante, permitindo a diminuição do uso de produtos químicos auxiliares e contribuindo para a redução da carga poluidora dos efluentes gerados.

Tecnologias baseadas em plasma também vêm sendo investigadas devido à capacidade de modificar superficialmente o tecido sem alterar significativamente suas

propriedades estruturais, reduzindo ou até eliminando o uso de água em determinadas operações, como a descoloração do jeans azul, substituindo processos convencionais de lavagem química e abrasão mecânica (ESPINOSA et al, 2026).

Além da aplicação no acabamento têxtil, sistemas baseados em plasma vêm sendo estudados no tratamento de efluentes devido à geração de espécies altamente reativas, como radicais hidroxila (•OH), ozônio (O_3) e peróxido de hidrogênio (H_2O_2), capazes de promover a degradação de corantes e compostos orgânicos recalcitrantes presentes nos efluentes têxteis. Apesar do elevado potencial oxidativo, a aplicação dessa tecnologia em escala industrial ainda apresenta limitações relacionadas ao elevado consumo energético, complexidade operacional dos reatores e possível formação de subprodutos durante o processo oxidativo (ESPINOSA et al, 2026).

A integração dessas tecnologias possibilitou reduções de até 97% no consumo de água e entre 70% e 90% no consumo energético em empresas do setor denim avaliadas no estudo. Além disso, os autores destacam a utilização integrada de sistemas de ultrafiltração e osmose reversa para recuperação e reúso interno da água de processo, contribuindo para estratégias de economia circular e redução do descarte de efluentes líquidos na indústria têxtil (NAYAK et al, 2022).

Ademais, a aplicação de enzimas vem sendo considerada uma alternativa sustentável aos processos convencionais de acabamento do denim. Entre as principais enzimas utilizadas, destacam-se as celulases, responsáveis pela hidrólise superficial das fibras celulósicas, promovendo efeitos de desbotamento, amaciamento e aparência envelhecida ao tecido. Estudos recentes demonstram que a imobilização dessas enzimas em suportes poliméricos, como quitosana e Eudragit S-100, aumenta significativamente sua estabilidade térmica, resistência operacional e potencial de reutilização, contribuindo para a redução de custos e impactos ambientais associados ao processo. Além disso, a utilização de celulases imobilizadas reduz problemas de backstaining e danos físicos ao tecido, tornando o processo mais eficiente e sustentável para aplicações industriais no beneficiamento do denim (MADHU AMIT, 2024).

Além disso, a biotecnologia também vem possibilitando o desenvolvimento de rotas mais sustentáveis para a produção e aplicação do índigo utilizado no denim. Tecnologias chemoenzimáticas baseadas na produção de indican, precursor natural do índigo, utilizando enzimas modificadas por engenharia proteica, vêm sendo

estudadas como alternativa ao tingimento convencional do jeans. Esses processos eliminam a necessidade de agentes redutores agressivos e condições fortemente alcalinas tradicionalmente empregadas no tingimento do denim, contribuindo para a redução da carga química presente nos efluentes gerados (BIDART et al, 2024).

Adicionalmente, processos de tingimento enzimático e fotolítico têm demonstrado potencial para reduzir significativamente os impactos ambientais associados ao processamento do jeans, incluindo menor toxicidade, redução do consumo de recursos fósseis e diminuição da geração de resíduos químicos. Como consequência, observa-se a formação de efluentes menos complexos e com menor concentração de compostos recalcitrantes, favorecendo a aplicação de tratamentos avançados e estratégias de reúso industrial da água no setor têxtil (BIDART et al, 2024).

4.7.4 Aplicações de reuso

A água proveniente do tratamento de efluentes têxteis pode ser reinserida em diferentes etapas do processamento do denim, principalmente nas operações de tingimento, lavagem e acabamento das peças. De maneira geral, o reúso ocorre em processos como *stone wash*, enxágues, lavagens oxidativas e etapas de tingimento, nas quais há elevada demanda hídrica e intenso consumo de água ao longo da produção.

Estudos recentes demonstram que a utilização de água recuperada após tratamento avançado pode ocorrer inclusive em sistemas contendo elevada proporção de água reutilizada, sem comprometer parâmetros de qualidade do tecido exigidos pela indústria internacional do denim. Em avaliações realizadas com amostras produzidas utilizando 100% de efluente tratado e misturas contendo 90% de água de reúso, os tecidos apresentaram desempenho satisfatório em parâmetros como peso do tecido, solidez da cor à fricção, resistência à água, suor e saliva, mantendo resultados compatíveis com os padrões exigidos por marcas europeias e norte-americanas (NAHAR et al, 2024).

