



UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO
FACULDADE DE ENGENHARIA E ARQUITETURA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL

ERITON BRIXNER

**PÓS TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LATICÍNIOS PARA
REUSO POTÁVEL POR MICROFILTRAÇÃO E OSMOSE
INVERSA**

Passo Fundo

2021

ERITON BRIXNER

**PÓS TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LATICÍNIOS PARA
REUSO POTÁVEL POR MICROFILTRAÇÃO E OSMOSE
INVERSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Passo Fundo, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental, sob orientação do Prof. Dr. Vandré Barbosa Brião.

Passo Fundo

2021

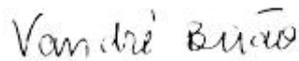
ERITON BRIXNER

**PÓS TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LATICÍNIOS PARA
REUSO POTÁVEL POR MICROFILTRAÇÃO E OSMOSE
INVERSA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Ambiental da Universidade de Passo Fundo, como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Engenheiro Ambiental, sob orientação do Prof. Dr. Vandré Barbosa Brião.

Aprovado em 24 de junho de 2021 .

ORIENTADOR



Prof. Dr. Vandré Barbosa Brião - UPF

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Edésnei Barbosa Brião - UPF



Prof. Dr. Marcelo Hemkemeier - UPF

Passo Fundo

2021

BRIXNER, Eriton. *Pós tratamento de efluente de laticínios para reuso potável por microfiltração e osmose inversa*. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Passo Fundo, 2021.

RESUMO

A demanda por recursos naturais no mundo é crescente, devido ao acompanhamento do desenvolvimento da sociedade em geral. Neste contexto, a água, um dos recursos mais importantes para a humanidade, não vem sendo utilizada das melhores formas disponíveis, o que pode gerar problemas futuros com relação a sua disponibilidade e qualidade. Um dos setores industriais que se destaca no Brasil é o dos laticínios, e estes têm por característica a elevada demanda hídrica. Este cenário agrega ao alto consumo de água de boa qualidade devolvendo posteriormente ao meio ambiente um efluente que não possui características de potabilidade. O objetivo do estudo em questão é oferecer alternativas com base científica para que seja realizado o reuso destas águas nas indústrias de laticínios. Isto, através da utilização de processos de separação por membranas, neste caso mais em específico, a microfiltração e a osmose inversa. O primeiro sistema empregado para a purificação do efluente foi o de microfiltração, utilizando uma amostra composta, de efluente tratado, saindo da ETE de um laticínio. Este sistema opera com uma pressão entre 0,2 e 0,4 bar. Para a alimentação do segundo sistema de purificação, a osmose inversa, foram necessários 40 litros de efluente pós microfiltração. A característica de operação deste é a pressão de 20 bar a 25°C. Os resultados após os tratamentos empregados foram positivos, obtivemos uma água com boas características de cor, condutividade e turbidez, sendo necessária uma correção de seu pH que ficou levemente ácido, variando entre 4,55 e 5,55. Alcançando desta forma a potabilidade dentro dos parâmetros analisados.

Palavras-chaves: reuso, indústria de laticínios, separação por membranas, microfiltração, osmose inversa, potabilidade.

BRIXNER, Eriton. *Dairy effluent post treatment for potable reuse by microfiltration and reverse osmosis*. Completion of course work (Environmental Engineering) – University of Passo Fundo, Passo Fundo, 2021.

ABSTRACT

The demand for natural resources in the world is growing, due to the monitoring of the development of society in general. In this respect, water, one of the most important resources for humanity, has not been used in the best available ways, which can generate future problems related to their availability and quality. One of the industrial segment that stands out in Brazil is dairy industry, and these are characterized by high water demand. This scenario adds to the high consumption of good quality water, subsequently returning to the environment an effluent that does not have potability characteristics. The objective of the research is to offer alternatives with a scientific basis for the reuse of these waters in the dairy industries. This, through the use of membrane separation processes, in this case more specifically, microfiltration and reverse osmosis. The first system used to purify the effluent was microfiltration, using a composite sample of treated raw effluent, leaving the ETE of a dairy. This system operates with a pressure between 0.2 and 0.4 bar. To feed the second purification system, reverse osmosis, 40 liters of effluent after microfiltration were needed. The operating characteristic of this is a pressure of 20 bar at 25°C. The results after the treatments were positives, getting water with good characteristics of color, conductivity and turbidity, requiring a correction of its pH, which became slightly acidic, ranging between 4.55 and 5.55. Thus achieving potability within the analyzed parameters.

Key Words: reuso, dairy industry, membrane separation processes, microfiltration, reverse osmosis, potability

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Representação esquemática do processo de separação por membranas	20
Figura 2: Características dos processos de separação por membranas.....	20
Figura 3: Esquemas de microfiltração com seus tipos de fluxo	23
Figura 4: O fenômeno osmótico e o processo de Osmose Inversa.	25
Figura 5: Local de coleta de amostra na saída da ETE do laticínio.....	29
Figura 6: Fluxograma de equipamento piloto para microfiltração	30
Figura 7: Equipamento para microfiltração em escala piloto.....	31
Figura 8: Fluxograma de equipamento piloto para osmose inversa	33
Figura 9: Configuração da membrana de osmose inversa espiral	34
Figura 10: Equipamento para osmose inversa em escala piloto.....	34
Figura 11: Fluxo de permeado na microfiltração de efluente na saída ETE	37
Figura 12: Fluxo de permeado na osmose inversa com efluente na saída ETE	38
Figura 13: Gráfico comparativo para valores de pH	39
Figura 14: Gráfico comparativo para valores de condutividade.....	40
Figura 15: Gráfico comparativo para valores de cor	41
Figura 16: Gráfico comparativo para valores de turbidez	42

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Classificação do reuso segundo qualidade da água pela NBR 13969/97.....	14
Quadro 2: Classificação do reuso segundo EPA.	16
Quadro 3: Fluxograma da metodologia do trabalho.....	27
Quadro 4: Fluxograma de funcionamento da ETE do laticínio.....	28
Quadro 5: Características da membrana de microfiltração	31
Quadro 6: Análises terceirizadas e metodologia utilizada pelo laboratório (EcoCerta).....	36
Quadro 7: Análises faltantes para comprovação de potabilidade.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Características do efluente tratado na saída da ETE.....	26
Tabela 2: Análises in loco após cada tratamento.....	39
Tabela 3: Comparativo de efluente tratado, pós tratamento e portaria potabilidade.....	43
Tabela 4: Resultados das análises microbiológicas para efluente na saída da ETE.....	45
Tabela 5: Resultados das análises de agrotóxicos para efluente na saída da ETE.....	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1 EFLUENTES DAS INDÚSTRIAS DE LATICÍNIOS	12
2.2 REUSO DE ÁGUA	12
2.3 CLASSIFICAÇÕES PARA REUSO	14
2.4 SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	19
2.5 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	21
2.6 MICROFILTRAÇÃO	22
2.7 OSMOSE INVERSA	23
3 MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1 LOCAL DO ESTUDO	28
3.2 TRATAMENTO POR MICROFILTRAÇÃO	30
3.3 TRATAMENTO POR OSMOSE INVERSA	33
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 FLUXO DE PERMEADO	37
4.2 ANÁLISES INICIAIS E EFICIÊNCIA DOS TRATAMENTOS EMPREGADOS	39
4.3 COMPILADO DE ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES PARA REUSO POTÁVEL	42
5. CONCLUSÃO	48
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1 INTRODUÇÃO

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de leite, sendo o setor lácteo o de maior expansão e inovação no Brasil, a produção nacional chegou a 19 bilhões de litros de leite em 2019 (IBGE, 2020). O Rio Grande do Sul (RS) foi o responsável por 13% da produção nacional no ano de 2019, ficando atrás somente de Minas Gerais, segundo o relatório emitido pelo IBGE (2020).

O setor lácteo tem grande importância na economia da região, do estado e do país. Porém as indústrias de laticínios têm por característica a elevada demanda hídrica, variando a relação de 0,2 a 10 L de efluente gerado por litro de leite processado (SUAREZ, 2014).

Dito isto, é importante ressaltar que na região em que estamos situados este tipo de setor também possui grande importância, beneficiando o volume de leite de um grande número de produtores, estes que por sua vez são de diversas regiões, o que expande ainda mais este horizonte.

Dentro destas indústrias os usos da água são os mais diversos possíveis, esta é empregada em diversos processos produtivos como lavagens de máquinas, tubulações e pisos; águas de sistemas de resfriamento e geradores de vapor; águas utilizadas diretamente nas etapas do processo industrial e esgotos sanitários dos funcionários. Exceto os volumes que evaporam, as águas utilizadas tornam-se efluentes líquidos devido à alteração da sua qualidade.

A legislação brasileira é bastante clara em relação ao descarte dos efluentes líquidos originários deste tipo de setor, e sabemos que as indústrias geradoras precisam garantir que os parâmetros de lançamento estejam de acordo com o estabelecido. Este processo é rotineiro dentro destes empreendimentos, e como qualquer outro gera necessidade de investimentos e custos, o que aumenta ainda mais a sua importância.

Diante deste cenário surge a possibilidade de estudo para obtenção de novos processos que visem a diminuição das cargas orgânicas geradas e demanda hídrica dentro do sistema produtivo, trazendo consigo como consequência benefícios ambientais e também econômicos.

A indústria de laticínios, de um modo geral, tem buscado reutilizar água em sistemas secundários, como reposição em sistemas de troca térmica, utilização em caldeiras, lavagens de pisos externos à indústria, limpeza de caminhões, entre outras. Estas atividades, contudo, não utilizam mais do que 10% da demanda total, que se concentra na limpeza do ambiente de produção e sanitização de máquinas e equipamentos (Brião e Tavares, 2007).

O reuso surge como uma promissora alternativa para a redução do consumo de águas e diminuir o descarte de efluentes. Além disso, os sistemas visam, muitas vezes, recuperar o efluente final já gerado e tratado, não lidando com os processos de uma ótica atual, visando a redução na fonte conforme os conceitos das tecnologias limpas (Brião et al, 2019).

Em momentos futuros, havendo escassez de água e tarifas sobre seu uso, bem como custos com a disposição de efluentes, o reuso e reciclo de águas surge como alternativa para a minimização de lançamentos, evitando a sobrecarga nos sistemas de tratamento e servindo como uma ferramenta na redução de custos.

A água residual, objeto de estudo do presente trabalho é originada na estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria de laticínios. Em sua composição basicamente há a presença de matéria orgânica, coloides e material particulado (MP).

Uma das situações observadas para o funcionamento da indústria alimentícia é a qualidade da água empregada no processo produtivo em geral e esta deve estar de acordo com o padrão de potabilidade estipulado na legislação.

Para que possamos alcançar então este padrão, serão empregadas ferramentas para a purificação deste efluente. Os tratamentos empregados neste estudo são baseados nos processos de separação por membranas (PSM), que consistem na separação dos componentes de uma solução através da atuação de um meio filtrante, com fluxo presente devido a aplicação de uma pressão. Atualmente são técnicas mais difundidas em processos industriais de beneficiamento de alimentos.

Em específico, os processos de separação por membranas utilizados serão a microfiltração, para remoção de partículas de maior tamanho como MP e coloides, seguida da osmose inversa para controle dos componentes com menor tamanho, ou seja, do que se encontra em solução.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 EFLUENTES DAS INDÚSTRIAS DE LATICÍNIOS

Esses efluentes são oriundos da produção de produtos lácteos e da lavagem de silos, tubos, tanques, pasteurizadores e equipamentos resultando em grandes volumes de águas residuais com alta carga orgânica (Brião e Tavares, 2007; Baskaran et al., 2003; Vourch et al., 2005). Sendo assim, em alguns casos, na produção de cada litro de leite processado pode se produzir até 10 litros de efluente, que serão enviados para tratamento.

