



Universidade de Passo Fundo

Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental

Caroline Diehl Basso

**TRATAMENTO POR OSMOSE INVERSA DE EFLUENTES GERADOS
NA PRODUÇÃO DO SORO DE LEITE EM PÓ**

Passo Fundo, RS, Brasil

2014

Caroline Diehl Basso

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, para obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Infraestrutura e Meio Ambiente, sob a orientação do Professor Doutor Vandrê Barbosa Brião.

Passo Fundo, RS, Brasil

2014

Caroline Diehl Basso

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, para obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de concentração de Infraestrutura e Meio Ambiente, sob a orientação do Professor Doutor Vandrê Barbosa Brião.

Data da Aprovação: Passo Fundo, RS, Brasil, 25 de abril de 2014.

Os componentes da Banca Examinadora aprovaram a Dissertação:

Professor Doutor Vandrê Barbosa Brião
Orientador
Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor Marco Di Luccio
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Professora Doutora Luciane Maria Colla
Universidade de Passo Fundo – UPF

Professor Doutor Marcelo Hemkemeier
Universidade de Passo Fundo – UPF

Passo Fundo, RS, Brasil

2014

“Quem sabe concentrar-se numa coisa e insistir nela como único objetivo, obtém, ao fim e ao cabo, a capacidade de fazer qualquer coisa.” (Mahatma Gandhi)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de prestar meus agradecimentos à Universidade de Passo Fundo e à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo indispensável suporte financeiro.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Vandr  Barboza Brião, pela seriedade e competência e por todo conhecimento transmitido, sendo fundamental para realiza o desta disserta o.

Aos membros da banca, Prof.^a Luciane Maria Colla, Prof. Marcelo Hemkemeier, Prof. Marco Di Luccio por colaborarem com a discussão e conclusão deste trabalho.

A todos os demais professores do Programa de Pós Gradua o em Engenharia Civil e Ambiental (PPGENG – UPF), pelos ensinamentos e aten o dispensados durante o mestrado.

Aos colaboradores da empresa parceira da pesquisa, pela disponibilidade e confiança com a qual me receberam, cedendo informa es e disponibilizando amostras de efluente para o desenvolvimento dos estudos.

Ao funcionário João Barcelos, do Centro de Pesquisa em Alimenta o (CEPA-UPF), e aos estagiários Adriana Milani, Luana Sbeghen e Augusto Hemkemeier pelo auxílio na realiza o dos experimentos.

  Vania Cristina Bacega, secret ria do PPGENG–UPF, pela amizade, auxílio, aten o e disposi o.

Aos colegas do PPGENG–UPF, pelo convívio repleto de alegria, troca de informa es e conhecimentos.

Agradeço aos meus pais Maria Leonice e Daltro Tadeu Diehl, aos sogros Hélia e Ademir Basso, ao irmão Felipe Diehl, aos demais familiares e amigos pelo carinho e incentivo que dispensaram a mim, para que conseguisse alcançar mais um objetivo em minha vida.

Um agradecimento especial ao meu marido, Eduardo Basso, pelo apoio, paciência, conselhos, amizade e por estar sempre ao meu lado durante esta jornada.

Por fim, a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão desta disserta o de mestrado, obrigada.

RESUMO

Objetivou-se utilizar a osmose inversa para tratar as águas residuais geradas na desmineralização do soro de leite, buscando melhorar a qualidade para que esta seja passível de reúso pela indústria. As águas residuais, foram submetidas a filtração por osmose inversa baseado em ensaios que seguiram um planejamento experimental 2^2 , utilizando-se as temperaturas de 20 °C e 45 °C e as pressões de 10 bar e 20 bar como variáveis independentes para se obter a melhor qualidade físico-química do permeado. Os resultados demonstram que a pressão de operação e a temperatura possuem efeito direto no fluxo permeado, embora não tenham apresentado influência nas rejeições da membrana. O melhor fluxo permeado foi obtido na condição de 20 bar e 45 °C e corresponde a 102,11 L.m⁻².h⁻¹. Esta condição experimental apresentou rejeições de 96 % para turbidez, 96 % para condutividade elétrica, 97 % para sólidos totais, 100 % para sólidos solúveis, 87 % para nitrogênio total, 90 % para nitrogênio amoniacal, 52 % para óleos e graxas, 99 % para demanda química de oxigênio, 100 % para lactose e 97,33 % para cor, demonstrando que processo de separação por membranas por osmose inversa permite o pós tratamento do efluente gerado na etapa de nanofiltração da produção do soro de leite em pó, possibilitando a geração de água de reúso para fins não potáveis como limpeza externa e reposição de água em torres de resfriamento e caldeira.

Palavras-chave: desmineralização do soro de leite, processo de separação por membranas, reúso de águas.

ABSTRACT

The study aimed to use reverse osmosis to treat the wastewater generated in the demineralization of whey, seeking to improve the quality so that it is capable of reuse by industry. For this, these waste waters are submitted to a pilot based assays reverse osmosis system which follow an experimental planning 2², using temperatures of 20 °C and 45 °C and pressures of 10 bar and 20 bar as independent variables to obtain the best physico-chemical quality of the permeate. The results show that the operating pressure and temperature have a direct effect on the permeate flux, although they showed no influence on the membrane rejections. The best permeate flow was obtained in the condition of 45 °C and 20 bar, corresponding to 102.11 Lm⁻².h⁻¹. This experimental condition showed rejections of 95.89% for turbidity, electrical conductivity for 95.65%, 96.59 % for total solids, 100% for soluble solids, 87.15% for total nitrogen, 90.09% for ammonia nitrogen, 52.29% for oils and greases, 99.09% for chemical oxygen demand, 99.58% to 97.33% for lactose and color, demonstrated that membrane separation process by reverse osmosis enables the after treatment of the effluent generated in the nanofiltration production of whey powder phase, enabling the generation of reuse water, non-potable uses such as cleaning and replacement of external water towers cooling and boiler.

Keywords: Demineralization of Whey. Membrane Separation Process. Reuse Water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Representação esquemática do processo de separação por membranas.....	13
Figura 2	Esquema da morfologia da seção transversal de diferentes membranas.....	15
Figura 3	Desenho esquemático de um módulo de filtração por membrana tangencial	17
Figura 4	Módulo em espiral.....	18
Figura 5	Configuração espiral da membrana de osmose inversa.....	19
Figura 6	Medida de seletividade em processos com membranas.....	20
Figura 7	Transporte molecular através de membranas.....	21
Figura 8	Faixas das dimensões separadas por processos com membranas que utilizam o gradiente de pressão como força motriz.....	22
Figura 9	Ilustração esquemática da osmose, equilíbrio osmótico e a osmose inversa	23
Figura 10	Efeitos da polarização da concentração e colmatação no fluxo permeado..	24
Figura 11	Fluxo permeado em função do tempo para sistemas com membranas operando em alta e baixa pressão (alta e baixa polarização).....	25
Figura 12	Processamento do soro de leite.....	31
Figura 13	Linhas gerais do procedimento experimental.....	35
Figura 14	Foto do equipamento piloto de osmose inversa.....	37
Figura 15	Diagrama do equipamento piloto de osmose inversa.....	38
Figura 16	Comportamento do fluxo ao longo do tempo para cada condição experimental testada com a amostra.....	45
Figura 17	Fluxo como variável de resposta para a análise combinada de pressão e temperatura.....	47
Figura 18	Efeito da pressão e temperatura sobre condutividade elétrica	59
Figura 19	Efeito da pressão e temperatura sobre sólidos totais	60
Figura 20	Efeito da pressão e temperatura sobre nitrogênio total	61
Figura 21	Efeito da pressão e temperatura sobre demanda química de oxigênio	62
Figura 22	Efeito da pressão e temperatura sobre lactose	63
Figura 23	Efeito da pressão e temperatura sobre cor	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Legislações referente aos padrões de potabilidade para reúso.....	28
Tabela 2	Matriz do planejamento experimental 2 ²	36
Tabela 3	Médias e desvios padrões da caracterização físico-química da amostra e diretrizes para reúso	42
Tabela 4	Médias e desvios padrões do fluxo permeado e rejeições de condutividade elétrica, sólidos totais, nitrogênio total, demanda química de oxigênio, lactose e cor.....	43
Tabela 5	Análise do fluxo inicial e final	46
Tabela 6	Análise de variância do fluxo permeado em relação as variáveis independentes pressão de operação e temperatura alimentação	46
Tabela 7	Médias e desvios padrões da caracterização físico-química do efluente e permeado e diretrizes para reúso	48
Tabela 8	Resultados dos coeficientes de rejeição (%) das variáveis dependentes referente a cada condição experimental testada	58
Tabela 9	Análise de variância da condutividade elétrica em relação as variáveis independentes pressão de operação e temperatura alimentação	59
Tabela 10	Análise de variância dos sólidos totais em relação as variáveis independentes pressão de operação e temperatura alimentação	60
Tabela 11	Análise de variância do nitrogênio total em relação as variáveis independentes pressão de operação e temperatura alimentação	61
Tabela 12	Análise de variância da demanda química de oxigênio em relação as variáveis independentes pressão de operação e temperatura alimentação ..	62
Tabela 13	Análise de variância da lactose em relação as variáveis independentes pressão de operação e temperatura alimentação	63
Tabela 14	Análise de variância da cor em relação as variáveis independentes pressão de operação e temperatura alimentação	64

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Processo de separação por membranas.....	13
2.1.1	Morfologia das membranas	15
2.1.2	Módulo de membranas	16
2.1.3	Módulo de membrana em espiral	17
2.1.4	Gradiente de pressão como força motriz	19
2.1.5	Processo de separação por membrana por osmose inversa	22
2.1.6	Polarização de concentração e colmatação.....	23
2.2	O reúso e o reciclo de águas em processos industriais.....	25
2.2.2	O reúso de águas e a legislação ambiental vigente.....	26
2.3	A produção do soro de leite em pó e a geração de efluentes.....	29
2.3.1	Caracterização do soro de leite <i>in natura</i>	29
2.3.2	Processamento do soro de leite <i>in natura</i> e a geração do efluente em estudo....	30
2.3.3	A osmose inversa e o tratamento de efluentes para reúso	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1	Amostra	35
3.2	Delineamento experimental.....	35
3.3	Procedimento operacional	36
3.3.1	Membrana de osmose inversa.....	38
3.3.2	Operação de limpeza da membrana.....	38
3.4	Métodos analíticos.....	39
3.4.1	Demanda química de oxigênio	39
3.4.2	Lactose.....	39
3.4.3	Nitrogênio Total Kjeldahl.....	40
3.4.4	Potencial hidrogeniônico	40
3.4.5	Condutividade elétrica	40
3.4.6	Cor	40
3.4.7	Sólidos totais	40
3.5	Coefficiente de colmatação.....	41
3.6	Rejeição da membrana.....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1	Caracterização físico-química da amostra de efluente	42
4.2	Seleção da melhor condição experimental de temperatura e pressão.....	43
4.3	Fluxo permeado	45
4.4	Possibilidades de reúso.....	48
5	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
	APÊNDICE	57
	APÊNDICE A: Resultados dos coeficientes de rejeição das variáveis resposta referente a cada ensaio realizado para o planejamento experimental 2 ²	58
	APÊNDICE B: Análise de variância da variável dependente condutividade elétrica e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.....	59

APÊNDICE C: Análise de variância da variável dependente sólidos totais e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.....	60
APÊNDICE D: Análise de variância da variável dependente nitrogênio total e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.....	61
APÊNDICE E: Análise de variância da variável dependente demanda química de oxigênio e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.....	62
APÊNDICE F: Análise de variância da variável dependente lactose e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.....	63
APÊNDICE G: Análise de variância da variável dependente cor e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.....	64

1 INTRODUÇÃO

O conjunto das atividades humanas, cada vez mais diversificado, associado ao crescimento demográfico e ao desenvolvimento industrial, vem exigindo atenção maior à proteção e conservação dos recursos hídricos (PELLACANI, 2006; SARKAR et al., 2006; GEISE et al., 2010).

Municípios de pequeno e médio porte sofrem fortes efeitos da poluição hídrica, pois carecem de infraestrutura associada à gestão ambiental. Efluentes industriais lançados em bacias hidrográficas próximas aos centros urbanos interferem na qualidade de vida das populações destes municípios.

Dentre as atividades industriais, o setor de alimentos destaca-se por um maior consumo de água. Em indústrias de laticínios, a água é usada em todas as etapas do processo produtivo e há naturalmente uma exigência pela sua qualidade. Na indústria de laticínios há um consumo aproximado de 2 m³ a 10 m³ de água por m³ de leite processado, e uma maior geração de efluentes líquidos no processo (KONIG et al., 2000; VOURCH et al., 2005; HEPSEN; KAYA, 2012).

Durante a desmineralização por nanofiltração do soro de leite, para a produção do soro de leite em pó, é gerado um permeado residual (foco deste trabalho) com elevadas concentrações de matéria orgânica, contendo matéria orgânica e sais, sendo necessário e obrigatório o tratamento prévio de seus despejos líquidos antes do lançamento para disposição final em curso d'água.

Para atender aos padrões de lançamento do efluente, as indústrias de laticínios estão praticando um elaborado protocolo de tratamento de efluentes que afeta de forma direta a economia global da planta industrial (SARKAR et al., 2006).

As técnicas de tratamento para este efluente estão associadas aos processos tradicionais que combinam tratamento físico-químico com tratamento biológico. Entretanto, a moderada eficiência destes para remoção de compostos eutrofizantes, bem como as desvantagens específicas de cada tratamento biológico levam à busca de sistemas que atendam às necessidades crescentes referentes à qualidade do efluente tratado (BRIÃO et al., 2005).

Técnicas visando o reúso de águas ganham relevância nesses ambientes, pois surgem como alternativas viáveis para o aumento da oferta de água e a prevenção da poluição (GEISE et al., 2010). O reúso é uma das maneiras de unir comprometimento social e ambiental,

minimizando a produção de efluentes e o consumo de água de qualidade superior, devido à substituição da água potável por água que já fora previamente usada, e dependendo da qualidade da água tratada obtida, esta poderá ser destinada para diferentes fins de reuso. Assim, as águas de reuso surgem como alternativa eficaz de racionalização desse bem natural (DANTAS; SALES, 2009).

A osmose inversa é um método de purificação da água que permite o reuso pela indústria, podendo ser aplicado com sucesso da redução da demanda química de oxigênio dos efluentes (CSÉFALVAY et al., 2008). Baseado no conceito de filtração a nível molecular e atômico destaca-se pela seletividade, simplicidade de operação e escalonamento, separação de compostos termolábeis, economia de energia, pouco espaço necessário para instalação e a não utilização de aditivos químicos (HABERT et al., 2006).

Desta forma, a osmose inversa pode ser uma boa alternativa para o tratamento deste permeado gerado na nanofiltração do soro de leite, separando matéria orgânica e sais e produzindo uma água com qualidade passível de reuso. Com isso, o objetivo geral do trabalho é produzir água passível de reuso no processo de produção do soro de leite em pó, utilizando a osmose inversa, reduzindo os impactos ambientais desse setor industrial. Para o atendimento do objetivo geral definiu-se os seguintes objetivos específicos:

- a) Caracterizar a água de descarte gerada no processo de desmineralização parcial do soro de leite.
- b) Avaliar diferentes condições operacionais de temperatura e pressão para o processo de osmose inversa.
- c) Obter um permeado (água purificada), com qualidade físico-química de água passível de reuso pela indústria.
- d) Comparar a qualidade do permeado obtido com a legislação ambiental vigente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

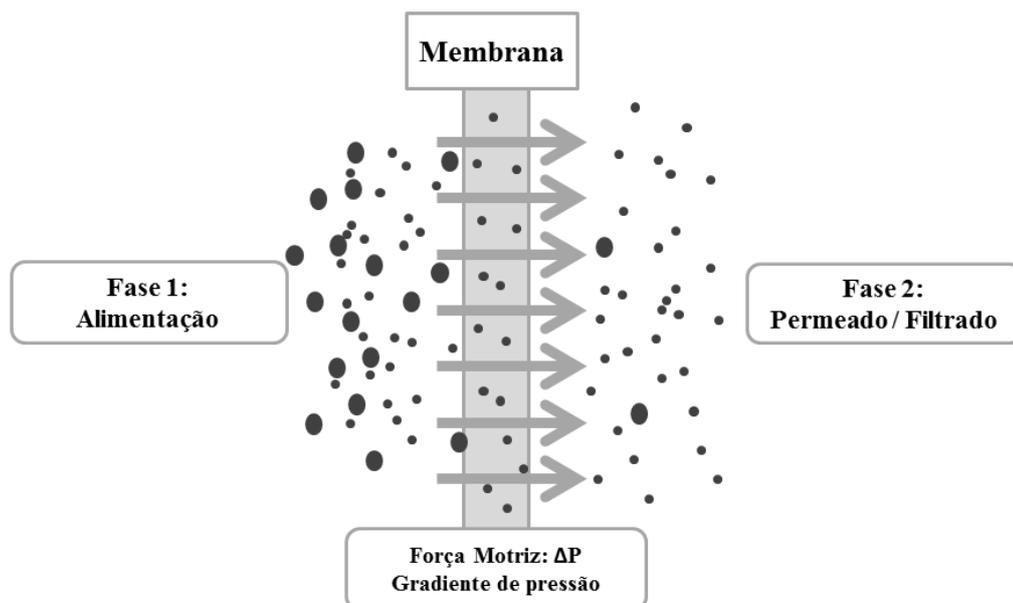
2.1 Processo de separação por membranas

A partir do início da década de 1970, para complementar os processos clássicos de separação como destilação, filtração, absorção, troca iônica, centrifugação, extração por solvente, cristalização e outros, surge uma nova classe de processos que utilizam membranas sintéticas como barreira seletiva (HABERT et al., 2006).

No processo de separação por membranas, a propriedade fundamental que é explorada é a capacidade da membrana separar substâncias de diferentes propriedades como tamanho, forma e/ou difusividade (HOEK et al., 2013; ANAND et al., 2014). A filtração envolve a separação (remoção) de material particulado e coloidal a partir de um líquido. Na filtração por membranas a gama de tamanho de partículas é estendida para incluir os constituintes dissolvidos, tipicamente de $0,0001 \mu\text{m}$ a $1,0 \mu\text{m}$ (GEISE et al., 2010).

Em aplicações de separação, o objetivo da membrana é ser uma barreira permeável e seletiva que restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies químicas entre duas fases (HOEK et al., 2013; MURO et al., 2012), conforme demonstrado na Figura 1.

