

TECNOLOGIAS DE MEMBRANAS E P+L: CONVERGÊNCIAS PARA A SUSTENTABILIDADE NO USO DA ÁGUA

MARTELLO, Caique Mendonça¹

FRACAROLLI, João Victor Boldrin²

MIGUEL, José Vitor Pereira³

Resumo

Este estudo examinou a operação de um sistema de osmose reversa (OR) para o tratamento e reutilização de água em uma indústria de gelatina e colágeno em um estudo de caso aplicado, exploratório e descritivo. Tanto as informações quantitativas (taxa de fluxo, condutividade, dureza, volume tratado, eficiência de remoção de sais etc.) quanto as observações qualitativas da operação foram analisadas. A comparação dos sistemas inicial e proposto resultou em melhorias notáveis, como um aumento de 90,9% na taxa de fluxo nominal, um aumento de 79,7% no volume total tratado e a manutenção da dureza do permeado em um limite aceitável, indicando uma maior eficiência do sistema e recuperação de água, mesmo após um aumento da carga iônica e da dureza de entrada.

Palavras-chave: Osmose reversa. Produção mais Limpa (P+L). Reuso de água. Tratamento industrial.

1 Introdução

A água é essencial à vida e desempenha papel central em diversas atividades humanas, com relevância biológica, econômica, social e cultural. Ela sustenta processos vitais, permite transporte, geração de energia, produção de alimentos, atividades industriais, recreação e paisagismo, além de contribuir na assimilação de poluentes, função simples, mas essencial (HESPANHOL; MIERZAWA, 2005).

¹ Graduando em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário Municipal de Franca Uni-FACEF. Endereço eletrônico: caiquemartelo98@gmail.com.

² Graduando em Engenharia de Produção pelo Centro Universitário Municipal de Franca Uni-FACEF. Endereço eletrônico: fracarolli.joao@gmail.com.

³ Doutor pela USP e Docente do Centro Universitário Municipal de Franca Uni-FACEF. Endereço eletrônico: josevitor@facef.br.

Nesse cenário, o conceito de Produção mais Limpa (P+L) apresenta-se como um referencial estratégico para orientar soluções sustentáveis, como a osmose reversa. Proposto pela *United Nations Environment Programme* (UNEP) em 1988, esse enfoque preventivo e integrado busca o uso eficiente dos recursos naturais, a minimização da geração de resíduos e a redução de riscos ambientais e à saúde humana. Diferentemente das técnicas corretivas de fim-de-tubo, a P+L privilegia a prevenção da poluição, a eliminação de desperdícios e a melhoria contínua dos processos (UNEP, 1996; ALMEIDA, 2002; ONU, 2015).

Sob essa perspectiva, a aplicação da osmose reversa para o reuso de efluentes industriais não deve ser entendida apenas como uma tecnologia de tratamento, mas como parte de uma estratégia de sustentabilidade mais abrangente. Ao integrar inovação tecnológica com os princípios da Produção mais Limpa, esse processo contribui para a eficiência no uso da água, para a redução da carga poluidora e para a consolidação de práticas industriais alinhadas às metas ambientais globais (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001; METCALF; EDDY, 2003; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Diante do fortalecimento das exigências ambientais e da constante evolução das legislações, as indústrias vêm intensificando a busca por soluções sustentáveis que permitam reduzir seus impactos e, ao mesmo tempo, assegurar a conformidade legal. Nesse cenário, uma indústria localizada em Franca – SP adotou a implantação de um sistema de reaproveitamento e tratamento de efluentes, voltado à otimização do uso da água e à redução da carga poluidora. O projeto considerou um consumo médio de aproximadamente 60 m³/h no setor de instalação, associado a uma elevada geração de efluentes, o que reforçou a necessidade de tecnologias mais eficientes e alinhadas aos princípios de sustentabilidade.

A implantação do sistema de tratamento e reuso de água ocorreu em duas etapas distintas. No projeto inicial, foi instalada uma unidade de osmose reversa integrada aos filtros já existentes, com a finalidade de avaliar o desempenho da tecnologia e identificar possíveis melhorias operacionais. Entretanto, essa primeira fase enfrentou diversas dificuldades, especialmente devido às grandes variações na qualidade da água bruta disponível para tratamento. Essas oscilações estavam

relacionadas às etapas de preparação e condicionamento da matéria-prima utilizada no processo produtivo, que geravam flutuações significativas na concentração de sais, sólidos suspensos e compostos orgânicos. Essa instabilidade exigiu constantes ajustes no pré-tratamento e representou um desafio para a manutenção da eficiência das membranas, aumentando a necessidade de monitoramento contínuo. Apesar dessas barreiras, o sistema conseguiu operar, demonstrando a viabilidade da osmose reversa como tecnologia de tratamento.

Com base nos resultados obtidos, foi concebido um projeto atualizado e mais robusto, que expandiu o sistema por meio da adição de novos equipamentos, resultando em maior capacidade de tratamento e reuso eficiente. Essa segunda etapa teve como foco principal garantir o aumento da vazão tratada sem comprometer de forma significativa a eficiência das membranas, buscando alcançar maior taxa de recuperação de água e reduzir o volume de rejeito gerado. Dessa forma, o sistema passou a oferecer um suprimento de água recuperada mais compatível com as demandas operacionais da indústria, contribuindo não apenas para a redução do consumo de água potável, mas também para a diminuição da carga poluente lançada no meio ambiente. Além disso, a expansão representou um passo importante em direção à Produção mais Limpa (P+L), uma vez que promoveu o uso racional dos recursos hídricos, diminuiu a dependência de mananciais externos e alinhou o processo produtivo com práticas sustentáveis e requisitos legais cada vez mais rígidos.

A osmose reversa, tecnologia central nesse sistema, permite a remoção de sais, impurezas orgânicas e outros contaminantes por pressão, retendo solutos indesejados em membranas semipermeáveis. No contexto industrial, é essencial no tratamento de água para caldeiras, prevenindo danos e falhas que comprometem a eficiência operacional. O processo envolve pré-tratamento com abrandadores, ajuste de pH, dosagem de produtos químicos e filtração, seguido de desmineralização por colunas catiônicas e aniônicas e desaeração térmica para remover oxigênio dissolvido e gases corrosivos (SCHNEIDER; TSUTIYA, 2001; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006; METCALF; EDDY, 2003).

Com a crescente demanda por água de alta pureza, a osmose reversa tem se destacado frente a tratamentos convencionais, oferecendo eficiência, menor geração de resíduos e caráter de tecnologia limpa (VAN DER BRUGGEN et al., 2003; ONU, 2015; UNEP, 1996). Apesar de consolidada, sua aplicação em efluentes industriais de alta carga contaminante, as chamadas “águas pesadas”, ainda é pouco explorada, especialmente na indústria de colágeno e gelatina. Assim, compreender seu funcionamento e aplicabilidade é fundamental para avaliar eficiência, rendimento operacional e impacto na sustentabilidade, com potencial de avanços significativos na economia de recursos e redução da carga poluente (ALMEIDA, 2002; MELLO, 2002).

