

**MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ  
CÂMPUS MEDIANEIRA**

**DOUGLAS FELIPE GALVÃO**

**PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES POR PROCESSOS DE  
SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS E REÚSO DE ÁGUA EM UMA  
INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS**

**DISSERTAÇÃO**

**MEDIANEIRA-PR**

**2016**

**DOUGLAS FELIPE GALVÃO**

**PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES POR PROCESSOS DE  
SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS E REÚSO DE ÁGUA EM UMA  
INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais.

Discente: Douglas Felipe Galvão

Orientador(a): Dra. Eliane Rodrigues dos Santos Gomes

**MEDIANEIRA-PR**

**2016**

### Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

G182p Galvão, Douglas Felipe

Pós-tratamento de efluentes por processos de separação por membranas e reuso de água em uma indústria de laticínios / Douglas Felipe Galvão – 2016.

117 f. : il. ; 30 cm.

Orientador: Eliane Rodrigues dos Santos Gomes

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2016.

Inclui bibliografias.

1. Resíduos industriais. 2. Águas residuais – Purificação - Filtração  
3. Meio Ambiente – Dissertações. I. Gomes, Eliane Rodrigues dos Santos, orient. II. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambientais. III. Título.

CDD: 620.1

Biblioteca Câmpus Medianeira  
Marci Lucia Nicodem Fischborn 9/1219



## **TERMO DE APROVAÇÃO**

### **PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTES POR PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS E REÚSO DE ÁGUA EM UMA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS**

Por

**DOUGLAS FELIPE GALVÃO**

Essa dissertação foi apresentada às 14:00 horas, do dia 14 de março de dois mil e dezesseis, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Tecnologias Ambientais, Linha de Pesquisa Tecnologias de Prevenção e Controle de Impactos Ambientais, no Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O(A) candidato(a) foi arguido(a) pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

---

Profa. Dra. Eliane Rodrigues dos Santos Gomes (Orientador – PPGTAMB)

---

Profa. Dra. Dângela Maria Fernandes (Membro Interno – UTFPR)

---

Prof. Dr. Luiz Alberto Sarmiento (Membro Interno – UTFPR)

---

Profa. Dra. Marcia Teresinha Veit (Membro Externo – UNIOESTE Campus Toledo)

**A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa**

Dedico esta dissertação a meus familiares  
e a todos que direta ou indiretamente  
colaboraram para a sua realização.

## **AGRADECIMENTOS**

A minha família, pela força que sempre me deram, por tudo que fizeram e fazem por mim.

Aos meus amigos, sempre juntos em todos os momentos.

À minha orientadora professora Dra. Eliane Rodrigues dos Santos Gomes, pela orientação, dispêndio de tempo, paciência e disponibilidade para ajudar em todas as fases da dissertação.

A unidade de laticínios estudada e aos funcionários do Setor de Meio Ambiente da indústria, pelo dispêndio de tempo e atenção durante a realização da pesquisa.

Ao Laboratório Central da Cooperativa Agroindustrial Lar de Medianeira, fundamental para a realização de algumas análises.

Agradeço aos pesquisadores e professores do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais - PPGTAMB, professores da UTFPR, Câmpus Medianeira.

Enfim, sou grato a todos que, de alguma forma, contribuíram, ajudaram e me motivaram a finalizar todas as fases dos meus estudos.

## RESUMO

GALVÃO, Douglas Felipe. **Pós-tratamento de efluentes por processos de separação por membranas e reúso de água em uma indústria de laticínios.** 2016. 117 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

As indústrias de laticínios utilizam volume substancial de água para a realização dos processos produtivos, especialmente para a manutenção de condições de higiene e limpeza. Com isso, ocorre a geração de volume considerável de efluentes que demandam tratamento para atendimento dos padrões de lançamento antes de serem descartados. Com a escassez de recursos hídricos e a cobrança pelo uso da água, a minimização do consumo de água nas indústrias é de suma importância para manter sua competitividade no mercado. Nesse sentido, tem aumentado o interesse pelo reúso de efluentes, com o objetivo de diminuir o consumo de água de boa qualidade em processos que não exigem qualidade tão alta desse recurso. Os processos de separação por membranas têm destaque na geração de águas de reúso de boa qualidade e que podem atender a demanda de vários processos industriais. Desse modo, a presente pesquisa teve como objetivo avaliar os processos de separação por membranas como pós-tratamento de efluentes de uma indústria de laticínio com vistas ao reúso deste efluente. Para isso, foi realizada a caracterização físico-química e microbiológica dos efluentes da indústria de laticínios, a realização dos processos de separação por membranas de microfiltração (MF) e ultrafiltração (UF) e microfiltração seguida de ultrafiltração (MF+UF). Os processos de MF e UF foram realizados variando-se as condições de pressão aplicadas, realizando-se a avaliação da qualidade do efluente obtido após os processos de separação por membranas, considerando o atendimento à exigências técnicas, legais e sanitárias para diferentes usos industriais. Os resultados demonstraram que, os processos de MF e UF têm considerável eficiência no tratamento do efluente da indústria de laticínio, com eficiências que chegaram a 36,57% para nitrogênio total, 98,39% para óleos e graxas, 97,27% para DQO e 97,64% para DBO. A membrana de MF demonstrou eficiência máxima na remoção de DQO, DBO, nitrogênio amoniacal, fósforo, turbidez, óleos e graxas e sólidos totais voláteis de 97,27, 96,79, 73,96, 38,46, 100, 95,89 e 87,79%, respectivamente. A membrana de UF teve eficiência na remoção DQO, DBO, nitrogênio amoniacal, fósforo, turbidez, óleos e graxas, e sólidos totais voláteis de 97,27, 90,29, 70,81, 20,51, 100, 97,26 e 91,01%, respectivamente. Para as membranas de MF e UF foram obtidas eficiências de 100% na remoção de coliformes termotolerantes. Para o ensaio de MF seguida de UF nas melhores condições de operação determinadas, foram obtidos resultados bastante consideráveis para DBO, DQO, turbidez e sólidos totais voláteis, de 97,64, 97,29, 100 e 93,11%, respectivamente. As membranas de MF e UF apresentaram fluxos permeados bastantes semelhantes e, mesmo com o aumento da pressão, os fluxos permeados não apresentaram valores muito diferentes, sendo que as duas membranas de MF e UF tem bastante influência da incrustação em sua superfície, causando o rápido declínio do fluxo permeado.