Figura 1: Representação esquemática do processo de separação por membranas



Fonte: Adaptado de MULDER, 1996.

A Fase 1, denominada de alimentação, contém os componentes a serem removidos ou concentrados. A Fase 2, denominada permeado ou filtrado, contém os componentes que passam através da membrana. Para que ocorra a separação da água dos demais contaminantes, deve ser aplicada uma força motriz na fase da alimentação, denominada pressão hidráulica (MULDER, 1996).

Embora os materiais que compõem a membrana possam variar de acordo com a composição química e o tipo de processo, os principais objetivos na fabricação de membranas são sempre os mesmos (JUDD; JEFFERSON, 2004). O desempenho ou a eficiência de uma membrana é determinado por dois parâmetros, a sua seletividade e o fluxo através da membrana. Este último, geralmente indicado como o fluxo ou taxa de permeação, é definido como o volume que flui através da membrana por unidade de área e de tempo (MULDER, 1996; MURO et al., 2012).

O fluxo permeado ($L.m^{-2}.h^{-1}$), que representa a vazão volumétrica de permeado por unidade de área da membrana e unidade de tempo (ANAND et al., 2014), e a capacidade seletiva da membrana, caracterizam o processo de separação por membrana (HABERT et al., 2006).

A seletividade de uma membrana para uma mistura é geralmente expressa pela retenção ou pelo fator de separação. Para misturas aquosas diluídas, que consistem de um solvente (geralmente água) e um soluto, o mais conveniente para exprimir a seletividade é a taxa de retenção do soluto. O soluto é parcialmente ou completamente retido, enquanto que as moléculas de solvente (água) passam livremente através da membrana (MULDER, 1996).

Cabe ainda salientar que o processo de separação por membranas proporciona a separação sem a necessidade de uma mudança de fase, e por isso é energeticamente mais eficiente do que a destilação. Pouca ou nenhuma acumulação ocorre no processo que, portanto, opera continuamente sob a condição de estado estável sem necessidade de regeneração de ciclos, ao contrário dos processos de separação por adsorção. Não é necessária a adição de produtos químicos, ao contrário de processos convencionais de clarificação que depende geralmente da adição de produtos químicos coagulantes e floculantes (JUDD; JEFFERSON, 2004).

Entre as principais vantagens do processo de separação por membranas estão o alto grau de confiabilidade no processo, a economia de energia, a seletividade, a remoção de sólidos dissolvidos, a separação de compostos termolábeis, recuperação de subprodutos de alto valor agregado bem como a simplicidade de operação e escalonamento e pouco espaço para instalação (TURAN, 2004).

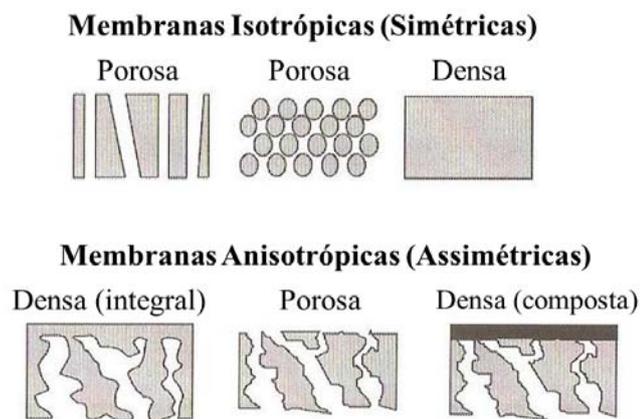
As principais limitações da tecnologia de membranas são a fragilidade das membranas e a deposição de substâncias na sua superfície. O uso de pressões elevadas, como no caso da osmose inversa, as paradas para limpezas e as limitações práticas do nível máximo de concentração a ser atingido também podem ser citados como desvantagens do processo (HABERT et al., 2006).

2.1.1 Morfologia das membranas

Em essência, uma membrana não é nada mais do que uma interface que modera a permeação de espécies químicas em contato com ela. Esta interface pode ser molecularmente homogênea, isto é, completamente uniforme em composição e estrutura, ou pode ser quimicamente ou fisicamente heterogênea, por exemplo, contendo orifícios ou poros de dimensões finitas ou constituídos por algum tipo de estrutura em camadas. A morfologia da membrana e a natureza do material que a constitui são algumas das características que vão definir o tipo de aplicação e a eficiência na separação (SOBANA; PANDA, 2011; MURO et al., 2012; ANAND et al., 2014).

Quanto à morfologia, as membranas podem ser divididas em isotrópicas e anisotrópicas, densas e porosas, conforme demonstrado na Figura 2.

Figura 2: Esquema da morfologia da seção transversal de diferentes membranas



Fonte: Adaptado de HABERT et al., 2006.

Tanto as membranas densas quanto as porosas podem ser isotrópicas ou anisotrópicas, ou seja, podem ou não apresentar as mesmas características morfológicas ao longo de sua

espessura. As membranas isotrópicas ou simétricas possuem a mesma morfologia em toda a sua estrutura. As membranas anisotrópicas ou assimétricas possuem uma pele, região muito fina e mais fechada (possuindo poros ou não) suportada em uma camada porosa (HABERT et al., 2006; GEISE et al., 2010).

A membrana é considerada densa quando o transporte dos componentes envolve uma etapa de dissolução e difusão através do material que constitui a membrana. A separação por membranas densas depende das interações físico-químicas entre os componentes que permeiam e do material da membrana e dizem respeito aos processos de separação com maior seletividade (osmose inversa e nanofiltração) (JUDD; JEFFERSON, 2004; SOBANA; PANDA, 2011).

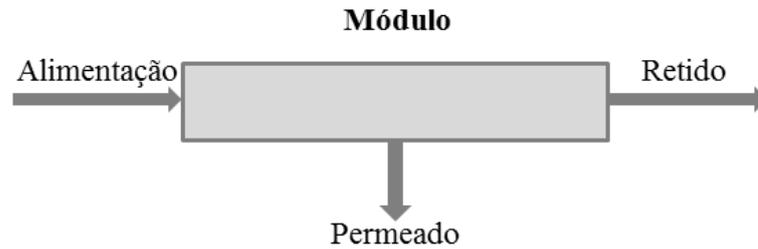
A membrana é denominada porosa quando o transporte dos permeantes ocorre preferencialmente em uma fase fluida contínua que preenche os poros da membrana e obtém-se a separação mecanicamente por exclusão de particulados por tamanho (peneiramento), sendo que o material rejeitado pode ser ou dissolvido ou suspenso, dependendo da sua dimensão relativa à do poro (ultrafiltração e microfiltração) (HABERT et al., 2006; JUDD; JEFFERSON, 2004).

Um dos fatores decisivos, usados na escolha da membrana adequada, é a natureza do fluido de processo. O conhecimento do teor dos sólidos dissolvidos, do peso molecular das espécies dissolvidas e da natureza e carregamento de qualquer material suspenso norteará a definição da melhor geometria e escolha da membrana correta. O pH e a temperatura da corrente de entrada de processos também são fatores importantes na tomada da decisão final (GEISE et al., 2010; PEARSON, 2012).

2.1.2 Módulo de membranas

Para que uma membrana seja utilizada em escala é necessário que esta seja acondicionada em um dispositivo conhecido como módulo. O módulo é a menor unidade na qual a membrana está embalada, sendo a parte central de uma instalação de membrana. O design mais simples é aquele em que um único módulo é utilizado. A Figura 3 apresenta um desenho esquemático de um projeto com um único módulo (MULDER, 1996).

Figura 3: Desenho esquemático de um módulo de filtração por membrana tangencial



Fonte: Adaptado de MULDER, 1996.

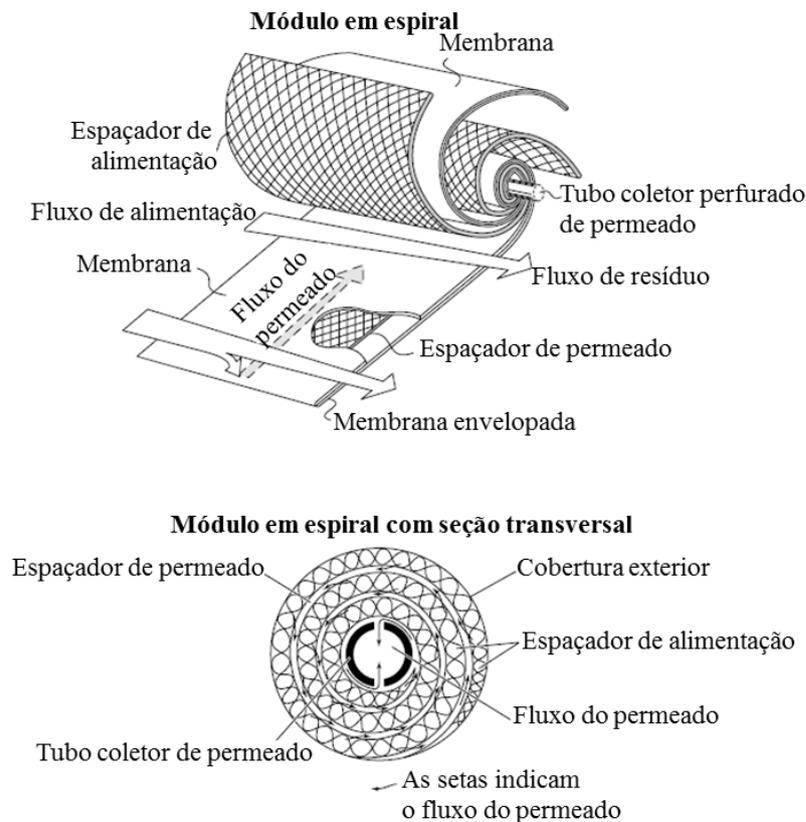
A corrente de entrada da alimentação entra no módulo com uma certa composição e uma vazão determinada. Como a membrana tem a capacidade para transportar um componente mais prontamente do que o outro, tanto a composição da alimentação e a taxa de fluxo no interior do módulo irá mudar como uma função da distância. Na passagem pela membrana, o fluxo de entrada da alimentação é separado em duas correntes, uma corrente de permeado e uma corrente de retido. A corrente de permeado é a fração da corrente de alimentação que passa através da membrana enquanto que a corrente de retido é a fração retida pela membrana que contém a maior parte dos sais dissolvidos da água (MULDER, 1996).

2.1.3 Módulo de membrana em espiral

As membranas podem ser preparadas tanto na geometria plana quanto na cilíndrica. A partir dessas duas geometrias, diferentes tipos de módulos podem ser construídos. Os módulos devem ser projetados de forma a contemplar uma melhor eficiência do escoamento da solução de alimentação (HABERT et al., 2006).

Membranas na geometria plana são usadas tanto em módulos de tipo placa e quadro quanto em módulos do tipo espiral. Os módulos preparados a partir de membranas com geometria cilíndrica podem ser classificados em categorias segundo o seu diâmetro externo, enquadrando os módulos de fibras ocas e capilares e o módulo tubular (GEISE et al., 2010). Neste trabalho utilizar-se-á o módulo espiral, conforme Figura 4, onde utiliza-se a membrana entre dois espaçadores.

Figura 4: Módulo em Espiral

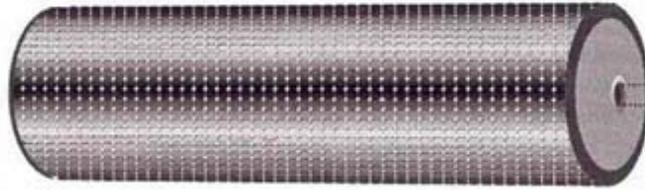


Fonte: Adaptado de BAKER, 2004.

Um dos espaçadores serve como um canal coletor para o permeado, enquanto o outro fornece espaço para escoar a solução de alimentação. As membranas conjuntamente com os espaçadores são enroladas em torno de um duto perfurado, para qual o permeado escoar. O conjunto é selado externamente com resina epóxi. O módulo apresenta uma relação entre área de permeação e volume do módulo mais elevada, de 800 a 1.000 $\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$. Esta concepção tem sido utilizada em módulos de osmose inversa (HABERT et al., 2006).

A membrana semipermeável de osmose inversa é montada na configuração espiral, conforme Figura 5 e possui uma camada de polímero denso. O módulo espiral tem um desempenho compacto para maximização da área de membrana de um sistema. A composição da membrana consiste de três camadas: uma manta suporte não tecida de poliéster, uma camada intermediária microporosa de polisulfona e uma cobertura ultrafina na superfície superior. Esta estrutura age como um filtro molecular que não é entupido porque os componentes da alimentação são rejeitados na superfície e não penetram a membrana, resultando em uma membrana resistente ao stress mecânico químico (GEISE et al., 2010).

Figura 5: Configuração espiral da membrana de osmose inversa



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

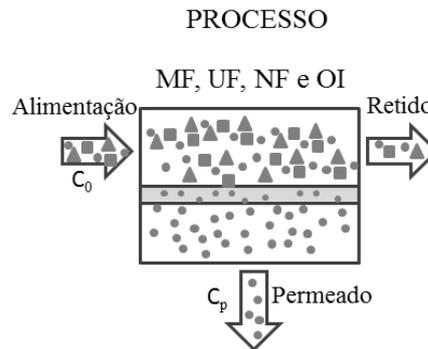
2.1.4 Gradiente de pressão como força motriz

Os processos de separação por membrana que utilizam diferença de pressão através da membrana como força motriz têm sido utilizados para concentrar, fracionar e purificar soluções diluídas, em particular soluções aquosas. Para que ocorra o transporte de uma espécie através de uma membrana é necessária a existência de uma força motriz agindo sobre a mesma. A força motriz que rege o movimento depende das características da membrana, e em geral são aplicados gradientes de pressão, concentração, temperatura ou potencial elétrico para gerar o movimento das espécies químicas envolvidas através da membrana (YOUNOS; TULOU, 2005).

Os processos que utilizam o gradiente de pressão tem uma forte analogia com a filtração convencional, visto que as membranas são meios porosos e que a retenção por tamanho é o princípio básico de fracionamento das diferentes espécies químicas presentes. A microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI) são exemplos de processos que utilizam o gradiente de pressão como força motriz (MULDER, 1996).

Para processos cuja força motriz é o gradiente de pressão a capacidade seletiva da membrana, em relação a uma dada espécie, é medida através do Coeficiente de Rejeição (R), definido por uma relação entre a concentração da espécie da alimentação (C_o) e sua concentração no permeado (C_p), conforme Figura 6 e Equação 1. Quando $R=0$ a concentração da espécie em questão, no permeado, é igual a sua concentração na alimentação, ou seja, a membrana não apresenta nenhuma capacidade seletiva para esta espécie. Por outro lado, $R=1$ significa que a espécie em questão não está presente no permeado, ou seja, a membrana foi capaz de rejeita-la completamente (HABERT et al., 2006; HOEK et al., 2013).

Figura 6: Medida de seletividade em processos com membranas



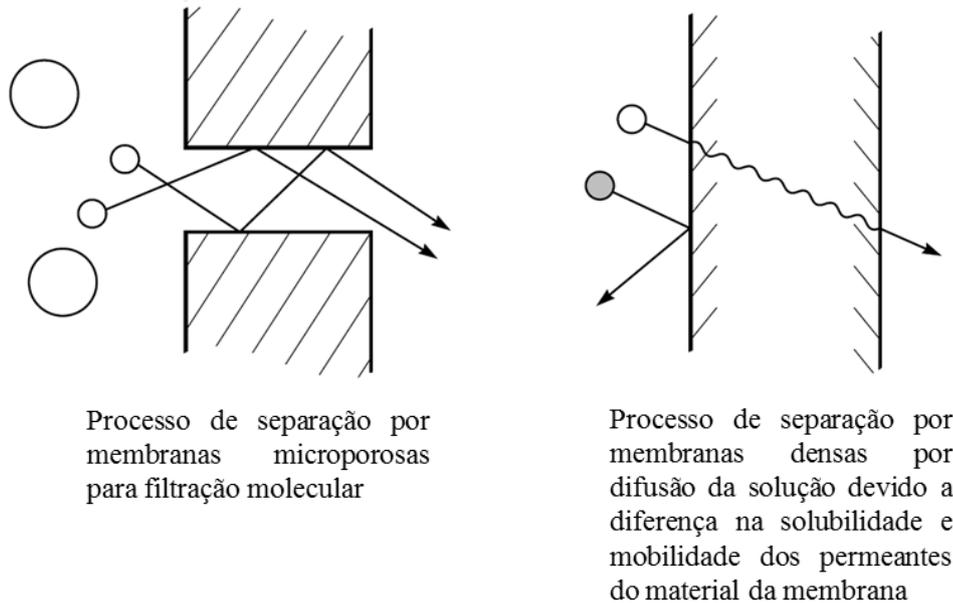
Fonte: Adaptado de HABERT et al., 2006.

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_0} \quad (1)$$

Estes processos apresentam um grande potencial para a recuperação de efluentes, atuando como filtros em nível molecular, possibilitando o fracionamento dos compostos. Em quase todos os processos de separação por membrana, para o tratamento de água, a pressão impulsiona a água a permear, de tal modo que o material retido ou rejeitado (o retentado) é concentrado através de um fluxo permanente ou por mecanismo de difusão da solução, conforme Figura 7 (JUDD; JEFFERSON, 2004; GEISE et al., 2010; SOBANA; PANDA, 2011).

A diferença entre os mecanismos de solução-difusão e de fluxo através dos poros encontra-se no tamanho relativo e permanência dos poros. O espectro da filtração de membranas começa no menor nível molecular com a osmose inversa (OI), um processo que permite o grau mais fino de separação. As espécies mais dissolvidas passarão através da membrana à medida que se avança pela faixa de filtração de desaguamento ou purificação de água com a osmose inversa muito firme até a nanofiltração (NF), ultrafiltração (UF) e microfiltração (MF), que é essencialmente uma separação de partículas de submícrons de materiais dissolvidos (BAKER, 2004; MURO et al., 2012).