1.1 Objetivo geral

Apresentar e analisar o projeto de osmose reversa implementado para o tratamento e reuso de efluentes na indústria de gelatina e colágeno, destacando seu desempenho operacional, eficiência de recuperação de água e qualidade do permeado produzido.

1.2 Objetivos específicos

- Levantar e descrever os projetos de osmose reversa, identificando os objetivos de cada sistema e as condições de operação inicial.
- Mapear as intervenções realizadas, analisando as alterações implementadas e mensurando as melhorias alcançadas ao longo do processo.
- Avaliar os resultados obtidos após as modificações, com ênfase no desempenho da planta, eficiência do sistema, recuperação de água e qualidade do permeado produzido.

1.3 Justificativa

Diante desse cenário, o presente projeto busca validar a implementação técnica da osmose reversa no tratamento de efluentes gerados durante o preparo da matéria-prima nesse segmento industrial através de um estudo de caso. Além de contribuir com dados práticos sobre o desempenho do equipamento frente a águas com elevada complexidade, a proposta visa demonstrar os ganhos em recuperação de água e sustentabilidade, reforçando a importância da reutilização de recursos hídricos em processos produtivos.

2 Referencial teórico

2.1 Importância global da água e ações tomadas para seu reuso consciente

A água e o saneamento básico são elementos fundamentais para o desenvolvimento sustentável, estando diretamente relacionados à erradicação da pobreza, à promoção da saúde pública, ao crescimento econômico e à preservação ambiental. No entanto, o cenário global revela desafios críticos: cerca de 2,2 bilhões de pessoas ainda não têm acesso à água potável gerida de forma segura, e mais de 4,2 bilhões vivem sem saneamento adequado. Além disso, 80% das águas residuais são devolvidas à natureza sem qualquer tipo de tratamento, e aproximadamente 70% das zonas úmidas naturais já foram perdidas. As mudanças climáticas intensificam esses problemas, por meio de eventos como secas, enchentes e escassez hídrica. A pandemia de COVID-19 também agravou a situação, ao destacar ainda mais a importância do acesso à água e ao saneamento como medidas básicas de prevenção à propagação de doenças (UNITED NATIONS, 2025).

A água é considerada um recurso naturalmente renovável devido ao ciclo hidrológico. Quando reciclada por meios naturais, apresenta-se como um recurso limpo e seguro, mas a atividade antrópica frequentemente leva à sua deterioração em diferentes níveis de poluição. Ainda assim, mesmo poluída, a água pode ser recuperada e reutilizada para diversas finalidades, desde que sejam respeitados critérios técnicos, sanitários e econômicos. A qualidade da água disponível e o tipo de reuso pretendido determinarão os níveis de tratamento necessários, os critérios de segurança e os custos operacionais envolvidos (HESPANHOL, 2002).

Com o intuito de enfrentar essas questões, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 6 como parte da Agenda 2030, visando garantir a disponibilidade e gestão sustentável da água e do saneamento para todos até 2030. A trajetória da ONU nesse tema é marcada por iniciativas importantes, como a Conferência de Mar del Plata em 1977, que reconheceu a água potável como uma necessidade básica, e a criação do Dia Mundial da Água em 1993. Outros marcos incluem a Década Internacional da Água Potável (1981-1990), a Declaração do Milênio (2000), e o reconhecimento da água e

saneamento como direitos humanos pela Resolução 64/292 da Assembleia Geral em 2010. Mais recentemente, o Marco de Aceleração Global do ODS 6 foi lançado como um esforço para acelerar as metas hídricas, reforçando a necessidade de liderança nacional e cooperação internacional para transformar os compromissos em ações concretas (UNITED NATIONS, 2025)

Dessa forma o reuso tem sido cada vez mais buscado como solução para os desafios associados à destinação dos efluentes, que tradicionalmente eram vistos como "resíduos inevitáveis". Nessa lógica, a alternativa mais comum tem sido a busca por locais e formas de dispor esses efluentes ao menor custo possível, mesmo que isso não represente a melhor solução ambiental. Assim, os sistemas de reuso devem ser concebidos dentro de uma visão sustentável e integrada, levando em consideração aspectos políticos, institucionais, técnicos, sociais, econômicos e culturais (AISSE et al., 2006).

2.2 Normas e resoluções sobre utilização de recursos hídricos

A gestão dos recursos hídricos no Brasil é estruturada por um conjunto de normas legais que buscam assegurar a disponibilidade, a qualidade e o uso sustentável da água, contemplando tanto a preservação ambiental quanto o abastecimento humano. Nesse contexto, destaca-se a Resolução nº 54, de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), que estabelece diretrizes e critérios gerais para o reuso direto não potável da água. Seu objetivo principal é regulamentar e incentivar essa prática em âmbito nacional, promovendo a conservação hídrica, o uso racional dos recursos e a redução da dependência das fontes convencionais de captação, especialmente relevantes em regiões de escassez hídrica ou elevado consumo industrial (BRASIL, 2005).

Outro marco regulatório essencial é a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), considerada um divisor de águas na política ambiental brasileira. Essa norma classifica os corpos hídricos superficiais em categorias (especial, 1, 2, 3 e 4), de acordo com os usos previstos, como abastecimento público, irrigação, recreação, preservação da fauna aquática e fins industriais. Além disso, define padrões mínimos de qualidade físico-química e

biológica para cada classe e estabelece condições para o lançamento de efluentes, exigindo tratamento prévio adequado, sobretudo em atividades industriais, de modo a evitar a degradação dos ecossistemas aquáticos. A resolução também incentiva o monitoramento contínuo e o reuso como medidas de proteção e gestão sustentável dos recursos hídricos (BRASIL, 2005).

Complementando essas normas ambientais, a Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde (MS), define os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano, bem como os padrões de potabilidade em todo o território nacional. A norma abrange sistemas de abastecimento públicos e privados, estabelecendo limites máximos para parâmetros microbiológicos (como coliformes e *Escherichia coli*), físico-químicos (como turbidez, pH, cor e cloro residual) e químicos de interesse à saúde (como metais pesados, agrotóxicos e subprodutos da desinfecção). Também determina responsabilidades dos gestores no monitoramento, notificação de riscos e implementação de ações corretivas e preventivas, assegurando a proteção da saúde pública e a segurança hídrica (BRASIL, 2021).

Em conjunto, esses instrumentos legais fornecem as bases técnicas e regulatórias para uma gestão integrada da água no Brasil, articulando aspectos de sustentabilidade ambiental, proteção da saúde e eficiência no uso dos recursos. Além disso, refletem o alinhamento do país às diretrizes internacionais de segurança hídrica e acesso universal à água potável e ao saneamento, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU, 2015).

2.3 Classificação dos tipos de reuso de água

De acordo com Schneider e Tsutiya (2001), a água gerada a partir de efluentes tratados ou esgoto bruto pode atender a três tipos principais de mercados:

Reuso não potável: água distribuída por redes independentes para usos que não exigem qualidade potável, como lavagem de veículos, rega de jardins e descargas sanitárias;

Reuso potável indireto: água tratada por sistemas avançados, como membranas, que é devolvida a mananciais subterrâneos ou superficiais para posterior captação;

Reuso potável direto: água tratada que é direcionada diretamente para consumo após tratamento rigoroso.