Mesmo com o tamanho do poro menor que o da membrana de MF, a membrana de UF apresentou fluxo permeado mais elevado que a MF. Comparando os resultados dos parâmetros físico-químicos e biológicos dos processos de MF e UF com os padrões de reúso de efluentes, houve atendimento satisfatório dos parâmetros para o reúso em caldeiras, torres de resfriamento, lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos, proteção contra incêndio e descarga sanitária.

**Palavras-chave:** Leite. Ultrafiltração. Microfiltração. Água. Reúso.



## ABSTRACT

GALVÃO, Douglas Felipe. **Post-treatment wastewater by membrane technology and water reuse in a dairy industry**. 2016. 117 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2016.

The dairy industry uses substantial amount of water to achieve the production process, especially for the maintenance of hygiene and cleanliness conditions. With this, is generating considerable volume of wastewater requiring treatment to meet the discharge standards before discarded. With the shortage of water resources and charging for water use, minimizing water consumption in industries is of paramount importance to maintain its market competitiveness. In this sense, there has been increasing interest in the reuse of wastewater, in order to decrease the good water consumption by processes that do not require such high quality that feature. Membrane separation processes are highlighted in generating good quality reuse water that can meet the demand of various industrial processes. Thus, the present study aimed to evaluate the membrane separation processes such as post-treatment of dairy industry effluent with a view to reuse of this effluent. For this, the physical-chemical and microbiological characterization of the studied dairy wastewater was held, achieving the separation processes microfiltration membranes (MF) and ultrafiltration (UF), and microfiltration followed by ultrafiltration (MF + UF). The MF and UF processes were performed varying the pressure conditions applied, performing the evaluation of the quality of the effluent obtained after the separation of membrane processes, considering the compliance with technical, legal and sanitary requirements for different industrial uses. The results show that the MF and UF processes have considerable effectiveness in the treatment of the effluent from the dairy industry, with efficiencies reached 36.57% for total nitrogen, 98.39% for oils and greases, 97.27% for COD and 97.64% for BOD. The membrane MF demonstrated maximum efficiency in the removal of COD, BOD, ammonia nitrogen, phosphorus, turbidity, total volatile solids, oils and greases of 97.27, 96.79, 73.96, 38.46, 100, 95.89 and 87.79%, respectively. The UF membrane had removal efficiency of COD, BOD, ammonia nitrogen, phosphorus, turbidity, total volatile oils and greases and solids of 97.27, 90.29, 70.81, 20.51, 100, 97.26 and 91.01%, respectively. For membrane MF and UF 100% efficiencies were obtained in the removal of thermotolerant coliforms. For MF tests followed by UF with the best certain operating conditions, were obtained quite considerable results for BOD, COD, turbidity, and total volatile solids, 97.64, 97.29, 93.11 and 100%, respectively. MF and UF membranes showed quite similar permeate fluxes and even with increasing pressure, permeate flows had not very different values, while the two membranes MF and UF has enough influence of fouling on its surface, causing rapid decline in the permeate flux. Even with a pore size smaller than the MF membrane, UF membrane showed higher permeate flux than MF. Comparing the results of physico-chemical parameters and biological of MF and UF processes with the patterns of reuse of wastewater,

there was satisfactory compliance with the parameters for reuse in boilers, cooling towers, floor washing, irrigation of green areas, washing vehicles, fire protection and sanitary discharge.

**Keywords:** Milk. Ultrafiltration. Microfiltration. Water. Reuse.

## LISTA DE SIGLAS

AATS	Amostra Após Tratamento Secundário
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Acetato de Celulose
AFF	Amostra após Flotador Físico-químico
APHA	<i>American Public Health Association</i>
CC	Coeficiente de Colmatação
CEMA	Conselho Estadual do Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
Fc	Fator de Concentração
IQP	Índice de Qualidade do Permeado
kDa	Quilo Dalton
LPM	Litros por minuto
MF	Microfiltração
NBR	Normas Brasileiras Regulamentadoras
NF	Nanofiltração
NMP	Número mais provável
NTK	Nitrogênio Total Kjeldahl
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
OR/RO	Osmose Reversa
pH	Potencial Hidrogeniônico
PAN	Poliacrinonitrila
PEI	Polieterimida
PES	Polietersulfona
PM	Peso Molecular
PP	Polipropileno
PS	Polisulfona
PVC	Policloreto de Vinila
PVDF	Fluoreto de polivinilideno
RPM	Rotações por minuto
SDT	Sólidos Dissolvidos totais
SEBRAE	Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas
SS	Sólidos Suspensos
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
STF	Sólidos Totais Fixos
STV	Sólidos Totais Voláteis
UF	Ultrafiltração
UFC	Unidade de Formação de Colônias
Vp	Volume Permeado

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representando a entrada do líquido, a saída do permeado e do concentrado (retentado). .....	38
Figura 2 – Partículas e moléculas retidas de acordo com o tipo de processo de separação por membranas.....	40
Figura 3 – Exemplo de Módulo de placas. ....	41
Figura 4 – Exemplo de Módulo Tubular. ....	42
Figura 5 – Exemplo de Módulo Espiral.....	43
Figura 6 – Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes.....	51
industrial e pontos de coleta.....	51
Figura 7 – Módulo de Tratamento por membranas de bancada.....	53
Figura 8 – Esquema com os equipamentos, instrumentos e válvulas de operação do módulo. ....	54
Figura 9 – (A) Módulos de MF (azul) e UF (vermelho); (B) Imagem das fibras internas da membrana de UF. ....	55
Figura 10 – Amostras de efluente: (A) Amostra de efluente após lagoa aerada (AATS); (B) Amostra efluente após o flotador (AAF). ....	64
Figura 11 – Fluxo permeado no decorrer do tempo e à variação da pressão (pressurização e despressurização) da membrana MF 158, com água destilada.....	66
Figura 12 – Fluxo permeado no decorrer do tempo e à variação da pressão (pressurização e despressurização) da membrana UF 257, com água destilada. ....	66
Figura 13 – Permeabilidade para água destilada da membrana de MF 158. ....	67
Figura 14 – Permeabilidade para água destilada da membrana de UF 257. ....	68
Figura 15 – Fluxo permeado no decorrer do tempo e à variação da pressão (pressurização e despressurização) da membrana de microfiltração (MF 158) com efluente de laticínio. ....	69
Figura 16 – Fluxo permeado no decorrer do tempo e à variação da pressão (pressurização e despressurização) da membrana de ultrafiltração (UF 257) com efluente de laticínio. ....	69