Além da viabilidade técnica, a implementação de sistemas de reciclagem e reúso de efluentes tratados apresenta potencial significativo para redução da demanda por água subterrânea e diminuição dos custos operacionais associados ao abastecimento hídrico industrial. Estudos de caso realizados em indústrias de denim em Bangladesh demonstraram que a operação adequada de estações de tratamento

de efluentes associadas ao processo de lodos ativados possibilitou a reutilização da água tratada nas etapas úmidas da produção, especialmente em lavanderias industriais e unidades de processamento úmido (NAHAR et al, 2024).

Os autores estimaram que a substituição integral da água subterrânea por água reciclada poderia promover redução superior a 60% na captação hídrica da unidade industrial, além de diminuir os custos energéticos relacionados ao bombeamento de água subterrânea.

No Brasil, estudos realizados em Pernambuco demonstraram que 83% das lavanderias de jeans já apresentavam algum tipo de reúso de água durante o processo produtivo, principalmente por meio da recirculação de efluentes tratados em etapas de beneficiamento. Os resultados indicaram que a reutilização contribuiu para a redução dos custos relacionados à compra de água, especialmente em regiões marcadas pela escassez hídrica (FILHO et al, 2021).

Além disso, os autores observaram que o aumento das taxas de reúso promove redução proporcional do consumo de água bruta por quilograma de jeans beneficiado, evidenciando ganhos ambientais e econômicos simultaneamente. Entretanto, o estudo destaca que sistemas de reúso em circuito fechado ainda apresentam limitações operacionais relacionadas ao acúmulo progressivo de substâncias químicas ao longo das etapas de lavagem e tingimento, tornando necessária a reposição parcial de água fresca ao sistema (FILHO et al, 2021).

5. DISCUSSÃO

5.1 Comparativo entre indústrias

Os setores alimentício, de papel e celulose e têxtil apresentam elevada demanda hídrica e significativa geração de efluentes, porém diferem quanto às características dos resíduos gerados, às exigências de qualidade da água e às possibilidades de reúso dentro do processo produtivo. De maneira geral, observou-se que a viabilidade do reúso industrial está diretamente relacionada à complexidade dos efluentes, ao grau de tratamento empregado e às exigências operacionais de cada setor.

Na indústria alimentícia, especialmente no setor cervejeiro, a principal limitação para ampliação do reúso está associada às exigências sanitárias e microbiológicas, tendo em vista que se trata de um produto de consumo humano. Como os processos possuem contato direto ou indireto com alimentos, há necessidade de elevado controle da qualidade da água, o que restringe aplicações mais amplas de reúso potável direto. Dessa forma, as aplicações observadas concentram-se principalmente em sistemas auxiliares e operações de limpeza, como os sistemas CIP, nos quais o reúso ocorre de forma mais conservadora e geralmente associado à reutilização de correntes específicas de enxágue.

Apesar dessas limitações, estudos recentes demonstram crescente interesse em tecnologias avançadas para reúso potável direto, especialmente associadas a processos de membranas e oxidação avançada. Contudo, a aceitação popular ainda representa um dos principais desafios para a ampliação dessa prática. Desse modo, divulgações científicas em formato popular ou eventos amplos poderiam ser utilizados para ampliar o conhecimento da população e aumentar a aceitação dessa alternativa para a produção de cerveja.

Na indústria de papel e celulose, por outro lado, verificou-se maior consolidação das práticas de recirculação interna de água. Isso ocorre porque grande parte das operações industriais não exige água com padrão potável, favorecendo a implementação de circuitos fechados e sistemas de reaproveitamento contínuo. Além disso, a própria configuração do processo produtivo possibilita a reutilização de correntes hídricas em diferentes etapas, como lavagem de polpa, transporte de fibras e formação da folha.

Entretanto, o aumento das taxas de recirculação promove o acúmulo progressivo de compostos orgânicos, lignina e sólidos dissolvidos, exigindo controle operacional rigoroso e integração com tecnologias avançadas de tratamento.