A limpeza dos equipamentos tem início com a lavagem, que transporta a maior parte da carga orgânica produzida pela indústria leiteira, tendo em vista que essa água da lavagem consiste em um tipo de licor de leite diluído, rico em gordura, carboidratos (lactose), proteínas e alguns sais (Brião, 2000). A possível recuperação desses nutrientes de lavagem, pode ser uma excelente alternativa ambiental e econômica, pois diminuiríamos a carga orgânica das águas residuais que por sua vez é enviada a estações de tratamento ou descarregada em recursos hídricos próximos.

2.2 REUSO DE ÁGUA

No presente estudo os termos águas recuperadas e reuso de água são utilizados. Na literatura vários estudos procuram definir o reuso de águas ou efluentes de acordo com a forma como ocorrem (planejado ou inconsciente, direto ou indireto) e em função da aplicação a qual se destinam (usos) urbano, industrial ou agrícola.

Como definição, o reuso de água é o aproveitamento de águas residuárias dentro do mesmo processo produtivo ou de outra parte do processo, com ou sem tratamento, podendo ser originado de ações planejadas ou não.

“Reusar água é aproveitar a água residuária recuperada, através da remoção ou não de parte dos resíduos por ela carregada em uso anterior, e inserir novamente em aplicações menos exigentes que o primeiro uso, encurtando assim o ciclo da natureza em favor do balanço energético” (METCALF; EDDY, 2003).

Segundo Hespanhol (2008), embora a água possua um volume finito no planeta Terra, por meio do ciclo hidrológico se constitui em um recurso renovável, sendo permanentemente disponível. Quando utilizada mediante sistemas naturais, é um recurso limpo e seguro, sendo deteriorada pela atividade antrópica a níveis diferentes de poluição. Entretanto, uma vez poluída, a água pode ser recuperada e reusada para diversos fins benéficos. A qualidade da água e o objeto específico do reuso estabelecerão os níveis de tratamento recomendados, bem como os custos de capital, de operação e manutenção associados.

Muitas indústrias já estão buscando alternativas para manter ou expandir suas atividades, seja com a conservação de água ou com o reuso das águas residuárias. FIESP/CIESP (2004) definem conservação da água como “as práticas, técnicas e tecnologias que aperfeiçoam a eficiência do uso da água”, ou seja, qualquer ação que: Reduza a quantidade de água extraída das fontes de suprimento; reduza o consumo de água, reduza o desperdício de água, reduza as perdas de água, aumente a eficiência do uso da água, aumente a reciclagem e o reuso da água e evite a poluição da água.

Ampliar a eficiência da água representa, de forma direta, aumento da disponibilidade para os demais usuários, flexibilizando os suprimentos existentes para outros fins, bem como atendendo ao crescimento populacional, à implantação de novas indústrias e à preservação e conservação do meio ambiente.

As indústrias de alimentos são exemplos de atividades que sofrerão consequências econômicas com o conceito do usuário pagador, pois há um grande consumo de água para o processamento de seus produtos e limpeza de seus equipamentos. As usinas de laticínios encontram-se nesse grupo de indústrias, pois as operações de lavagens de silos, tubulações, tanques, pasteurizadores e equipamentos demandam grandes volumes de água, descartando consequentemente grandes volumes de efluentes. Em alguns casos, cada litro de leite processado pode gerar até onze litros de efluente enviados ao tratamento de final de tubo (Brião, 2000).

A implementação de circuitos fechados ou semifechados de água para uso industrial tem sido estudada para se avaliar a melhor proposta para o reuso, minimizando também os custos com o tratamento necessário para tal. Diferentes alternativas podem ser disponibilizadas para tratar efluentes para o reuso, dado que diferentes podem ser as necessidades e tendências de cada atividade produtiva ou região onde está inserida esta atividade (Ballanec, 2002).

2.3 CLASSIFICAÇÕES PARA REUSO

Como o objetivo do projeto é a reutilização do efluente para na indústria ou em qualquer outro setor é necessário que haja um embasamento dos parâmetros permitidos pela legislação conforme a sua classe como mostra o quadro 1.

Quadro 1: Classificação do reuso segundo qualidade da água pela NBR 13969/97.

Classe de reuso	Parâmetros	Indicações	Tratamento Necessário
Classe 1	-Turbidez < 5; -Coliformes fecais < 200 NMP/100 mL; -SDT < 200 mg/L; -pH entre 6,0 e 8,0; -Cloro residual entre 0,5 mg/L e 1,5 mg/L.	Lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes	Tratamento seguido por filtração convencional (areia e carvão ativado) e, finalmente, cloração. Pode-se substituir a filtração convencional por membrana filtrante;
Classe 2	-Turbidez < 5; -Coliformes fecais < 500 NMP/100 mL; -Cloro residual superior a 0,5 mg/L	Lavagens de pisos, calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes.	Tratamento biológico aeróbio seguido de filtração de areia e desinfecção. Pode-se também substituir a filtração por membranas filtrantes
Classe 3	-Turbidez < 10; -Coliformes fecais < 500 NMP/100 mL.	Reuso nas descargas dos vasos sanitários	Tratamento aeróbio seguido de filtração e desinfecção
Classe 4	-Coliformes fecais < 5 000 NMP/100 mL -OD > 2,0 mg/L.	Reuso nos pomares, cereais, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.	Sem indicação

Fonte: Adaptado de ABNT (1997).

O reuso não potável pode ser dividido em reuso para fins agrícolas, industriais, recreacionais, domésticos, manutenção de vazões e na recarga de aquíferos subterrâneos. A resolução CNRH N° 54/2005, em seu artigo estabelece alguns critérios gerais para reuso de água não potável, como mostrado a baixo:

I - Reuso para fins urbanos: utilização de água de reuso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio, dentro da área urbana;

II - Reuso para fins agrícolas e florestais: aplicação de água de reuso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;

III - Reuso para fins ambientais: utilização de água de reuso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;

IV - Reuso para fins industriais: utilização de água de reuso em processos, atividades e operações industriais;

V - Reuso na aquicultura: utilização de água de reuso para a criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

Rodrigues (2005), comenta que o reuso pode ser diferenciado de acordo com a intenção em realizá-lo como:

- a) Reuso indireto planejado: ocorre quando os efluentes, depois de tratados, são descarregados de forma planejada nos corpos de águas superficiais ou subterrâneas, para ser utilizada a jusante, de maneira controlada, no atendimento de algum uso benéfico.
- b) Reuso indireto não planejado: ocorre quando a água, utilizada em alguma atividade humana, é descarregada no meio ambiente e novamente utilizada a jusante, em sua forma diluída, de maneira não intencional e não controlada. Caminhando até o ponto de captação para o novo usuário, a mesma está sujeita às ações naturais do ciclo hidrológico (diluição, autodepuração). A reciclagem de águas pode ser entendida como reuso interno da água antes de sua descarga em um sistema geral de tratamento ou outro local de disposição para suplementar o abastecimento do uso original. É um caso de reuso direto.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) também estabelece padrões e recomendações para o reuso de água residuária, fazendo uma classificação semelhante à da NBR 13969/97, porém abrangendo mais aspectos do reuso.

Os principais parâmetros encontrados no Guia para Reuso de Água da EPA estão apresentados no Quadro 2, abaixo.

Quadro 2: Classificação do reuso segundo EPA.

Categoria de Reuso e Descrição	Tratamento	Qualidade da Água de Reuso
Reuso Urbano		
<p style="text-align: center;"><u>Irrestrito</u></p> <p>Aplicações não potáveis em locais públicos onde o acesso não é restrito.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Filtração • Desinfecção 	<ul style="list-style-type: none"> • pH 6,0 - 9,0 • DBO ≤ 10 • Turbidez ≤ 2 NTU • Coliformes fecais não detectáveis em 100 ml • Cloro residual 1mg/L
<p style="text-align: center;"><u>Restrito</u></p> <p>Aplicações não potáveis em locais públicos onde o acesso é controlado ou restrito por barreiras físicas ou institucionais.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Desinfecção 	<ul style="list-style-type: none"> • pH 6,0 - 9,0 • DBO ≤ 30 mg/L • SST ≤ 30 mg/L • Coli. Fecais ≤ 200 / 100 ml • Cloro residual 1mg/L
Reuso Agrícola		
<p style="text-align: center;"><u>Culturas Alimentares</u></p> <p>Uso de água de reuso para irrigação de culturas alimentares consideradas de consumo humano e consumidas cruas.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Filtração • Desinfecção 	<ul style="list-style-type: none"> • pH 6,0 - 9,0 • DBO ≤ 10 • Turbidez ≤ 2 NTU • Coliformes fecais não detectáveis em 100 ml • Cloro residual 1mg/L
<p style="text-align: center;"><u>Culturas Alimentares Processadas</u></p> <p>Uso de água de reuso para irrigação de culturas alimentares consideradas de consumo humano e processadas comercialmente.</p> <p style="text-align: center;"><u>Culturas Não-Alimentares</u></p> <p>Uso de água de reuso para irrigação de culturas que não são de consumo humano</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Desinfecção 	<ul style="list-style-type: none"> • pH 6,0 - 9,0 • DBO ≤ 30 mg/L • SST ≤ 30 mg/L • Coli. Fecais ≤ 200 /100 ml • Cloro residual 1mg/L

Categoria de Reuso e Descrição	Tratamento	Qualidade da Água de Reuso
incluindo sementes de culturas, forragem ou para irrigar solos de pastagens.		
Recreação		
<p style="text-align: center;"><u>Irrestrita</u></p> <p>Uso de água de reuso em reservatórios, onde não há limitações impostas sobre contato com o corpo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Filtração • Desinfecção 	<ul style="list-style-type: none"> • pH 6,0 - 9,0 • DBO ≤ 10 • Turbidez ≤ 2 NTU • Coliformes fecais não detectáveis em 100 ml • Cloro residual 1mg/L
<p style="text-align: center;"><u>Restrita</u></p> <p>Uso de água de reuso em um reservatório onde o contato é restrito.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Desinfecção 	<ul style="list-style-type: none"> • DBO ≤ 30 mg/L • SST ≤ 30 mg/L • Coli. Fecais ≤ 200 /100 ml • Cloro residual 1mg/L.
Reuso Ambiental		
<p style="text-align: center;"><u>Reuso Ambiental</u></p> <p>Uso de água de reuso para criar “wetlands” ou melhorar o fluxo de rios.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Variável • Secundário e • Desinfecção 	<p>Variável mas não deve exceder:</p> <ul style="list-style-type: none"> • DBO ≤ 30 mg/L • SST ≤ 30 mg/L • Coli. Fecais ≤ 200 /100 ml • Cloro residual 1mg/L
Reuso industrial		
<p><u>Torres de resfriamento de uma passagem</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário 	<ul style="list-style-type: none"> • pH 6,0 - 9,0 • DBO ≤ 30 mg/L • SST ≤ 30 mg/L • Coli. Fecais ≤ 200 /100 ml • Cloro residual 1mg/L.
<p><u>Recirculação em torres de resfriamento</u></p>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Desinfecção 	<p>Depende da taxa de recirculação</p> <ul style="list-style-type: none"> • pH 6,0 - 9,0 • DBO ≤ 30 mg/L • SST ≤ 30 mg/L

Categoria de Reuso e Descrição	Tratamento	Qualidade da Água de Reuso
		<ul style="list-style-type: none"> • Coli. Fecais \leq 200 /100 ml • Cloro residual 1mg/L
Reuso Potável Indireto		
<u>Recarga de Aquíferos pela aspersão em aquíferos potáveis</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Filtração • Desinfecção • Tratamento do solo do Aquífero 	Inclui mas não limita: <ul style="list-style-type: none"> • Cloro residual 1 mg/l (min) • pH 6,5-8,5 • Turbidez \leq 2 NTU • COT \leq 2 Encontrar padrões de água potável após a percolação
<u>Recarga de Aquíferos por injeção em aquíferos potáveis</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Filtração • Desinfecção • Tratamento avançado 	Inclui mas não limita: <ul style="list-style-type: none"> • Coliformes/100 ml não detectáveis • Cloro residual 1 mg/l • pH 6,5-8,5 • Turbidez \leq 2 NTU • COT \leq 2 Encontrar padrões de água potável após percolação
<u>Aumento dos reservatórios de águas superficiais</u>	<ul style="list-style-type: none"> • Secundário • Filtração • Desinfecção • Tratamento avançado 	Inclui mas não limita: <ul style="list-style-type: none"> • Coliformes/100 ml não detectáveis • Cloro residual 1 mg/l • pH 6,5-8,5 • Turbidez \leq 2 NTU • COT \leq 2

Fonte: Adaptado de EPA (2004).