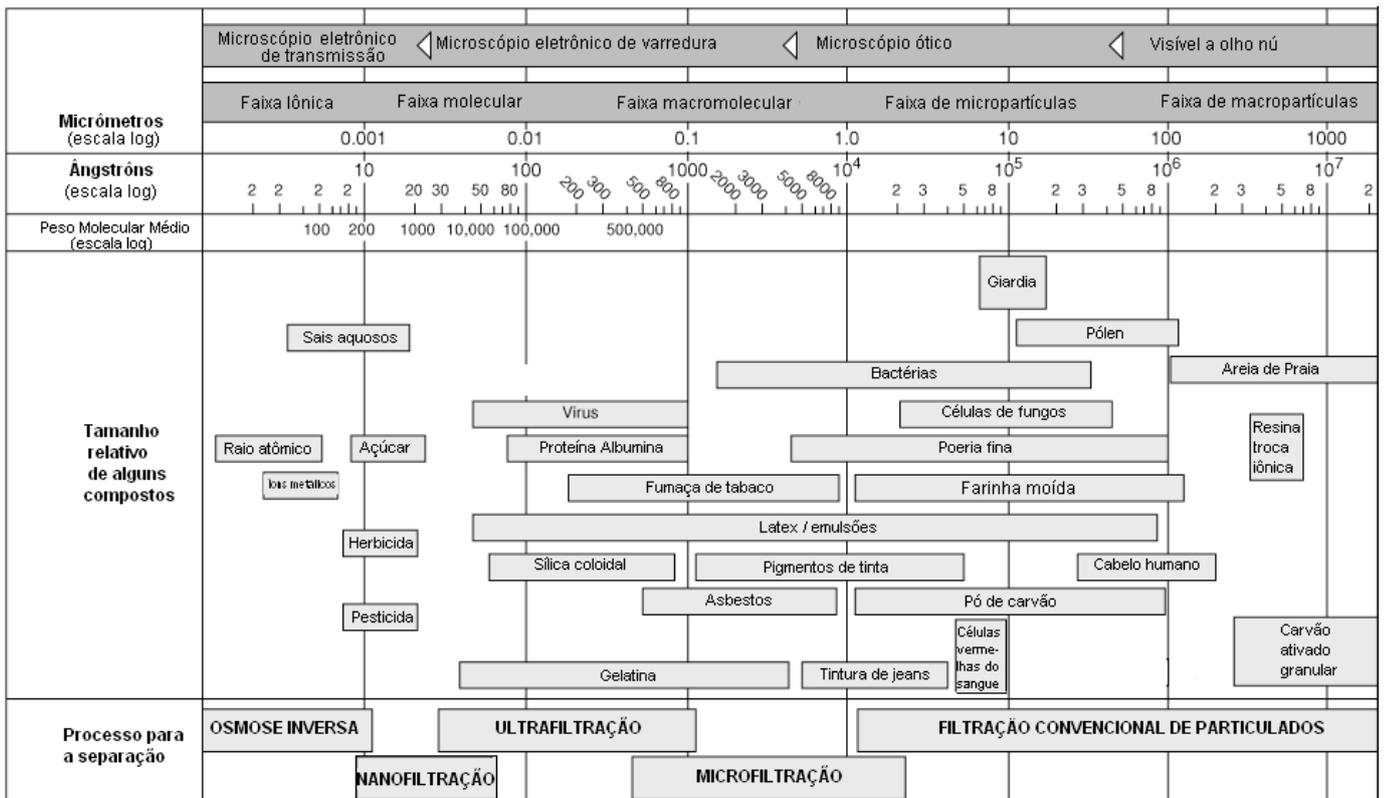
Figura 7: Transporte molecular através de membranas



Fonte: Adaptado de BAKER, 2004.

Esses processos podem separar partículas que se diferem em tamanho, desde poucos angstroms até poucos microns, produzindo permeados e concentrados. As aplicações se estendem de 0,1 μm a 3,0 μm para MF, 0,01 μm a 0,1 μm para UF, 0,005 μm a 0,05 μm para NF e 0,0001 μm a 0,001 μm para OI (YOUNOS; TULOU, 2005; GEISE et al., 2010; MURO et al., 2012), conforme apresentado na Figura 8. Os vários níveis de filtração de membranas exigem pressões internas que variem entre 1000 psi (70bar) em sistemas de alta pressão e até abaixo de 15 psi (1bar) em unidades de microfiltração de baixa pressão (JUDD; JEFFERSON, 2004).

Figura 8: Faixas das dimensões separadas por processos com membranas que utilizam o gradiente de pressão como força motriz



Fonte: Adaptado de GIRARD E FUKUMOTO, 2000.

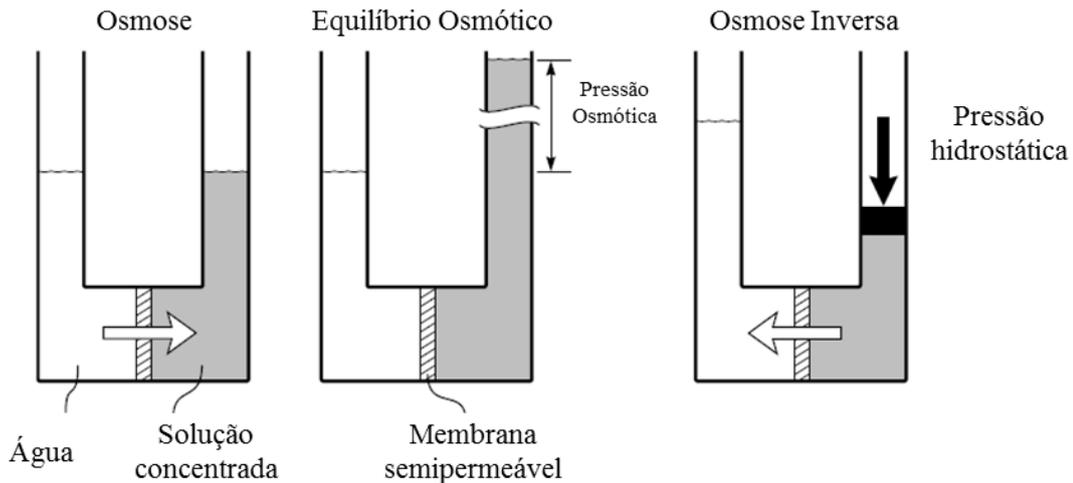
2.1.5 Processo de separação por membrana por osmose inversa

Para descrever o processo de separação por membrana por osmose inversa, se faz necessário entender o fenômeno da osmose demonstrado na Figura 9. A osmose ocorre quando duas soluções, com diferentes concentrações, são colocadas num mesmo recipiente separadas por uma membrana semipermeável. A passagem do solvente da solução mais diluída para a solução mais concentrada ocorre espontaneamente, até que se encontre um equilíbrio osmótico (YOUNOS; TULOU, 2005; GEISE et al., 2010; SOBANA; PANDA, 2011).

Já na osmose inversa é necessário imprimir uma pressão (superior à pressão osmótica) sobre a solução mais concentrada a fim de que ela seja forçada a atravessar a membrana semipermeável em direção à solução menos concentrada obtendo a concentração da solução e um permeado com baixa concentração de sais. O objetivo é equilibrar, por balanceamento, a concentração de soluto nos dois lados de uma membrana semipermeável. Neste processo a

solução de alimentação é bombeada, com auxílio de uma pressão determinada, através da superfície da membrana. Como o fluido passa sobre a membrana, o processo chama-se filtração tangencial (YOUNOS; TULOU, 2005; GEISE et al., 2010; SOBANA; PANDA, 2011).

Figura 9: Ilustração esquemática da osmose, equilíbrio osmótico e a osmose inversa



Fonte: Adaptado de BAKER, 2004.

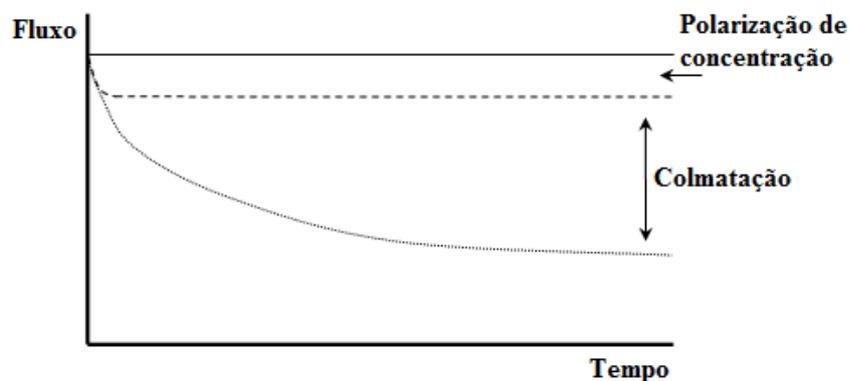
Os fluxos de permeantes através destas membranas são muito menores do que através das membranas microporosas, havendo a separação de partículas na faixa iônica (orgânicos e inorgânicos), removendo moléculas orgânicas menores que 200 g.mol^{-1} . Solutos cujos tamanhos são maiores que o tamanho do poro da membrana e todos os sólidos suspensos e sais dissolvidos são retidos e concentrados. Cabe salientar que quanto maior a concentração da solução a ser filtrada, maior deverá ser a pressão utilizada para separar a água dos solutos, necessária para vencer a pressão osmótica da alimentação. As pressões de operação podem atingir de 10 bar a 60 bar (BAKER, 2004; CAVALCANTI, 2012).

2.1.6 Polarização de concentração e colmatação

A polarização de concentração é um fenômeno indesejável que ocorre na superfície da membrana a qual é exposta a uma solução que tem um aumento na concentração de um soluto. O resultado prático é uma redução no fluxo de permeado e, em casos extremos, levam à precipitação de sais na superfície da membrana, especialmente em osmose inversa (SUTZKOVER et al., 2000; GEISE et al., 2010).

A Figura 10 apresenta uma curva típica de fluxo em membranas, na qual é destacado o efeito da polarização de concentração e da colmatação no fluxo. A linha cheia demonstra o fluxo de solvente puro e as linhas pontilhadas os efeitos da polarização de concentração e da colmatação. Embora a polarização de concentração seja observada já nos primeiros instantes de filtração, o seu efeito tende a um valor constante rapidamente, uma vez que o estado estacionário é alcançado. Em contrapartida, a colmatação possui uma tendência de estabilização mais prolongada, reduzindo o fluxo ao longo do tempo (MULDER, 1996).

Figura 10: Efeitos da polarização de concentração e colmatação no fluxo permeado



Fonte: Adaptado de MULDER, 1996.

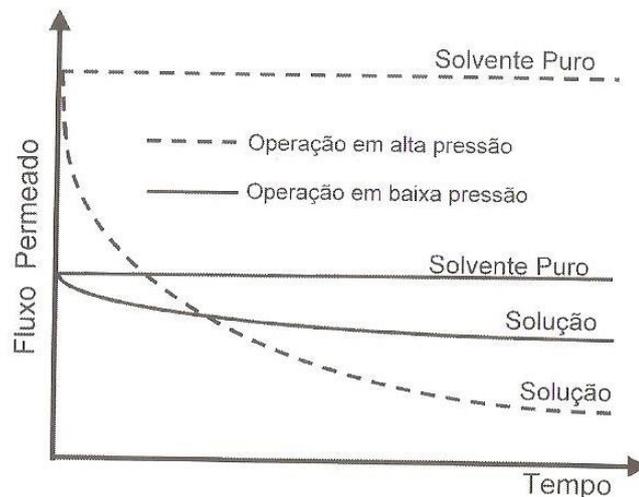
A polarização de concentração apresenta grande sensibilidade aos parâmetros operacionais da osmose inversa, tais como velocidade tangencial, pressão, temperatura, natureza e concentração do soluto, e a seleção das condições operacionais, que são essenciais para minimizar o fenômeno. A colmatação é verificada principalmente na UF e MF (apresentando menor efeito em processos que utilizam membranas densas), resultando na redução do desempenho das membranas, ocasionando a queda de fluxo (JÖNSSON e TRÄGARDH, 1990; BAKER, 2004).

Durante o processamento do soro de leite é comum ocorrer a incrustação da membrana devido à grande diversidade de componentes lácteos que participam na incrustação. A deposição de proteína e precipitação mineral são os principais contribuintes para a incrustação. Os fatores de hidrodinâmica, como pressão e velocidade de fluxo cruzado desempenham um papel importante no padrão de fluxo e nas características de incrustação (MADAENI; MANSOURPANAH, 2004).

A elevada temperatura da água de alimentação ($> 20\text{ }^{\circ}\text{C}$) aumenta a difusividade do soluto e diminui a polarização de concentração, elevando-se o fluxo; em geral a formação de incrustações é inibida a alta temperatura (JAWOR; HOEK, 2009).

Quando se trabalha em pressões reduzidas, e portanto, com fluxos de permeados menores, os resultados para tempos longos de operação podem ser melhores. Em condições menos polarizadas a incrustação é bem menor e o fluxo permeado se estabiliza mais rapidamente e em valores superiores aos dos fluxos estáveis, quando se trabalha em condições mais severas de pressão (HABERT et al., 2006). O fluxo inicial no caso de pressões maiores é mais elevado, mas este cai rapidamente com o tempo de operação, conforme indicado na Figura 11.

Figura 11: Fluxo permeado em função do tempo para sistemas com membranas operando em alta e baixa pressão (alta e baixa polarização)



Fonte: Adaptado de Habert et al., 2006.

2.2 O reúso e o reciclo de águas em processos industriais

A indústria de laticínios gera grandes volumes de efluentes que contêm as frações diluídas dos produtos lácteos. Devido a busca por tecnologias não poluentes, processos sóbrios e de baixo custo, é fundamental agregar valor às águas de processamento de leite, através de tratamentos que concentrem os constituintes do leite e produzam água purificada (BALANNEC, 2002). O reúso e a conservação da água devem ser estimulados, a partir da

utilização de processos industriais e sistemas que possibilitem a recuperação e o reúso (MURO et al., 2012).

O uso mais eficiente da água traz como benefícios a redução do custo de produção e o aumento da eficiência do processo, a partir da racionalização do consumo, da redução de descarte de efluentes e da possibilidade de reúso das águas tratadas, além da proteção dos recursos naturais. Ainda, proporciona redução do consumo de energia, aspecto fortemente dependente do consumo de água, disponibilizando o volume economizado para finalidades mais nobres, como o abastecimento público. Além de reduzir o lançamento de efluentes, evitando a sobrecarga nos sistemas de tratamento convencionais e reduzindo, desta forma, os impactos ambientais dos setores industriais (BAPTISTA et al., 2001; SILVA et al., 2003; ANDRADE, 2011).

A implementação de circuitos fechados ou semifechados de água para uso industrial tem sido estudada para se avaliar a melhor proposta para o reúso, minimizando também os custos com o tratamento necessário para tal. Diferentes alternativas podem ser disponibilizadas para tratar efluentes para o reúso, devido à diversidade de necessidades e tendências de cada atividade produtiva ou região onde está inserida esta atividade (BALANNEC et al, 2002).

O reúso de água é o aproveitamento de águas previamente utilizadas, uma ou mais vezes em alguma atividade humana, para suprir as necessidades de outros usos benéficos, inclusive o original. Pode ser direto ou indireto, bem como decorrer de ações planejadas ou não planejadas. O reúso direto planejado da água ocorre quando os efluentes, após devidamente tratados, são encaminhados diretamente de seu ponto de descarga até o local do reúso. Assim, sofrem em seu percurso os tratamentos adicionais e armazenamento necessário, mas não são, em momento algum, descarregadas no meio ambiente (MANCUSO, 2003).

2.2.2 O reúso de águas e a legislação ambiental vigente

Com o objetivo de estimular o uso racional da água e gerar recursos financeiros para investimentos na recuperação e preservação dos mananciais das bacias, foi definida a cobrança pelo uso da água em suas reservas naturais, que é um dos instrumentos de gestão de recursos hídricos instituídos pela Lei Federal nº 9.433 de 1997.

As indústrias de alimentos são exemplos de atividades que sofrem 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 (BRIÃO, 2000). O usuário que reutiliza suas águas reduz as vazões de captação e lançamento e conseqüentemente tem sua cobrança reduzida. Assim, quanto maior for o reúso, menor será a utilização de água e menor a cobrança. Dependendo das vazões utilizadas, a quantidade de recursos economizados com a redução da cobrança em função do reúso pode cobrir os custos de instalação de um sistema de reúso da água (FERNANDES, 2008).

Na indústria de alimentos o efluente de processo pode ser dessalinizado e componentes orgânicos podem ser removidos a fim de cumprir os requisitos para a reutilização da água. Para a água de processo ser reutilizada, mesmo para fins de limpeza, deve possuir a qualidade potável (MAVROV et al., 2001).

Para a indústria de alimentos é necessário considerar a Circular Nº 175/2005/CGPE/DIPOA do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), que dispõe sobre a inspeção contínua e sistemática de todos os fatores que, de alguma forma, podem interferir na qualidade higiênico-sanitária dos produtos expostos ao consumo da população.

Esta Circular determina que o abastecimento de água potável é de capital importância para a indústria de alimentos, como os estabelecimentos de produtos de origem animal sob Inspeção Federal (IF), os quais devem dispor de água potável em quantidade suficiente para o desenvolvimento de suas atividades e que atenda os padrões fixados pela legislação brasileira vigente. A manutenção de tais padrões implica no monitoramento a ser executado pelo estabelecimento e na verificação pela IF, tendo como referência os parâmetros da citada legislação e executados consoante as particularidades inerentes à modalidade de suprimento de cada estabelecimento.

A qualidade de uma água é definida por sua composição química, física e bacteriológica. As características desejáveis de uma água dependem de sua utilização. Para o consumo humano há a necessidade da qualidade potável, isto é, livre de matéria suspensa visível, cor, gosto e odor, de quaisquer organismos capazes de provocar enfermidades e de quaisquer substâncias orgânicas ou inorgânicas que possam produzir efeitos fisiológicos prejudiciais (RICHTER; NETTO, 2002).

Para o reúso com fins potáveis, considera-se necessário o atendimento a Portaria nº 2914 (2011), do Ministério da Saúde do Brasil, que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. No Artigo 3º é determinado que toda água destinada ao consumo humano, distribuída coletivamente por meio de sistema ou solução alternativa coletiva de

abastecimento de água, deve ser objeto de controle e vigilância da qualidade da água. O Artigo 5º define que água para consumo humano é a água potável destinada à ingestão, preparação e produção de alimentos e à higiene pessoal, independentemente da sua origem, sendo que, água potável trata-se da água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido nesta Portaria e que não ofereça riscos à saúde.

Contudo, a Portaria 2914 de 2011 não estabelece alguns parâmetros de potabilidade como DQO, matéria orgânica, nitrogênio entre outros. Assim alguns dos parâmetros podem ser relacionados à Norma Européia. A Diretiva do Conselho 80/778/CEE de 15 de julho de 1980, complementada pela Diretiva do Conselho 98/83/EC, de 3 de novembro de 1998, são as normas utilizadas para avaliar a qualidade da água potável destinada ao consumo humano.