Já na indústria têxtil, especialmente no processamento do denim, observou-se uma abordagem distinta, marcada não apenas pelo tratamento e reúso dos efluentes, mas também pela redução da própria geração de resíduos líquidos por meio de tecnologias emergentes. Tecnologias sem água, como laser, ozônio e plasma, demonstram que a sustentabilidade hídrica no setor pode ser alcançada tanto pela recuperação da água quanto pela substituição de processos convencionais altamente consumidores de recursos hídricos. Além disso, a aplicação de água recuperada em etapas como tingimento, *stone wash* e acabamento apresentou resultados satisfatórios quanto à qualidade final do tecido, evidenciando elevado potencial de ampliação do reúso industrial no setor.

Outro aspecto relevante observado entre os setores refere-se às tecnologias predominantes de tratamento. Enquanto a indústria alimentícia apresenta forte dependência de processos biológicos associados a sistemas de polimento avançado, a indústria de papel e celulose demanda tratamentos voltados principalmente à remoção de matéria orgânica e compostos derivados da lignina. Já no setor têxtil, os tratamentos precisam lidar com elevada coloração, compostos recalcitrantes e sais dissolvidos, favorecendo a aplicação de tecnologias como osmose reversa, nanofiltração, eletrocoagulação e processos oxidativos avançados.

De forma geral, verificou-se que a combinação de diferentes tecnologias de tratamento constitui a estratégia mais eficiente para viabilizar o reúso industrial. Em praticamente todos os setores analisados, os melhores resultados foram observados em sistemas híbridos, nos quais processos biológicos, físico-químicos e membranas atuam de forma integrada para adequação da qualidade da água às exigências de cada aplicação industrial.

5.2 Desafios para o reúso no Brasil

Os avanços tecnológicos nos últimos anos não foram suficientes para resolver o problema do reúso de água no Brasil. Ainda há muitas limitações técnicas, econômicas e regulatórias que precisam ser superadas. Um dos principais obstáculos é a falta de regras específicas para o reúso de água em indústrias. Embora existam diretrizes para o reúso em cidades e agricultura, não há padrões nacionais para atender às necessidades das indústrias, que são muito variadas.

Além disso, o custo de implementar tecnologias avançadas de tratamento de água, como a osmose reversa, é muito alto. Isso torna difícil para as indústrias justificar economicamente o investimento no reúso de água. No entanto, em regiões onde a água é escassa, o reúso pode ser uma opção mais viável.

Outra problemática é que, quando a água é reutilizada, os sais e os sólidos dissolvidos podem se acumular e causar problemas operacionais. Isso pode levar à incrustação, corrosão e outros problemas que afetam a eficiência dos sistemas industriais. Portanto, é fundamental monitorar constantemente a qualidade da água e controlar rigorosamente o processo de reúso.

Além das limitações técnicas, também existem fatores institucionais e culturais que influenciam a adoção do reúso industrial. Em alguns setores, como a indústria alimentícia, há uma resistência ao uso de água recuperada, mesmo que seja tratada adequadamente. Isso se deve, em parte, à falta de regulamentações claras e protocolos padronizados.

No entanto, a pressão sobre os recursos hídricos e as exigências ambientais estão aumentando, e as empresas estão começando a investir em sistemas de recirculação e recuperação de água. Isso não apenas reduz a captação de água e a geração de efluentes, mas também aumenta a eficiência operacional e traz benefícios econômicos.

Portanto, o avanço do reúso industrial no Brasil depende de uma abordagem integrada que inclua políticas públicas, incentivos econômicos, regulamentações específicas e gestão hídrica industrial eficaz. A ampliação do reúso de água é fundamental para aumentar a segurança hídrica, reduzir os impactos ambientais e promover a economia circular no setor industrial.

6. CONCLUSÃO

O reúso de água apresenta-se como uma estratégia fundamental para a redução da demanda por água potável e para a minimização dos impactos ambientais associados às atividades industriais. Ao longo deste trabalho, verificou-se que os setores alimentício, de papel e celulose e têxtil possuem elevada intensidade hídrica, além de gerarem volumes significativos de efluentes líquidos, o que reforça a necessidade de adoção de práticas voltadas à gestão eficiente dos recursos hídricos.

Nos diferentes setores analisados, observou-se que a implementação de sistemas de reúso está diretamente associada à aplicação de tecnologias de tratamento capazes de adequar a qualidade da água às exigências de cada processo industrial. Tecnologias convencionais, como tratamentos físicos, químicos e biológicos, continuam desempenhando papel importante na remoção de contaminantes, porém os estudos recentes demonstram crescente utilização de tecnologias avançadas, incluindo processos com membranas, osmose reversa, biorreatores com membranas (MBR) e processos oxidativos avançados, visando ampliar a eficiência do tratamento e possibilitar aplicações de reúso em etapas mais críticas do processo produtivo.