Neste momento cabe ressaltar que as recomendações da agência de proteção ambiental dos Estados Unidos (EPA) norteiam muitas das aplicações de reuso de água no mundo, sendo que, nos Estados Unidos, trinta estados adotaram regulamentação para o reuso, enquanto no Brasil ainda não possuímos legislação específica e ainda existe muita desconfiança e embaraço por parte dos órgãos ambientais e governamentais que restringem a prática do reuso de águas.

2.4 SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Segundo Borilli (2016) a frequente escassez dos recursos hídricos vem provocando um aumento na busca por novas tecnologias que promovam a recuperação de águas, efluentes industriais, municipais, entre outros, com o menor custo e maior eficiência possível.

E dentre as tecnologias que mais apresentam potencial para purificação de efluentes e tecnicamente podem agregar aos mesmos padrões de potabilidade, os PSM vem sendo introduzidos para estes fins.

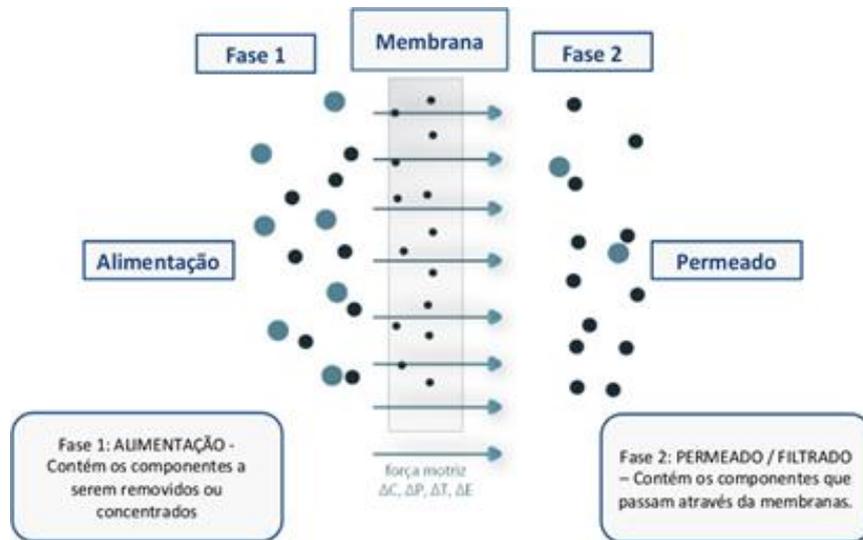
Uma opção que tem sido considerada para atender o desafio da recuperação e produção de água segura para abastecimento são os processos de separação por membranas. Dentre esses processos destacam-se a microfiltração, ultrafiltração, a nanofiltração e a osmose inversa, que utilizam pressão hidráulica como força motriz para separar a água dos contaminantes (Mierzwa, Hespanhol, 2005).

Segundo Yoshida (2005) esses processos de separação por membranas podem ser definidos como sendo a separação parcial de uma mistura com dois ou mais componentes por meio de uma barreira semipermeável (membrana). A corrente de alimentação é separada em duas novas correntes: o permeado que é parte do efluente de alimentação que passou através da membrana e o rejeito que é parte da alimentação que não passou pela membrana. Tanto a corrente de alimentação, quanto as correntes de permeado e rejeito podem ser encontradas no estado líquido, sólido ou gasoso.

Membranas agem como barreiras seletivas, deixando alguns constituintes passar e enquanto isso bloqueia outros, esse movimento entre as membranas requer uma força motriz, ou seja, uma diferença potencial através da membrana, sendo usada para aplicações em água potável (EPA, 2004).

Na Figura 1 há um processo de separação por membrana esquematizado, onde a fase 1 representa a alimentação a ser tratada, a fase 2 o permeado sem os solutos indesejáveis e o retido na membrana representa o concentrado.

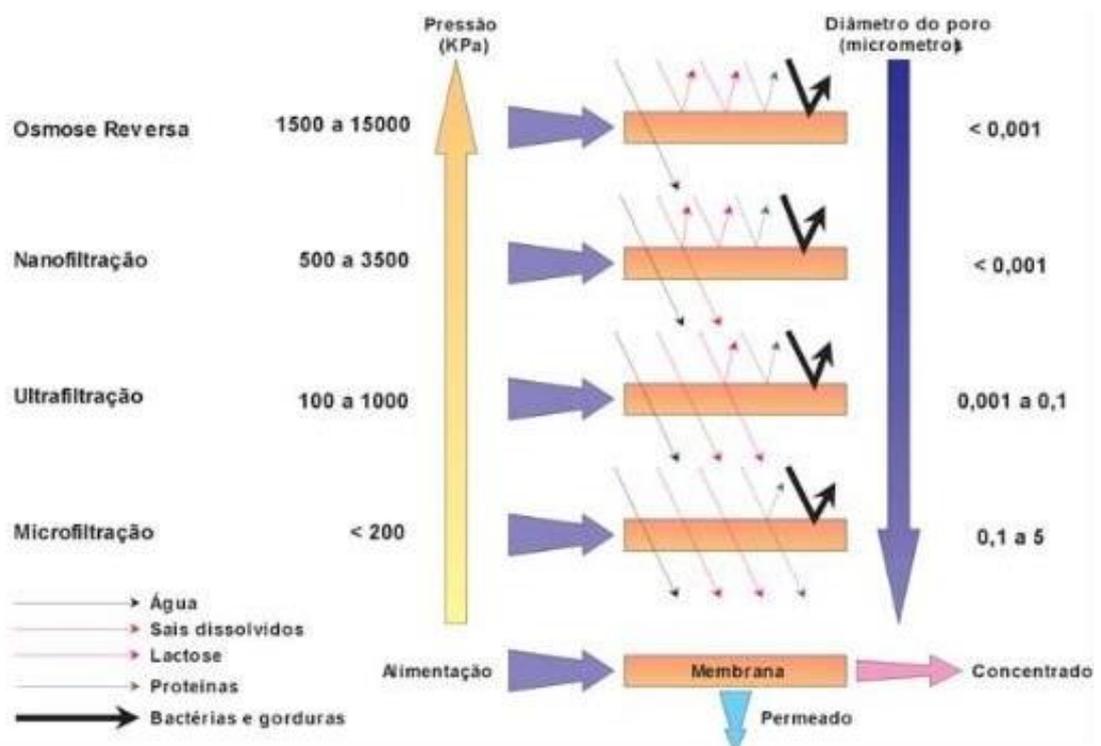
Figura 1: Representação esquemática do processo de separação por membranas



Fonte: Adaptado de MULDER (1996).

Já a figura 2 apresenta, esquematicamente, as características dos processos de separação por membranas.

Figura 2: Características dos processos de separação por membranas



Fonte: Mierzwa et al (2008).

De acordo com as informações dispostas na figura acima, é possível concluir que o processo de menor seletividade e menor pressão de operação é o de MF, pois o mesmo possui o maior tamanho de poros na membrana. A variação da pressão de operação nestes processos está ligada a permeabilidade da área filtrante e portanto, enquanto mais demandarmos pureza e seletividade, maiores serão as pressões e menores as áreas permeáveis.

2.5 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Segundo Metcalf e Eddy (2003), nos processos de membranas são incluídos microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose reversa, diálise e eletrólise, podendo ser classificados pelo material de que é constituída a membrana, a natureza da força motriz, o mecanismo de separação e também o tamanho de partículas a serem separadas.

A pressão se diferencia de um processo para outro como é no caso da microfiltração para osmose reversa, sendo que estes processos de menor e maior pressão respectivamente.

A vazão efluente é separada em duas linhas distintas, denominadas permeado e concentrado. A parcela que passa pela membrana é chamada de permeado, enquanto a outra é chamada de concentrado, sendo esta a parcela que fica enriquecida com os solutos ou sólidos retidos pela membrana. O processo constitui na passagem forçada do solvente (água) através da membrana semipermeável pela aplicação de uma força motriz, pela diferença de pressão hidrostática.

Essas tecnologias apresentam algumas aplicações sendo elas usadas para o pós tratamento de esgoto sanitário e de efluentes industriais como é o caso do estudo proposto e também no tratamento de água para o abastecimento. (BARBOSA, 2009).

A eficiência de cada membrana é determinada por dois fatores, pelo fluxo que é nada mais que o volume que passa pela membrana por unidade de área, por unidade de tempo, e seletividade, para uma membrana ser ideal ela precisa possuir uma alta seletividade e permeabilidade, mas, entretanto, quando se aumenta a seletividade diminui-se a permeabilidade e vice versa (CONSTANZI, 2007).

2.6 MICROFILTRAÇÃO

A microfiltração é um processo de separação por membranas em que a força diretriz é a diferença de pressão através da membrana e os poros da membrana. Sendo que o tamanho típico para uma membrana possui tamanho de poros entre 0,1 a 10 μ m.

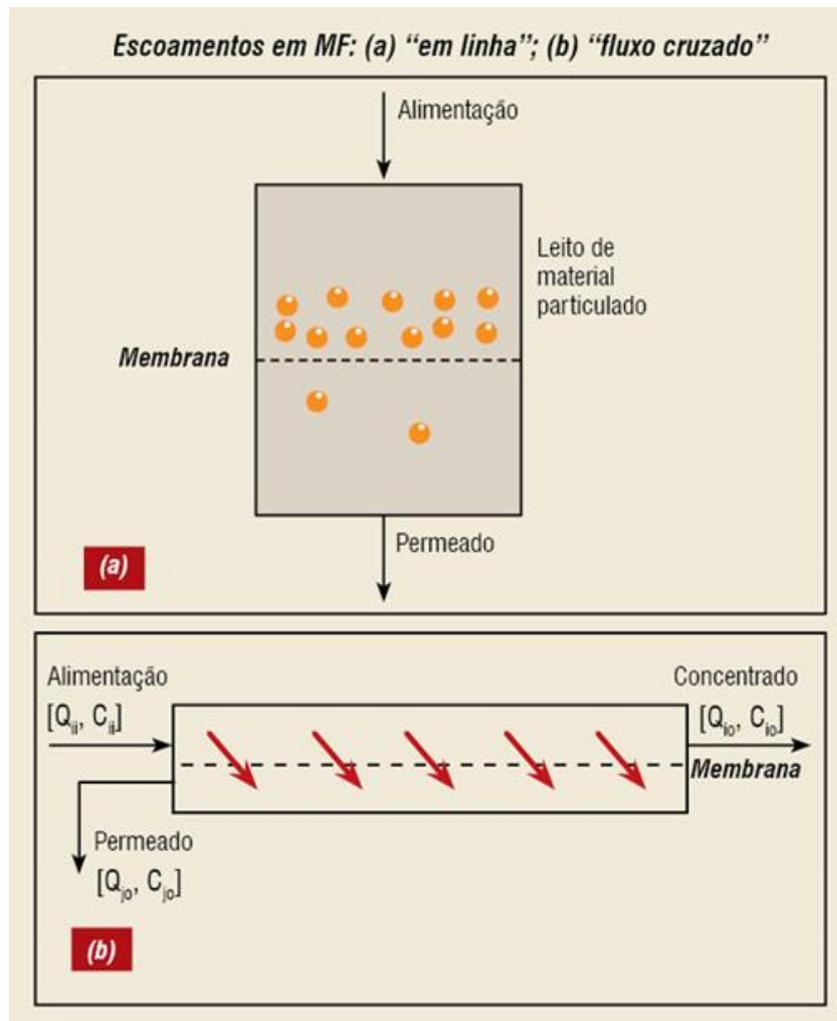
Os dispositivos de MF operam em duas formas de escoamento. A primeira, denominada em linha, e a segunda denominada de fluxo cruzado. Os equipamentos em linha são bem simples e neles toda a vazão de alimentação da suspensão atravessa a membrana. À medida que o material particulado se acumula na superfície da membrana, a vazão de processo diminui para uma pressão constante de operação, e, a partir de certa vazão mínima de operação, o elemento filtrante é substituído. Em alguns modelos, a operação é interrompida e se promove um fluxo reverso, chamado retro lavagem, que destaca boa parte do material particulado aderido à superfície da membrana.