Figura 17 - Comportamento do fluxo permeado de água destilada em função do diferencial de pressão aplicado à membrana de microfiltração (MF 158) e de ultrafiltração (UF 257).....	70
Figura 18 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente após o tratamento secundário (AATS) em função do diferencial de pressão aplicado às membranas de microfiltração (MF 158) e ultrafiltração (UF 257). ....	71
Figura 19 – Comportamento do fluxo permeado na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio. ....	74
Figura 20 – Comportamento do fluxo permeado na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio. ....	77
Figura 21 – Aspecto visual das amostras de permeado de MF 158 (A) e UF 257 (B). ....	79
Figura 22 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais por fator de concentração, na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio. ....	81
Figura 23 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais Fixos por fator de concentração, na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio. ....	82
Figura 24 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais Voláteis por fator de concentração, na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio.....	82
Figura 25 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais por fator de concentração, para a membrana de UF (257) nas pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de laticínio. ....	85
Figura 26 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais Fixos por fator de concentração, para a membrana de UF (257) nas pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de laticínio. ....	85
Figura 27 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais Voláteis por fator de concentração, para a membrana de UF (257) nas pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de laticínio. ....	86
Figura 28 – Fluxo permeado para a membrana de MF, pressão 0,75 bar, durante os ensaios de MF+UF (T9). ....	90

Figura 29 – Fluxo permeado para a membrana de UF, pressão 1,5 bar, durante os ensaios de MF+UF (T9). .....	90
Figura 30 – Fluxo permeado para a membrana de MF, pressão 0,75 bar, e UF, 1,5 bar, durante os ensaios de retenção de coliformes termotolerantes. ....	92
Figura 31 – Fluxo permeado para a membrana de MF, durante os ensaios de retenção de nutrientes, pressão 0,75 bar, MF (T10). ....	95
Figura 32 – Fluxo permeado para a membrana de UF, durante os ensaios de retenção de nutrientes, pressão 1,5 bar (T11). ....	98
Figura 33 – Fluxo permeado para a membrana de MF com efluente de laticínio (AAF), durante os ensaios de retenção de nutrientes, pressão 0,75 bar (T12). ....	100

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Tipos de polímeros utilizados na produção das diferentes membranas..	44
Quadro 2 – Propriedades das membranas de microfiltração (MF 158) e de ultrafiltração (UF 257).....	56

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ranking brasileiro das maiores indústrias de laticínios em quantidade de leite adquirida em 2014. ....	24
Tabela 2 – Consumo de água na indústria de laticínios em diferentes linhas de produção. ....	26
Tabela 3 – Consumo de água em laticínios de diferentes países europeus e nórdicos. ....	27
Tabela 4 – Volume de efluente gerado por quilograma de leite processado nas diferentes linhas de produção da indústria de laticínios. ....	28
Tabela 5 – Caracterização físico-química dos efluentes da indústria de laticínios. ....	29
Tabela 6 – padrões de qualidade para águas de reúso citados por Fappi (2015). ...	37
Tabela 7 – Tipo de membrana, porosidade e força motriz. ....	40
Tabela 8 – Densidade de empacotamento dos diferentes tipos de módulos de membranas. ....	44
Tabela 9 - Parâmetros para caracterização dos efluentes agroindustriais. ....	52
Tabela 10 – Condições experimentais estabelecidas para os processos de separação por membranas. ....	57
Tabela 11 – Recebimento de leite de janeiro a junho de 2015. ....	62
Tabela 12 – Características qualitativas das amostras de efluente utilizadas nos ensaios. ....	64
Tabela 12 – Características qualitativas das amostras de efluente utilizadas nos ensaios. ....	65
Tabela 13 – Coeficiente de Colmatação das membranas de MF e UF, nas diferentes pressões e nos tempos de 30 e 60 minutos. ....	72
Tabela 14 – Percentual de redução do fluxo (%) referente a membrana de microfiltração (158) nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de indústria de laticínio após o tratamento secundário. ....	75
Tabela 15 – Percentual de queda do fluxo referente a membranas de ultrafiltração (257) às pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de indústria de laticínio após o tratamento secundário. ....	77



Tabela 15 – Percentual de queda do fluxo referente a membranas de ultrafiltração (257) às pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de indústria de laticínio após o tratamento secundário.....	78
Tabela 16 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de MF 0,5 bar.....	80
Tabela 17 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de MF 0,75 bar.....	80
Tabela 18 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de MF 1,0 bar.....	81
Tabela 19 – Resultados por fator de concentração (Fc) e eficiência do processo (%) para a membrana de UF 0,5 bar.....	84
Tabela 20 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de UF 1,0 bar.....	84
Tabela 21 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de UF 1,5 bar.....	84
Tabela 22 – Índice de qualidade do permeado, por pressão e fator de concentração para a membrana de MF.....	87
Tabela 22 – Índice de qualidade do permeado, por pressão e fator de concentração para a membrana de MF.....	88
Tabela 23 – Índice de qualidade do permeado, por pressão e fator de concentração para a membrana de UF.....	89
Tabela 24 – Eficiência no tratamento de efluente de laticínio da membrana de MF seguida de UF.....	91
Tabela 25 – Eficiência no tratamento de efluente Laticínio para a membrana de MF 158.....	93
Tabela 26 – Eficiência no tratamento de efluente Laticínio para a membrana de UF 257.....	93
Tabela 27 - Eficiência na remoção de parâmetros físico-químicos pela MF (158) no tratamento de efluente de laticínio – AATS – ponto de coleta 1.....	96
Tabela 28 - Eficiência na remoção de nutrientes pela membrana de UF (257) no tratamento de efluente de laticínio – AATS – ponto de coleta 1.....	98

Tabela 29 – Porcentagem de redução do fluxo no decorrer do ensaio de microfiltração com amostra coletada após o Flotador Físico-químico, no ponto de coleta 2 - AAF.....	100
Tabela 30 – Características da amostra coletada após o Flotador físico-químico (AAF) e eficiência na remoção de nutrientes pela membrana de MF (158) no tratamento de efluente de laticínio com amostra coletada após o Flotador Físico-químico, no ponto de coleta 2 - AAF. ....	102
Tabela 31 - Requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reúso de efluentes e médias encontradas para a MF (AATS), UF (AATS), MF (AAF) e MF+UF. ....	104