Na indústria alimentícia, verificou-se que as principais limitações estão relacionadas às exigências sanitárias e microbiológicas, o que restringe aplicações mais amplas de reúso potável. Já na indústria de papel e celulose, destacam-se os elevados índices de recirculação interna de água, favorecidos pela própria configuração do processo produtivo. No setor têxtil, especialmente no processamento do denim, observou-se não apenas a ampliação das práticas de reúso, mas também o desenvolvimento de tecnologias voltadas à redução da própria geração de efluentes, como processos a laser, ozônio, plasma e biotecnologias aplicadas ao acabamento dos tecidos.

Além dos benefícios ambientais, os estudos analisados demonstraram que o reúso industrial pode proporcionar vantagens operacionais e econômicas, incluindo redução da captação de água, diminuição dos custos associados ao abastecimento hídrico e redução do volume de efluentes descartados. Entretanto, a ampliação dessas práticas ainda depende de fatores como viabilidade econômica, monitoramento contínuo da qualidade da água, controle operacional e desenvolvimento de regulamentações mais específicas para aplicações industriais.

Dessa forma, conclui-se que o reúso de água constitui uma alternativa relevante para promoção da sustentabilidade hídrica industrial, estando diretamente associado aos princípios da economia circular e da gestão sustentável dos recursos naturais. O avanço dessas práticas tende a tornar-se cada vez mais necessário diante do crescimento da demanda hídrica, das limitações de disponibilidade de água e das exigências ambientais relacionadas à sustentabilidade industrial.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS (ABIA). **Indústria de alimentos contribui para conter inflação, lidera a geração de empregos e sustenta crescimento em 2025**. São Paulo, 2026. Disponível em: https://abia.org.br/release/industria-de-alimentos-contribui-para-conter-inflacao-lidera-a-geracao-de-empregos-e-sustenta-crescimento-em-2025/. Acesso em: 15 abr. 2026.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **ABNT NBR 16783**: uso de fontes alternativas de água não potável em edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

BANBOUKIAN, Aline *et al.* Exploring the Potential of Rainwater Harvesting for Cooling Towers: A Systematic Review and Regional Feasibility Assessment. **Results in Engineering**, v. 28, 1 dez. 2025.

BICALHO PIMENTA, Larissa *et al.* A história e o processo da produção da cerveja: uma revisão. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, v. 37, n. 3, p. 26715, 25 nov. 2020.

BIEDUNKOVA, Olha; KUZNIETSOV, Pavlo; KORBUTIAK, Vasyl. Evaluation of return cooling water reuse in the wet cooled power plant to minimise the impact of water intake and drainage. **Sustainable Chemistry for the Environment**, v. 7, 1 set. 2024.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 1997. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 18 de maio 2026.

BRASIL. **Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000**. Dispõe sobre a criação da Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA), entidade federal de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2000. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9984.htm. Acesso em: 18 maio 2026.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA**). Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005**. Estabelece diretrizes gerais para o reúso direto não potável de água. Brasília, DF: CONAMA, 2005. Disponível em: https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2054.pdf. Acesso em: 18 maio 2026.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Brasília, DF: Presidência da República, 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 18 maio 2026.

CARLOS, Daniely Marreiro; ARAÚJO, Paolo Germanno Lima; QUEIROZ, Herlene Greyce da Silveira. Higienização em indústrias de bebidas – segmento cerveja: uma revisão de literatura. **Revista de Nutrição e Vigilância em Saúde**, [S. l.], 2018.

CASADO. *et al*. **REDUÇÃO DO CONSUMO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA DE BEBIDAS**. Associação Brasileira de Recursos Hidricos. Disponível em: https://revistas.abrhidro.org.br/article.php?Article=4394. Acesso em: 18 mai. 2026

ÇAĞLAR, İpek; ALP, Emre. Rethinking water in the circular economy: a review of policy approaches in action plans in Europe and pillars of the circular water economy. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [S. l.], v. 72, p. 101626, 2026. DOI: 10.1016/j.cosust.2026.101626. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877343526000229?via%3Dihub. Acesso em: 18 maio 2026.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **CETESB – reúso de água.** São Paulo, [s. d.]. Disponível em: CETESB. Acesso em: 18 maio 2026.

DOW. **Industrial water reuse case study**. Midland, 2026. Disponível em: https://corporate.dow.com/content/dam/corp/documents/science-sustainability/066-00202-01-industrial-water-reuse-case-study.pdf?. Acesso em: 13 abr. 2026.