Já os equipamentos de fluxo cruzados são mais complexos, podendo processar muito bem suspensões com concentração de sólidos pequenos durante largos períodos de tempo antes de uma parada para limpeza, pois a contínua remoção do concentrado diminui sobremaneira a taxa de deposição do material particulado sobre a superfície da membrana. A eficiência de microfiltração e da ultrafiltração está relacionada com a diferença de tamanho do poro da membrana e a partícula a ser removida (FAPPI, 2015).

A retenção física de material particulado é o principal mecanismo de rejeição em membranas de microfiltração e ultrafiltração. Tal fato é explicado pela deposição de materiais na superfície e no interior das membranas, ou mesmo devido ao efeito de compactação ou degradação química de constituintes químicos que compõem a estrutura da membrana (BONAMIGO, 2014).

Na figura 3 tem-se um desenho esquemático dos processos de microfiltração com diferenciação dos seus dois tipos de fluxo.

Figura 3: Esquemas de microfiltração com seus tipos de fluxo



Fonte: Blog Química.com (2021).

2.7 OSMOSE INVERSA

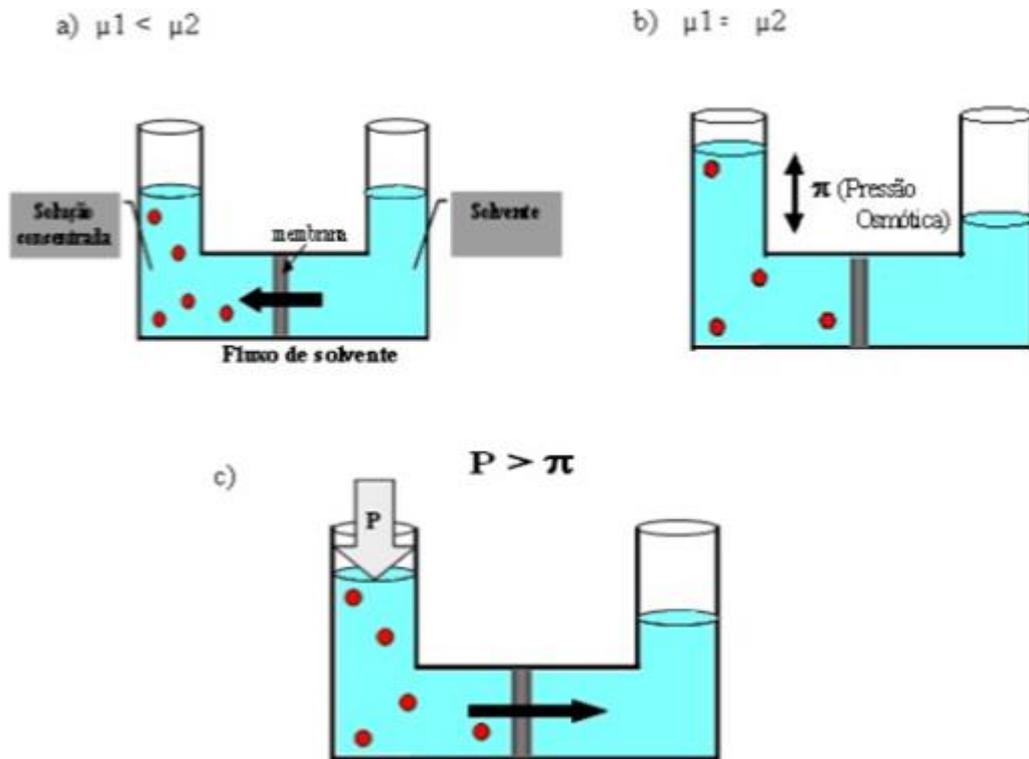
Habert et al. (2006) afirma que a osmose inversa (OI) é um processo de separação com membranas usado quando se deseja reter solutos de baixa massa molar, tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose. Por este motivo, as membranas de OI devem ser mais fechadas (poros menores) apresentando, portanto, uma maior resistência à permeação e, conseqüentemente, pressões de operação mais elevadas do que as utilizadas em UF. O nome Osmose Inversa se deve ao fato de que neste tipo de processo o fluxo permeado é no sentido inverso do fluxo osmótico normal.

Na Figura 4 é possível comparar os processos de osmose convencional e osmose inversa. Quando uma membrana semipermeável (permeável somente ao solvente) separa uma solução de um determinado soluto do solvente puro, ou de uma solução de menor concentração, haverá um fluxo de solvente no sentido solvente puro para a solução, ou da solução diluída para a solução concentrada (Figura 4a). Isso ocorre porque a presença do soluto ocasiona uma queda no potencial químico do solvente na solução, provocando um gradiente de potencial químico entre os dois lados da membrana (HABERT et al, 2006).

O fluxo de solvente continua neste sentido até que o equilíbrio seja estabelecido. No entanto, à medida que o solvente passa para a solução aumenta a pressão no lado da solução. Desta forma, pode-se chegar a uma situação onde a queda do potencial químico do solvente devido a presença do soluto é equivalente ao aumento de potencial químico devido ao aumento de pressão do sistema. Nesta situação não haverá mais força motriz para o transporte do solvente no sentido do solvente puro para a solução, ou da solução diluída para a solução concentrada. Considera-se, então, que o equilíbrio osmótico foi atingido (HABERT et al., 2006).

A diferença de pressão entre os dois lados da membrana é definida como sendo a diferença de pressão osmótica, $\Delta\pi$, (Figura 4b), entre as duas soluções. Caso haja solvente puro em um dos lados da membrana a diferença de pressão representará a pressão osmótica da solução. Ao se aplicar pelo lado da solução mais concentrada uma diferença de pressão entre as duas soluções ($\Delta P > \Delta\pi$), o potencial químico do solvente na solução concentrada será maior do que o potencial químico do solvente puro ou do solvente na solução mais diluída. A consequência é uma inversão no sentido do fluxo osmótico, ou seja, o solvente escoar do lado da solução concentrada para o lado do solvente puro (Figura 4c) (HABERT et al., 2006).

Figura 4: O fenômeno osmótico e o processo de Osmose Inversa. a) Condição inicial; b) Equilíbrio osmótico; c) Condição da Osmose Inversa.



Fonte: RAMOS (2008).

Cabe ressaltar que a osmose inversa é um processo que transforma uma fonte de água inutilizável em recurso utilizável. Ela é capaz de renovar um amplo espectro de águas de alimentação. A osmose inversa encontra aplicação na produção de água potável devido à sua maior rejeição de impurezas. Esta tecnologia é utilizada para a produção de águas com alto grau de pureza, água potável e água de processo (PANDEY et al., 2012).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Como etapa inicial do nosso processo, realizamos a coleta de amostra de efluente tratado na saída da ETE da indústria de laticínios, a qual possui uma vazão de saída constante. Esta coleta fora realizada obedecendo um padrão de horários e volume, caracterizando uma amostragem composta, esta por sua vez possui maior representatividade. A cada 4 horas uma amostra de 10 L foi coletada, durante o período de 24 horas. Posteriormente este volume foi acondicionado sob refrigeração em um tarro até a obtenção do volume total necessário. O volume total coletado foi de 54 L, posteriormente fracionado em duas parcelas

Uma primeira amostra de efluente tratado (4 L) fora enviada ao laboratório (EcoCerta) para realizar a caracterização físico química e de metais. O restante (50 L) fora transportado até a Universidade de Passo Fundo (UPF), para ser utilizado nos protótipos de tratamento. Volume este previamente estabelecido, pois, o protótipo de osmose inversa necessita de no mínimo 40 L para iniciar sua operação. Este plano amostral é representado pelo quadro 3, que nos traz as características do efluente tratado no momento de sua coleta.

Tabela 1: Características do efluente tratado na saída da ETE

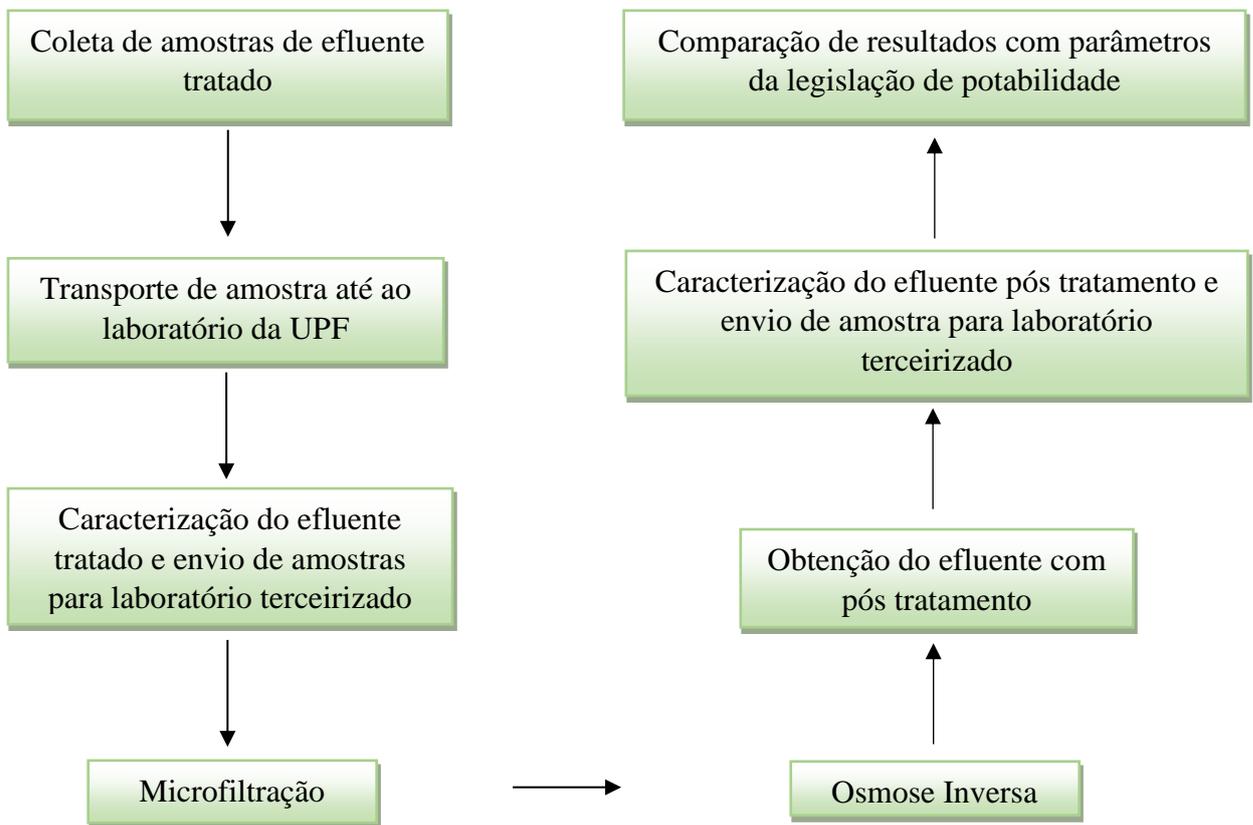
COLETA DE AMOSTRA DE EFLUENTE TRATADO NA SAÍDA DA ETE						
HORÁRIO	TEMP. BRUTO (°C)	pH BRUTO	TEMP. TRATADO (°C)	pH TRATADO	TEMP. AMBIENTE (°C)	VAZÃO (L/s)
00:00						
02:00	25	7,6	24	7,83	17	12
04:00						
06:00	24	6,89	21	7,58	14	12
08:00						
10:00	28	6,53	24	7,63	21	11
12:00						
14:00	29	6,67	25	7,82	22	11
16:00						
18:00	25	8,86	24	7,93	19	10
20:00						
22:00	27	8,63	24	7,93	17	10

Fonte: O autor (2021).