A Resolução nº 54/2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), em seu Art. 3º, estabelece cinco modalidades para o reuso direto não potável (BRASIL, 2005):

Reuso para fins urbanos: utilização da água de reuso em lavagem de ruas, irrigação de áreas verdes, combate a incêndios e usos similares, sem contato direto com consumo humano.

Reuso para fins agrícolas e florestais: aproveitamento da água em irrigação de culturas agrícolas, florestais e pastagens, respeitando limites de qualidade para não comprometer o solo nem os alimentos.

Reuso para fins ambientais: aplicação na manutenção de vazões ecológicas, recuperação de áreas degradadas, controle de poeira, recomposição de aquíferos e manutenção de ecossistemas.

Reuso para fins industriais: utilização em processos produtivos, torres de resfriamento, caldeiras e lavagem de equipamentos, reduzindo a demanda de água potável.

Reuso na aquicultura: emprego da água de reuso no cultivo de organismos aquáticos, desde que atendidos parâmetros de qualidade adequados à preservação da saúde animal e humana.

2.4 Reuso na indústria

O reuso industrial da água engloba diversas aplicações, como resfriamento, lavagem, transporte de materiais, alimentação de caldeiras e integração direta ao processo produtivo. A qualidade exigida da água depende da aplicação específica, não sendo possível sua generalização. Estima-se que cerca de 75% do reuso industrial esteja relacionado à refrigeração (CROOK, 1993).

As principais aplicações industriais da água incluem (CROOK, 1993):

- Consumo humano: uso sanitário, cozinhas, vestiários, bebedouros e equipamentos de segurança;
- Matéria-prima: incorporação ao produto, como em indústrias alimentícias e farmacêuticas;
- Fluido auxiliar: preparo de soluções, lavagem, transporte de compostos;
- Geração de energia: aproveitamento da energia térmica, cinética ou potencial da água;
- Aquecimento e/ou resfriamento: controle térmico em reações ou equipamentos;
- Outros usos: combate a incêndios, irrigação de áreas verdes, uso em subprodutos industriais.

Além dos ganhos operacionais, o reuso industrial proporciona benefícios ambientais e econômicos, permitindo maior disponibilidade hídrica para outros fins, redução na poluição e menor custo com taxas de uso da água (HESPANHOL, 2004). Em função da disponibilidade hídrica, as indústrias podem considerar três alternativas:

1. continuar usando água de mananciais ou redes públicas;
2. adquirir água de reuso de empresas de saneamento;
3. tratar e reutilizar seus próprios efluentes.

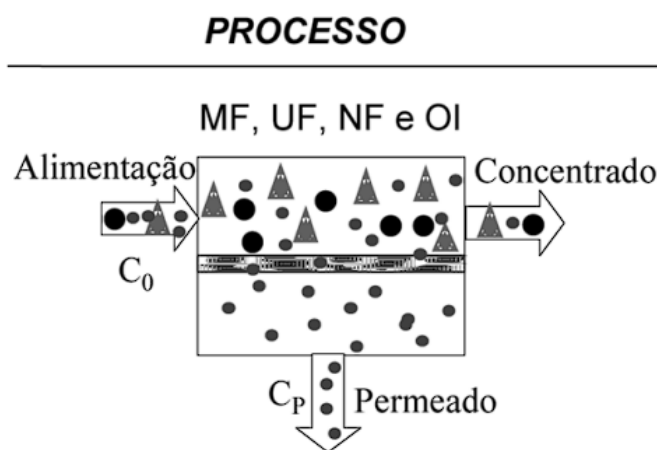
2.5 Processos de separação por membranas

A indústria química tem, entre seus maiores desafios, a separação, purificação e concentração de substâncias resultantes de processos de transformação. Desde a década de 1970, os processos de separação por membranas (PSM) passaram a integrar as técnicas industriais, ao lado de métodos clássicos como destilação e filtração. Esses processos utilizam membranas sintéticas como barreiras seletivas, inspiradas em membranas naturais, destacando-se por sua seletividade e permeabilidade. O estudo de fenômenos de membranas remonta ao século XVIII, com a experiência de Nollet em 1748, mas os PSM só ganharam escala industrial a partir da década de 1950, com o desenvolvimento de membranas eficientes para osmose reversa. As descobertas de Loeb e Sourirajan, com a técnica de inversão de fase, possibilitaram a criação de membranas assimétricas (com “pele” seletiva e suporte

poroso), melhorando drasticamente o desempenho dos processos (Habert; Borges; Nobrega, 2006).

A Figura 1 ilustra de forma simplificada o funcionamento das membranas. Nela, a corrente de alimentação com maior concentração de solutos é submetida à membrana, que atua como barreira seletiva. Como resultado, obtém-se de um lado o permeado, composto principalmente pelo solvente purificado, e do outro lado o concentrado, ou seja, a solução que reteve parte significativa dos solutos removidos no processo.

Figura 1 - Modo de funcionamento de membranas



Fonte: adaptado de Habert, Borges e Nobrega (2006, p. 18).

As membranas podem ser densas ou porosas, e isotrópicas ou anisotrópicas, com estruturas e funções adaptadas ao tipo de separação desejada. As membranas compostas, feitas por laminação de diferentes materiais, permitiram aplicações mais amplas, como permeação de gases e pervaporação, além de possibilitarem maior seletividade e resistência mecânica (Habert; Borges; Nobrega, 2006).

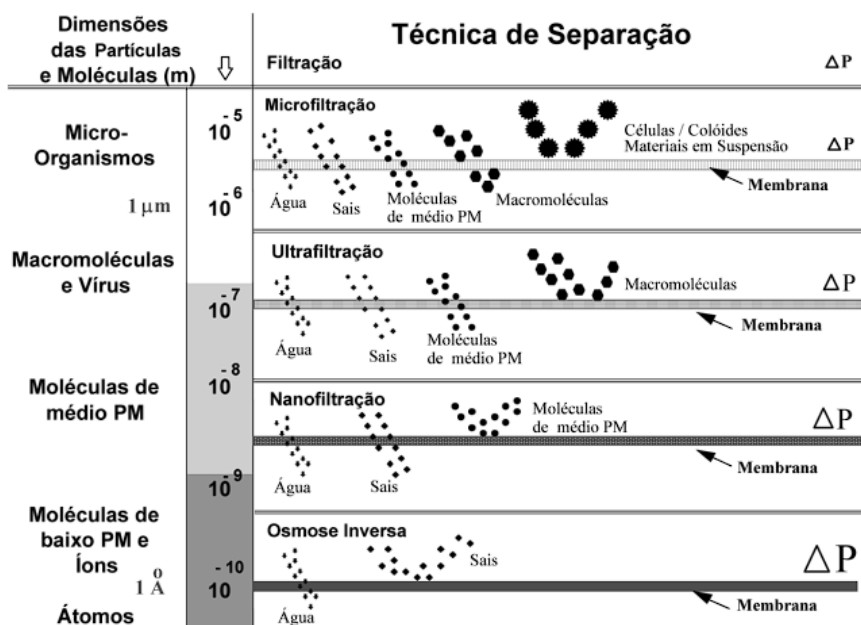
2.5.1 Principais processos de filtração por membranas

O transporte através das membranas depende da força motriz aplicada, gradiente de pressão, concentração ou potencial elétrico. Processos como microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e diálise (D) operam com membranas porosas, enquanto osmose reversa (OR), pervaporação (PV) e permeação de gases (PG) utilizam membranas densas, nas quais o transporte ocorre

por difusão. Já a eletrodialise (ED) depende de um gradiente elétrico e da carga das espécies.