DREWNOWSKI, Jakub et al. Strategy towards the use of ultrafiltration and reverse osmosis for industrial water recovery and reuse as part of the Green Deal implementation. **Desalination and Water Treatment**, [S. l.], v. 305, p. 227–235, 2023.

EDREIS, Edreis; PETROV, A. Types of heat exchangers in industry, their advantages and disadvantages, and the study of their parameters. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, [S. l.], 2020.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **A indústria de papel e celulose no Brasil e no mundo: panorama geral**. Rio de Janeiro: EPE, 2023.

ESMAEELI, Ali et al. A comprehensive review on pulp and paper industries wastewater treatment advances. **Industrial and Engineering Chemistry Research**, [S. l.], 2023.

FERNANDES, Evaristo; CUNHA MARQUES, Rui. Review of water reuse from a circular economy perspective. **Water**, Basel, v. 15, n. 5, 2023.

HOLKAR, Chandrakant R. et al. A critical review on textile wastewater treatments: possible approaches. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 182, p. 351–366, 2016.

HU, Zhifeng et al. Iron-carbon galvanic cells enhance an anaerobic-aerobic-anoxic baffled reactor pretreatment for simultaneous organic and nitrogen removal from decentralized black water. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. l.], v. 13, n. 2, 2025.

HUNG, Yung-Tse et al. Wastewater treatment in the pulp and paper industry: a review. **Global Journal of Engineering and Technology Advances**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 001–005, 2024.

IBN BATOUTA, Kawtar; AOUHASSI, Sarah; MANSOURI, Khalifa. Energy saving potential in steam systems: a techno-economic analysis of a recycling pulp and paper mill industry in Morocco. **Scientific African**, [S. l.], v. 26, 2024.

INTERNATIONAL COTTON ADVISORY COMMITEE. Summary note. [S.l]: **ICAC**, 2025. Disponível em: https://interreg-sudoe.eu/wp-content/uploads/2025/05/E.1.1.4_PT_Annex_v2.pdf. Acesso em: 28 maio 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). **ISO 22449-1:2020 – Use of reclaimed water in industrial cooling systems – Part 1: Technical guidelines**. Geneva: ISO, 2020. Disponível em: https://standards.iteh.ai/catalog/standards/iso/31f5c545-2649-4d8a-9e2a-662857da875f/iso-22449-1-2020?. Acesso em: 18 maio 2026.

JAVEED, Tariq et al. Application of advanced oxidation processes for the treatment of color and chemical oxygen demand of pulp and paper wastewater. **Water**, Basel, v. 15, n. 7, 2023.

JIN, Guoxing et al. Intelligent clean-in-place (CIP) system in beverage (healthy water) cleaner production. **Food Control**, [S. l.], v. 168, 2025.

JOSÉ CARLOS MIERZWA JONATHAN ESPÍNDOLA IVANILDO HESPANHOL. **Água na industria uso racional e reúso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

LIANG, Xiaoli et al. Sustainable utilization of pulp and paper wastewater. **Water**, Basel, v. 15, n. 23, 2023.

MARCHI DE ALMEIDA, Ilton et al. Cadeia de suprimentos sustentável, economia circular, indústria 4.0 e gestão do conhecimento. **Exacta**, São Paulo, v. 22, n. 1, p. 144–160, 2022.

MARIA, Mariana Pires et al. Current advances in the brewery wastewater treatment from anaerobic digestion for biogas production: a systematic review. **Environmental Advances**, [S. l.], v. 14, 2023.

MARQUES, Guilherme Ianusckiewicz; NIZZOLI FILHO, Irio; SANTOS, Aldo Ramos. Utilização de água de reuso como reposição de perda de água em torres de resfriamento. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 11, 2022.

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

MINIER-MATAR, Joel et al. Evaluation of high-temperature reverse osmosis for recycling boiler blowdown in industrial applications. **Journal of Water Process Engineering**, [S. l.], v. 69, 2025.

MOURA, Priscila Gonçalves et al. Water reuse: a sustainable alternative for Brazil. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 25, n. 6, p. 975–984, 2020.

NALCO WATER. **The NALCO Water handbook**. 4. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.

NEDELCU, Otilia. Industrial cooling systems: a comprehensive review of technologies, challenges, and future directions. **The Scientific Bulletin of Electrical Engineering Faculty**, [S. l.], v. 24, n. 2, p. 80–87, 2024.