A FIESP (2005) apresenta os critérios para o reúso da água como Classe 1, garantindo a segurança dos usuários que operam o sistema. A água de reúso Classe 1 pode ser utilizada em descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos e fins ornamentais (chafarizes, espelhos de água etc.), lavagem de roupas e veículos. Desta forma, a fim de atender aos padrões de reúso para a indústria de alimentos, faz-se necessário considerar os parâmetros apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Legislações referente aos padrões de potabilidade para o reúso

Parâmetro	Unidade	Portaria	FIESP 2005	Diretiva
		2914 de 2011	água de reúso	Européia 98/83/EC
		VMP ⁽¹⁾	Classe 1 VMP ⁽¹⁾	VMP ⁽¹⁾
pH	-/-	6,0 a 9,5	6,0 a 9,0	6,5 a 9,5
<i>Escherichia coli</i> ⁽²⁾	-/-	Ausência em 100 mL	-/-	Ausência em 100 mL
Coliformes totais ⁽³⁾	-/-	Ausência em 100 mL	-/-	Ausência em 100 mL
Coliformes fecais	-/-	-/-	Não detectáveis	-/-
Condutividade	µS.cm ⁻¹	-/-	-/-	2500,0
Matéria Orgânica	mg.L ⁻¹	-/-	-/-	5,0 ⁽⁴⁾
DBO ₅	mg.L ⁻¹	-/-	≤ 10,0	-/-
Nitrogênio Kjeldahl	mg.L ⁻¹	-/-	-/-	1,0
Nitrogênio Amoniacal	mg.L ⁻¹	-/-	≤ 20,0	-/-
Óleos e Graxas	mg.L ⁻¹	-/-	≤ 1,0	-/-
Temperatura	°C	-/-	25	-/-
Gosto e odor	Intensidade	6,0	Não desagradáveis	Não desagradável
Sólido suspenso total	mg.L ⁻¹	-/-	≤ 5,0	-/-
Sólido dissolvido total	mg.L ⁻¹	1.000,0	≤ 500	-/-
Turbidez	uT	5,0	≤ 2,0	Não desagradável
Cor	uH	15,0	≤ 10,0	Não desagradável
Odor	-/-	Não Objetável	Não objetável	Não objetável

Notas:

- (1) Valor máximo permitido.
- (2) Indicador de contaminação fecal.
- (3) Indicador de eficiência de tratamento
- (4) Dado extraído da Diretiva Européia 80/778/CEE de 15 de julho de 1980

Fonte: Adaptado de BRASIL, 2011; FIESP, 2005; DIRETIVA EUROPÉIA 98/83/EC.

A regulamentação da Alemanha para água potável e para utilização em indústria de alimentos específica, entre outros, que a água deve possuir um limite de turbidez de 1,5 NTU, condutividade elétrica de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, DQO de 5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, Nitrogênio Kjeldahl de 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, além da ausência de coliformes totais e *Escherichia coli* (MAVROV et al., 1997).

Para alimentação de caldeira os limites aceitáveis para água de reúso são DQO < 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, óleos e graxas < 1 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$, condutividade elétrica < 40 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e pH entre 6,5 a 9,0 (CHMIEL et al., 2000; MAVROV et al., 2001; BALANNEC et al., 2005). Para água de limpeza os limites aceitáveis para água de reúso são < 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para condutividade elétrica e pH na faixa de 6,5 – 9,0 (MAVROV et al., 2001).

A qualidade da água de reúso para utilização como águas de resfriamento de recirculação deve atender os limites de 75 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ para DQO, pH na faixa de 5,0 a 8,3, sólidos suspensos de 100 $\text{m}\cdot\text{L}^{-1}$, sólidos dissolvidos de 500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ (METCALF; EDDY, 2003).

2.3 A produção do soro de leite em pó e a geração de efluentes

2.3.1 Caracterização do soro de leite *in natura*

O soro de leite *in natura*, recebido pela indústria, para fabricação do soro de leite em pó, é um subproduto fluído da fabricação industrial ou caseira de diversos tipos de queijo, obtido pela coagulação do leite e redução do pH. Compreende de 80 % a 90 % do volume total de leite que entra no processo e contém cerca de 50 % dos nutrientes do leite original (BYLUND, 1998), é amplamente requisitado como ingrediente ou como precursor de ingredientes na indústria de alimentos (GERNIGON et al., 2010).

Conforme Carvalho et al. (2013), o soro de leite possui uma composição físico-química muito variável em função do leite cru utilizado e demais variáveis de processo, como por exemplo, a fração de soro de queijo residual não valorizada e a quantidade de água de limpeza utilizada. O soro de leite reprocessado pela indústria é um líquido amarelo-esverdeado de sabor ligeiramente doce, que possui um pH na faixa de 5,8 a 6,5 e contém 0,5 % de sais (BYLUND, 1998).

A composição básica do soro de leite residual determinada por Bylund (1998) e Li et al. (2008) contém em média 0,05 % de gorduras, 0,6 % de proteínas, 0,18 % de nitrogênio não proteico, 4,8 % de lactose, 0,5 % de lipídios e 0,5 % de minerais. Os teores de lactose e

gordura presentes no soro de leite são os principais responsáveis pelos índices de oxigênio dissolvido expressos através da DQO e DBO₅ (CARVALHO et al., 2013).

O soro de leite se caracteriza por uma elevada demanda química de oxigênio e por grandes volumes produzidos (YOURGUN et al., 2008). Possui, em média, 60.000 mg.L⁻¹ de demanda química de oxigênio (DQO), 30.000 mg.L⁻¹ de demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅), entre 2.513 a 2.850 mg.L⁻¹ de sólidos suspensos totais, 88 a 440 mg.L⁻¹ de nitrogênio total, 1.490 mg.L⁻¹ de fósforo total e 320 mg.L⁻¹ de nitratos (ARGUN et al., 2007; KABBOUT et al., 2011; MURO et al., 2012; AKDEMIR; OZER, 2013). Estes dados mostram que o soro de leite se caracteriza por uma elevada carga orgânica, nitrogênio, fósforo e sólidos suspensos.

Devido à sua elevada carga nutricional e carga orgânica, o processamento do soro de leite *in natura*, para a fabricação do soro de leite em pó, é uma das formas de reaproveitamento deste resíduo a fim de melhorar a eficiência econômica dos laticínios e minimizar os impactos ambientais (ARGUN et al., 2007).

2.3.2 Processamento do soro de leite *in natura* e a geração do efluente em estudo

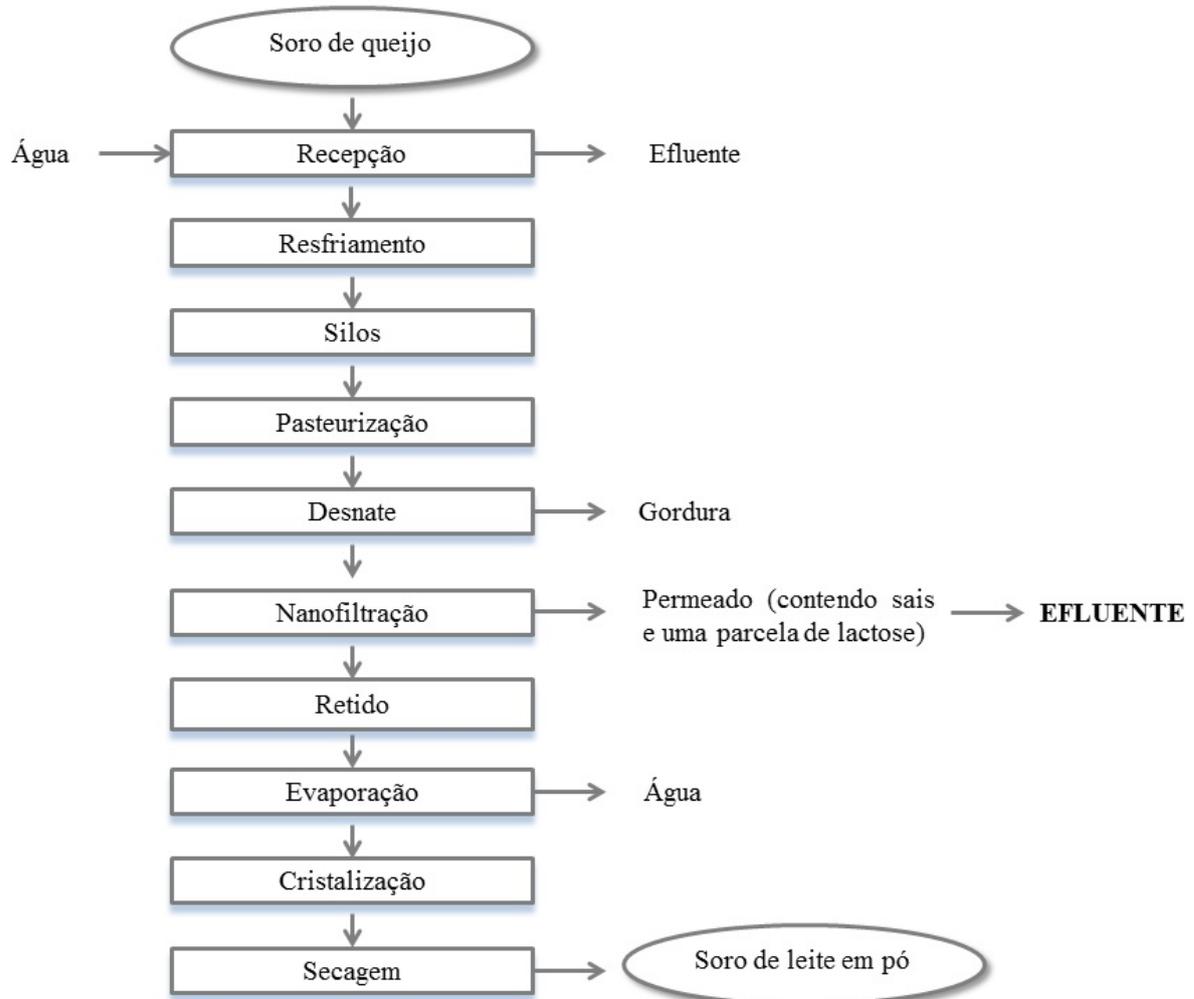
Dentre as diversas formas de processamento do soro de leite *in natura* na indústria, encontra-se a produção do soro de leite em pó. Este processo produtivo constitui-se de uma forma de valorização desse derivado lácteo (LI et al., 2008) que é rico em constituintes valiosos, tais como proteína, gordura, lactose, sais minerais e ácido láctico (ANAND et al., 2014), contribuindo ao mesmo tempo para a melhoria do meio ambiente e proporcionando ganhos às indústrias.

O soro de leite em pó entra na composição de biscoitos, pães, massas, sorvetes, chocolates, bebidas lácteas, bebidas isotônicas e leites modificados. Pelo alto nível de concentração de proteínas e rico perfil de aminoácidos, o soro de leite em pó também é utilizado em nutrição esportiva, como auxiliar para redução de peso e aumento da massa magra. Ele está presente em produtos de suplementação protéica, barras de proteínas e outros produtos alimentícios nutritivos (FARIAS, 2011).

Para a fabricação do soro de leite em pó a empresa parceira deste trabalho, localizada na região norte do estado do Rio Grande do Sul, realiza o recebimento do soro de leite doce, proveniente da fabricação de queijo mozzarella e prato, de indústrias de queijo do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná; beneficiando cerca de 1,2 milhões de litros de soro de leite

por dia, e o processamento ocorre em etapas, tais como: resfriamento, pasteurização, desnate, concentração e secagem, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12: Processamento do soro de leite



Durante a produção do soro de leite em pó é originado o efluente em estudo. Trata-se do efluente gerado na etapa de desmineralização parcial do soro de leite, realizada com o auxílio do processo de separação por membranas por nanofiltração. Nesta etapa, o efluente é forçado a passar por uma membrana porosa, a qual retém proteínas e lactose, e permite a passagem dos sais. Esta membrana, contudo, não é uma barreira ideal, e parte da lactose permeia a membrana e atribui a esta corrente uma carga orgânica contaminante. Esta corrente aquosa gerada, composta principalmente de sais e uma parcela de lactose, constitui aproximadamente 15 % do volume do soro processado, sendo encaminhada para as estações de tratamento de efluentes.

2.3.3 A osmose inversa e o tratamento de efluentes para reúso

A tecnologia de filtração por membranas vem sendo cada vez mais aplicada, com grande sucesso, em tratamentos avançados de águas e efluentes líquidos, permitindo a reciclagem para finalidades nobres. O processo de separação por membranas oferece vantagens sobre as técnicas convencionais, sendo relativamente simples e de fácil operação. São processos práticos e confiáveis e o tratamento produz efluentes de boa qualidade para reutilização em indústrias (TAY; JEYASEELAN, 1995).

Pelo processo de separação por membranas por osmose inversa, são removidas substâncias orgânicas e inorgânicas dissolvidas em águas residuais industriais. Nessa técnica, uma membrana semipermeável composta de um material orgânico polimérico, como acetato de celulose ou triacetato de celulose, sobre a qual se aplica alta pressão é colocada no caminho da água contaminada, permeando a membrana apenas a água pura (BAIRD, 2002).

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 a 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, visando a recuperação do recurso hídrico (PANDEY et al., 2012; KHOJARE et al., 2005).

No processo de tratamento da água por osmose inversa (OI) há a remoção da maioria dos contaminantes orgânicos e até 99% de todos os íons. Remove ainda até 99,9 %, os vírus, as bactérias e colóides (MACÊDO, 2000). As membranas utilizadas para o tratamento da água e das águas residuais consistem tipicamente de uma pele fina com uma espessura de cerca de 0,20 µm a 0,25 µm suportado por uma estrutura mais porosa de cerca de 100 µm de espessura, sendo tipicamente orgânicas. Os principais tipos de membranas utilizadas para o tratamento de águas residuais são tipicamente acetato, poliamidas aromáticas, e de filme fino composto (TFC) (GEISE et al., 2010).

Dentre outras aplicações para a osmose inversa pode-se citar a remoção da salinidade para permitir tratamentos biológicos, a remoção de compostos orgânicos dissolvidos tóxicos, a obtenção de água para reúso, a remoção do íon amônia após sua conversão em amoníaco, a remoção de microrganismos, a remoção de metais (Zn, Ni, Cu), a remoção de arsênio e fluoreto, a adequação para reúso em sistema de refrigeração e a produção de água ultrapura segundo os padrões PW (Purified Water) e WFI (Water for Injectables) (BALLANEC et al., 2002; CAVALCANTI, 2012).

Conforme estudado por Madaeni e Mansourpanah (2004), o soro de leite foi o primeiro alimento líquido a ser concentrado por membranas em larga escala. O processo de separação de osmose inversa pode ser aplicado ainda no processamento de soro de leite, incluindo a concentração do soro de leite, a desmineralização parcial, o fracionamento do soro e a remoção de sal.

Estudos realizados utilizando a osmose inversa para a retenção da carga orgânica de efluentes de laticínios obtiveram uma rejeição média de 98,6 % de DQO. Para a realização do trabalho foi utilizado dois efluentes, um com alta carga orgânica (9500 mg.L⁻¹ de DQO) e o outro com menor valor de carga orgânica (1160 mg.L⁻¹ de DQO). Para o primeiro caso, as correntes permeadas demonstraram concentrações menores que 100 mg.L⁻¹ para OI. No segundo experimento (alimentação com baixa carga orgânica), o permeado apresentou a concentração de DQO entre 20 mg.L⁻¹ a 30 mg.L⁻¹ para OI. Não foi observado um significativo decréscimo de fluxo para OI (GALAMBOS et al., 2004).

Estudos realizados com águas de processo de 5 diferentes laticínios das quais foram preparadas soluções a partir de leite integral, leite desnatado e soro de leite concluíram que a combinação de dois estágios de NF + OI a água pode ser reutilizada como substituto para limpeza e alimentação de caldeiras, já quando aplicado o processo de OI + OI a água se tornou altamente purificada atingindo valores menores que 6 mg.L⁻¹ de DQO (VOURCH et al., 2005).

Utilizando o processo de separação por membranas por osmose inversa no tratamento de efluentes de soro de leite com DQO na faixa de 60.000 a 70.000 mg.L⁻¹ obteve-se uma eficiência de 90 % na rejeição do componente (DEL RE et al., 1998).

Testes efetuados para avaliar o desempenho do processo de separação por membranas por osmose inversa para a rejeição de sais e DQO das águas residuais com a finalidade do reúso e concentração dos constituintes do leite, obtiveram com a membrana de osmose inversa a 25 °C e 15 x 10⁵ Pa, uma rejeição de 99,96 % de DQO, 98 % de Na⁺, K⁺ e Cl⁻ e 99,8 % para Ca²⁺ e Mg²⁺, demonstrando grande eficiência no tratamento de efluentes visando o reúso pela indústria (BALLANEC et al., 2002).

Neste trabalho, para o tratamento dos efluentes provenientes da etapa desmineralização parcial da fabricação do soro de leite em pó, utilizar-se-á o processo de separação por membranas por osmose inversa o qual emprega o uso de uma membrana densa de poliamida para a filtração do efluente. Avanços na tecnologia de membranas mostraram muitas vantagens para o tratamento de águas residuais na indústria de alimentos.

Com a implementação do processo de separação por membranas, as substâncias são separadas da água de uma forma quimicamente inalterada facilitando a reutilização destes constituintes. O máximo de benefícios são obtidos quando um ou ambos os fluxos de saída do sistema de membranas são reciclados ou reutilizados, minimizando os custos referentes a eliminação destes resíduos (VOURCH et al., 2008; MURO et al., 2012).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Amostra

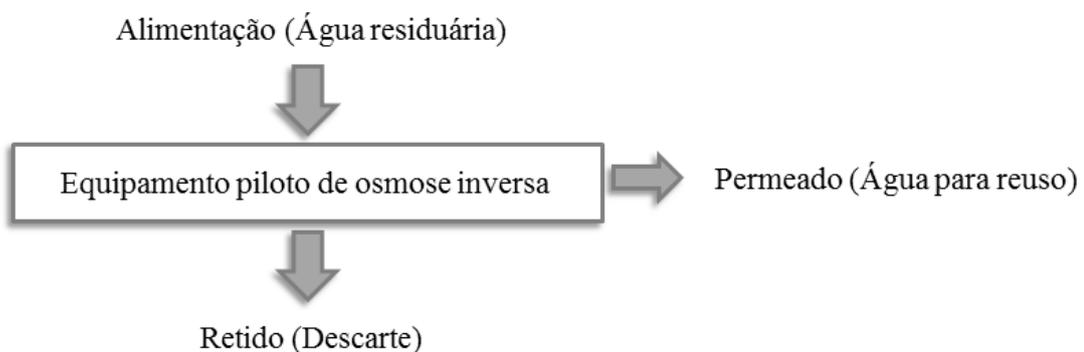
Utilizou-se como amostra de efluente o permeado da etapa de nanofiltração, onde ocorre a desmineralização parcial do soro de leite (Figura 12).