A Figura 2 diferencia os processos de MF, UF, NF e OI classificando através das dimensões de partículas e moléculas e a quantidade de energia aplicada para separação através do delta de pressão.

Figura 2 - Seletividade de Processos por Membranas



Fonte: Habert, Borges e Nobrega (2006, p. 104).

A Tabela 1 apresenta um resumo das principais características dos processos de filtração com membranas, incluindo pressão de operação, tamanho de poros, mecanismo de separação e aplicações típicas.

Tabela 1 - Processo de filtração em membranas e suas características

Parâmetro	Microfiltração (MF)	Ultrafiltração (UF)	Nanofiltração (NF)	Osmose Reversa (OR)
Pressão (bar)	0,1 – 2	0,1 – 5	3 – 20	5 – 120
Tamanho dos poros	> 50 nm	2 – 50 nm	< 2 nm	< 2 nm
Mecanismo de separação	Exclusão por tamanho	Exclusão por tamanho	Efeitos de carga	Solução - Difusão
Aplicações	Clarificação, pré-tratamento, remoção de bactérias	Remoção de macromoléculas, bactérias e vírus	Remoção de íons multivalentes	Dessalinização das águas e remoção de toda matéria orgânica

Fonte: Adaptado de Metcalf & Eddy (2003) e Van der Bruggen et al. (2003).

Os (PSM) apresentam diversas vantagens, como baixo consumo de energia, por operarem sem mudança de fase, e alta seletividade, sendo muitas vezes a única solução viável para certas separações (Habert; Borges; Nobrega, 2006).

Também se destacam por permitir o tratamento de compostos sensíveis ao calor, operando à temperatura ambiente, e por sua facilidade de operação e escalonamento, graças ao uso de sistemas modulares (Habert; Borges; Nobrega, 2006).

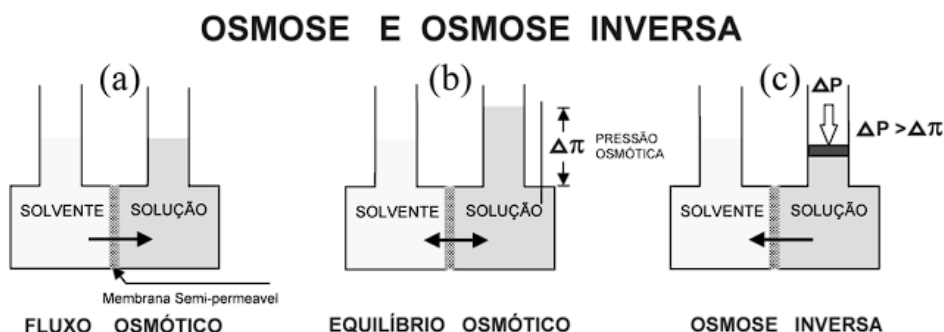
2.5.2 Osmose reversa

A osmose reversa/inversa (OI) é um processo de separação por membranas densas, amplamente utilizado para a retenção de solutos de baixa massa molar, como sais inorgânicos e pequenas moléculas orgânicas. Devido à elevada seletividade exigida, as membranas empregadas nesse processo são altamente compactas e praticamente impermeáveis aos solutos, o que requer pressões de operação significativamente superiores às aplicadas em outras técnicas, como a ultrafiltração. Do ponto de vista estrutural e funcional, a OI se posiciona entre a ultrafiltração e processos mais seletivos como pervaporação e permeação de gases, sendo particularmente eficaz na obtenção de água de alta pureza (Habert; Borges; Nobrega, 2006).

O princípio da osmose reversa baseia-se na aplicação de uma pressão hidráulica superior à pressão osmótica natural da solução. Essa condição força o fluxo do solvente (geralmente a água) a atravessar a membrana no sentido oposto ao da osmose espontânea, ou seja, do meio mais concentrado para o mais diluído. Esse fenômeno é explicado pela diferença de potencial químico entre as soluções, sendo a pressão aplicada capaz de inverter o gradiente osmótico e promover a separação eficiente dos componentes da mistura (Habert; Borges; Nobrega, 2006).

A Figura 3 apresenta de forma esquemática os fenômenos da osmose e da osmose reversa, utilizando um sistema composto por dois compartimentos separados por uma membrana semipermeável, que permite a passagem do solvente, mas não do soluto.

Figura 3 - Processo de osmose e osmose reversa



Fonte: (Habert; Borges; Nobrega, 2006).

Na etapa (a), observa-se o fluxo osmótico espontâneo: o solvente migra do lado com menor concentração de soluto (solvente puro ou solução diluída) para o lado mais concentrado, devido à diferença de potencial químico. Esse fluxo ocorre até que o sistema atinja o equilíbrio osmótico, representado na etapa (b), onde a pressão gerada pela diferença de níveis entre os compartimentos é denominada pressão osmótica ($\Delta\pi$). Na etapa (c), tem-se o princípio da osmose reversa, no qual uma pressão externa (ΔP) superior à pressão osmótica é aplicada sobre o lado da solução concentrada. Com isso, o sentido do fluxo do solvente é invertido, forçando sua passagem da solução mais concentrada para o lado diluído. Esse processo é fundamental em sistemas de separação por membranas densas, como na dessalinização da água do mar, no reuso de efluentes e em diversas aplicações industriais, permitindo a obtenção de um permeado purificado ao reter sais e outras substâncias dissolvidas.

2.6 Análise de dureza

A água potável distribuída pelas concessionárias é captada de rios, lagos ou barragens e submetida a processos de coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção, adição de fluoreto e correção de pH, em conformidade com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 2.914/2011 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2011).

A dureza da água está relacionada à concentração de cálcio e magnésio, sendo classificada em dureza temporária, associada a carbonatos e bicarbonatos, e dureza

permanente, ligada a sais solúveis como cloretos e nitratos. A soma das duas é denominada dureza total (BACCAN et al., 2004). A composição química da água depende do tipo de solo, de modo que águas provenientes de regiões calcárias apresentam maiores níveis de dureza, enquanto águas de solos graníticos e basálticos tendem a ser brandas (ALVARADO; HERRERA, 1999).

A dureza influencia diversos setores industriais, como papel, celulose e cervejarias, além da própria distribuição de água, podendo causar incrustações em tubulações e caldeiras (ALVARADO; HERRERA, 1999). O método mais utilizado para determinação da dureza é a volumetria de complexação com EDTA, em meio tamponado e com uso do indicador negro de eriocromo T (ANDRADE et al., 2010; HARRIS, 2005).