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>21</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>23</b>
2.1 PRODUÇÃO DE LEITE E A INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS .....	23
2.2 ÁGUA NA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS .....	25
2.2.1 Efluentes líquidos da indústria de laticínios .....	28
2.3 REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA .....	30
2.3.1 Reúso macro externo .....	31
2.3.2 Reúso macro interno .....	33
2.4 ENQUADRAMENTO PARA O REÚSO DA ÁGUA.....	35
2.5 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS.....	38
2.5.1 Classificação dos processos de separação por membranas.....	39
2.5.2 Materiais para produção de membranas .....	44
2.5.3 Operação dos processos de separação por membranas e fatores que influenciam no fluxo.....	45
2.5.4 Alguns estudos utilizando os processos de separação por membranas .....	47
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>49</b>
3.1. OBJETIVO GERAL .....	49
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	49
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>50</b>
4.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE COLETA DE AMOSTRAS.....	50
4.2 COLETA DE AMOSTRAS NO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	50
4.3 UNIDADE EXPERIMENTAL DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS.....	52
4.4 CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS DE MICROFILTRAÇÃO E ULTRAFILTRAÇÃO .....	55
4.5 EXPERIMENTOS DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS .....	56
4.5.1 Índice de Qualidade do Permeado (IQP).....	59
4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA e MICROBIOLÓGICA DAS AMOSTRAS DE EFLUENTE.....	59
4.7 LIMPEZA DAS MEMBRANAS.....	60
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>62</b>

5.1 CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA .....	62
5.2 COMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES .....	63
5.2.1 Pressurização e despressurização das membranas com água destilada e com efluente de laticínio .....	65
5.3.2 Coeficiente de Colmatação para as membranas de microfiltração e ultrafiltração.....	72
5.3.3 Comportamento do fluxo permeado para membrana de microfiltração.....	73
5.3.4 Comportamento do fluxo permeado para membrana de ultrafiltração .....	76
5.3.5 Eficiência do sistema de tratamento de microfiltração em relação aos fatores de concentração.....	80
5.3.6 Eficiência do sistema de tratamento de ultrafiltração em relação aos fatores de concentração.....	83
5.4 CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DO PERMEADO (IQP) .....	87
5.4.1 Índice de Qualidade do Permeado para a membrana de microfiltração.....	87
5.4.2 Índice de Qualidade do Permeado para a membrana de ultrafiltração .....	88
5.5 ENSAIOS DE MICROFILTRAÇÃO SEGUIDA DE ULTRAFILTRAÇÃO (MF+UF).....	89
5.6 RETENÇÃO DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES PELAS MEMBRANAS DE MICROFILTRAÇÃO E ULTRAFILTRAÇÃO .....	92
5.7 ENSAIOS DE RETENÇÃO DE NUTRIENTES PARA AS MEMBRANAS DE MF E UF.....	95
5.7.1 Membrana de MF 158 - efluente AATS .....	95
5.7.2 Membrana de UF 257 - efluente AATS .....	97
5.7.3 Membrana de MF 158 - efluente AAF .....	99
5.8 ANÁLISE DOS PARÂMETROS COM RELAÇÃO AO ATENDIMENTO DOS PADRÕES DE REÚSO DE EFLUENTES .....	103
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>107</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>109</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As indústrias são grandes consumidoras de água em seus processos produtivos, sendo responsáveis por, aproximadamente, 20% do consumo mundial de água (MILLER JR., 2008).

A indústria de laticínios é responsável pelo consumo de elevado volume de água, sendo o recurso natural mais utilizado na indústria. A necessidade de água ocorre, principalmente, pela manutenção de condições de limpeza, sanitárias e de higiene dentro dos setores de produção.

Com o elevado consumo de água, ocorre a geração de grandes vazões de efluentes, o que torna a indústria de laticínios um potencial poluidor. Os efluentes da indústria de laticínios apresentam em sua composição matéria orgânica, soro e demais constituintes do leite, produtos de limpeza e sabões. É necessário o tratamento deste efluente com o objetivo de atender aos padrões de lançamento previstos na legislação e, conseqüentemente, reduzir as cargas poluentes lançadas no meio hídrico.

Com a escassez de água e a necessidade de pagamento por esse recurso, a minimização do consumo torna-se essencial. O uso consciente, novas tecnologias que utilizam menos água para a realização do mesmo processo e a adoção de formas de reúso podem ser atitudes relevantes para a redução do consumo de água pelo setor industrial.

Nesse sentido, torna-se importante o estudo para a proposição de métodos de tratamento de efluentes e reúso de água na indústria de laticínios, para a redução do consumo e, conseqüentemente, da geração de efluentes. As possibilidades de reúso do efluente após tratamento para os processos industriais ficam restritas por se tratar de uma indústria de produção de alimentos. Entretanto, há a possibilidade de reúso para áreas como: limpeza de pisos, regas de jardim, águas de resfriamento e águas de utilização em caldeiras.

O reúso de água na indústria permite a utilização de água de menor qualidade (efluente) em outros processos, desde que atendidas as qualidades de água necessária para o processo. Deve-se considerar que a concentração de determinados contaminantes aumenta conforme se aplica o reúso, o que pode

comprometer a prática do reúso se não levar esse aumento de concentração em consideração (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Os processos de separação por membranas têm se destacado nos últimos anos no que se refere ao tratamento de efluentes para seu reúso, pois permite a utilização de sistemas compactos de tratamento, gerando águas de reúso de boa qualidade, que possibilitam grandes economias para as indústrias.

Em sistemas de separação por membranas são utilizadas membranas sintéticas, que imitam as características de seletividade das membranas naturais, no sentido de separar, concentrar ou purificar as substâncias presentes na água, tornando-a de melhor qualidade. Deve-se aplicar um gradiente de pressão hidráulica ou campo elétrico para que a separação ocorra (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Os processos utilizando membranas principais são basicamente cinco: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose reversa e eletrodialise. A diferença de cada uma é o tamanho dos poros da membrana e com qual intensidade a força motriz promove a separação dos contaminantes (SCHNEIDER; TSUTYIA, 2001).

A qualidade da água requerida para determinados processos pode ser atendida pelas características físico-químicas e biológicas dos efluentes tratados pelas membranas. Destarte, a criação de sistemas de tratamento e produção de águas de reúso poderá gerar renda, economia de água potável e redução de investimentos para a coleta e tratamento de efluentes líquidos.

O presente estudo consiste no tratamento de efluente de uma indústria de laticínios da região oeste do Estado do Paraná, por meio de membranas de microfiltração e ultrafiltração propondo-se formas de reúso na própria indústria para esse efluente tratado.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 PRODUÇÃO DE LEITE E A INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

O homem alimenta-se do leite de vaca e de outros mamíferos *in natura* ou na forma de produtos elaborados como o queijo, manteiga, iogurte, entre outros. O leite é uma mescla de substâncias como proteínas, minerais, água, lipídios, enzimas, vitaminas, glicídios, entre outras (BEZERRA, 2011).