As coletas das amostras de efluentes foram realizadas de acordo com a programação da produção da Empresa parceira. Coletaram-se 8 amostras de efluente gerados na etapa de desmineralização do soro de leite, com volume aproximado de 30 L cada, sendo acondicionadas em bombonas plásticas e mantidas sobre refrigeração até a realização dos experimentos; submetendo-as à filtração em uma membrana de osmose inversa sob condições controladas.

3.2 Delineamento experimental

O trabalho foi realizado conforme o esquema apresentado na Figura 13. O efluente foi filtrado em um módulo piloto de osmose inversa, separando as correntes de permeado e de retido sob condições controladas. As amostras *in natura* e permeado foram caracterizadas quanto às suas propriedades físico-químicas.

Figura 13: Linhas gerais do procedimento experimental



Um delineamento fatorial completo 2^2 foi utilizado para o estudo da influência da pressão de operação e temperatura da alimentação sobre a retenção dos contaminantes do efluente e sobre o fluxo permeado, obtendo, desta forma, o melhor coeficiente de rejeição da

membrana frente a parâmetros físico-químicos para a qualidade da água. A Tabela 2 apresenta a matriz do planejamento experimental com as variáveis independentes codificadas e os seus respectivos valores reais.

Tabela 2: Matriz do delineamento fatorial completo 2^2

Experimento	Pressão	Temperatura	Pressão (bar)	Temperatura (°C)
1	-	-	10	20
2	+	-	20	20
3	-	+	10	45
4	+	+	20	45

A temperatura e a pressão foram selecionadas como variáveis independentes porque a temperatura possui efeito direto na viscosidade do permeado e portanto no fluxo, enquanto a pressão é a força motriz do processo e tem efeito direto no fluxo permeado, além disso, ambas as variáveis podem ter efeito na rejeição dos contaminantes. Outro ponto relevante é que o efluente em questão é removido sob temperatura de cerca de 40°C, o que facilitaria o seu tratamento por osmose inversa.

Os experimentos foram realizados em forma de duplicata, totalizando 8 (oito) ensaios. As variáveis de resposta do sistema foram o fluxo permeado e as rejeições de demanda química de oxigênio (DQO), lactose, óleos e graxas, cor, turbidez, pH, condutividade elétrica, nitrogênio total kjeldahl, nitrogênio amoniacal e sólidos totais e sólidos solúveis.

Os resultados foram avaliados através da análise de variância (ANOVA) com significância de 5 % e teste de Tukey para comparação de médias utilizando o software Statistica 5.5.

3.3 Procedimento operacional

Os testes de filtração foram realizados em um equipamento piloto de osmose inversa, fornecido pela empresa WGM Sistemas Importação e Exportação Ltda, apresentado na Figura 14.

Figura 14: Foto do equipamento piloto de osmose inversa

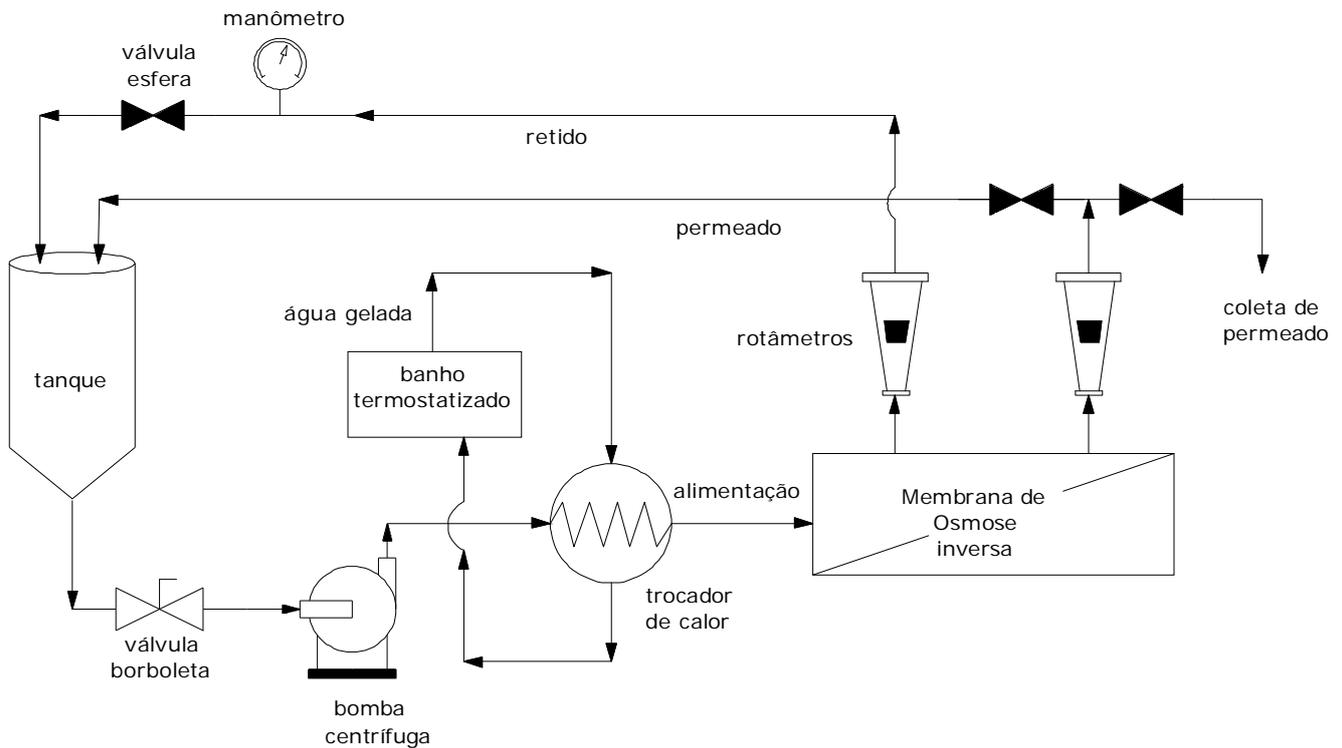


A Figura 15 apresenta o diagrama esquemático do sistema. Aproximadamente 30 L de efluente foram utilizados para alimentação do tanque durante a realização de cada experimento. O efluente foi impulsionado por uma bomba centrífuga multiestágios através da carcaça onde é instalada a membrana, sendo separada em duas correntes: permeado e retido. Permeado e retido foram recirculados para o tanque de alimentação, de onde foram novamente impulsionados através da membrana.

O processo foi realizado durante 30 minutos, e ao final coletou-se amostras de permeado e retido para a sua caracterização físico-química. Ao longo do tempo (0, 2, 4, 6, 8, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos), registrou-se a medida do fluxo permeado e retido com rotâmetros instalados nas tubulações das respectivas correntes.

Realizou-se o controle da temperatura durante o experimento com o banho termostaticado, o qual recirculou a água gelada (1 a 3 °C) em um trocador tubular instalado na tubulação de alimentação. Decorrido o período, esgotou-se o tanque e foi aplicado o enxágüe inicial descrito no procedimento de limpeza (item 3.3.2).

Figura 15: Diagrama do equipamento piloto de osmose inversa



3.3.1 Membrana de osmose inversa

A membrana de osmose inversa utilizada foi o modelo 3838 HR-NYV (Koch Membrane Systems). A membrana possui configuração espiral e $7,1 \text{ m}^2$ de área de filtração, com $9,6 \text{ cm}$ ($3,8$ polegadas) de diâmetro e $96,5 \text{ cm}$ de comprimento, sendo seu material de poliamida. A permeabilidade hidráulica da membrana é de $1,9 \text{ L.h}^{-1}.\text{m}^2.\text{bar}^{-1}$ e sua rejeição a cloretos é $99,3 \%$ (medido com 2.000 mg.L^{-1} de solução de NaCl a $15,5 \text{ bar}$).

3.3.2 Operação de limpeza da membrana

Para a manutenção da durabilidade das membranas e do desempenho do sistema, após o procedimento experimental realizou-se uma limpeza cuidadosa. A limpeza da membrana de osmose inversa baseou-se no procedimento descrito pelo fabricante do módulo experimental.

O método consistiu basicamente em realizar-se três enxágues do sistema com 30 L de permeado da mesma membrana de osmose inversa, com o equipamento despressurizado e com a vazão máxima de recirculação do equipamento (5000 L.h^{-1}), descartando-se o

permeado e retido; seguido da limpeza alcalina (pH entre 10,5 e 11), preparada com hidróxido de sódio 1,0 M diluído em permeado de OI. Posteriormente, realizou-se a recirculação de permeado e retido durante 30 minutos; efetuou-se um novo enxágue conforme o primeiro passo, mediu-se o pH e repetiu-se o procedimento até a neutralização. A limpeza ácida foi o próximo passo, realizada com uma solução preparada com ácido nítrico (pH entre 1,8 e 2,0), recirculação de permeado e rejeito por 30 minutos e efetuou-se um novo enxágue conforme o primeiro passo, mediu-se o pH e repetiu-se o procedimento até a neutralização; finalizando com a medição do fluxo permeado com água para verificar a eficiência da limpeza.

Para estocagem da membrana de osmose inversa, por períodos prolongados, a membrana era imersa numa solução de 0,5 % de bissulfito de sódio para reduzir o crescimento microbiano.

3.4 Métodos analíticos

As amostras de efluente e permeado foram analisados quanto aos parâmetros que caracterizam a qualidade da água, no intuito do reúso pela indústria de laticínios. Os parâmetros para análise englobam: demanda química de oxigênio (DQO), lactose, cor, pH, condutividade elétrica, nitrogênio total kjeldahl e sólidos totais.

3.4.1 Demanda química de oxigênio

A demanda química de oxigênio foi quantificada pelo método titulométrico segundo American Public Health Association (APHA, 1995), por meio da digestão em refluxo fechado e quantificação fotométrica a 420nm.

3.4.2 Lactose

A lactose foi quantificada pela dosagem de açúcar redutor, pelo método colorimétrico do 3,5 DNS (ácido dinitrossalicílico).

3.4.3 Nitrogênio Total Kjeldahl

A concentração de nitrogênio foi quantificada por meio da digestão ácida da amostra e posterior destilação e titulação, de acordo com APHA (1995).

3.4.4 Potencial hidrogeniônico

O pH foi determinado pelo método eletrométrico, usando o pHmetro (Tecnal-Tec2).

3.4.5 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica foi determinada pelo método da resistência elétrica e da constante da cela de condutividade. O equipamento utilizado foi o Condutivímetro TEC-4MP da marca TECNAL.

3.4.6 Cor

A determinação da cor foi quantificada pelo método colorimétrico. O equipamento utilizado é o espectrofotômetro da marca Merck, modelo SQ118.

3.4.7 Sólidos totais

Os sólidos contidos nas águas residuais são toda a matéria que permanece como resíduo quando a amostra é submetida à temperatura de 103 a 105 °C durante 4 horas (CAVALCANTI, 2012).

3.5 Coeficiente de colmatção

Um coeficiente de colmatção da membrana foi medido para cada ensaio realizado. Este coeficiente foi calculado pela Equação 3.2 (RAO, 2002):

$$CC = 1 - \frac{J_p}{J_a} \quad (2)$$

Sendo:

CC: coeficiente de colmatção [=] adimensional;

J_p : fluxo com água após o enxágüe inicial do procedimento de limpeza;

J_a : fluxo com água antes da realização do experimento.

Sendo que $0 \leq CC \leq 1,0$, com o valor mínimo para a membrana limpa e o valor máximo para a membrana completamente bloqueada ao fluxo de permeado.

3.6 Rejeição da membrana

Após cada análise calculou-se o coeficiente de rejeição para cada parâmetro avaliado conforme a Equação 2, que fornece uma medida quantitativa da capacidade da membrana em reter, por exemplo, as moléculas que conferem cor, sob determinadas condições de operação. Este coeficiente é determinado em termos percentuais.

$$R = \left(1 - \frac{C_p}{C_o}\right) \times 100 \quad (3)$$

Sendo:

R: é o coeficiente de rejeição

C_o : é a concentração do parâmetro no retido

C_p : é a concentração do parâmetro no permeado

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização físico-química da amostra de efluente

A Tabela 3 apresenta os resultados da caracterização físico-química do efluente (permeado da etapa de nanofiltração da desmineralização parcial do soro de leite) utilizado na realização dos experimentos, bem como algumas diretrizes para o reúso da água.

Tabela 3: Médias e desvios padrões da caracterização físico-química da amostra e diretrizes para o reúso

Parâmetros	Unidade	Amostra	Diretrizes para reúso
		Efluente	VMP ⁽¹⁾
DQO	mg.L ⁻¹	9634 ± 2025	5,0 ^(2,3)
Lactose	mg.L ⁻¹	4480 ± 2449	-/-
Nitrogênio Total	mg.L ⁻¹	827 ± 177	≤ 10,0 ⁽³⁾
Sólidos Totais	mg.L ⁻¹	162 ± 58	1000 ⁽⁴⁾
Condutividade	µS.cm ⁻¹	3858 ± 582	-/-
pH	-/-	6 ± 0,65	6,0 a 9,5 ^(2,3,4)
Cor	uH	55 ± 24	15 ⁽⁴⁾
Odor	-/-	Objetável	Não objetável

Notas:

(1) Valor máximo permitido.

(2) Limite para detecção conforme Diretiva Européia 98/83/EC

(3) Limite para detecção conforme Fiesp 2005: Água de reúso classe I.

(4) Limite para detecção conforme Portaria 2914/2011

Os resultados da análise do efluente demonstraram índices elevados de nitrogênio e matéria-orgânica (expresso no resultado para o parâmetro DQO) que impedem o reúso direto deste efluente.

O resultado para o parâmetro DQO está diretamente relacionado aos níveis detectados de lactose e nitrogênio. Como a amostra de efluente é coletada após a etapa de nanofiltração os limites detectados de lactose podem estar relacionados a vida útil da membrana de nanofiltração que, devido ao tempo de utilização, pode estar com a eficiência reduzida para a

retenção deste componente, permitindo a passagem de uma maior parcela da lactose através da membrana.

É relevante destacar a alta condutividade elétrica do efluente, indicando alta concentração de sais, o que impede a reutilização direta do efluente. A amostra apresentou coloração aparente levemente esbranquiçada, com leve turbidez. Outro parâmetro a ser considerado é o odor característico de leite fervido, indesejável para o uso da água.

Um efluente adequado para descarga direta nos cursos de água, mas não adequado para fins potáveis, deve possuir de 50 a 150 mg.L⁻¹ de DQO, de 5 a 50 mg.L⁻¹ de sólidos suspensos, de 1 a 30 NTU de turbidez e de 10 a 30 mg.L⁻¹ de nitrogênio (PANDEY et al., 2012), verifica-se que os resultados apresentados nesta caracterização tornam o efluente impróprio para reúso direto e/ou descarga direta nos cursos de água, devendo sofrer tratamento para futura reutilização ou descarte.

4.2 Seleção da melhor condição experimental de temperatura e pressão

A Tabela 4 apresenta as médias e desvios padrões de cada variável dependente em relação as variáveis independentes.

Tabela 4: Médias e desvios padrões do fluxo permeado e rejeições de condutividade elétrica, sólidos totais, nitrogênio total, demanda química de oxigênio, lactose e cor.*

Parâmetros	Pressão e Temperatura				Unidades
	Experimento 1 10 bar e 20°C	Experimento 2 20 bar e 20°C	Experimento 3 10 bar e 45°C	Experimento 4 20 bar e 45°C	
Fluxo permeado	28,17 ± 1,99 ^(a)	61,97 ± 5,98 ^(b)	57,04 ± 1,00 ^(b)	102,11 ± 4,98 ^(c)	L.m ⁻² .h ⁻¹
Condutividade Elétrica	96,94 ± 0,92 ^(a)	97,22 ± 0,13 ^(a)	95,40 ± 0,60 ^(a)	95,65 ± 0,95 ^(a)	µS.cm ⁻¹
Sólidos Totais	98,56 ± 0,49 ^(a)	97,77 ± 1,09 ^(a)	97,66 ± 0,48 ^(a)	96,59 ± 0,41 ^(a)	mg.L ⁻¹
Nitrogênio Total	84,36 ± 0,70 ^(a)	85,42 ± 8,84 ^(a)	75,55 ± 3,99 ^(a)	87,15 ± 2,46 ^(a)	mg.L ⁻¹
DQO	98,40 ± 0,61 ^(a)	98,25 ± 0,68 ^(a)	98,90 ± 0,11 ^(a)	99,09 ± 0,04 ^(a)	mg.L ⁻¹
Lactose	99,20 ± 0,20 ^(a)	99,57 ± 0,15 ^(a)	99,77 ± 0,33 ^(a)	99,58 ± 0,11 ^(a)	mg.L ⁻¹
Cor	98,50 ± 2,12 ^(a)	91,91 ± 2,71 ^(a)	96,43 ± 5,05 ^(a)	97,33 ± 3,77 ^(a)	Hazen

* Em uma mesma linha, índices iguais representam iguais valores encontrados pela comparação estatística de médias.

A Tabela 4 demonstra que todas as condições experimentais levaram a valores estatisticamente iguais para as rejeições dos parâmetros condutividade elétrica, sólidos totais, nitrogênio total, demanda química de oxigênio, lactose e cor.

No Apêndice A é apresentado os resultados dos coeficientes de rejeição das variáveis dependentes referente aos ensaios realizados para o planejamento experimental 2². Os Apêndices B até G são apresentadas as tabelas de análise de variância assim como os gráficos de efeito para as variáveis dependentes em relação as variáveis independentes (pressão de operação e temperatura de alimentação).

Assim como demonstrados nos resultados deste trabalho, outros processos de reúso de água na indústria de laticínios, utilizando o processo de separação por membranas por osmose inversa apresentaram rejeições médias de 90-99% para demanda química de oxigênio (DEL RE et al., 1998; BALANNEC et al., 2002; GALAMBOS et al., 2004; BALANNEC et al., 2005; YOURGUN et al., 2008), e rejeição média de 99 % dos sais Na⁺, K⁺, Cl⁻, Ca²⁺ e Mg²⁺ (BALANNEC et al., 2005).