Além disso, águas duras reduzem a eficiência de sabões e detergentes, pois os sais de cálcio e magnésio formam compostos insolúveis que prejudicam a formação de micelas e espuma, aumentando o consumo de produtos de limpeza (MÓL; BARBOSA; SILVA, 1995).

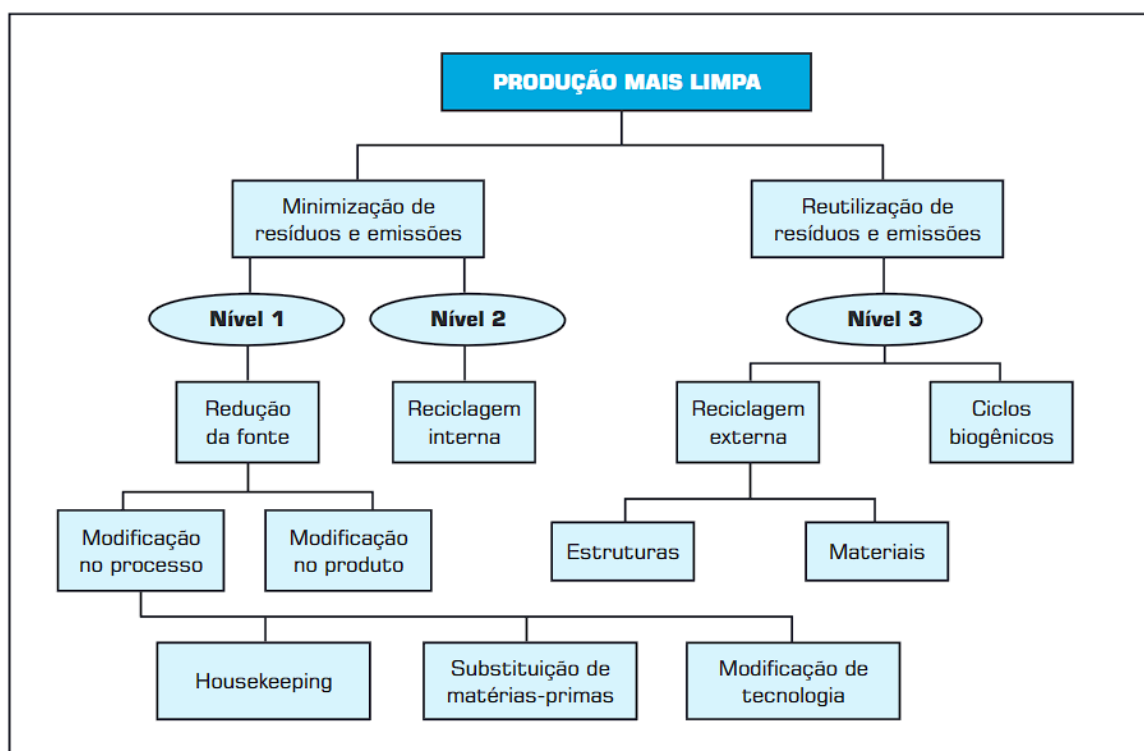
2.7 Produção mais limpa

No Brasil, as iniciativas de Produção Mais Limpa (P+L) têm se desenvolvido a partir de duas metodologias principais: a P+L, definida pela UNEP como uma estratégia preventiva e integrada aplicada a processos, produtos e serviços, com foco no uso eficiente de recursos naturais e na minimização de resíduos, poluição e riscos à saúde e segurança humana (LEMS, 2002; FURTADO, 2002; UNEP, 2001), e a P2 (Prevenção à Poluição), surgida nos EUA, que prioriza a redução de poluentes na fonte de geração (FURTADO, 2002; MEADOWS, 1972). Apesar das diferenças conceituais, ambas compartilham o objetivo central de reduzir resíduos no ponto de geração (ALMEIDA, 2002).

A CETESB desempenha papel relevante na aplicação desses conceitos, utilizando tanto o conceito de P+L quanto o de P2 (CETESB, 2003). Essas iniciativas permitem às indústrias brasileiras identificarem técnicas de produção mais limpa e implementar melhorias nos processos, promovendo a minimização dos impactos ambientais e a integração de práticas sustentáveis (UNIDO, 2001; UNEP, 1996).

A Produção mais limpa (P+L) adota como prioridade máxima a prevenção da geração de resíduos e emissões, representada no nível 1 do fluxograma. Quando não for possível evitar sua formação, recomenda-se a reintegração desses resíduos ao processo produtivo (nível 2) ou, de forma alternativa, sua reciclagem externa (nível 3) como pode ser observado na Figura 4.

Figura 4 - Fluxograma P+L



Fonte: (Alves,2007)

Essa lógica hierárquica conduz ao desenvolvimento e à aplicação de Tecnologias Limpas, promovendo ganhos ambientais e econômicos. A implementação da P+L em processos produtivos pode ser realizada por diferentes estratégias, que buscam alinhar metas ambientais, econômicas e tecnológicas de forma integrada.

3 Metodologia

Este artigo caracteriza-se como um estudo de caso, que segundo Yin (2015), consiste em uma investigação empírica que analisa um fenômeno atual dentro de seu contexto real, utilizando diferentes fontes de evidência. A adoção desse método permite compreender detalhadamente o desempenho de um sistema de osmose

reversa (OR) aplicado ao tratamento e reuso de água em uma indústria de gelatina e colágeno.

3.1 Delineamento metodológico

A pesquisa apresenta caráter aplicado, exploratório e descritivo. É aplicada, pois busca gerar conhecimento com fins práticos, voltado à melhoria de processos industriais e à otimização do tratamento de água. Ao mesmo tempo, possui caráter exploratório, visto que visa ampliar a compreensão sobre o funcionamento do sistema de OR em condições reais de operação. Por fim, é descritiva, uma vez que detalha os procedimentos, parâmetros e resultados observados, permitindo documentar o desempenho do sistema de forma sistemática. O método adotado consiste em um estudo de caso, o qual possibilita uma análise aprofundada do sistema em operação. Essa abordagem se justifica pela necessidade de examinar o sistema de OR em seu ambiente real, compreendendo tanto o seu desempenho técnico quanto as particularidades do contexto industrial.

3.2 Natureza dos dados

A pesquisa envolve dados quantitativos e qualitativos. Os dados quantitativos incluem parâmetros operacionais, como vazão, condutividade, pH, dureza, volume tratado, recuperação do sistema e eficiência de remoção de sais. Esses indicadores permitem mensurar de forma objetiva a performance do sistema de OR. Por outro lado, os dados qualitativos são obtidos por meio de observações técnicas durante a operação, registros de manutenção e relatos sobre dificuldades operacionais, contribuindo para uma compreensão mais ampla das condições reais de funcionamento e dos desafios enfrentados pela planta.