A composição percentual média do leite produzido por diferentes raças é de 87,5% de água e 12,5% de extrato seco total. Neste extrato seco, encontram-se 4,7% de lactose, 3,5% de proteínas, 3,5% de gorduras, e teor de 0,8% de sais minerais (FIEMG, 2014).

No ano de 2014, o país chegou a uma produção de 35,2 bilhões de litros de leite, crescimento de 2,7% com relação a 2013. A região sul do Brasil é responsável pela produção de 12,2 bilhões de litros, que equivale a 34,7% do total de leite produzido, sendo a região brasileira com maior produção. A região sudeste foi a segunda maior produtora, com 12,17 bilhões de litros, equivalente a 34,6% do total (IBGE, 2014).

A produção de leite que em 2003 era de 22,2 bilhões de litros, cresceu 57% na última década, sendo que, o aumento da produtividade e do rebanho de ordenha ajudaram nesse crescimento. A produtividade média no Brasil em 1980 era de 676 litros/vaca/ano, passando para 1.381 litros/vaca/ano em 2011 (FIEMG, 2014).

Do total de leite produzido no país em 2014, aproximadamente 70,3% foi industrializado. Tal levantamento investiga somente estabelecimentos industriais que atuam sob algum tipo de inspeção sanitária federal, estadual ou municipal, e registrou a aquisição de 24,75 bilhões de litros de leite pela indústria láctea em 2014 (IBGE, 2014).

No Brasil estão presentes grandes indústrias de processamento de leite. O ranking brasileiro das maiores indústrias de laticínios de 2014, segundo a quantidade de leite adquirida, está disposto na Tabela 1. A estimativa da capacidade

instalada de processamento de leite dessas indústrias juntas, em 2014, foi de 14.219,08 milhões de litros (LEITE BRASIL, 2014).

**Tabela 1 – Ranking brasileiro das maiores indústrias de laticínios em quantidade de leite adquirida em 2014.**

Classificação	Empresas/Marcas	Quantidade de Leite processado (milhões de litros)
1º	DPA	2.000,00
2º	BRF	1.424,62
3º	CCPR/ITAMBÉ	1.222,37
4º	LATICÍNIOS BELA VISTA	1.032,09
5º	COOPs, CASTROLANDA, BATAVO E CAPAL	765,93
6º	EMBARÉ	564,95
7º	AURORA	518,90
8º	DANONE	457,69
9º	CONFEPAR	418,97
10º	JUSSARA	318,12
11º	VIGOR	270,06
12º	CENTROLEITE	260,70
13º	FRIMESA	259,20

Fonte: Adaptado de Leite Brasil (2014).

Para o mercado de alimentos, o setor de laticínios é um dos três principais *commodities* mais consumidos, ficando atrás apenas dos derivados de carne (1º) e o que se refere ao beneficiamento de café, cereais e chás (2º) (MENDES, 2014).

Os dados citados refletem a grande importância do setor leiteiro e, conseqüentemente, da indústria de laticínios, para a economia brasileira. A indústria de processamento dos derivados do leite é uma das principais atividades industriais que se apresentam na agricultura brasileira e é caracterizada pela sua ampla gama de produtos e, conseqüentemente, de linhas de produção (JERÔNIMO et al., 2012).

Nesse sentido, de acordo com Maganha (2008), a indústria de laticínios depende da qualidade e do custo de seus produtos. No caso brasileiro, irá depender principalmente da redução de custos e desperdícios, pois grande parte dos



consumidores desse setor considera o preço, em vez da qualidade, para decidir sobre a aquisição dos produtos.

Além disso, com o aumento da competitividade devido a entrada de empresas de grande porte no mercado, que necessitam de ganho em escala, exigindo melhor qualidade da matéria prima, o setor leiteiro brasileiro vem passando por muitas modificações e adaptações (JERÔNIMO et al., 2012).

Na indústria de laticínios, há uma diferenciação com relação a dois termos, de acordo com o Ministério de Agricultura e Pecuária: Leite e Produtos Lácteos. O primeiro, é o produto oriundo da ordenha completa e sem interrupções, em condições higiênicas, de vacas leiteiras saudáveis; o segundo termo se refere ao produto que se obtém quando da elaboração do leite que pode ter aditivos alimentícios e ingredientes funcionais, necessários para sua elaboração (BRASIL, 2005).

## 2.2 ÁGUA NA INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS

Na indústria, a água apresenta diversos tipos de uso, os principais são apresentados a seguir (FIESP, 2004):

- a) Consumo humano: água utilizada em ambientes sanitários, vestiários, cozinhas e refeitórios, bebedouros, equipamentos de segurança ou em qualquer atividade doméstica com contato humano direto;
- b) Matéria-prima: como matéria-prima, a água será incorporada ao produto final, a exemplo do que ocorre nas indústrias de cervejas e refrigerantes, ou a água é utilizada para obtenção de outros produtos, por exemplo, o hidrogênio por eletrólise da água;
- c) Uso como fluido auxiliar: a água, como fluido auxiliar, destaca-se para a preparação de suspensões e soluções químicas, compostos intermediários, reagentes químicos, veículo, ou ainda, para as operações de lavagem.
- d) Uso para geração de energia: transformação da energia cinética, potencial ou térmica, acumulada na água, em energia mecânica e elétrica.

- e) Uso como fluído de aquecimento e/ou resfriamento: nestes casos a água é utilizada como fluido de transporte de calor para remoção do calor de misturas reativas ou outros dispositivos que necessitem de resfriamento.
- f) Outros usos: utilização de água para combate ao incêndio, rega de áreas verdes ou incorporação em diversos subprodutos gerados nos processos industriais, seja na fase sólida, líquida ou gasosa.

Na indústria de laticínios o consumo de água é significativo, sendo o recurso natural mais empregado neste setor (MAGANHA, 2008). Saraiva et al. (2009) e Silva (2006) encontraram os coeficientes de consumo dispostos na Tabela 2, os quais são referentes aos tipos de produtos produzidos.

**Tabela 2 – Consumo de água na indústria de laticínios em diferentes linhas de produção.**

Atividade/produto	Consumo de Água (L L <sup>-1</sup> de leite processado)	
	(1)	(2)
Iogurte	10	5,15
Manteiga	1	-
Queijo mussarela	1,55	-
Ricota	0,2	-
Requeijão (barra)	1,4	-
Requeijão (pote)	1,39	-
Doce de leite	-	9,14

Fonte: (1) Adaptado de Saraiva et al., 2009; (2) Adaptado de Silva, 2006.