OMRAN, Ibrahem. Importance of condensate recovery in industrial operations “AMOC CASE”. **International Journal of Innovative Science and Research Technology**, [S. l.], p. 2618–2628, 2024.

PATEL, Kartik et al. Trends and strategies in the effluent treatment of pulp and paper industries: a review highlighting reactor options. **Current Research in Microbial Sciences**, [S. l.], v. 2, 2021.

PEREIRA, Letícia do Couto; HANSEN, Éverton. Wastewater reuse in the clean in place process of a beverage industry. **Journal of Engineering and Technology for Industrial Applications**, [S. l.], v. 6, n. 21, p. 47–54, 2020.

ROMÃO, Ana Lúcia Eufrázio et al. Water usage in Brazil’s industrial sector: estimated withdrawal, consumption, and discharge by the 30 largest industries in the country. **Ambiente & Água**, Taubaté, v. 21, p. 1–34, 2026.

SALIMI, Mohsen et al. Technical-economic analysis of energy efficiency solutions for the industrial steam system of a natural gas processing plant. **Sustainability**, Basel, v. 15, n. 20, p. 14995, 2023.

SANTOS, Ana Silvia Pereira; LIMA, Maíra Araújo de Mendonça. Technical note 2 – legal aspects of water reuse serving as a guideline for institutionalizing this practice in Brazil. **Cadernos Técnicos Engenharia Sanitária e Ambiental**, [S. l.], v. 2, n. 3, p. 15–27, 2022.

SÃO PAULO (Estado). **Resolução Conjunta SES/SIMA nº 01, de 13 de fevereiro de 2020.** Dispõe sobre os procedimentos e critérios para a prática segura de reúso direto não potável de água no estado de São Paulo. São Paulo, SP: Secretaria de Estado da Saúde; Secretaria de Infraestrutura e Meio Ambiente, 2020. Disponível em: https://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/cao_urbanismo_e_meio_ambiente/legislacao/leg_estadual/leg_est_resolucoes/Resol-cjta-SES-SIMA-01-2020_Processo-ssrh-90-2016_reuso-de-agua-nao-potavel_fins_urbano_ETE.pdf. Acesso em: 18 maio 2026.

SAWADOGO, B. et al. Beer and soft drinks industry wastewater treatment using an anoxic-aerobic membrane bioreactor (MBR) coupling with nanofiltration in sahelian context. **Desalination and Water Treatment**, [S. l.], v. 126, p. 32–39, 2018.

SHRIVASTAVA, Vaibhav et al. Wastewater in the food industry: treatment technologies and reuse potential. **Chemosphere**, [S. l.], v. 293, 2022.

SILVA FILHO, Antonio Romão Alves da et al. Análise da importância do reuso da água em lavanderias de beneficiamento de jeans. **Research, Society and Development**, [S. l.], v. 10, n. 6, p. e40710614402, 2021.

SOUZA, Juliana Pinheiro Neves de. **Revisão do processo de obtenção da celulose kraft e suas tecnologias**. *Ciências Agrárias*, v. 28, ed. 134, maio 2024. DOI: 10.5281/zenodo.11352194.

UNESCO WORLD WATER ASSESSMENT PROGRAMME. **The United Nations World Water Development Report 2024: water for prosperity and peace**. Paris: UNESCO, 2024.

VAN ASSELT, Arjan J. et al. Is cleaning in place (CIP) ready for the future? – A critical assessment. **Food and Bioproducts Processing**, [S. l.], v. 154, p. 270–281, 2025.

VEOLIA. **An innovative approach to water reuse in the pulp & paper industry**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <www.veoliawatertechnologies.com>.

VEOLIA. **Tecnologias avançadas da Veolia estabelecem novos padrões para reúso de água em larga escala no Brasil**. [S. l.], 2025.Disponível em: <https://www.latinoamerica.veolia.com/pt/noticias/tecnologias-avancadas-da-veolia-estabelecem-novos-padroes-para-reuso-de-agua-em-larga>. Acesso em: 13 abr. 2026.

VIEGAS, Rui M. C. et al. Pilot-scale demonstration of advanced wastewater treatment for direct potable water reuse for beer production. **Separation and Purification Technology**, [S. l.], v. 372, 2025.

WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). **Pure Water Brewing Alliance**. Alexandria, [s.d.]. Disponível em: <https://www.wef.org/purewaterbrewingalliance?utm_source=chatgpt.com>. Acesso em: 15 maio. 2026.