3.3 Fontes de dados e coleta

As informações analisadas foram obtidas a partir de diferentes fontes. Entre elas destacam-se os relatórios internos da indústria, que fornecem dados históricos sobre a operação do sistema, bem como análises laboratoriais da água bruta, do permeado e do concentrado. Além disso, o acompanhamento técnico contínuo da

planta permitiu registrar condições de operação, ajustes realizados e eventuais intervenções, garantindo que a coleta de dados refletisse a realidade do funcionamento do sistema.

3.4 Etapas da análise

A análise foi organizada em três etapas principais, correspondentes ao acompanhamento do projeto inicial, do projeto atualizado e à comparação entre ambos.

No projeto inicial, descreveu-se a configuração do sistema de OR, apresentando os parâmetros de alimentação, como vazão, condutividade e pH, e os resultados obtidos após a instalação, incluindo o volume recuperado, a eficiência de remoção de sais e dureza e a qualidade da água tratada.

O projeto atualizado registrou as modificações implementadas, como a ampliação de filtros, a complementação de membranas e a instalação de uma nova unidade de OR. Também foram analisados os resultados após essas alterações, destacando ganhos de eficiência, maior estabilidade operacional e melhoria na qualidade da água tratada.

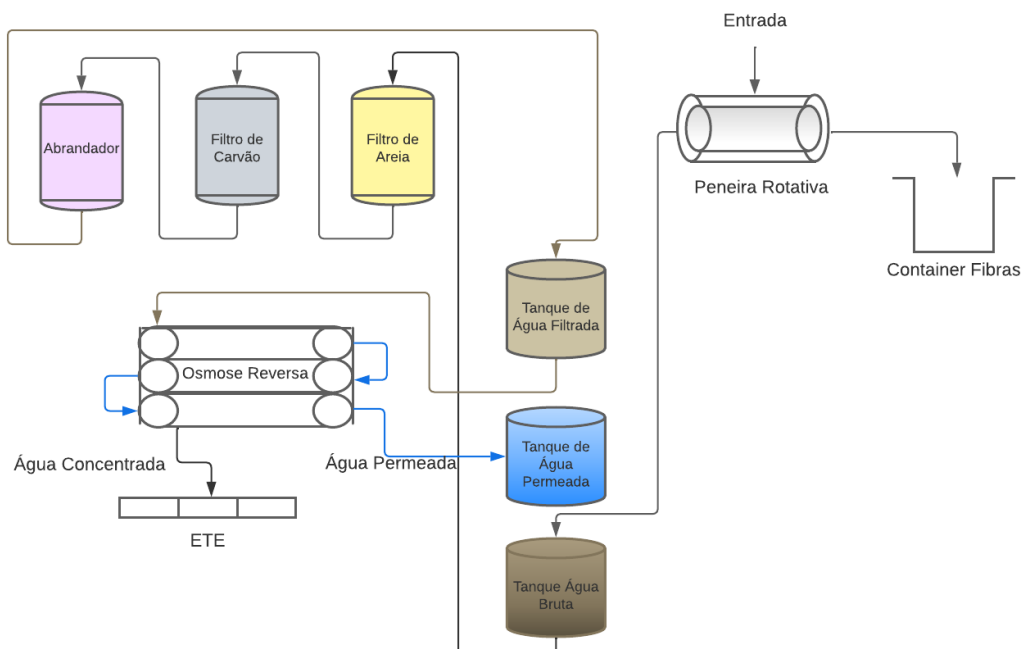
Por fim, a comparação entre projetos permitiu confrontar os resultados obtidos inicialmente com aqueles do projeto atualizado, considerando indicadores como o volume de água tratada, a eficiência de remoção de sais e dureza, a recuperação global do sistema e a continuidade operacional. Essa análise possibilitou avaliar de forma crítica as melhorias alcançadas, identificar desafios ainda existentes e fornecer subsídios para futuras intervenções na planta de tratamento.

4 Desenvolvimento da pesquisa

4.1 Caracterização do fluxo de tratamento de água pela osmose reversa

O fluxo de tratamento do processo foi realizado por uma empresa terceira especializada em tratamento de água e fluentes com clientes em todo Brasil. A Figura 5 mostra o fluxo simplificado do processo de tratamento implementado focando nos principais processos que antecipam a osmose reversa.

Figura 5 - Fluxo de Tratamento



Fonte: Do autor, 2025

O processo tem início na peneira rotativa, onde toda a água residual proveniente dos processos produtivos é direcionada para a remoção de fibras e sólidos grosseiros, garantindo o descarte adequado desses resíduos. A solução remanescente, ainda com alta carga contaminante, é denominada água bruta, por conter uma combinação significativa de sais, sólidos em suspensão, proteínas, graxas e gorduras.

Para que essa água possa ser tratada por osmose reversa, ela precisa passar por um condicionamento prévio, realizado por meio de um sistema de filtração em série. Esse sistema é composto por três etapas principais: um filtro de areia, que remove partículas finas e impurezas em suspensão; um filtro de carvão ativado, responsável pela remoção de cloro residual e compostos orgânicos voláteis; e um ablandador, que reduz a dureza da água, evitando incrustações nas membranas da osmose.

Com a água já filtrada e condicionada, ela é então submetida ao sistema de osmose reversa, onde ocorre a separação de sais, sólidos dissolvidos e matéria orgânica por meio de membranas semipermeáveis. Esse processo resulta em dois fluxos distintos: o permeado, que é a água purificada, destinada ao reuso em

processos internos da indústria; e o concentrado, que contém os contaminantes retidos e é direcionado para o sistema de tratamento de efluentes industriais.

4.2 Caracterização da água e etapas

Para realizar um tratamento adequado foi-se necessário entender o produto de entrada, em quais condições ele se encontrava, como seria captado e por fim armazenado para tratamento. Desse modo, o primeiro ponto visto foi quais efluentes provenientes do processo produtivo seriam captados e suas condições iniciais.

No primeiro projeto foram analisados as três principais etapas e o volume gerado por batelada conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Etapas produtivas

Etapa de Processo	Volume Médio Total
Etapa alcalina	60m ³
Etapa de Peróxido de Hidrogênio	30m ³
Etapa de Ácido Diluído	180m ³

Fonte: Do autor, 2025

Porém, devido a quantidade de carga orgânica presente na etapa alcalina, sendo uma grande quantidade de gordura solidificada, a empresa responsável pelo equipamento e consultoria técnica sugeriram inicialmente remover essa etapa. Onde determinou-se a captação das etapas de peróxido de hidrogênio e acidificação para recuperação resultando nos parâmetros encontrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Caracterização efluente primeiro projeto

Parâmetro	Entrada
pH	4,8
Condutividade (µS/cm)	2805
Contaminação	Presente
Dureza (mg/L)	340

Fonte: Autor, 2025.

Esses parâmetros principais representavam as condições que o sistema de tratamento teria que reduzir ou remover totalmente através do processo de osmose reversa.

Após os testes iniciais e expansão do sistema de osmose para o segundo projeto o diagnostico realizado pela empresa parceira verificou que os sistemas de filtração apresentaram melhores resultados que o esperado e dessa maneira era possível adicionar o efluente alcalino a captação resultando em uma recuperação total dos efluentes para tratamento na osmose que resultou nos dados destacados na Tabela 4.