Cabe ressaltar neste momento que o efluente que dá origem a amostra analisada é o tratado, ou seja, o mesmo já passou pela ETE da indústria de laticínios. Através da análise destas informações foi possível avaliar as condições reais no momento do descarte deste efluente, estas que foram consideradas para a operação de nossos protótipos.

Em sequência e para um melhor entendimento da metodologia empregada, o quadro 3 traz em forma de fluxograma todos os passos realizados para conclusão deste estudo.

Quadro 3: Fluxograma da metodologia do trabalho



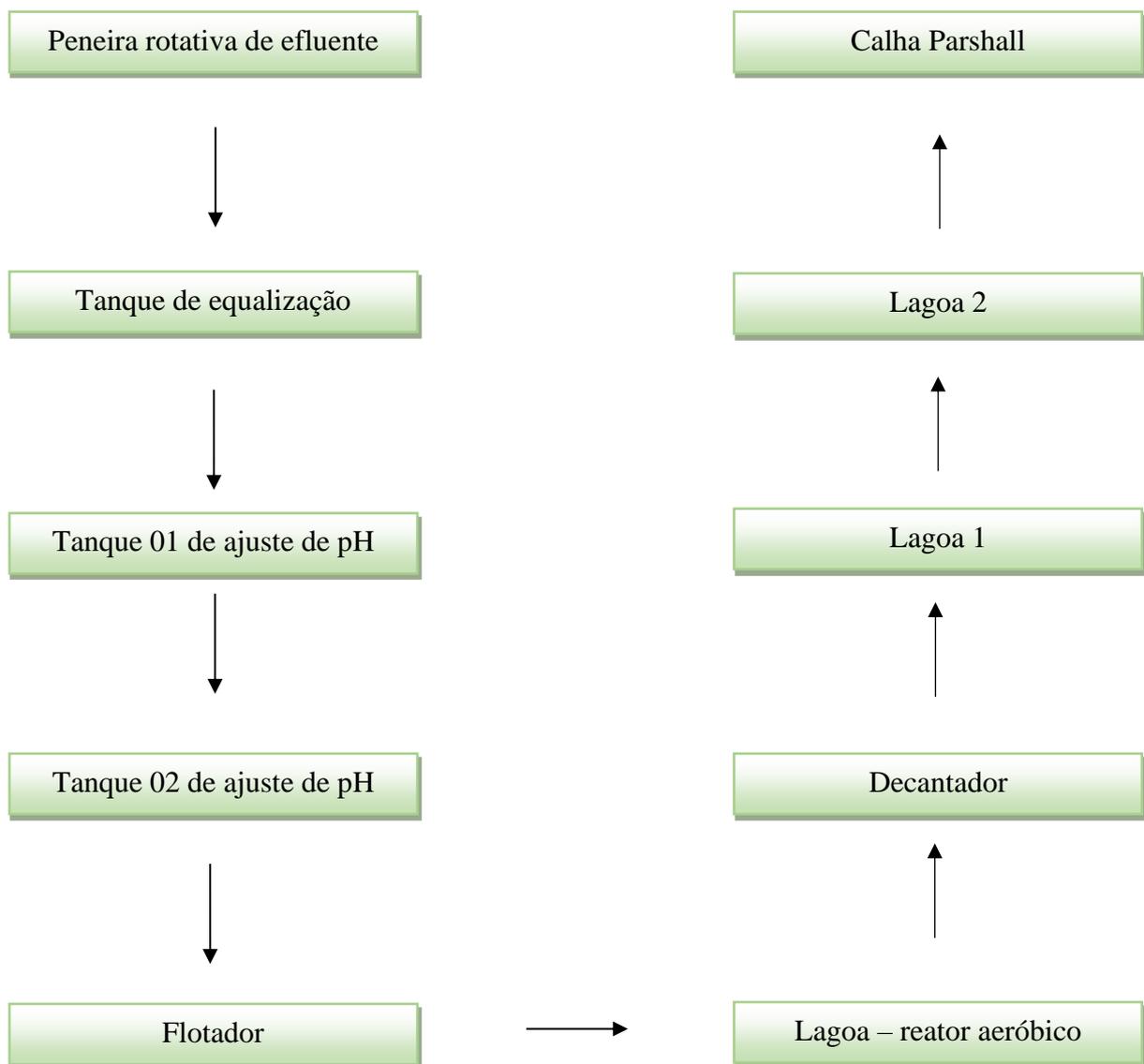
Fonte: O autor (2021).

3.1 LOCAL DO ESTUDO

A indústria de laticínios, objeto de estudo do trabalho, localiza-se no município de Passo Fundo – RS, ao norte do estado do Rio Grande do Sul. A unidade iniciou suas atividades no ano de 2007 e desenvolve o processamento de leite, creme de leite e leite condensado, recebendo uma média diária de aproximadamente 450 mil litros de matéria prima.

Em relação a estação de tratamento de efluentes instalada na indústria, seu funcionamento é representado pelo fluxograma abaixo.

Quadro 4: Fluxograma de funcionamento da ETE do laticínio



Fonte: O autor (2021).

Para enriquecimento visual a figura 5 é uma representação fotográfica do local da coleta de amostra na indústria de laticínios (calha Parshall).

Figura 5: Local de coleta de amostra na saída da ETE do laticínio

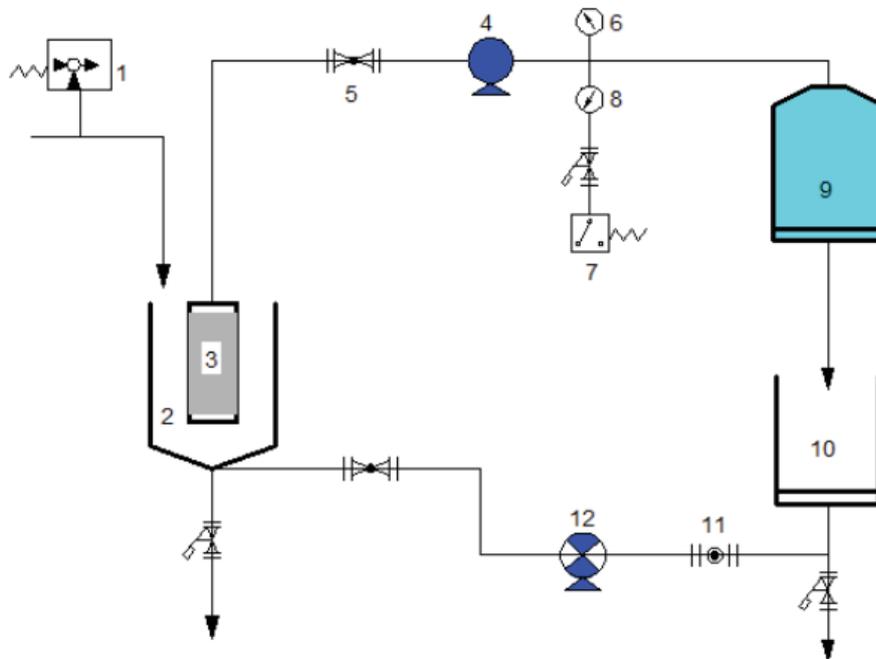


Fonte: O autor (2021).

3.2 TRATAMENTO POR MICROFILTRAÇÃO

Uma das condições de configuração para o protótipo de microfiltração que fora obedecida é a pressão de operação ficou entre 0,2 e 0,4 bar, que por sua vez, é uma condição que oferece eficiência durante a operação do equipamento. A necessidade neste momento era para que micro filtrássemos ao mínimo 40 L, volume este necessário para alimentar o protótipo de osmose inversa posteriormente. Abaixo a figura 6 traz a representação gráfica do funcionamento deste equipamento.

Figura 6: Fluxograma de equipamento piloto para microfiltração



Onde: 1 – Painel de controle; 2 – Tanque de polipropileno; 3 – Membrana submersa; 4 – Bomba de vácuo; 5 – Válvula agulha; 6 – Rotâmetro para controle de vazão; 7 – Compressor de ar; 8 – Rotâmetro para controle de ar; 9 – Tanque de vácuo; 10 – Tanque para disposição final; 11 – Válvula de esfera; 12 – Bomba centrífuga.

Fonte: Adaptado de Sandoval (2016)

O equipamento piloto e as membranas utilizadas no estudo foram fabricados pela empresa Pam – Membranas Seletivas Ltda, e segundo esta as membranas são constituídas na configuração de fibra oca para trabalhar submersas. O quadro 5 apresenta as informações da membrana utilizada e sua respectiva permeabilidade hidráulica.

Quadro 5: Características da membrana de microfiltração

Identificação dos módulos	723
Material	Poliamida
Processo	Microfiltração
Configuração	Fibra oca outside/inside
Área de microfiltração (m²)	0,12
Diâmetro dos poros (µm)	0,1

Fonte: Pam membranas seletivas LTDA (2015)

Para enriquecimento visual, abaixo a figura 7 nos traz a representação fotográfica do equipamento para microfiltração em escala piloto.

Figura 7: Equipamento para microfiltração em escala piloto



Fonte: Adaptado de Pastre (2015)

O fluxo de permeado foi monitorado com o auxílio de um rotâmetro durante os ensaios e atribuído em gráficos para avaliação do comportamento. Este representa a medida de fluxo de permeado (L/h.m²) através da membrana, sendo este calculado de acordo com a equação (1) (CHERYAN, 1998).

Equação 1: Fluxo do permeado (L/h.m²)

$$J_p = \frac{V_p}{tA} \quad (1)$$

Onde:

J_p Fluxo do permeado (L/h.m²);

A Área da membrana (m²);

V_p Volume do permeado recolhido (mL);

t Tempo para permeação (s).

Além disso, medições de tempo foram realizadas para também avaliar o fluxo de filtração obtido quando o protótipo estava em funcionamento, ou seja, houveram tempos cronometrados para alcançarmos um volume conhecido de efluente micro filtrado.

A rejeição ou eficiência da remoção (%) da membrana fornece uma medida quantitativa da capacidade da membrana em reter moléculas ou componentes específicos, sob determinadas condições de operação (GIRARD, FUKUMOTO, 2000), sendo calculada pela Equação (2) para as variáveis Cor, Turbidez e pH e condutividade elétrica.

Equação 2: Índice de rejeição

$$R (\%) = \left[1 - \frac{C_p}{C_R} \right] \cdot 100 \quad (2)$$

Onde:

C_p Concentração do composto no permeado (mg/L)

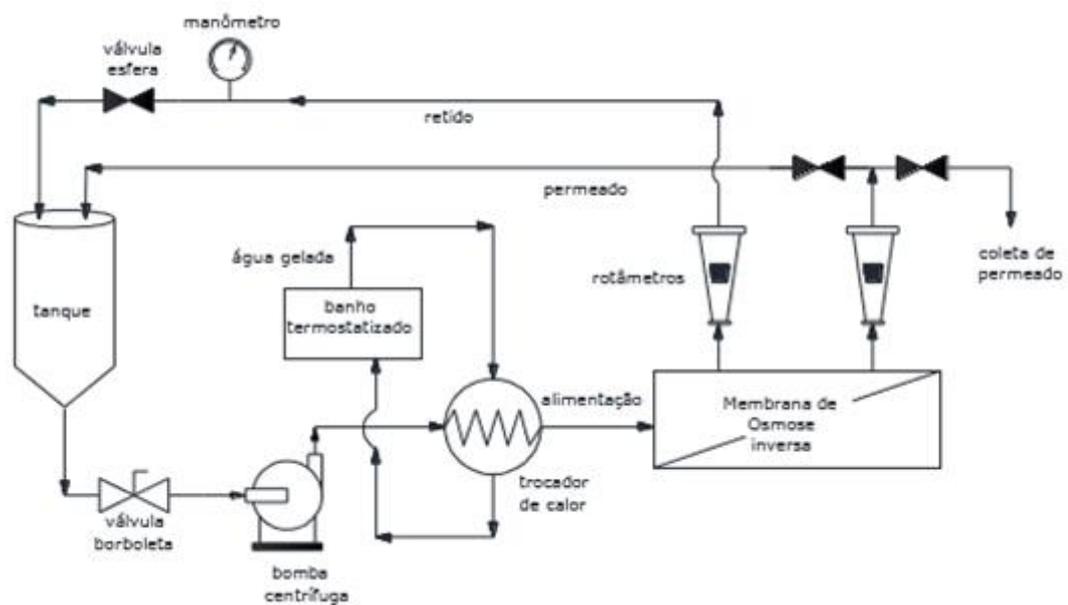
C_R Concentração do composto na alimentação (mg/L)

3.3 TRATAMENTO POR OSMOSE INVERSA

O tratamento com osmose inversa foi aplicado seguindo a condição experimental de 20 bar (2000 kPa), selecionada a partir de Basso (2014) e temperatura de operação de 25°C, pois é basicamente a média natural de temperatura encontrada na saída da estação de tratamento. Como pretende-se um processo de tratamento contínuo, a temperatura deve ser considerada nos testes. O protótipo fora alimentado com 40 L de efluente pós microfiltração.