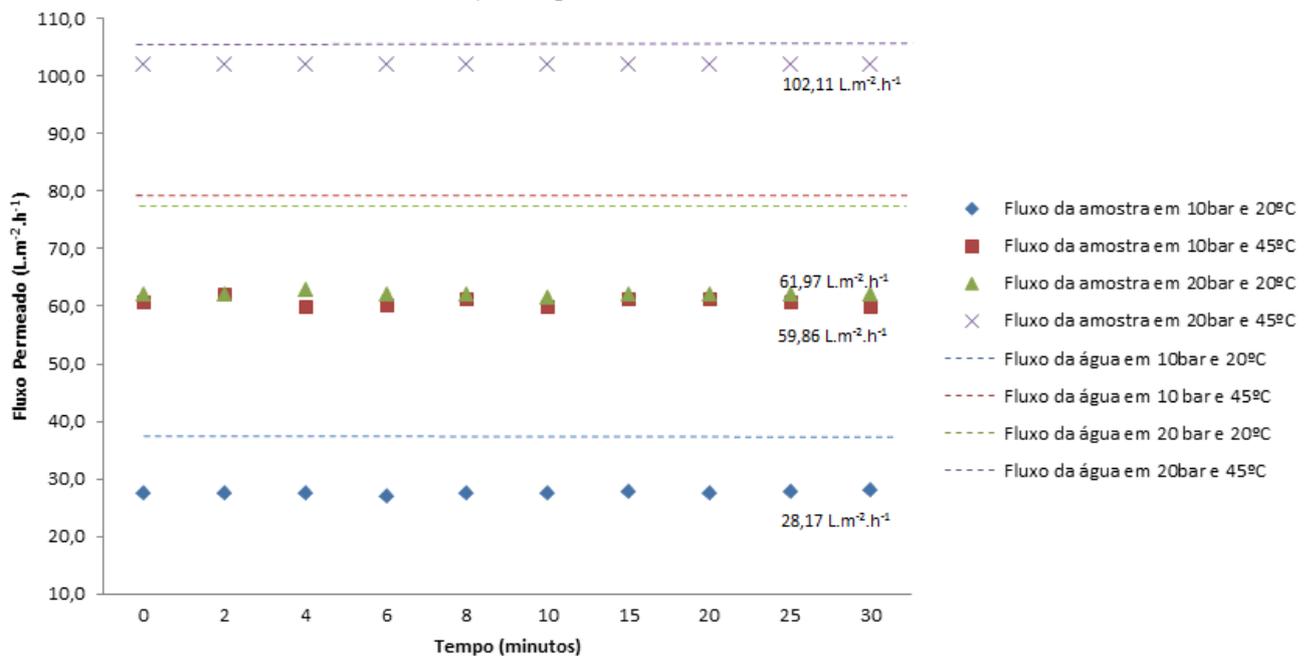
Embora tenha ocorrido uma alta rejeição de lactose, ainda há um residual deste componente no permeado que juntamente com o residual de nitrogênio contribuem para a detecção de matéria orgânica, cor, odor e turbidez aparente no permeado.

O fator determinante para a escolha da melhor condição experimental foi o melhor fluxo permeado, obtido na condição de 20 bar e 45 °C que corresponde a 102,11 L.m⁻².h⁻¹. Esta condição experimental se adequaria facilmente ao processo atual da indústria, visto que o efluente, oriundo da membrana de nanofiltração, é gerado em temperatura morna, entre 35 °C e 40 °C.

4.3 Fluxo permeado

A Figura 16 apresenta o comportamento do fluxo permeado ao longo do tempo de filtração na membrana de osmose inversa para a amostra e a água purificada em diferentes condições experimentais.

Figura 16: Comportamento do fluxo ao longo do tempo para cada condição experimental testada com a amostra



A Figura 16 permite observar que o fluxo inicial manteve-se constante. Este fato pode demonstrar baixo depósito de solutos na superfície da membrana, contribuindo para prolongar o tempo de uso da membrana com menor necessidade de paradas para limpeza. Para os processos de ultrafiltração e nanofiltração geralmente há uma limpeza quando o fluxo atinge 50% do fluxo inicial, já neste processo a Figura 16 demonstra um baixo depósito.

A Tabela 5 apresenta o comportamento do fluxo com água purificada antes do experimento, o fluxo com amostra após 30 minutos de filtração e o fluxo com água purificada após o experimento, sendo apresentado também o índice de colmatação da membrana.

Tabela 5: Análise do fluxo inicial e final

Experimento	Condição experimental		Análise do fluxo inicial e final			Coeficiente de colmatção
	Pressão (bar)	Temperatura (°C)	$J_0^{(1)}$ (L/h.m ²)	$J^{(2)}$ (L/h.m ²)	$J^{(3)}$ (L/h.m ²)	
1	10	20	38,73	28,17	35,92	0,07
2	20	20	78,87	61,97	74,65	0,05
3	10	45	79,58	59,86	73,24	0,08
4	20	45	105,63	102,11	105,63	0,00

Sendo que:

$J_0^{(1)}$ = fluxo com água purificada antes do experimento

$J^{(2)}$ = fluxo com amostra de efluente após 30 minutos de filtração

$J^{(3)}$ = fluxo com água purificada após o experimento

A Tabela 5 demonstra que a condição experimental que permitiu o melhor fluxo foi a de 20 bar e 45 °C. Embora o fluxo permeado tenha se mantido constante no intervalo de 30 minutos de filtração, observa-se que os fluxos permeados apresentam valores que variam de 72 – 97 % do fluxo obtido com água purificada antes do experimento, desta forma, esta redução de cerca de 16 % do fluxo com água resulta da combinação do efeito da pressão osmótica (diminuindo a pressão de filtração real) e da polarização de concentração, que são considerados fenômenos reversíveis.

Associa-se a leve geração de incrustação na membrana de osmose inversa a origem do efluente, coletado após o processo de separação por membranas por nanofiltração. A membrana de NF é capaz de reter moléculas orgânicas de baixo peso molecular e íons bivalentes.

A Tabela 6 apresenta a análise de variância do fluxo permeado em relação a pressão e temperatura. Ambas as variáveis apresentam efeito sobre o fluxo permeado, mas não há interação entre elas (representado pela linha pressão*temperatura), observando-se um valor p maior que 0,05, e, portanto, não significativo.

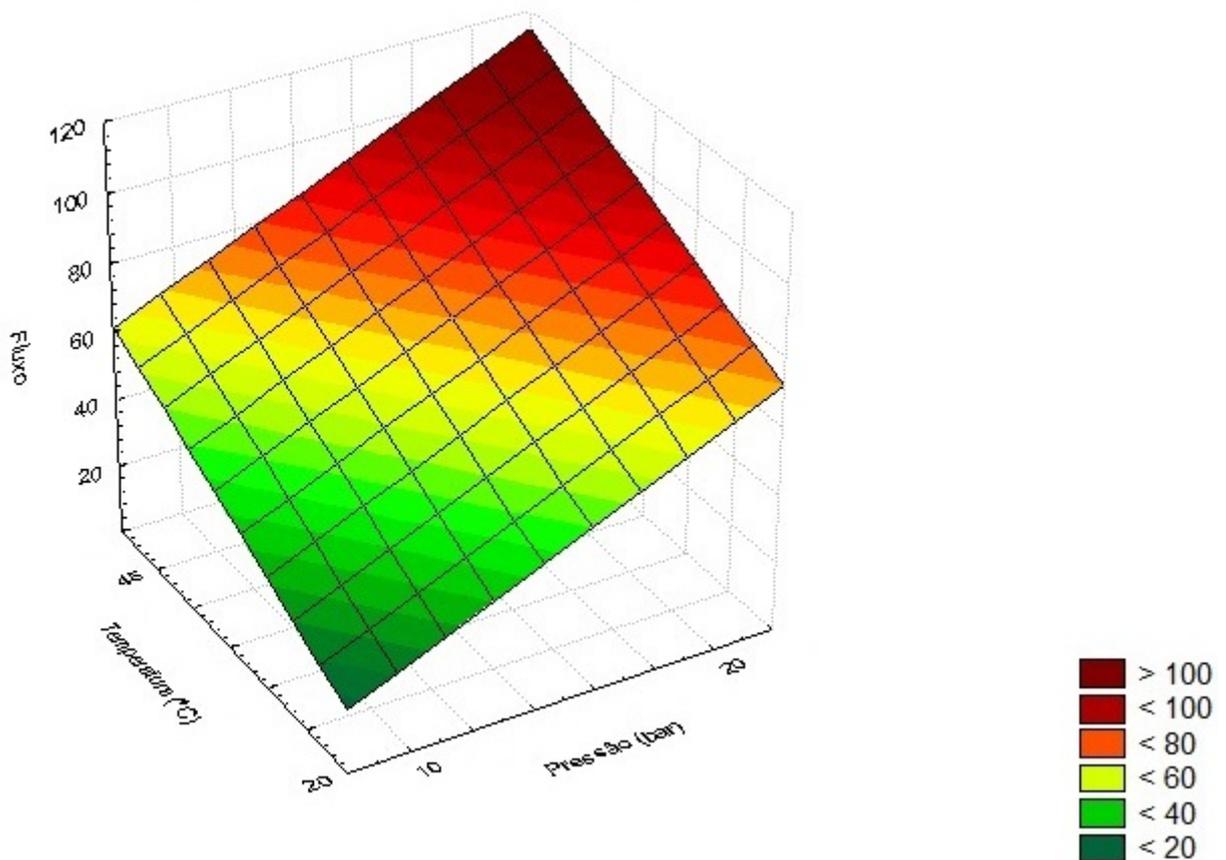
Tabela 6: Análise de variância do fluxo permeado em relação as variáveis independentes pressão de operação e temperatura de alimentação

Efeitos	SS	DF	MS	F	p
Pressão	2891,801	1	2891,801	134,0799	0,000318
Temperatura	2579,774	1	2579,774	119,6126	0,000397
Pressão * Temperatura	35,701	1	35,701	1,6553	0,267652
Erro	86,271	4	21,568		

Legenda: SS: soma dos quadrados; DF: graus de liberdade; MS: média quadrática; F: valor do teste exato de Fischer; p: probabilidade.

A Figura 17 mostra o efeito combinado da pressão e da temperatura no fluxo permeado decorridos 30 minutos de filtração.

Figura 17: Fluxo ($L \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$) como variável de resposta para a análise combinada de pressão e temperatura.



Observa-se uma tendência de maximização do fluxo na região de maior pressão e temperatura. Este fato pode justificar-se levando em consideração que o aumento da temperatura reduz a viscosidade do permeado, e com isso há a redução da resistência de filtração, elevando-se o fluxo. Por outro lado, o aumento da pressão eleva o fluxo permeado, uma vez que a pressão é a força motriz do processo. Logo, a elevação da pressão leva diretamente ao aumento do fluxo permeado, desde que não se aumente as demais parcelas da resistência de filtração (resistências de colmatção reversível e irreversível).

4.4 Possibilidades de reúso

Para análise das possibilidades de reúso, a Tabela 7 apresenta a caracterização físico-química do efluente e permeado obtido.

Tabela 7: Médias e desvios padrões da caracterização físico-química do efluente e do permeado e diretrizes para o reúso

Parâmetros	Unidade	Resultados		Diretrizes para reúso
		Efluente	Permeado	VMP ⁽¹⁾
DQO	mg.L ⁻¹	9634 ± 2025	92 ± 4	5,0 ^(2,3)
Lactose	mg.L ⁻¹	4480 ± 2449	26 ± 5	-/-
Nitrogênio Total	mg.L ⁻¹	827 ± 177	98 ± 23	1,0 ⁽²⁾
Sólidos Totais	mg.L ⁻¹	162 ± 58	0,02 ± 0,02	1000 ⁽⁴⁾
Condutividade Elétrica	µS.cm ⁻¹	3858 ± 582	127 ± 25	-/-
pH	-/-	6 ± 0,65	6,6 ± 0,14	6,0 a 9,5 ^(2,3,4)
Cor	uH	55 ± 24	4 ± 2,5	15 ⁽⁴⁾
Odor	-/-	Objetável	Levemente Objetável	Não objetável

Notas:

(5) Valor máximo permitido.

(6) Limite para detecção conforme Diretiva Européia 98/83/EC

(7) Limite para detecção conforme Fiesp 2005: Água de reúso classe I.

(8) Limite para detecção conforme Portaria 2914/2011

Considerando o alto grau de confiabilidade no processo, a economia de energia, a seletividade, a remoção de sólidos dissolvidos, a separação de compostos termolábeis, recuperação de subprodutos de alto valor agregado bem como a simplicidade de operação e escalonamento e pouco espaço para instalação; os resultados obtidos demonstram que processo de separação por membranas por osmose inversa apresenta boa eficiência na remoção dos parâmetros que caracterizam a qualidade de águas.

Os baixos níveis de cor e turbidez aparente são fundamentais para viabilizar o reúso do ponto de vista estético. Além destes houve considerável redução dos parâmetros lactose, sólidos totais e condutividade elétrica. O odor característico de leite fervido foi reduzido após o processo de tratamento para todas as condições experimentais testadas.

Não há especificação ou controle da concentração de nitrogênio total ou matéria orgânica para água potável no Brasil, segundo a Portaria 2914 do Ministério da Saúde

(BRASIL, 2011). Por outro lado, a União Européia estabelece limites na concentração de nitrogênio e matéria orgânica para água para consumo humano.

A DQO não é um parâmetro controlado, pois indica demanda de oxigênio por vias químicas e bioquímicas, mas deve ser uma referência inicial para se conhecer a qualidade da água. Apesar da eficiência de 99 % na remoção da matéria orgânica (expressa através da demanda química de oxigênio) e 87 % para a remoção de nitrogênio o permeado ainda apresenta valores acima dos limites para reúso.

Para fazer a remoção desta carga residual, fato que inviabiliza o cumprimento dos padrões referenciados pela legislação ambiental para utilização como água potável, sugere-se um tratamento com carvão ativado e posterior filtração por osmose inversa. Também pode ser considerado a hipótese do descarte em mananciais hídricos, pelo excelente padrão de qualidade para descarte.

Outra forma de aproveitamento do permeado obtido é a utilização para fins não potáveis. Isto inclui o reúso pela indústria nos processos de limpeza externa e reposição de torres de resfriamento ou caldeiras (BALANNEC et al., 2002; BALANNEC et al., 2005).

Para fins não potáveis sugere-se a utilização para água de limpeza, onde os limites aceitáveis para água de reúso são condutividade elétrica $< 200 \mu\text{S}/\text{cm}$ e pH na faixa de 6,5 – 9,0 (MAVROV et al., 2001); para águas de torres de resfriamento e de recirculação os valores obtidos estão próximo aos limites de detecção especificados, que correspondem a 75 mg.L^{-1} de DQO, pH na faixa de 5,0 a 8,3, sólidos suspensos de 100 m.L^{-1} , sólidos dissolvidos de 500 mg.L^{-1} (METCALF; EDDY, 2003) e para água de alimentação de caldeiras os limites aceitáveis para água de reúso são DQO $< 10 \text{ mg.L}^{-1}$, óleos e graxas $< 1 \text{ mg.L}^{-1}$, condutividade elétrica $< 40 \mu\text{S}/\text{cm}$ e pH entre 6,5 a 9,0 (CHMIEL et al., 2000; MAVROV et al., 2001; BALANNEC et al., 2005).

5 CONCLUSÕES

O processo de separação por membranas por osmose inversa é uma promissora alternativa técnica para a recuperação de águas geradas na etapa de desmineralização por nanofiltração do soro de leite, removendo 99 % da carga orgânica deste efluente. Sua implementação poderia trazer ganhos ambientais para a indústria fabricante de soro de leite em pó e possivelmente ganhos econômicos com a redução do consumo de água.

A caracterização físico-química da amostra de efluente apresentou residuais de compostos de leite, expresso tanto na demanda química de oxigênio como na lactose e nitrogênio, e alta concentração de íons na solução, impedindo o reúso direto e confirmando a necessidade do tratamento prévio para posterior reúso.

Aplicando o processo de separação por membranas por osmose inversa, para o tratamento do efluente, verificou-se que a pressão de operação e a temperatura possuem efeito direto no fluxo permeado e ambas as variáveis não apresentaram diferenças nas rejeições. O melhor fluxo permeado foi obtido na condição de 20 bar e 45 °C e corresponde a 102,11 L.m⁻².h⁻¹. O fluxo foi o fator determinante para escolha da melhor condição experimental, uma vez que a elevação do fluxo permeado auxiliou na maior eficiência do processo de filtração.

A condição experimental de 20 bar e 45 °C demonstrou grande eficiência na rejeição das variáveis resposta; sendo obtidas rejeições de 95,89 % para turbidez, 95,65 % para condutividade elétrica, 96,59 % para sólidos totais, 100 % para sólidos solúveis, 87,15 % para nitrogênio total, 90,09 % para nitrogênio amoniacal, 52,29 % para óleos e graxas, 99,09 % para demanda química de oxigênio, 99,58 % para lactose e 97,33 % para cor.

O processo de osmose inversa permite o pós tratamento do efluente proveniente processo de nanofiltração da produção de soro de leite em pó, possibilitando a geração de água de reúso para fins não potáveis para limpeza externa e reposição de água em torres de resfriamento e caldeira.