Tabela 4 - Caracterização efluente segundo projeto

Parâmetro	Entrada
pH	5,9
Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	5820
Contaminação	Presente
Dureza (mg/L)	760

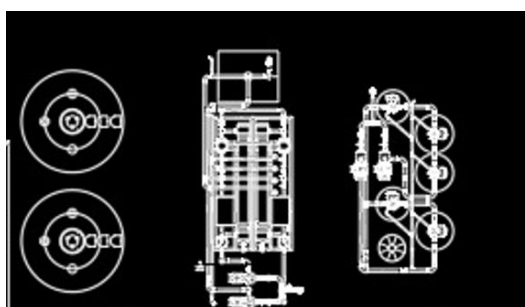
Fonte: Autor, 2025.

Os novos resultados mostraram uma água mais “pesada” para tratamento no sistema de osmose reversa uma vez que o segundo projeto representava uma expansão de capacidade de tratamento e não uma melhoria de qualidade na água recuperada. Desse modo, os resultados de tratamento, porém apresentar uma eficiência reduzida e um fluxo produtivo fora do esperado.

4.3 Resultados primeiro projeto

O primeiro sistema de tratamento para água residual contava com uma osmose reversa que tinha um sistema duplo independente, dessa maneira era possível trabalhar com metade da capacidade em caso de manutenções conforme representado na Figura 6.

Figura 6 - Primeiro sistema de Osmose Reversa



Fonte: Do autor, 2025

Esse projeto foi dimensionado para receber uma entrada de 11m³/h de entrada e sua recuperação tinha como objetivo principal eficiência de remoção de condutividade, dureza e contaminação para que essa água recuperada pudesse ser utilizada em qualquer parte do processo produtivo.

A Tabela 5 contém os resultados de 6 meses de operação contínua da osmose reversa.

Tabela 5 - Resultados primeiro projeto

Parâmetro	Entrada	Permeado	Concentrado	Observações
Condutividade (µS/cm)	2805	165	4615	Remoção de 96,42%
Volume (L)	10.417	5.220	4.897	Eficiência Global de 50,11%
Contaminação	Presente	Ausente	Presente	Ausente
Dureza (mg/L)	340	40	—	Redução significativa da dureza

Fonte: Do autor, 2025

Porém, mesmo com bons resultados em condutividade, contaminação e dureza um ponto observado foi a subalimentação da osmose em relação aos filtros conforme a Tabela 6.

Tabela 6 - Diferença de Capacidade de Tratamento

Equipamento	Vazão de Tratamento (L/h)
Osmose	10417
Filtros	7215
Diferença	3202

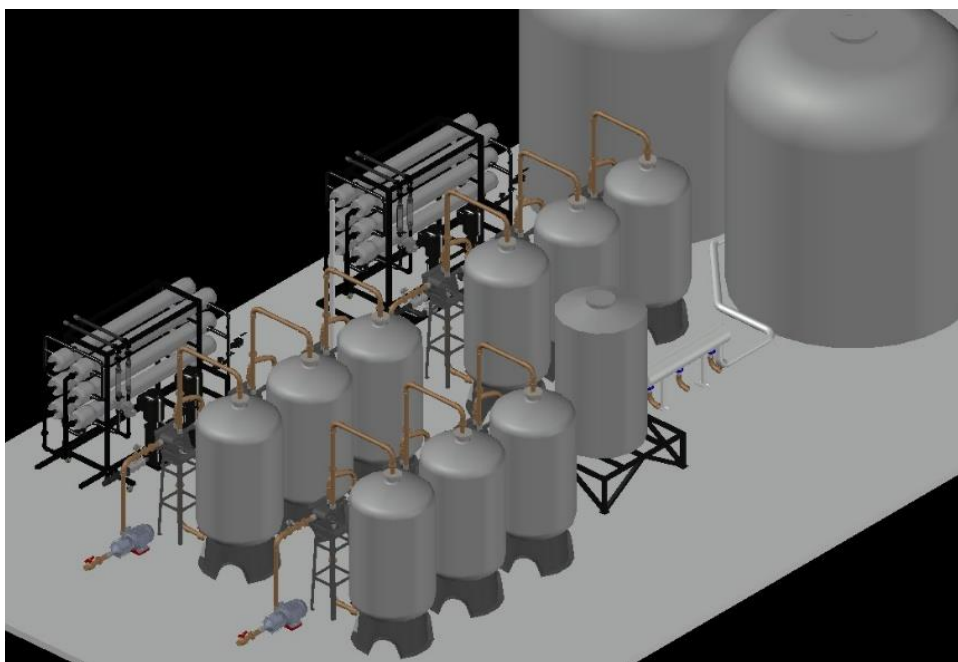
Fonte: Do autor, 2025

Essa diferença causava paradas que eram as principais dificuldades de operação contínua da osmose uma vez que o fornecimento de água filtrada era insuficiente levando a ser necessário o aumento dos filtros na melhoria do primeiro projeto.

4.4 Resultados segundo projeto

Para aumentar a capacidade de tratamento total das OR e garantir uma operação contínua foi expandido os sistemas de filtros e adicionado uma nova osmose com capacidade maior sendo adicionados 2 novos conjuntos de filtros com capacidade de 15000 L/h e outra osmose representados pelas Figura 7.

Figura 7 - Modelo dos novos conjuntos de filtros



Fonte: Do autor, 2025

Dessa maneira foi-se obtido um conjunto de filtros com capacidade total de 22500L/h e duas osmose individualizadas com capacidade de tratamento de 21000L/h nominal, porém ainda enfrentando desafios de qualidade de água tratada onde a qualidade de água se encontra em boas condições, porém a recuperação global de água está próxima de 50%.

Tabela 7 - Resultados segundo projeto

Parâmetro	Entrada	Permeado	Concentrado	Observações
Condutividade ($\mu\text{S/cm}$)	5820	250	7217	Remoção de 95,70%
Volume (L)	18720	8230	10190	Eficiência Global de 43,96%
Contaminação	Presente	Ausente	Presente	Ausente
Dureza (mg/L)	760	100	—	Redução significativa da dureza

Fonte: Do autor, 2025

Algumas diferenças entre os projetos foram observadas, sendo a qualidade da água recuperada e a eficiência global. Isso ocorreu principalmente pela mudança produtiva da planta e os tipos de água recuperadas que antes não faziam parte do efluente dimensionado pelo primeiro projeto. Dessa forma, mesmo com uma

qualidade de água mais “pesada” e sistema se mostrou eficiente no termo de qualidade e estável nos parâmetros de produtividade.

4.5 Comparativo

Desse modo, o comparativo entre os sistemas foi realizado para validação de eficácia para o tratamento de efluentes e desempenho produtivo na planta industrial. A Tabela 8 mostra as mudanças entre os projetos e fornece resultados para avaliação do sistema como um todo.