O modelo piloto utilizado possui sua instalação em aço inoxidável, com capacidade máxima de 100 litros de amostra. Na figura 8 há a representação de um esquema similar ao que será utilizado, sendo composto por um tanque de alimentação, bomba de alta pressão, trocador de calor, membrana e controles necessários para regulagem da pressão, vazão e temperatura.

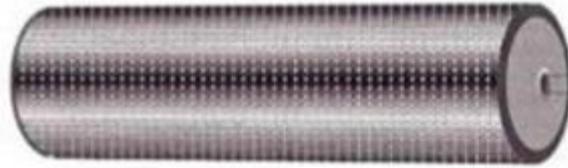
Figura 8: Fluxograma de equipamento piloto para osmose inversa



Fonte: Adaptado Miorando (2012)

A membrana utilizada no estudo, conforme mostra a Figura 9, foi uma membrana espiral de osmose inversa de alta rejeição de poliamida (PA) da marca KOCH Membrane Systems. O modelo possui área de 7,1 m², pressão máxima de operação de até 44,8 bar (4480 kPa) e fluxo de permeado de até 300 L.h⁻¹.

Figura 9: Configuração da membrana de osmose inversa espiral



Fonte: Adaptado de Koch Membrane Systems, Inc. (s.d.)

Também a nível de enriquecimento visual, abaixo a figura 10 é a representação fotográfica do protótipo utilizado para osmose inversa.

Figura 10: Equipamento para osmose inversa em escala piloto



Fonte: O autor (2021).

Para a osmose inversa foram calculadas as taxas de eficiência e/ou rejeição, e também o fluxo do permeado. Cálculos estes realizados através da utilização das equações 1 e 2 apresentadas anteriormente.

Ainda no momento da realização dos procedimentos de purificação do efluente, algumas das análises disponíveis no laboratório da UPF foram realizadas após cada tratamento, sendo elas: a medida de pH, turbidez, condutividade e cor.

Para medida de pH foi utilizado um medidor eletrônico. O equipamento possui sistema de fonte de alimentação, mostrador digital, seletor de regulagem para calibração, seletor de modo de leitura, eletrodo de vidro com faixa de trabalho de pH de 0,00 a 14,00 e eletrodo de compensação de temperatura.

Para medida de turbidez o equipamento utilizado foi o Medidor eletrônico, que possui 01 cubeta de 25 ml; e um set. de padrões prontos para calibração com os valores 0,1 NTU; 0,8 NTU; 8 NTU 80 NTU e 1000 NTU.

Para medida de condutividade elétrica foi utilizado o método da resistência elétrica e da constante de condutividade. O equipamento utilizado foi o Condutímetro TEC-4MP da marca TECNAL.

Para medida de cor foi realizada pelo método colorimétrico. E o equipamento utilizado é o espectrofotômetro da marca Merck, modelo SQ118.

Em relação as amostras enviadas para o laboratório terceirizado (EcoCerta), o quadro 6 nos traz as informações de análises realizadas juntamente com a metodologia utilizada.

Quadro 6: Análises terceirizadas e metodologia utilizada pelo laboratório (EcoCerta)

FÍSICO-QUÍMICA	
Ensaio	Metodologia
Alcalinidade a bicarbonatos	SMWW 23ª 2320 B
Cloreto	EPA 300.1 :1997
DBO5 - Demanda bioquímica de oxigênio	SMWW 23ª 5210 D / PE-513
Dureza	SMWW 23ª 2340 B / SMWW 23ª 2340 C / PE-130
Nitrato (como N)	EPA 300.1:1997
Nitrito (como N)	EPA 300.1:1997
Óleos e graxas minerais	SMWW 23º 5520 C, D e F / PE-529
Óleos e graxas vegetais e animais	SMWW 23º 5520 C, D e F / PE-529
Sólidos suspensos voláteis	SMWW 23º 2540 E
Sulfato	EPA 300.1:1997
Alcalinidade total	SMWW 23ª 2320 B
Condutividade a 25°C	SMWW 23ª 2510 B
DQO - Demanda química de oxigênio	SMWW 23ª 2510 B
Fósforo total	SMWW 23ª 4500-P B e E/ PE-519/ EPA 200.7:2001 / PE- 100
Nitrogênio amoniacal (Amônia como NH3)	SMWW 23ª- 4500 NH3 B e C
Nitrogênio Kjeldahl	SMWW 23ª 4500 N org B / NH3 B e C
Sílica solúvel (reativa)	SMWW 23ª 4500 SiO2 C
Sólidos dissolvidos totais	SMWW 23ª 2510 A e B / SMWW 23ª 2540 C / PE- 539
Sólidos suspensos totais	SMMW 23ª 2540 D
Sólidos totais	SMMW 23ª 2540 B
METAIS	
Ensaio	Metodologia
Alumínio total	PE-100/SWMM 23ª 3111D EPA 200.7:2001
Bário total	PE-100/SWMM 23ª 3111D EPA 200.7:2001
Boro total	PE-100/SWMM 23ª 4500-B B/EPA 200.7:2001
Estrôncio total	EPA 3015A / EPA 200.7:2001
Ferro dissolvido	PE-100/SWMM 23ª 3111B/EPA 200.7:2001
Ferro total	PE-100/SWMM 23ª 3111B/EPA 200.7:2001
Manganês total	PE-100/SWMM 23ª 3111B/EPA 200.7:2001
Potássio total	PE-100/SWMM 23ª 3500-K B/EPA 200.7:2001
Sódio total	PE-100/SWMM 23ª 3111B/EPA 200.7:2001

Fonte: EcoCerta Laboratório de Análises Ambientais (2021).

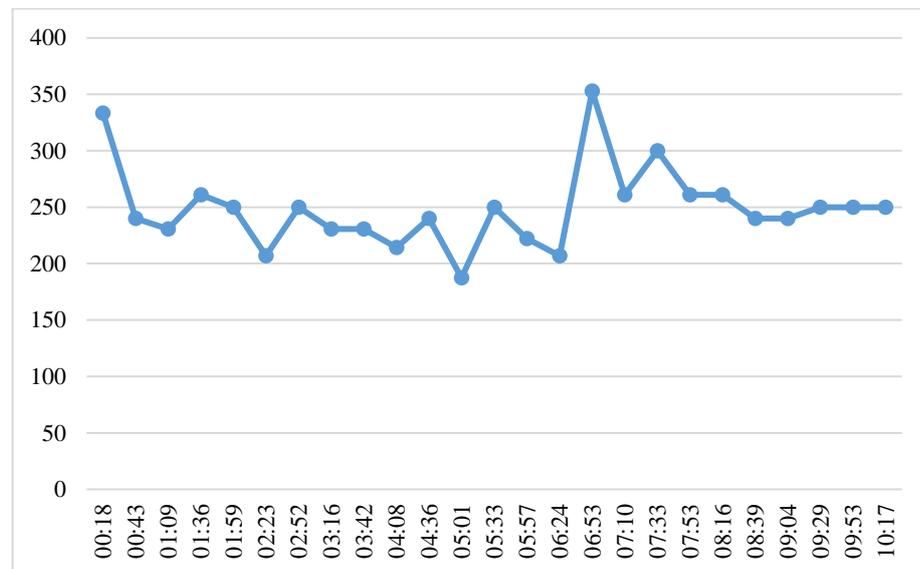
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir deste ponto são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de microfiltração e osmose inversa para o pós-tratamento de efluente oriundo de uma ETE de um laticínio.

4.1 FLUXO DE PERMEADO

A figura 11 nos traz a representação gráfica do fluxo de permeado durante a operação do equipamento de microfiltração. Em seu eixo x está disposto o tempo em minutos e segundos, e no eixo y está disposto o fluxo verificado para cada tempo.

Figura 11: Fluxo de permeado na microfiltração de efluente na saída ETE



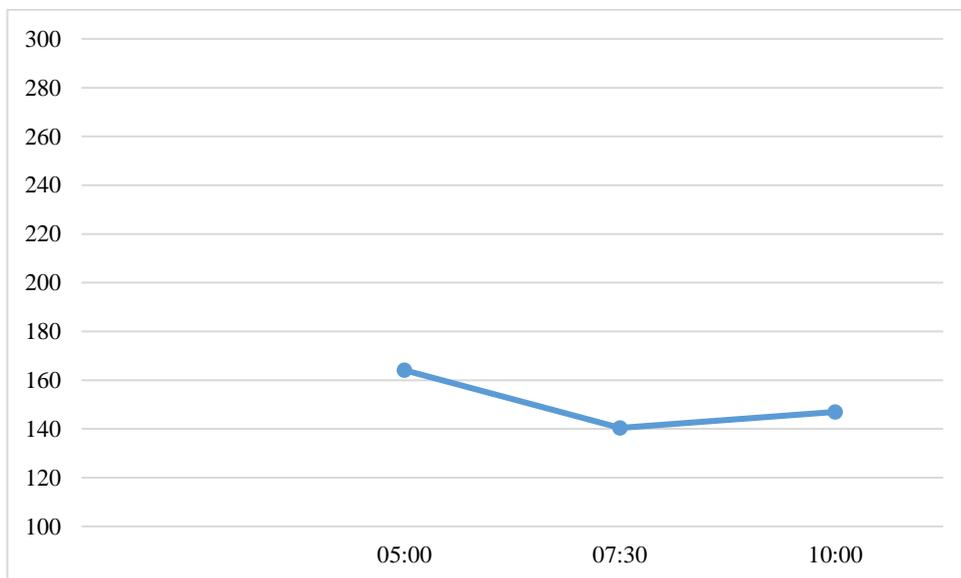
Fonte: O autor (2021).

Avaliando as informações dispostas é possível observar dois picos de fluxo de permeado, que até ultrapassam os 350L/m².h, no entanto, é um comportamento esperado devido a condição da membrana no momento inicial de filtração, e aos 06:53 uma retrolavagem foi executada, dando origem a um comportamento semelhante entre os ciclos.

O fluxo médio por sua vez, parâmetro utilizado para dimensionamento em escala, é representado pela estabilidade da curva no gráfico, e para a microfiltração esta média ficou em 224 L/m².h. O que é considerado interessante, pois, com equipamentos compactos será possível permear grandes volumes. A operação com este tipo de efluente não produziu incrustação circunstancial durante o tempo de filtração.

A figura 12, disposta abaixo nos traz a representação gráfica do fluxo de permeado durante a operação do equipamento de osmose inversa. Em seu eixo x estão dispostos os tempos em que foram realizadas as leituras de fluxo, e o fluxo observado disposto no eixo y.

Figura 12: Fluxo de permeado na osmose inversa com efluente na saída ETE



Fonte: O autor (2021).

O fluxo de permeado verificado durante a operação do equipamento de osmose inversa obteve a média de 150 L/m². h. O que também é um aspecto positivo quando avaliada a possibilidade do dimensionamento em larga escala.

Para uma avaliação mais coerente do fluxo na osmose inversa seria necessário um maior volume de efluente microfiltrado, o que traria um maior tempo de funcionamento do equipamento e por consequência um gráfico com um maior volume de informações.