O consumo de água é bastante variável, tendo relação com o porte do laticínio, a padronização das atividades, práticas de reúso, as tecnologias empregadas, além do tipo de produto produzido. Os consumos médios citados para diferentes países europeus e nórdicos são expostos na Tabela 3.

**Tabela 3 – Consumo de água em laticínios de diferentes países europeus e nórdicos.**

Produto	Consumo de Água (L L <sup>-1</sup> de leite processado)			
	Suécia	Dinamarca	Finlândia	Noruega
Leite e iogurte	0,96 a 2,8	0,6 a 0,97	1,2 a 2,9	4,1
Queijos	2,0 a 2,5	1,2 a 1,7	2,0 a 3,1	2,5 a 3,8
Leite em pó e/ou produtos líquidos	1,7 a 4,0	0,69 a 1,9	1,4 a 4,6	4,6 a 6,3

Fonte: Adaptado de Maganha (2008).

O alto consumo de água na indústria de laticínios é relacionado a necessidade de manutenção das condições sanitárias e de higiene e deve-se, principalmente, às operações de limpeza, lavagem da massa láctea, resfriamento e geração de vapor (MAGANHA, 2008).

De acordo com Vourch et al. (2008), citam que o consumo de água das indústrias de laticínios irá depender do volume de leite que é processado, da qualidade da água requerida para os diferentes processos industriais, além das práticas de gerenciamento da água na indústria.

Através da análise dos dados dispostos nas Tabelas 2 e 3 é possível perceber que, o maior coeficiente de consumo encontrado por Saraiva et al. (2009) foi para a produção de iogurte, apresentando um consumo de 10 litros de água para cada litro de leite processado. Tal valor ficou acima das demais linhas de produção e ficou bem acima dos valores citados por Maganha (2008), para os países europeus e nórdicos.

Diferentemente de Saraiva et al. (2009), Silva et al. (2006) encontraram consumo alto para a produção de doce de leite, porém, citaram a possibilidade de padronização de processos, diminuição do desperdício por parte dos funcionários do laticínio e adoção de práticas de reúso como formas de diminuição do consumo dessa linha de produção.

Observando-se os dados, nota-se que, o consumo pode variar bastante de acordo com as linhas de produção, bem como, as práticas de gerenciamento hídrico das indústrias de laticínios, o que torna de grande importância o desenvolvimento de estudos referentes a melhores formas de uso e de reúso de água.

### 2.2.1 Efluentes Líquidos da indústria de laticínios

Os efluentes industriais são correntes líquidas oriundas dos processos, operações e utilidades nas indústrias (CAVALCANTI, 2012). Podem ser consideradas também as correntes oriundas dos processos e operações nos quais utiliza-se água, não havendo, contudo, a incorporação desta no produto final, além da parcela líquida proveniente da matéria-prima que é removida nos processos industriais (PIRES; DAMIANOVIC; DEL NERY, 2013).

Os efluentes industriais variam de acordo com as tecnologias que são empregadas nos processos produtivos, os valores das matérias-primas e insumos, da idade da indústria e a especialização dos operadores de equipamentos, além da forma de operação se é contínua ou intermitente (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

As características dos efluentes podem ser de biodegradabilidade, semelhante aos esgotos sanitários, ou completamente não biodegradáveis, principalmente os oriundos de indústrias de produtos metálicos como as de galvanoplastia. As indústrias alimentícias, de papel e celulose e sucroalcooleiras, caracterizam-se pela geração de efluentes biodegradáveis e ricos em matéria orgânica (PIRES; DAMIANOVIC; DEL NERY, 2013).

Em se tratando de indústrias alimentícias, a de laticínios caracteriza-se por grande consumo de água e, conseqüentemente, elevada produção de efluentes. Na Tabela 4 são citados os volumes de efluentes gerados em indústrias de laticínios, conforme o tipo de produto produzido.

**Tabela 4 – Volume de efluente gerado por quilograma de leite processado nas diferentes linhas de produção da indústria de laticínios.**

<b>Tipo de Produto</b>	<b>Volume de efluentes líquidos (L kg<sup>-1</sup> de leite processado)</b>
Produtos “brancos” (leite, cremes e iogurtes)	3
Produtos “amarelos” (manteiga e queijos)	4
Produtos “especiais” (concentrados de leite ou soro e produtos lácteos desidratados)	5

Fonte: Maganha (2008).

Para Tchamango et al. (2010), os laticínios caracterizam-se pela elevada geração de efluentes líquidos, com alta Demanda Química de Oxigênio (DQO) oriunda de sua alta carga orgânica. Em muitos casos o efluente gerado acaba sendo lançado diretamente nos rios, contribuindo para sua eutrofização pelos componentes de fósforo e nitrogênio presentes no efluente.

As características dos efluentes gerados variam bastante conforme o padrão e as tecnologias utilizadas na indústria de laticínios. Em geral apresentam alta concentração de matéria orgânica, quantidades consideráveis de nutrientes, sólidos suspensos, poluentes orgânicos e agentes infectantes, além de resíduos de leite, proteínas, carboidratos, gorduras e resíduos de agentes de limpeza (LÁSLÓ et al., 2009; SARAIVA et al., 2009; ANDRADE et al., 2012).

Na Tabela 5 observa-se as características para os diferentes parâmetros do efluente bruto de laticínio, conforme Maganha (2008).

**Tabela 5 – Caracterização físico-química dos efluentes da indústria de laticínios.**

Parâmetro	Faixa de Variação	
	(1)	(2)
<b>Sólidos suspensos</b>	24 – 5700 mg L <sup>-1</sup>	100 – 1000 mg L <sup>-1</sup>
<b>Sólidos suspensos totais</b>	135 – 8500 mg L <sup>-1</sup>	100 – 2000 mg L <sup>-1</sup>
<b>DQO</b>	500 – 4500 mg L <sup>-1</sup>	6000 mg L <sup>-1</sup>
<b>DBO<sub>5</sub></b>	450 – 4790 mg L <sup>-1</sup>	4000 mg L <sup>-1</sup>
<b>Proteína</b>	210 – 560 mg L <sup>-1</sup>	ND
<b>Gordura/óleos e graxas</b>	35 – 500 mg L <sup>-1</sup>	95 – 550 mg L <sup>-1</sup>
<b>Carboidrato</b>	252 – 931 mg L <sup>-1</sup>	ND
<b>Amônia – N</b>	10 – 100 mg L <sup>-1</sup>	ND
<b>Nitrogênio</b>	15 – 180 mg L <sup>-1</sup>	116 mg L <sup>-1</sup>
<b>Fósforo</b>	20 – 250 mg L <sup>-1</sup>	0,1 – 46 mg L <sup>-1</sup>
<b>Sódio</b>	60 – 807 mg L <sup>-1</sup>	ND
<b>Cloretos</b>	48 – 469 mg L <sup>-1</sup>	ND
<b>Cálcio</b>	57 – 112 mg L <sup>-1</sup>	ND
<b>Magnésio</b>	22 – 49 mg L <sup>-1</sup>	ND
<b>Potássio</b>	11 – 160 mg L <sup>-1</sup>	ND
<b>pH</b>	5,3 – 9,4	1 – 12
<b>Temperatura</b>	12 – 40°C	20 – 30°C