Após o processo de tratamento proposto o permeado obtido apresentou um leve odor de leite fervido. Para atingir a finalidade do reúso potável para o permeado obtido, sugere-se testar a remoção do odor com a utilização de carvão ativado como pós-tratamento do permeado, devido as suas capacidades já estudadas por outros autores para a remoção da matéria orgânica, cor e odor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANAND, Sanjeev; HASSAN, Ashraf; AVADHANULA, Mallika. The effects of biofilms formed on whey reverse osmosis membranes on the microbial quality of the concentrated product. **International Journal of Dairy Technology**. v. 65, nº 3, Ago. 2012.
- ANAND, Sanjeev; SINGH, Diwakar; AVADHANULA, Mallika; MARKA, Sowmya. Development and Control of Bacterial Biofilms on Dairy Processing Membranes. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**. v.13, p. 18-33, 2014.
- ANDRADE, Laura Hamdan. **Tratamento de efluente de indústria de laticínios por duas configurações de biorreator com membranas e nanofiltração visando o reúso**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Minas Gerais: Programa de Pós Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Belo Horizonte, MG, 2011.
- AKDEMIR, Ezgi Oktav; OZER, Adem. Pretreatment of Cheese Whey Effluent Using a Microfiltration Process: A Statistical Design Approach. **Ekoloji**. 22, 88, p. 21-27, 2013.
- ARGUN, Mustafa Samil; ELGUN, Adem; ARGUN, M. Emim; KARATAS, Mustafa. Utilization of whey for waste minimization of white cheese industry: a case study. **J. Int. Environmental Application & Science**. v. 2 (1&2), p. 1-4, 2007.
- BAIRD, Colin. **Química Ambiental**. Porto Alegre, RS: Bookman. 622 p. 2002.
- BAKER, Richard W. **Membrane Technology and Applications**. 2ed. Menlo Park, California: John Wiley & Sons, Ltd. 2004.
- BALANNEC, Béatrice; GÉSAN-GUIZIOU, Geneviève Gésan-Guiziou; CHAUFER, Bernard; RABILLER-BAUDRY, Murielle; DAUFIN, Georges. Treatment of dairy process waters by membrane operations for water reuse and milk constituents concentration. **Desalination**, Amsterdam: Elsevier Science Direct, v. 147, p. 89–94, 2002.
- BALANNEC, B.; VOURCH, M.; RABILLER-BAUDRY M.; CHAUFER, B. Comparative study of different nanofiltration and reverse osmosis membranes for dairy effluent treatment by dead-end filtration. **Separation and Purification Technology**. v. 42, p. 195–200, 2005.
- BALDASSO, C.; BARROS, T. C.; TESSARO, I.C. Concentration and purification of whey proteins by ultrafiltration. **Desalination**, Amsterdam: Elsevier Science Direct, v. 278, p. 381–386, 2011
- BAPTISTA, J. M. et al. **Programa Nacional para o uso eficiente da água** (Versão Preliminar). Laboratório Nacional de Engenharia: Lisboa, 2001.
- BRASIL, Circular nº 175/2005/CGPE/DIPOA, de 16 de maio de 2005. **Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento** (MAPA), Brasília, DF, de 16 mai. 2005.
- BRASIL. ANA, Agência Nacional de Águas; FIESP, Federação das Indústrias do Estado de São Paulo; SINDUSCON-SP, Sindicato da Indústria da Construção do Estado de São Paulo. **Conservação e reúso da água em edificações**. São Paulo: Prol Editora Gráfica, jun. 2005.

BRASIL, Lei nº 9433, de 08 de janeiro de 1997. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 09 jan. 1997, Seção 1, p. 470, v. 135, n. 6.

BRASIL. Manual Prático de Análise de Água. **Fundação Nacional da Saúde (FUNASA)**. 3ª ed. rev. Brasília, DF: Ministério da Saúde, FUNASA, 2009, 144 p.

BRASIL, Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF: Ministério da Saúde, de 14 dez. 2011.

BRIÃO, Vandrê Barbosa. **Estudo de prevenção à poluição em uma indústria de laticínios**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Maringá: Programa de Mestrado em Engenharia Química, Maringá, PR, 2000.

BRIÃO, Vandrê Barbosa; TAVARES, Célia Regina Granhen; CALEFFI, Rosilene Doce. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. II-017- **Ultrafiltração para o tratamento de efluentes de laticínios**. Campo Grande, MS: ABES, 2005.

BRIÃO, Vandrê Barbosa; TAVARES, Célia Regina Granhen. Ultrafiltração como processo de tratamento para o reúso de efluentes de laticínios. **Engenharia Sanitária Ambiental**. v. 12, n. 2, p. 134-138, 2007.

BRIÃO, Vandrê Barbosa. **Processos de separação por membranas para reúso de efluentes de laticínios**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Maringá: Programa de Pós Graduação em Engenharia Química. Maringá, PR, 2007.

BYLUND, Gösta. **Dairy processing Handbook**. Sweden, Tetra Pak, Publishe, 1995.

CARVALHO, Fátima; PRAZERES, Ana R., RIVAS, Javier. Cheese whey wastewater: Characterization and treatment. **Science of the Total Environment**. p. 385–396, 2013.

CAVALCANTI, J.E. W. de A. **Manual de Tratamento de Efluentes Industriais**. 2 ed. São Paulo, SP: Engenho Editora Técnica Ltda., 500 p., 2012.

CHMIEL, Horst; MAVROV, Valko; BÉLIÈRES, Eric. Reuse of vapour condensate from milk processing using nanofiltration. *Filtration + Separation*. p. 24-27. April 2000.

CSÉFALVAY, Edit; IMRE, Péter M.; MIZSEY, Péter. Applicability of Nanofiltration and Reverse Osmosis for the Treatment of Wastewater of Different Origin. **Central European Journal of Chemistry**. v. 6(2), p. 277-283, 2008.

DANTAS, Danielly Luz Dantas. SALES, Alessander Wilckson Cabral. Aspectos ambientais, sociais e jurídicos do reúso da água. **RGSA – Revista de Gestão Social e Ambiental**. São Paulo, SP, v. 3, n. 3, p. 4 – 19, set./ dez. 2009

DEL RE, G.; DI GIACOMO, G.; ALOISIO, L.; TERRERI, M. RO treatment of waste waters from dairy industry. **Desalination**. v. 119, p. 205-206, 1998.

EUROPE, Council Directive 98/83/EC, of 03 November 1998. **Official Journal of the European Communities**, Europe: 05 December 1998.

FARIAS, Otavio A. C. **Soro de Leite em Pó: Brasil caminha para autossuficiência.** Milkpoint: Cadeia do Leite. Postado em 14/04/2011. Disponível em: <http://www.milkpoint.com.br/cadeia-do-leite/espaco-aberto/soro-de-leite-em-po-brasil-caminha-para-autossuficiencia-71038n.aspx>. Acesso em: 04/09/2012.

FERNANDES, Vera Maria. **Padrões para reúso de águas residuárias em ambientes urbanos.** Coaju: Comitê Alto Jacuí. 2008. Disponível em: www.upf.br/coaju/download/padroesreusoaguaII.pdf. Acesso em 08 de outubro de 2012.

FERREIRA FILHO, Sidney Seckler. ALVES, Rosemeire. Técnicas de avaliação de gosto e odor em águas de abastecimento: método analítico, análise sensorial e percepção dos consumidores. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental.** v. 11, n. 4, p. 362-370, out./dez. 2006.

GALAMBOS, Ildikó; MOLINA, Jesús Mora; JÁRAY, Peter; VATAI, Gyula; BEKÁSSY-MOLNÁR, Érika. High organic content industrial wastewater by membrane filtration. **Desalination.** Amsterdam:Elsevier Science, v. 162, p. 117 – 120, 2004.

GEISE, Geoffrey M.; LEE, Hae-Seung; MILLER, Daniel J.; FREEMAN, Benny D.; MCGRATH James E.; PAUL, Donald R. Water Purification by Membranes: The Role of Polymer Science. **Wiley InterScience:** 2010.

GERNIGON, G.; SCHUCK, P.; JEANTET, R. Processing of Mozzarella cheese wheys and stretchwaters: a preliminary review. **Dairy Science and Technology:** Rennes, v.90, p.27-46, 2010.

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

GHALY, A. E.; MAHMOUD, N. S.; RUSHTON, D. G.; ARAB, F. Potential Environmental and Health Impacts of High Land Application of Cheese Whey. **American Journal of Agricultural and Biological Science.** p. 106-117, 2007.

HABERT, Alberto Claudio; BORGES, Cristiano Piacsek; NOBREGA, Ronaldo. **Processos de separação por membranas.** Rio de Janeiro, RJ: E-papers, 180 p., 2006.

HEPSEN, Reyhan; KAYA, Yasemin. Optimization of Membrane Fouling Using Experimental Design: An Example from Dairy Wastewater Treatment. **Industrial Engineering Chemistry Research.** v. 51, 16074–16084, 2012.

HOEK, Eric M. V.; PENDERGAST, Mary Theresa M.; TARABARA, Volodymyr V. **Encyclopedia of Membrane Science and Technology.** Introduction: Membrane Separation and Transport. John Wiley & Sons, Inc.: 2013.

JAWOR, Anna; HOEK, Eric M. V. Effects of feed water temperature on inorganic fouling of brackish water RO membranes. **Desalination.** v. 235, p. 44-57, 2009.

JÖNSSON, Ann-Sofi; TRÄGARDH, Gun. Ultrafiltration Applications. **Desalination,** Amsterdam : Elsevier Science, v.77, p. 137 – 179, 1990.

JUDD, Simon. JEFFERSON, Bruce. **Membranes for industrial wastewater recovery and reuse**. New York, NY: Elsevier, 2004.

KABBOUT, Rana; BAROUDI, Moemen; DABBOUSSI, Fouad; HALWANI, Jalal; TAHA, Samir. Characterization, Physicochemical and Biological Treatment of Sweet Whey (Major Pollutant in Dairy Effluent). **International Conference on Biology, Environment and Chemistry, IACSIT Press, Singapore**. 2011.

KHOJARE, A. S.; KADU, A. B.; WASNIK, P. G.; PATIL, M. R.; KHOJARE, B. A. Adaptability of Membranes for Dairy Waste Management. **Asian J. Exp. Sci.**, v. 19, No. 2, p. 105-112, 2005.

KONIG, Annemarie; LIMA, Lêda Maria Mota; CEBALLOS, Beatriz Susana Ovruski de. I-031- Comportamento das águas residuárias brutas e tratadas provenientes de uma indústria de laticínios durante um dia de funcionamento. **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária Ambiental da ABES**. Porto Alegre, RS: ABES, 2000.

LI, Yebo; SHAHBAZI, Abolghasem; WILLIAMS, Karen; WAN, Caixia. Separate and Concentrate Lactic Acid Using Combination of Nanofiltration and Reverse Osmosis Membranes. **Appl Biochem Biotechnol**. v. 147, p. 1-9, 2008.

MACÊDO, Jorge Antônio Barros de. **Águas & águas**. Juiz de Fora, MG: Ortofarma. 505 p., 2000.

MACHADO, Rosângela Moreira Gurgel; FREIRE, Valdir Honório; SILVA, Patrícia Cristina da. VI-025- Alternativas tecnológicas para o controle ambiental em pequenas e médias indústrias de laticínios. **XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária Ambiental da ABES**. Porto Alegre, RS: ABES, 2000.

MADAENI, S.S.; MANSOURPANAH, Y. Chemical cleaning of reverse osmosis membranes fouled by whey. **Desalination**, Elsevier Science, v. 161, p. 13 – 24, 2004.

MANCUSO, Pedro Caetano Sanches; SANTOS, Hilton Felício dos. **Reúso de água**. Barueri, SP: Manole. 579 p., 2003.

MAVROV, V.; CHMIEL, H.; BÉLIÈRES E. Spent process water desalination and organic removal by membranes for water reuse in the food industry. **Desalination**, Elsevier Science. p. 64-74, 2001.

MAVROV, V.; FIHNRIK, A.; CHMIEL, H. Treatment of low-contaminated waste water from the food industry to produce water of drinking quality for reuse. **Desalination**. v. 113, p. 197-203, 1997.

METCALF; EDDY. Inc. Revised by TCHOBANOGLOUS, George; BURTON, Franklin L.; STENSEL, H. David. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 40th ed. New York: Mc. Graw-Hill. 1819p., 2003.

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

MURO, Claudia; RIERA, Francisco; DÍAZ, María Del Carmen. Membrane Separation Process in Wastewater Treatment of Food Industry. **Food Industrial Processes - Methods and Equipment**. Edited by Dr. Benjamin Valdez February, p. 418, 2012.

PANDEY, Santosh Raj; JEGATHEESAN, Veeriah; BASKARAN, Kanagaratnam; LI, Shu. Fouling in reverse osmosis (RO) membrane in water recovery from secondary effluent: a review. **Rev Environ Sci Biotechnol**. v. 11, p. 125-145, 2012.

PEARSON, David. **Escolhendo a Membrana Correta**. Membrane Specialists, LLC. Disponível em: <http://www.membranespecialists.com/global/ptb/choosing-the-right-membrane.php>. Acesso em: 02.11/2012.

PELLACANI, Christian Rodrigo. **Poluição das águas doces superficiais & responsabilidade civil**. Curitiba, PR: Juruá, 138 p., 2006.

PODLECH, P. A. S.; LUNA, M. F.; JERKE, P. R. Fermentação semicontínua de soro de leite por lactobacillus bulgaricus em instalação piloto. **Revista do Instituto de Laticínio Cândido Tostes**, v. 46, n. 01, p. 26-33, 1991.

PORTER, Mark C.; SUDAK, Richard G. **Handbook of industrial Membrane Technology**. New Jersey/USA: Noyes Publications, 1990.

RICHTER, Carlos A.; NETTO, José M. de Azevedo. **Tratamento de água - Tecnologia atualizada**. São Paulo, SP: Edgard Blücher Ltda, 332 p., 2002.

SARKAR, Baisali; CHAKRABARTI, P. P.; VIJAYKUMAR A.; VIJAY Kale. Wastewater treatment in dairy industries: possibility of reuse. **Desalination**, Amsterdam: Elsevier Science Direct, v. 195, p. 141–152, 2006.

SCOTT, K.; HUGHES, R. **Industrial membrane separation technology**. London: Blackie Academic & Professional, 305 p., 1996.

SERPA, L.; PRIAMO, W. L.; REGINATTO, V. Destino Ambientalmente Correto a Rejeitos de Queijaria e Análise de Viabilidade Econômica. **2nd International Workshop | Advances in Cleaner Production Key elements for a sustainable world: energy, water and climate change**. São Paulo, Brazil, Mai. 2009.

SILVA, Ana Karla Pessôa da; FLORES Liliane Cristina; GALDEANO Marcos Manzano; VAL Patrícia Trindade do. **Reúso de água e implicações jurídicas**. São Paulo, SP: Navegar Editora, 111p., 2003.

SOBANA, S; PANDA, Rames C. Review on modelling and control of desalination system using reverse osmosis. **Rev Environ Sci Biotechnol**. v. 10, p. 139-150, 2011.

SUTZKOVER, Iris; HASSON, David; SEMIAT, Raphael. Simple technique for measuring the concentration polarization level in a reverse osmosis system. **Desalination**, Amsterdam: Elsevier Science, v. 131, p. 117 – 127., 2000.

TAY, Joo-Hwa; JEYASEELAN, S. Membrane filtration for reuse of wastewater from beverage industry. Elsevier: **Resources Conservation and Recycling**. v. 15, p. 33-40., 1995.

TURAN, Mustafa. Influence of filtration conditions on the performance of nanofiltration and reverse osmosis membranes in dairy wastewater treatment. **Desalination**, Amsterdam: Elsevier Science Direct, v. 170, p. 83-90., 2004.

VOGELAAR, Rita de Cássia Bicego; PAWLOWSKY, Urivald. **19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. I-061- Reaproveitamento do soro do queijo por coagulação com quitosana. São Paulo, SP: ABES, 1997.

VOURCH, Mickael; BALANNEC, Beatrice; CHAUFER, Bernard; DORANGE, Gérard. Nanofiltration and reverse osmosis of model process waters from the dairy industry to produce water for reuse. **Desalination**. Amsterdam: Elsevier Science, v.172, p. 245 – 256, 2005.

VOURCH, Mickael; BALANNEC, Béatrice; CHAUFER Bernard; DORANGE, Gérard. Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for water reuse. **Desalination**, Amsterdam: Elsevier Science Direct, v. 219, p. 190–202, 2008.

YEE, Kevin W.K.; WILEY, Dianne E., BAO Jie. Whey protein concentrate production by continuous ultrafiltration: Operability under constant operating conditions. **Desalination**, Amsterdam: Elsevier Science Direct, v. 290, p. 125–137, 2007.

YOUNOS, Tamim; TULOOU, Kimberly E. Overview of Desalination Techniques. **Journal of Contemporary Water Research & Education**. v. 132, p. 3-10, Dez. 2005.

YOUGUN, M. S.; BALCIOGLU, Akmehmet; SAYGIN, D. Performance comparison of ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis on whey treatment. Elsevier. Science Direct. **Desalination**, v. 229, p. 204–216, 2008.

APÊNDICE

APÊNDICE A: Resultados dos coeficientes de rejeição das variáveis resposta referente a cada ensaio realizado para o planejamento experimental 2².

Tabela 8: Resultados dos coeficientes de rejeição (%) das variáveis dependentes referente a cada condição experimental testada.

Parâmetros	Pressão e Temperatura							
	10 bar e 20°C		10 bar e 45°C		20 bar e 20°C		20 bar e 45°C	
Condutividade Elétrica	96,29	97,59	94,98	95,83	97,32	97,14	96,32	94,97
Sólidos Totais	98,90	98,21	97,32	98,00	97,00	98,55	96,30	96,89
Nitrogênio Total	84,85	83,87	72,73	78,38	79,17	91,67	88,89	85,42
Demanda Química de Oxigênio	98,83	97,96	98,96	98,80	98,73	97,77	99,12	99,06
Lactose	99,34	99,05	100,00	99,53	99,46	99,67	99,50	99,65
Cor	97,00	100,00	92,86	100,00	93,83	90,00	94,67	100,00

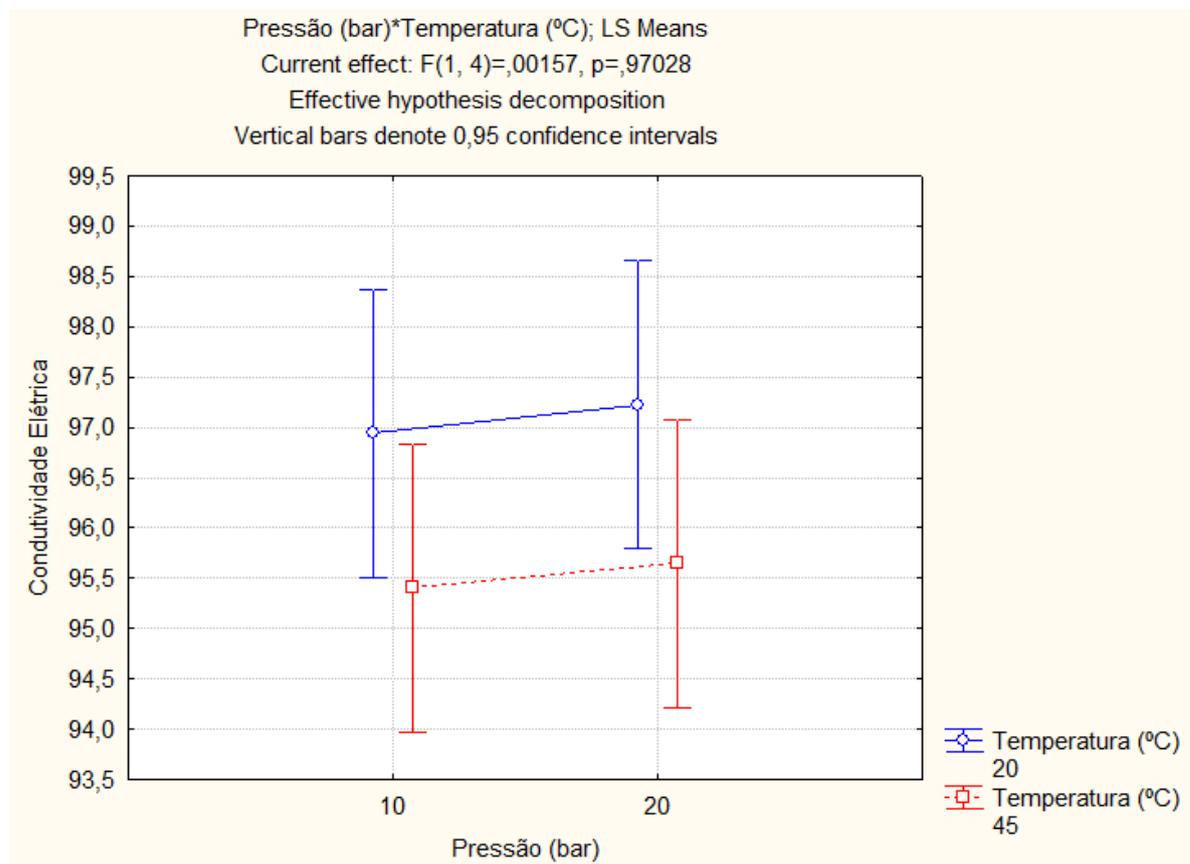
APÊNDICE B: Análise de variância da variável dependente condutividade elétrica e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Tabela 9: Análise de variância da condutividade elétrica em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Efeitos	SS	DF	MS	F	p
Pressão	0,137701	1	0,137701	0,259151	0,637501
Temperatura	4,859045	1	4,859045	9,144675	0,039009
Pressão * Temperatura	0,000835	1	0,000835	0,001572	0,970275
Erro	2,125410	4	0,531352		

Legenda: SS: soma dos quadrados; DF: graus de liberdade; MS: média quadrática; F: valor do teste exato de Fischer; p: probabilidade.