4.2 ANÁLISES INICIAIS E EFICIÊNCIA DOS TRATAMENTOS EMPREGADOS

A tabela 2 disposta abaixo apresenta os valores de pH, cor, condutividade e turbidez para cada um dos tratamentos de filtração.

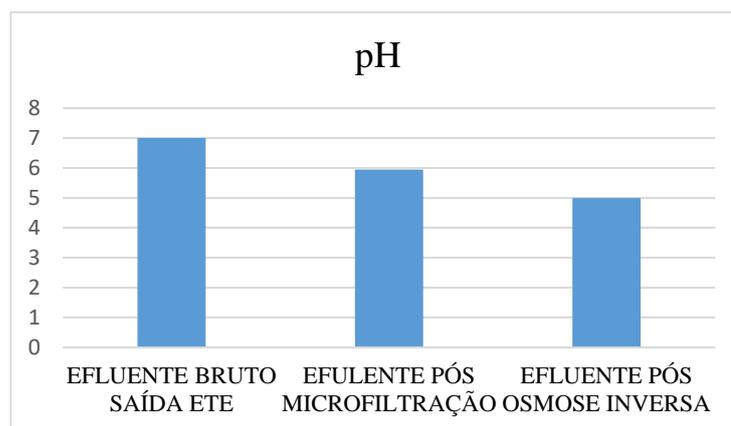
Tabela 2: Análises in loco após cada tratamento

	pH	Condutividade (uS/cm)	Cor (uH)	Turbidez (NTU)
EFLUENTE TRATADO NA SAÍDA ETE	7	1446	55	6,2
EFLUENTE PÓS MICROFILTRAÇÃO	5,95	1361	10	1,1
EFLUENTE PÓS OSMOSE INVERSA	5	119	0	0,99

Fonte: O autor (2021).

Em relação aos valores obtidos é possível observar uma redução em todos os quesitos avaliados. Analisando especificamente o valor de pH, inicialmente o mesmo estava em uma faixa considerada neutra (7). Depois da microfiltração o valor caiu para 5,95, e após a osmose inversa o valor ficou na média de 5. O gráfico abaixo é a representação da rejeição deste parâmetro após cada ciclo realizado.

Figura 13: Gráfico comparativo para valores de pH



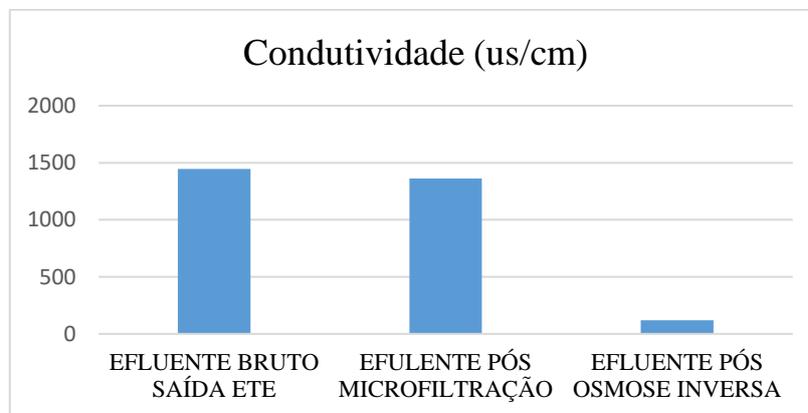
Fonte: O autor (2021).

A diminuição de valores no índice de pH nos remete a acidificação do efluente pós tratamento, em grande parte devido a remoção dos íons solúveis pelas membranas. Este fator

não é negativo, pois, segundo ABNT (1997) não seria necessária uma correção para um posterior reuso, visto que esta norma não limita uma faixa de pH. No entanto, para atendimento de normais internacionais, como a EPA (2004) a faixa para reuso fica entre 6,0 e 9,0, assim sendo necessária uma correção.

A variação entre os valores de condutividade apresentou redução ao longo do processo. Na etapa de microfiltração verificou-se uma rejeição de 5,88% e na osmose inversa 91,26%, resultando em uma eficiência total de 97,13%. O gráfico abaixo é a representação da rejeição deste parâmetro.

Figura 14: Gráfico comparativo para valores de condutividade

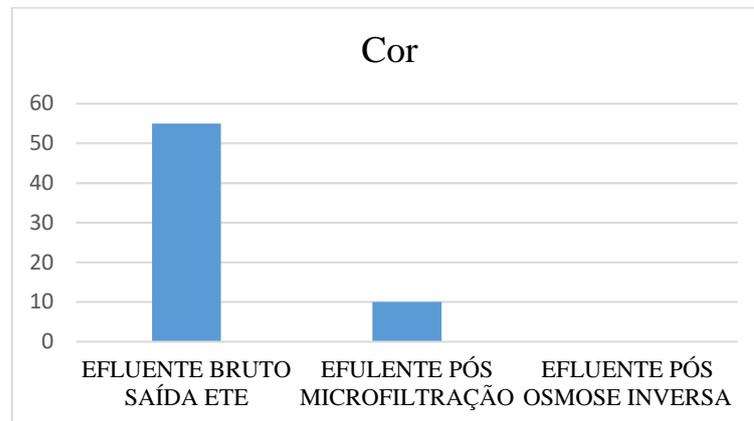


Fonte: O autor (2021).

A amplitude de rejeição visualizada entre um processo de tratamento e outro é fator condicionante para a aplicação da água em reuso. A concentração de sais limita o reciclo para os principais processos industriais, dentre eles, a higienização CIP das linhas de produção que demanda água com características de potabilidade.

Segundo Borilli (2016), a osmose inversa promove rejeições de até 91,8% para o parâmetro de condutividade.

Figura 15: Gráfico comparativo para valores de cor



Fonte: O autor (2021).

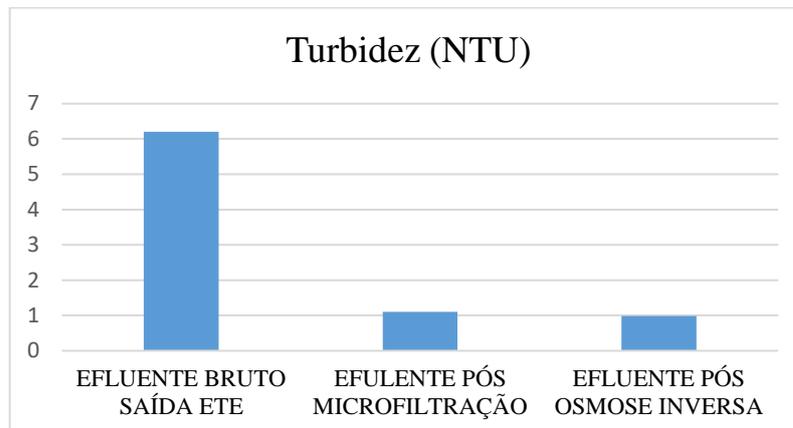
A diferença de valores no índice de cor representou uma eficiência de 100% de remoção. O principal responsável neste caso foi o processo de microfiltração que obteve uma rejeição de 81,82%. E na sequência, a osmose inversa como etapa secundária foi responsável pelos 18,18% restantes, que trouxeram o índice a zero.

Segundo Basso (2014), os baixos níveis de cor e turbidez são fundamentais para viabilizar o reuso do ponto de vista estético.

Segundo Fabro (2017), os parâmetros físicos cor e turbidez nas águas para reuso são importantes, pois fornecem indicações preliminares para a caracterização da qualidade da água como, por exemplo, os níveis de sólidos em suspensão (associados à turbidez) e as concentrações de sólidos dissolvidos (associados à cor), bem como, a decomposição da matéria orgânica em estado coloidal, além de compostos inorgânicos, como os óxidos de ferro e manganês.

O gráfico exposto abaixo contém os valores medidos para o parâmetro de turbidez.

Figura 16: Gráfico comparativo para valores de turbidez



Fonte: O autor (2021).

O comportamento verificado neste caso é semelhante ao da cor, pois, na etapa de microfiltração uma maior rejeição foi observada (82,26%), enquanto na osmose a taxa ficou em 10%. Em concomitância um total de 92,26% de remoção.

A redução de maior proporção neste caso (na MF), é ligada a remoção de componentes do efluente que possuem um maior tamanho de partícula, e não se encontram solubilizados. Portanto, este é um comportamento esperado.

4.3 COMPILADO DE ANÁLISES E CONSIDERAÇÕES PARA REUSO POTÁVEL

Os resultados obtidos a partir das amostras encaminhadas para o laboratório (EcoCerta) fazem parte da tabela comparativa abaixo. A mesma compreende os resultados da caracterização do efluente tratado na saída da ETE e caracterização do efluente pós combinação de tratamentos de microfiltração seguido de osmose inversa. Além disso, a tabela possui uma coluna que calcula a proporção de rejeição de cada um desses parâmetros após a combinação de tratamentos e um status que indica se o parâmetro está dentro do estabelecido pela portaria potabilidade (Nº 5 de 3 de outubro de 2017, e sua atualização Nº 888 de 4 de maio de 2021).

Tabela 3: Comparativo de efluente tratado, pós tratamento e portaria potabilidade.

PARÂMETROS	RESULTADO EFLUENTE DE SAÍDA DA ETE	RESULTADO APÓS OSMOSE INVERSA	EFICIÊNCIA E/OU REJEIÇÃO	POTABILIDADE (PORTARIA DE CONSOLIDAÇÃO 5 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE DE 03 DE OUTUBRO DE 2017).	POTABILIDADE (PORTARIA N° 888 DE 4 DE MAIO DE 2021)	STATUS	UNIDADE
pH	7	5		6,0 - 9,0	6,0 - 9,0	CORREÇÃO	-
Condutividade	1282	108,4	91,54%			NA	µS/cm
Cor	55	0	100,00%	15		OK	-
Turbidez	6,2	0,99	84,03%	5	5	OK	uT
Alcalinidade a Bicarbonatos	403,5	25,2	93,75%			NA	mg/L
Cloreto	113,7	7,3	93,58%	250		OK	mg/L
DBO 5	<3	<3	OK			OK	mg/L
DQO	<40	<40	OK			OK	mg/L
Dureza	51,2	<3,0	OK	500		OK	mg/L
Nitrato (N-NO ₂ ⁻)	<0,3	2	OK	10	10	OK	mg/L
Nitrito (N-NO ₃ ⁻)	9,9	<0,3	OK	1	1	OK	mg/L
Fósforo Total	1,74	0,17	90,23%			OK	mg/L
Sulfato	168,4	3,5	97,92%			OK	mg/L
Alcalinidade Total	403,5	25,2	93,75%			OK	mg/L
Sólidos Dissolvidos Totais	759	55,2	92,73%	1000	500	OK	mg/L
Sólidos Totais	776	55,2	92,89%			NA	mg/L
Alumínio	0,09	<0,05	OK	0,2		OK	mg/L
Bário	<0,01	<0,01	OK	0,7		OK	mg/L
Boro	0,05	<0,05	OK	5		OK	mg/L
Estrôncio total	0,05	0,002	96,00%			NA	mg/L
Ferro Dissolvido	<0,05	<0,05	OK			NA	mg/L

PARÂMETROS	RESULTADO EFLUENTE DE SAÍDA DA ETE	RESULTADO APÓS OSMOSE INVERSA	EFICIÊNCIA E/OU REJEIÇÃO	POTABILIDADE (PORTARIA DE CONSOLIDAÇÃO 5 DO MINISTÉRIO DA SAÚDE DE 03 DE OUTUBRO DE 2017).	POTABILIDADE (PORTARIA N° 888 DE 4 DE MAIO DE 2021)	STATUS	UNIDADE
Ferro Total	<0,05	<0,05	OK	0,3		OK	mg/L
Manganês	<0,025	<0,025	OK	0,1		OK	mg/L
Potássio	24,2	1,5	93,80%			NA	mg/L
Sódio	343,5	21	93,89%	200	200	OK	mg/L
Contagem de coliformes totais		$1,7 \times 10^2$	OK	INEXISTÊNCIA	INEXISTÊNCIA	OK	mg/L

Fonte: O autor (2021).