(1) Environment Agency of England and Wales, 2000; European Commission – Integrated Pollution Prevention and Control Jan/2006. (2) Associação Brasileira da Indústria de Queijo (ABIQ).

Estas águas residuárias, se despejadas nos recursos hídricos sem um tratamento adequado, poderão causar diversos problemas, tais como a mortandade das espécies aquáticas, prejuízo à saúde pública pelo consumo de água contaminada e aumento nos custos de tratamento deste recurso (SCHMITT et al., 2014; LIMA, 2010).

De tal maneira, torna-se importante utilizar sistemas de tratamento de efluentes otimizados que sejam integrados com a identificação dos pontos de geração de despejos líquidos no processo de produção, para que, se possa chegar a uma produção sustentável (SARAIVA et al., 2009).

### 2.3 REÚSO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

A cobrança pelo uso da água aliada a seu grande consumo na indústria, tem levado este segmento a buscar alternativas internas de reúso e a considerar a compra de efluentes tratados de companhias de saneamento a preços inferiores aos da água potável (CONSTANZI, 2007).

Nesse sentido, Hespanhol (2002) afirma que, deve-se optar por satisfazer àquelas demandas que exigem águas de qualidade não muito alta por fontes menos nobres e utilizar-se de fontes de qualidade superior somente para usos mais nobres, como o abastecimento doméstico.

Em resposta a tais condições, tem aumentado o desenvolvimento das tecnologias de tratamento de efluentes, a fim de satisfazer os limites de qualidade para o reúso. Assim, águas de reúso podem tornar-se uma importante contribuição para o suprimento de água na indústria (ÁREVALO et al., 2012; ANDRADE et al., 2012; ANDRADE et al., 2014; VOURCH et al., 2008).

Pode-se definir reúso como a utilização do efluente diretamente ou após alguma etapa de tratamento em outros processos, de acordo com a qualidade de água requerida. Nem toda a parcela de efluente gerada, precisa ser tratada para ser reutilizada, porém, em determinados casos, há necessidade de tratamentos específicos para purificação (TELLES; COSTA, 2010).

O reúso pode ser concebido também como a utilização de efluentes tratados ou não para fins que sejam benéficos, como a irrigação, o uso industrial e fins urbanos que não sejam potáveis (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Mierzwa (2002) afirma, entretanto, que a prática do reúso não deve ser vista como a meta de todo modelo de gerenciamento de recursos hídricos em uma indústria, não atendendo aos requisitos da Agenda 21, a qual expõe o uso racional da água como meta principal.

Alguns processos industriais, mais especificamente os da indústria alimentícia, não permitem a utilização de águas de reúso em seus processos de produção. Entretanto, mesmo nestas indústrias, há a possibilidade de reutilização da água em processos que exigem qualidade de água menos nobres, como para refrigeração, alimentação de caldeiras, limpeza de pisos, descargas sanitárias em banheiros, entre outros.

Devido às técnicas de tratamento existentes nas indústrias, um efluente tratado pode apresentar características físicas, químicas ou biológicas semelhantes ou até melhores que as da água bruta. Da mesma forma, efluentes de determinados processos apresentam qualidade adequada a outros processos, sem a necessidade de tratamento (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Nesse sentido, o reúso de água industrial pode ser classificado em duas formas amplas de aplicação, quais sejam: o reúso macro externo, que se refere ao uso de efluentes tratados provenientes de estações administradas por concessionárias ou outras indústrias; e o reúso macro interno, referente ao uso interno de efluentes, tratados ou não, provenientes de atividades realizadas na própria indústria (FIRJAN, 2006).

### 2.3.1 Reúso macro externo

O reúso macro externo refere-se à reutilização de efluentes que são oriundos de estações de tratamento administradas por outras concessionárias ou até mesmo por outras indústrias (FIESP, 2004).

No reúso macro externo, a indústria precisa de avaliação técnica e financeira, quanto a viabilidade de instalar um sistema de tratamento adicional, para atender aos padrões de qualidade exigidos, além dos sistemas adutores e de distribuição do efluente (OENNING JR., 2006).

Mancuso e Santos (2003) afirmam que o sistema de reúso macro externo torna-se viável com aglomerados de indústrias, associadas ao programa de reúso e que sejam próximas, cerca de 5 quilômetros, no entorno da estação de tratamento e recuperação para o reúso. Nessas áreas de concentração de indústrias, os usos industriais passíveis de reúso seriam:

- Torres de resfriamento;
- Caldeiras;
- Lavagem de peças e equipamentos (metalúrgicas e mecânicas);
- Irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos e pisos.

Conforme Mancuso e Santos (2003), os sistemas de reúso macro externo poderão, além de atender a demanda industrial, ser utilizados a uma gama significativa de usos urbanos não-potáveis. Entretanto, Cavalcanti (2012) menciona que, de qualquer forma, nas atividades industriais, apenas há viabilidade do reúso para fins não-potáveis.

Considerando as indústrias como grandes consumidoras de recursos hídricos, o reúso de água é de fundamental importância, não só pelos benefícios econômicos por redução de custos, mas, da mesma forma, pelos benefícios ambientais, podendo-se citar a redução da utilização de água de boa qualidade para fins menos nobres, preservação de águas subterrâneas e a minimização da poluição dos corpos hídricos (MIERZWA; HESPANHOL, 2005; HESPANHOL, 2002).

No Brasil, pode-se citar um grande aglomerado de indústrias que já é alimentado por sistemas de reúso. Este sistema, produz água de reúso industrial a partir de estação de tratamento de esgotos de São Paulo e, de acordo com a Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo (Sabesp), o sistema denominado Estação de Produção de Água Industrial Aquapolo, tem capacidade de produção de  $830 \text{ L s}^{-1}$  de água de reúso e atende atualmente 50 empresas (VASCONCELOS, 2015).