Tabela 8 - Comparação de resultados entre os projetos

Parâmetros	1º Sistema	2º Sistema	Varição/Observação
Vazão Nominal (L/h)	11000	21000	Aumento de capacidade operacional em 90,90%
Condutividade Entrada ($\mu\text{S/cm}$)	2805	5820	Aumento na carga iônica de entrada entre os projetos
Condutividade Permeado ($\mu\text{S/cm}$)	165	250	Leve aumento no permeado de carga iônica
Condutividade Concentrado ($\mu\text{S/cm}$)	4615	7217	Maior concentração de rejeito
Volume Total (L)	10.417	18720	Aumento de 79,70% de volume tratado
Volume Permeado (L)	5.220	10.126	Aumento proporcional de permeado
Dureza Entrada (mg/L)	340	760	Água mais dura na entrada do segundo sistema
Dureza Permeado (mg/L)	40	70	Leve aumento, mas ainda com boa eficiência

Fonte: Do autor, 2025

Em termos de qualidade o segundo projeto pode ser considerado apenas uma expansão do sistema inicial uma vez que basicamente as capacidades de tratamento foram basicamente ampliadas e as alterações de resultado se encontram mais influenciadas pela mudança do efluente de entrada que o próprio sistema de tratamento. Desse modo, a eficácia do tratamento do efluente está dentro do esperado pelo projeto proposto e objetivos da empresa.

Em relação a parte produtiva a quantidade de água tratada e recuperada representa 16,87% de toda água usada no setor onde o equipamento foi

implementado para tratamento, nesse tópico ainda falta otimizações de processo que estão sendo realizadas para que esse valor chegue a 33% do consumo total que estão sendo estudadas e avaliadas em parceria com a empresa parceira uma vez que esse processo ainda é pouco utilizado conforme citado anteriormente.

Considerações finais

A partir da proposta de implantação de um sistema de tratamento de efluentes por osmose reversa na indústria de gelatina e colágeno, foi possível atingir de forma satisfatória os objetivos estabelecidos neste artigo. O projeto inicial foi detalhadamente apresentado, incluindo a planta física e o fluxograma do processo, permitindo uma compreensão clara da estrutura implementada e do caminho percorrido pela água até a etapa de purificação.

Durante a fase inicial, foram identificadas limitações técnicas importantes, especialmente relacionadas à subalimentação da osmose reversa em função da capacidade insuficiente dos filtros. Esses desafios operacionais impactaram a continuidade do processo e foram essenciais para direcionar as melhorias posteriores. As intervenções realizadas, como a ampliação do sistema de filtração e a instalação de uma nova unidade de osmose com maior vazão, demonstraram-se eficazes tanto na superação dos gargalos quanto na adaptação do sistema a uma nova realidade de efluentes com carga contaminante mais elevada.

A avaliação dos dados comparativos entre os dois projetos evidenciou um aumento expressivo na capacidade de tratamento, mantendo a qualidade da água recuperada em níveis compatíveis com o reuso industrial. Apesar da leve redução na eficiência global de recuperação, atribuída à maior complexidade da água tratada, o sistema se mostrou robusto, com estabilidade operacional e bons índices de remoção de dureza e condutividade.

Por fim, este artigo demonstrou que a evolução do sistema de osmose reversa não apenas atendeu às metas de melhoria do desempenho técnico e produtivo da planta, como também reforçou o potencial do reuso de água como prática sustentável e estratégica no setor industrial. As otimizações em andamento buscam ampliar ainda

mais esse impacto, visando dobrar o percentual de água recuperada no processo, contribuindo para a eficiência hídrica e a responsabilidade ambiental da operação.

Como sugestão para pesquisas futuras, recomenda-se investigar estratégias para aumentar a eficiência de recuperação de água, considerando que sistemas de osmose reversa podem atingir níveis ainda maiores de filtração. Além disso, seria pertinente realizar uma análise econômica comparativa da utilização da osmose reversa em conjunto com outros métodos de tratamento, de modo a avaliar a viabilidade técnica e financeira de diferentes alternativas para o reaproveitamento de água industrial.

Referências

ALMEIDA, Fernando. *O Bom Negócio da Sustentabilidade*. Rio de Janeiro: Fronteira, 2002.

ALVES, Salete Martins; OLIVEIRA, João Fernando Gomes de. Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental. *Production*, v. 17, p. 129-138, 2007.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. Resolução CNRH nº 54, de 28 de novembro de 2005. Estabelece diretrizes e critérios para o reuso direto não potável de água. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 29 nov. 2005. Disponível em: <https://www.ceivap.org.br/ligislacao/Resolucoes-CNRH/Resolucao-CNRH%2054.pdf>. Acesso em: 21 maio 2025.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, n. 53, p. 58-63, 18 mar. 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 7 maio 2021. Disponível em: https://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2021/prt0888_07_05_2021.html. Acesso em: 21 maio 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União: seção 1*, Brasília, DF, 18 mar. 2005. Disponível

em: <https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/resolucoes/resolucao-conama-no-357-de-17-de-marco-de-2005/view>. Acesso em: 21 maio 2025.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Prevenção à Poluição/Produção Mais Limpa – Casos de Sucesso*. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br>. Acesso em: 08 ago. 2025.

CROOK, J. Critério de Qualidade da Água Para Reúso. *Revista DAE*, n. 174, p. 10-18, nov./dez. 1993.

FURTADO, Marcelo. P+L: Brasil assume compromisso com a Produção Mais Limpa. *Revista Química e Derivados*, n. 407, ago. 2002.

HABERT, Alberto Cláudio; BORGES, Cristiano Piacsek; NOBREGA, Ronaldo. *Processos de separação por membranas*. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. v. 3.

LEMS, Haroldo. *Competitividade e Meio Ambiente na República Federativa do Brasil: Fomento da Gestão Ambiental e Produção Mais Limpa em Pequenas e Médias Empresas – Cooperação Técnica Mercosul e Alemanha*. Brasília, DF, 2002.

MEADOWS, Donella H. *Os Limites do Crescimento*. Rio de Janeiro: Fundação Getúlio Vargas, 1972.

MELLO, L. F. *Produção mais Limpa e Ecoeficiência: conceitos e aplicações*. Florianópolis: UFSC, 2002.

METCALF; EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2003.

ONU – Organização das Nações Unidas. *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável*. Resolução adotada pela Assembleia Geral das Nações Unidas em 25 set. 2015. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 17 ago. 2025.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. *Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso*. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 2001.

UNEP – United Nations Environment Programme. *Cleaner Production*. Disponível em: <https://www.unepfi.org/>. Acesso em: 10 ago. 2025.

UNEP – United Nations Environmental Programme. *Eco-efficiency and Cleaner Production: charting the course to sustainability*, 1996.

UNEP – United Nations Environment Programme. *Cleaner Production Programme*. Paris: UNEP, 1988.



UNIDO – United Nations Industrial Development Organization. *Cleaner Production Toolkit: Introduction Into Cleaner Production*, v. 1, 2001.

UNITED NATIONS. *Water and Sanitation - Goal 6*. Disponível em: <https://sdgs.un.org/topics/water-and-sanitation>. Acesso em: 7 maio 2025.

VAN DER BRUGGEN, B. et al. Review of pressure-driven membrane processes in wastewater treatment and drinking water production. *Environmental Progress*, v. 22, n. 1, p. 46-56, 2003.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.