Em uma ótica geral os valores apresentados na tabela permitem a constatação de uma alta eficiência de remoção dos parâmetros analisados, possuindo taxas acima dos 90% na vasta maioria das avaliações, com exceção para turbidez que foi de 84,03%.

As eficiências alcançadas para cor e turbidez neste estudo foram significativas e consistentes com as citadas por outros autores: (Fabro, 2017); (Abdessemed; Nezzal, 2002); (Chen et al., 2007); (Moon et al., 2009), (Hatt; Germain; Judd, 2011).

Com relação ao índice de pH, o valor verificado no pós tratamento fica abaixo do especificado pela portaria de potabilidade (6,0 – 9,0), portanto, este é o único parâmetro que exige uma correção para um posterior enquadramento do efluente pós osmose inversa como potável. Esta por sua vez pode ser realizada através da inserção de um reagente alcalino, como bicarbonato de sódio ou cálcio.

Para atender todos os quesitos da portaria de potabilidade, considerando seu anexo 1 (Tabela de padrão bacteriológico), bactérias e coliformes totais devem ser inexistentes. Portanto a tabela em sequência nos traz o resultado obtido neste parâmetro para o efluente na saída da ETE, bem como a metodologia e seu limite de detecção.

Tabela 4: Resultados das análises microbiológicas para efluente na saída da ETE

Microbiologia				
Ensaio	Resultado	Unidade	LQ	Metodologia
Contagem de coliformes termotolerantes	< 1,8x10 ⁰ (Ausência)	NMP/100mL	1,8	CETESB L5.406 / 2007

Fonte: EcoCerta Laboratório de Análises Ambientais (2021).

Importante é destacar que no parâmetro de contagem de coliformes totais pós osmose inversa da tabela 3, houve a quantificação microbiológica, fato que se atribui a uma possível contaminação nos frascos utilizados para envio de amostras para o laboratório. Além disso, não foi realizada uma higienização por completa no equipamento antes da sua utilização.

Quando observado o anexo 11 da portaria de potabilidade, fora verificada a referência quanto a inexistência de agrotóxicos e metabólitos que representem risco à saúde humana. Para garantir este quesito, a tabela 5 exposta abaixo, nos traz os resultados das análises realizadas no efluente na saída da ETE observando estes aspectos.

Tabela 5: Resultados das análises de agrotóxicos para efluente na saída da ETE

Cromatografia				
Ensaio	Resultado	Unidade	LQ	Metodologia
Aldrin + Dieldrin	< 0,02	µg/L	0,02	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
Aldrin	< 0,01	µg/L	0,01	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
Clordano (cis + trans)	< 0,002	µg/L	0,002	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
DDT (p,p'-DDT+p,p'1DDE+p,p'-DDD)	< 0,01	µg/L	0,01	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
Dieldrin	< 0,02	µg/L	0,02	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
Dodecacloro pentaciclodecano (Mirex)	< 0,002	µg/L	0,002	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
Endrin	< 0,02	µg/L	0,02	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
Heptacloro e heptacloro epóxido	< 0,01	µg/L	0,01	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
Hexaclorobenzeno	< 0,002	µg/L	0,002	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
PCB's totais	< 0,002	µg/L	0,002	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018
Toxafeno	< 2,0	µg/L	2	EPA 3510C:1996 / EPA 8270E:2018

Fonte: EcoCerta Laboratório de Análises Ambientais (2021).

Através do quadro acima é possível verificar que todas as moléculas avaliadas apresentam resultado abaixo do limite de quantificação empregado pelo laboratório em questão. Logo, o efluente pós osmose inversa está conforme também neste aspecto.

Para fins de conclusão e equiparação do efluente obtido no estudo com a portaria de potabilidade é importante esclarecer que, todos os parâmetros avaliados no estudo ficaram dentro dos limites observados na legislação. No entanto, não foram realizadas análises para todos os parâmetros dispostos na portaria de potabilidade atual (Nº 888 de 4 de maio de 2021). O quadro abaixo aponta quais análises ainda devem ser realizadas para comprovação da potabilidade em 100%.

Quadro 7: Análises faltantes para comprovação de potabilidade

PARÂMETRO	VMP (Valor máximo permitido)	UNIDADE
Antimônio	0,006	mg/L
Arsênio	0,01	mg/L
Cádmio	0,003	mg/L
Chumbo	0,01	mg/L
Cobre	2	mg/L
Cromo	0,05	mg/L
Fluoreto	1,5	mg/L
Mercurio total	0,001	mg/L
Níquel	0,07	mg/L
Selênio	0,04	mg/L
Urânio	0,03	mg/L

Fonte: O autor (2021).

Ainda concernente ao quadro 7, é interessante ressaltar que a água atualmente utilizada nos processos produtivos do laticínio, atende ao padrão de potabilidade. Portanto, os componentes citados acima não estão presentes nesta, o que nos remete então a uma possível inexistência destes no efluente obtido pós combinação de tratamentos, ou seja, depois da MF seguida de OI. A ressalva necessária é para processos produtivos que possam agregar tais componentes ao efluente.

5. CONCLUSÃO

A combinação de tratamentos baseados na utilização de membranas, através da microfiltração seguida da osmose inversa, mostrou-se além de capaz, um processo eficiente e promissor para atingirmos padrões de águas para reuso.

O fluxo de permeado alcançado nas operações permite a aplicação em larga escala, e pode ser empregado para atendimento de grandes demandas. A eficiência constatada atingiu valores compatíveis com relação aos parâmetros dispostos na portaria de potabilidade, fator primordial para possibilidade de um reciclo.

É importante frisar que atualmente o embarreiramento na utilização destas técnicas para reuso potável é uma questão legislativa e ainda não podemos empregar este procedimento dentro da indústria.

Como recomendação para trabalhos futuros destacam-se: acompanhamento de dados ao longo do tempo, dimensionamento do sistema em larga escala, avaliação da viabilidade econômica da implantação com tempo de retorno e comprovação de potabilidade total com realização de análises faltantes.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDESSEMED, D.; NEZZAL, G. **Treatment of primary effluent by coagulation-adsorption- ultrafiltration for reuse.** Desalination, 2002.

Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT. **NBR 13.969/97: Tanques sépticos- Unidades de tratamento complementar e disposição final de efluentes líquidos** – Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

BALLANEC, B. et al. **Treatment of dairy process waters by membrane operation for water reuse and milk constituents concentration.** Desalination, Amsterdam, v. 147, p. 89 – 94, 2002.

BARBOSA, Y. L. **Avaliação dos Processos de Separação por membranas para geração de águas de reúso em um Centro Comercial.** Dissertação (Mestrado em Ciências) - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

BASSO, Caroline Diehl. **Tratamento por osmose inversa de efluentes gerados na produção do soro de leite em pó.** Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo (2014).

BONAMIGO, M. **Microfiltração e ultrafiltração para pós-tratamento de efluente de estação de tratamento de esgoto para reúso doméstico não potável.** 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia: Infraestrutura e Meio Ambiente). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2014.

BORILLI, L. **Recuperação de condensados de câmaras de vácuo do processo UHT por osmose inversa seguida de carvão ativado.** 2016. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Ambiental). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2016.

BRIÃO, V. B. **Estudo de prevenção à poluição em uma indústria de laticínios.** Maringá, UEM, Dissertação de Mestrado. 71 p.2000.

BRIÃO, V. B. **Processos de separação por membranas para reuso de efluentes de laticínios.** 2007, 130 p. Tese (Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química), Universidade Estadual de Maringá, Maringá 2007.

BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G. **Nota Científica: Ultrafiltração de efluente da indústria de laticínios para recuperação de nutrientes: efeito da pressão e da velocidade tangencial.** Brazilian Journal of Food Technology, v. 15, n. 4, p. 352-362, 2012.

BRIÃO, V. B.; TAVARES, C. R. G.; FAVARETTO, D. P. C.; HEMKEMEIER, M. **Ultrafiltração de efluente modelo e efluente industrial de laticínios.** Revista CIATEC – UPF, vol.7 (1), p.p.1-12, 2015.

BRIÃO, V.B.. **Water recovery from dairy rinse water by reverse osmosis: Giving value to water and milk solids.** University of Passo Fundo, Passo Fundo, Brazil (2019).

CHEN, Y.; DONG, B. ZHI; GAO, N. YUN; FAN, J. CHU. **Effect of coagulation pretreatment on the fouling of ultrafiltration membrane.** Journal of Environmental Sciences, 2007.

CHERYAN, M. **Ultrafiltration and microfiltration handbook.** 2 ° ed. Boca Raton: CRC. Press. 1998.

CONSTANZI, R.N. **Tratamento de efluentes domésticos por sistemas integrados de lodos ativados e membranas de ultrafiltração visando reuso de água.**2007. Tese (Doutorado em

Engenharia Hidráulica e Saneamento Básico) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

CROOK, J. Regulatory Aspects of Direct Potable Reuse in California. **National Water Research Institute**. Fountain Valley, California, 2010.

EPA. Environmental Protection Agency. **Guidelines for water reuse**. United States Environmental Protection Agency, U.S Agency for International Development: Cincinnati – OH: USEPA, 2004.

FABRO, L. F. **Floco-sedimentação seguida de processos de separação por membranas para tratamento de efluente de lagoa de estabilização visando reúso**. Dissertação de mestrado apresentado ao programa de Pós-Graduação em Engenharia da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo (2017).

FAPPI, D. A. **Micro e ultrafiltração como pós-tratamento para o reúso de efluentes de abatedouro e frigorífico de suínos**. 2015. 126 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO / CENTRO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (FIESP/CIESP). **Conservação e Reuso de Água**. Manual de Orientação para o Setor Industrial. Vol. 1, 2004.

GIRARD, B.; FUKUMOTO, L. R. Membrane processing of fruit juices and beverages: a review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 40, n. 2, p. 91-157, 2000.

JUDD, S. **Membrane Technology**. p. 13-75. In: JUDD, S. and JEFFERSON, B. Membranes for industrial wastewater recovery and re-use. Elsevier, 2003, 628 p.

HABERT, A. C. **Processo de separação com membranas**. Rio de Janeiro. 2006.181 fls

IBGE (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICAS). **Censo Agropecuário do Brasil: 2018-2019**. Rio de Janeiro, IBGE, 2020.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering – treatment and reuse**. 4 ed. New York: McGraw Hill, 2003.

MIERZWA, José Carlos et al. **Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado**. SciELO. São Paulo - SP, p. 1-10. 15 fev. 2008.

MIORANDO, Taizi. **Projeto e análise econômica de um sistema de osmose inversa para recuperação de sólidos lácteos de água de primeiro enxágue de laticínios**. 2012. Trabalho 27 de conclusão de curso (graduação em Engenharia Ambiental). Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2012.

MOON, J., KANG, M. S., LIM, J. L., KIM, C. H., PARK, H. D. **Evaluation of a low-pressure membrane filtration for drinking water treatment: pretreatment by coagulation/sedimentation for the MF membrane**. *Desalination*, v. 247, n. 1–3, p. 271–284, 2009.

MULDER, M. **Basic Principles of Membrane Technology**. Netherlands: Kluwer Academic Publishers. 1996.

RAMOS, G. M. D. **Fibras ocas compostas para osmose inversa e nanofiltração baseadas em poli (álcool vinílico) com resistência a agentes oxidantes e incrustações orgânicas**. Tese (Doutorado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - COPPE). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008, p. 198.

RODRIGUES, R. dos S. **As dimensões legais e institucionais do reúso de água no Brasil: proposta de regulamentação de reúso no Brasil.** Dissertação (Mestrado em Engenharia) -Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

SANDOVAL, Abby Daniela Ortega. **Microfiltração e ultrafiltração para tratamento de águas de chuva coletadas em solo.** 2016. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, RS, 2016.

SUAREZ, A et al. **Recovery of dairy industry wastewaters by reverse osmosis. Production of boiler water.** Elsevier. Amsterdã, p. 1-9. 10 july. 2014.

YOSHIDA, R. O. **Reutilização das membranas de osmose inversa no tratamento de efluentes industriais.** Monografia (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Química) – Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.