Figura 18: Efeito da pressão e temperatura sobre a condutividade elétrica.



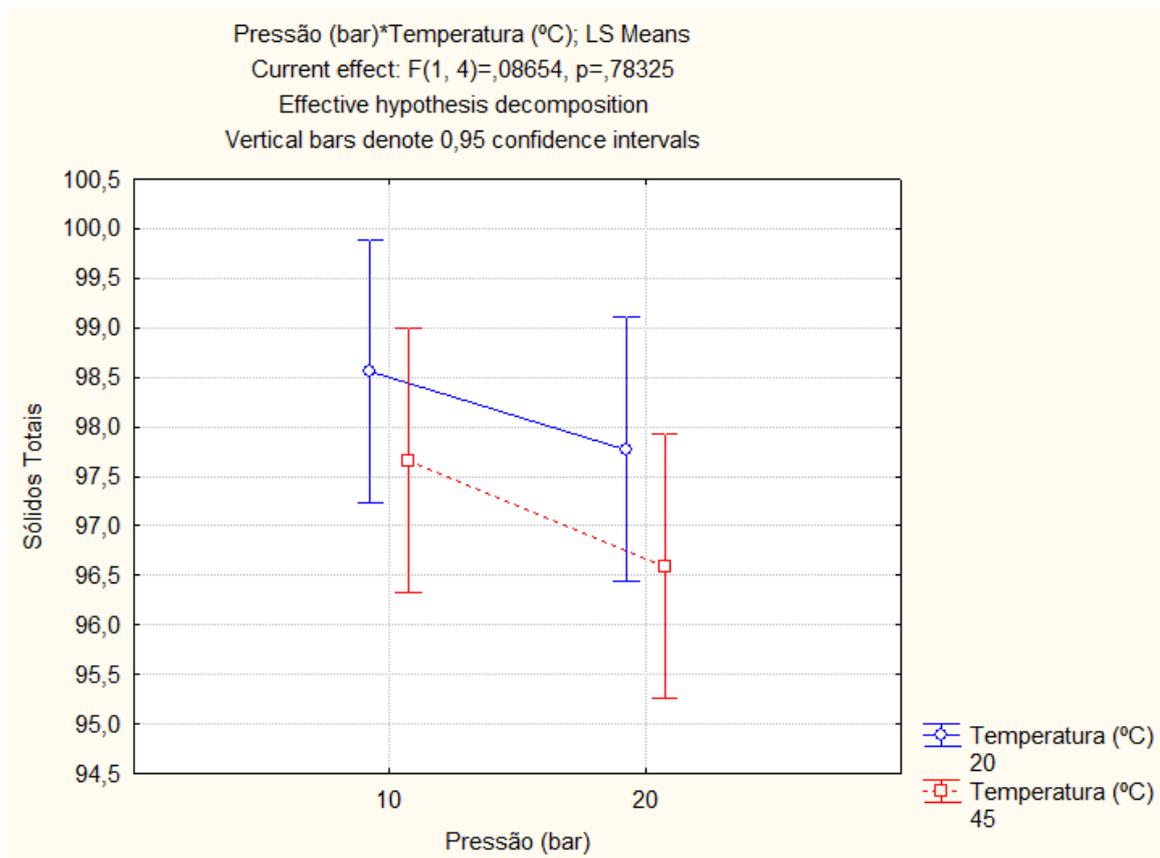
APÊNDICE C: Análise de variância da variável dependente sólidos totais e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Tabela 10: Análise de variância dos sólidos totais em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Efeitos	SS	DF	MS	F	p
Pressão	1,711410	1	1,711410	3,731651	0,125563
Temperatura	2,157057	1	2,157057	4,703366	0,095947
Pressão * Temperatura	0,039691	1	0,039691	0,086545	0,783251
Erro	1,834480	4	0,458620		

Legenda: SS: soma dos quadrados; DF: graus de liberdade; MS: média quadrática; F: valor do teste exato de Fischer; p: probabilidade.

Figura 19: Efeito da pressão e temperatura sobre os sólidos totais.



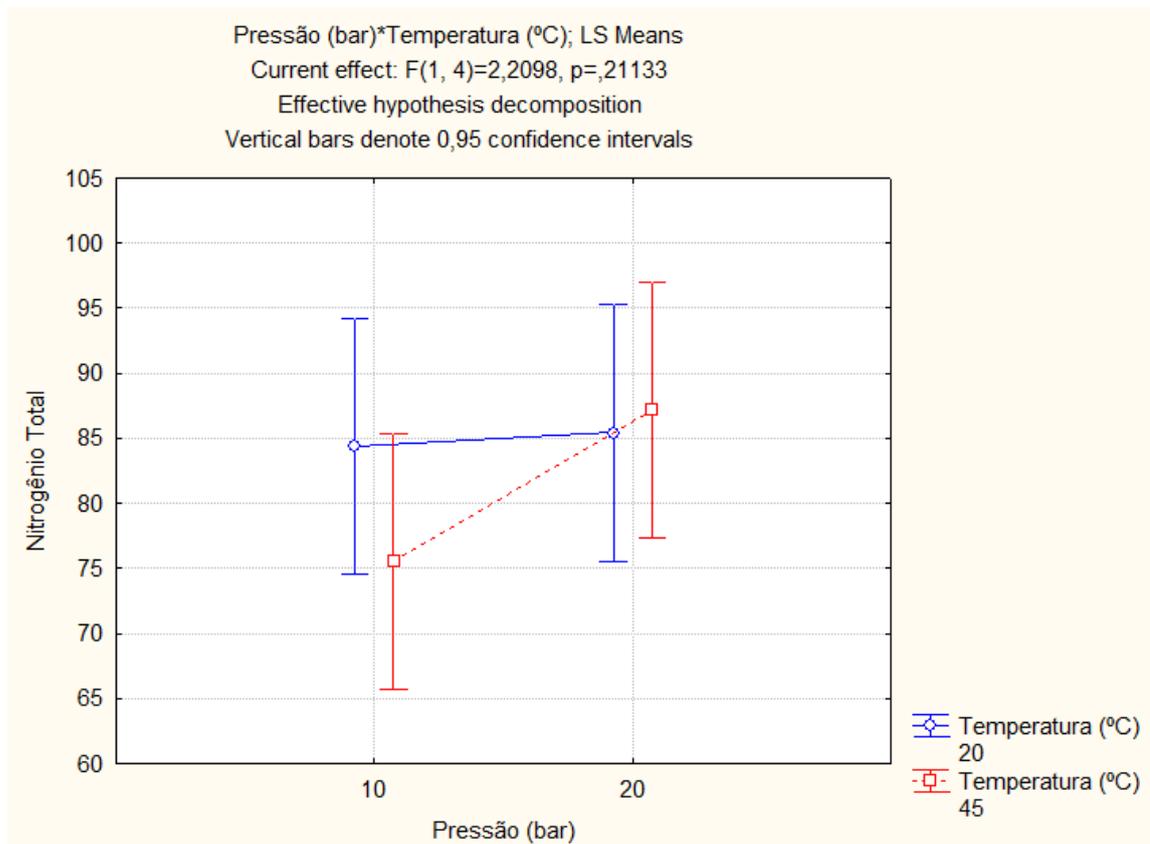
APÊNDICE D: Análise de variância da variável dependente nitrogênio total e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Tabela 11: Análise de variância do nitrogênio total em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Efeitos	SS	DF	MS	F	p
Pressão	80,1007	1	80,10070	3,184979	0,148875
Temperatura	24,9968	1	24,99679	0,993927	0,375209
Pressão * Temperatura	55,5757	1	55,57569	2,209811	0,211334
Erro	100,5981	4	25,14952		

Legenda: SS: soma dos quadrados; DF: graus de liberdade; MS: média quadrática; F: valor do teste exato de Fischer; p: probabilidade.

Figura 20: Efeito da pressão e temperatura sobre o nitrogênio total.



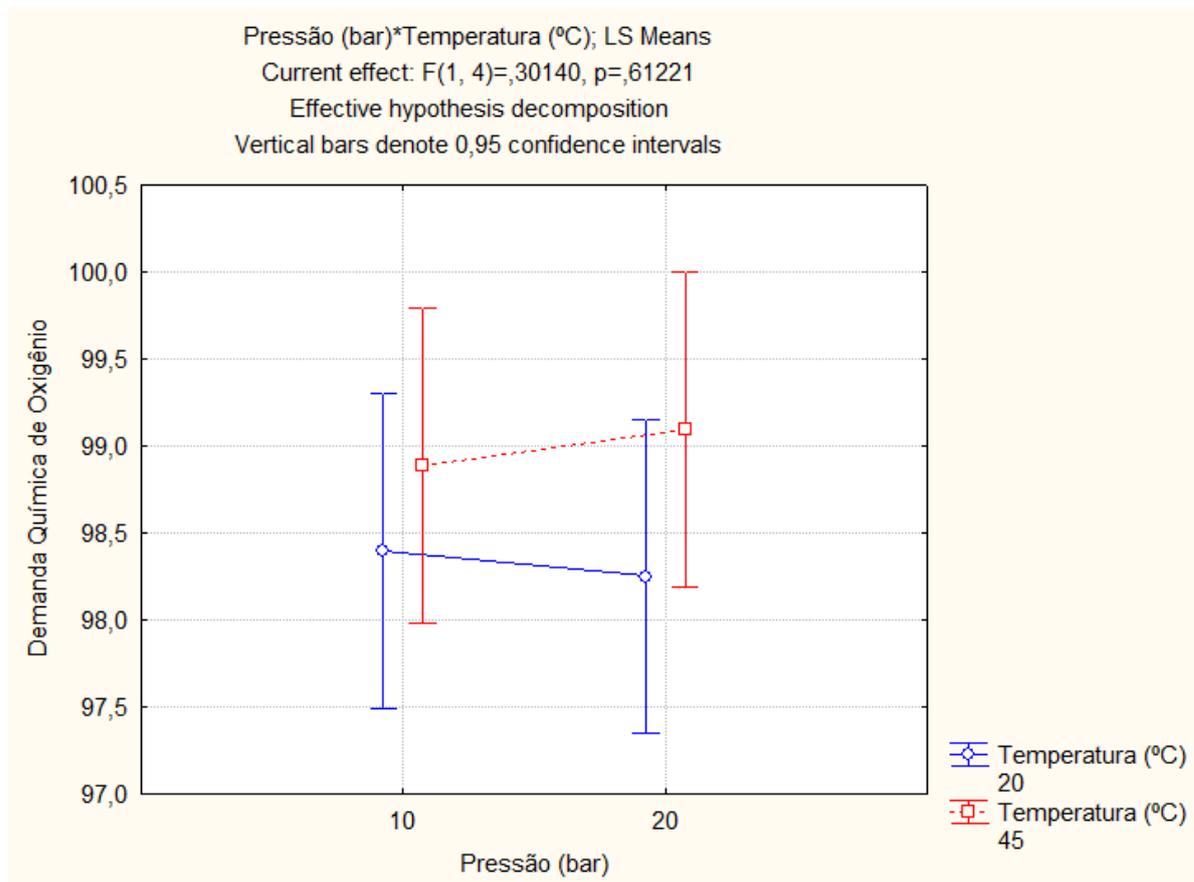
APÊNDICE E: Análise de variância da variável dependente demanda química de oxigênio e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Tabela 12: Análise de variância da demanda química de oxigênio em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Efeitos	SS	DF	MS	F	p
Pressão	0,001929	1	0,001929	0,009071	0,928705
Temperatura	0,879646	1	0,879646	4,136379	0,111727
Pressão * Temperatura	0,064096	1	0,064096	0,301399	0,612213
Erro	0,850644	4	0,212661		

Legenda: SS: soma dos quadrados; DF: graus de liberdade; MS: média quadrática; F: valor do teste exato de Fischer; p: probabilidade.

Figura 21: Efeito da pressão e temperatura sobre a demanda química de oxigênio.



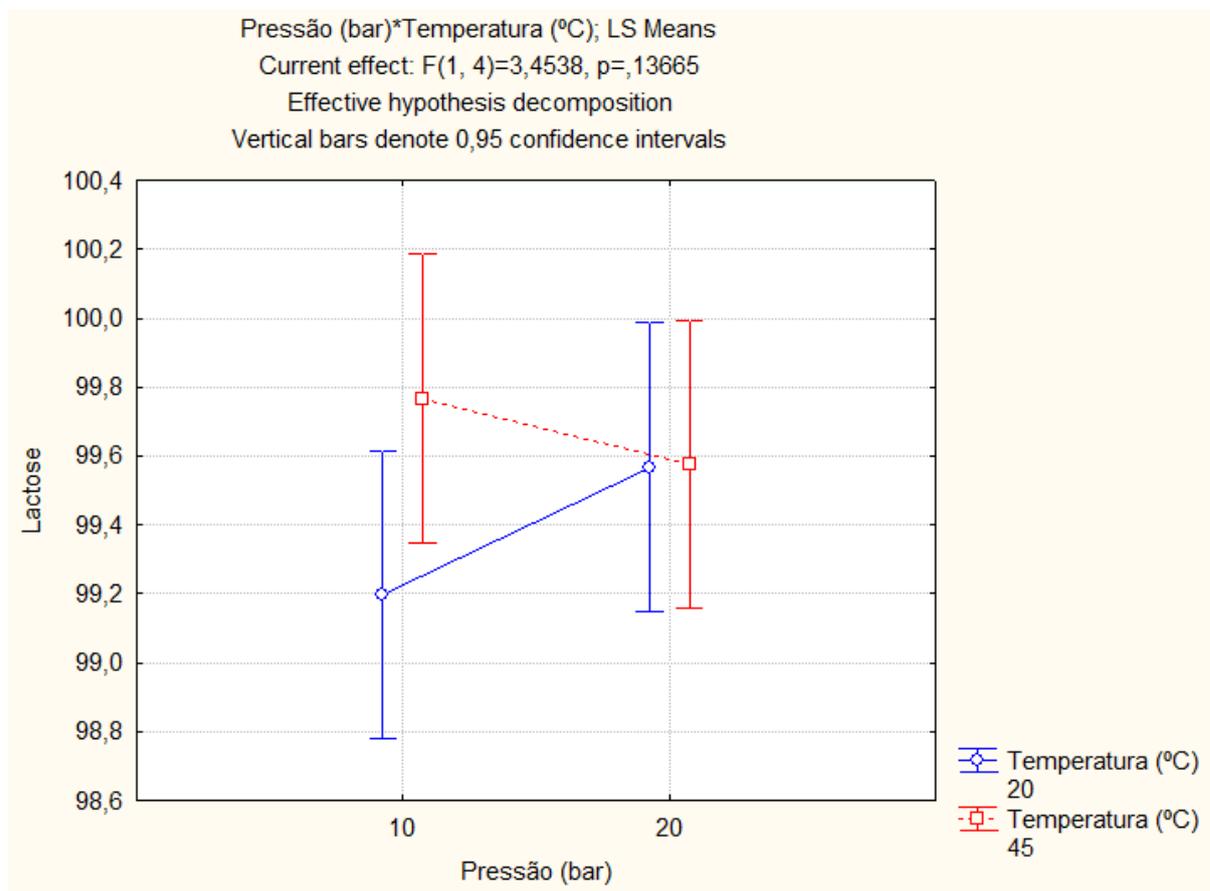
APÊNDICE F: Análise de variância da variável dependente lactose e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Tabela 13: Análise de variância da lactose em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Efeitos	SS	DF	MS	F	p
Pressão	0,016157	1	0,016157	0,354993	0,583377
Temperatura	0,166773	1	0,166773	3,664189	0,128123
Pressão * Temperatura	0,157199	1	0,157199	3,453834	0,136646
Erro	0,182057	4	0,045514		

Legenda: SS: soma dos quadrados; DF: graus de liberdade; MS: média quadrática; F: valor do teste exato de Fischer; p: probabilidade.

Figura 22: Efeito da pressão e temperatura sobre a lactose.



APÊNDICE G: Análise de variância da variável dependente cor e apresentação do gráfico de efeito em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Tabela 14: Análise de variância da cor em relação às variáveis independentes, pressão de operação e temperatura de alimentação.

Efeitos	SS	DF	MS	F	p
Pressão	16,1406	1	16,14062	1,252278	0,325777
Temperatura	5,6056	1	5,60564	0,434916	0,545622
Pressão * Temperatura	28,0589	1	28,05890	2,176965	0,214122
Erro	51,5560	4	12,88900		

Legenda: SS: soma dos quadrados; DF: graus de liberdade; MS: média quadrática; F: valor do teste exato de Fischer; p: probabilidade.

Figura 23: Efeito da pressão e temperatura sobre a cor.