### 2.3.2 Reúso macro interno

O reúso macro interno é o uso interno de efluentes, tratados ou não, provenientes de atividades realizadas na própria indústria, sendo a forma mais aplicada atualmente pelas indústrias (FIRJAN, 2006).

O reúso dos efluentes de quaisquer processos industriais, nos próprios processos nos quais são gerados ou em outros que se desenvolvem na sequência, precisa considerar a necessidade desta água residuária estar em conformidade com a qualidade requerida no processo no qual pretende-se reusar (MANCUSO; SANTOS, 2003).

Cada processo industrial necessita de água de qualidade química, física e biológica adequada. Desta forma, antes da aplicação do reúso é necessário estudar o seu potencial. A água após o uso industrial, possui diversas substâncias que a caracterizam como efluente. Como os padrões de lançamento de efluentes, na maioria dos casos, são menos restritivos que os de qualidade da água, o reúso pode não ser interessante para determinadas indústrias, do ponto de vista econômico (MIERZWA, 2002).

Mierzwa e Hespanhol (2005) relatam duas práticas principais para o reúso macro interno, o reúso em cascata e o reúso de efluentes tratados.

#### 2.3.2.1 Reúso em cascata

O reúso em cascata é um tipo de uso macro interno, no qual o efluente industrial originado em um determinado processo é diretamente utilizado em um processo subsequente (FIESP, 2004). É importante ressaltar a necessidade de se verificar se a qualidade da água do efluente é adequada para o processo seguinte.

Este tipo de reúso é o mais interessante para as indústrias, pois, da mesma forma que a quantidade de água utilizada irá diminuir, a quantidade de efluente gerado também decai. Entretanto, a concentração dos contaminantes e poluentes

específicos acaba aumentando com este tipo de reúso (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Além disso, o reúso em cascata não necessita de tratamento do efluente, pois, este encontra-se na qualidade apropriada para ser reutilizado em outro processo que não exija uma qualidade alta, o que acaba diminuindo os valores dispendidos para o reúso de água.

É necessário levar em conta se a quantidade e a qualidade do efluente disponível, estão conforme a demanda e os padrões exigidos para o processo no qual pretende-se reusar o efluente (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

### 2.3.2.2 Reúso de efluentes tratados

É a forma de reúso que mais tem sido aplicada na indústria e é caracterizada pela utilização dos efluentes gerados no local em outros processos industriais, isso após tratamento adequado para se alcançar a qualidade necessária aos padrões de utilização que foram pré-estabelecidos (FIRJAN, 2006).

Conforme a qualidade da água necessária no processo e o escopo específico do reúso, serão estabelecidos os níveis de tratamento dos efluentes, quais critérios de segurança serão adotados, além dos custos de capital, de operação e de manutenção relacionados (HESPANHOL, 2002).

Devido as técnicas que são utilizadas no tratamento de efluentes nas indústrias, algumas vezes, o efluente tratado apresenta características melhores que das águas brutas, ou podem ter aspectos adequados para sua utilização em determinados processos (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

O reúso dos efluentes após tratamento pode ser feito de forma direta e após técnicas de tratamento complementares. O reúso de forma direta é realizado através do encaminhamento do efluente da estação de tratamento até o local onde será utilizado. Caso ainda haja neste efluente algum contaminante que precise ser eliminado para atender aos índices de qualidade exigidos, deve-se adotar técnicas complementares para o tratamento e posterior reúso (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Destacam-se ainda três categorias de água de reúso para indústria que apresentam grandes possibilidades de reaproveitamento: água de reúso em torres e lagos de resfriamento, sistemas de ciclo aberto (resfriamento) e alimentação de processos e caldeiras (CONSTANZI, 2007).

## 2.4 ENQUADRAMENTO PARA O REÚSO DA ÁGUA

No Brasil, há a carência de aspecto legal que traga padrões de qualidade para o reúso de água industrial. Existem algumas legislações e normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, que tratam do tema, porém, de forma bastante simplificada.

A Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos, estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. Essa resolução, considera os princípios de racionalização e conservação dos recursos hídricos expostos na Agenda 21, elencando o reúso como importante na racionalização do uso da água e na diminuição de sua poluição.

Esta Resolução incentiva o reúso de água em diversas modalidades, porém, não apresenta nenhum parâmetro específico para se considerar quando realiza-se o reúso.

Um dos sistemas normativos que apresenta o reúso da água, refere-se a NBR 13.969/97 da ABNT, que trata de Tanques Sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação. A norma cita como uma das formas de disposição final dos efluentes líquidos e o seu reúso. Considera principalmente o reúso de esgotos, porém, entende como possível o reúso para fins industriais e agrícolas dessa água.

De acordo com a NBR 13.969/97, o reúso seria possível para a irrigação de jardins, lavagem dos pisos e dos veículos automotivos, na descarga dos vasos sanitários, na manutenção paisagística dos lagos e canais com água, na irrigação dos campos agrícolas e pastagens, entre outros.

A norma estabelece ainda quatro classes diferentes para o reúso, de acordo com os níveis mais e menos restritos de uso:

- Classe 1: lavagem de carros e outros usos que tenham contato direto do usuário com a água: turbidez inferior a 5, coliforme fecal inferior a 200 NMP/100 mL; sólidos dissolvidos totais inferiores a 200 mg L<sup>-1</sup>; pH entre 6,0 e 8,0; cloro residual entre 0,5 mg L<sup>-1</sup> e 1,5 mg L<sup>-1</sup>.

- Classe 2: lavagens de pisos e calçadas e irrigação dos jardins, manutenção dos lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes: turbidez inferior a cinco, coliforme fecal inferior a 500 NMP 100 mL<sup>-1</sup>, cloro residual superior a 0,5 mg L<sup>-1</sup>.

- Classe 3: reúso nas descargas dos vasos sanitários: turbidez inferior a 10, coliformes fecais inferiores a 500 NMP/100 mL.

- Classe 4: reúso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual. Coliforme fecal inferior a 5 000 NMP/100 mL e oxigênio dissolvido acima de 2,0 mg L<sup>-1</sup>. As aplicações devem ser interrompidas pelo menos 10 dias antes da colheita.

Outra norma reguladora da ABNT que trata de uma forma diferente de reúso, o reúso de água da chuva, é a NBR 15.527/2007 – água da chuva – aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos. A norma traz alguns modelos para estimar a quantidade de água passível de ser coletada, considerando o índice pluviométrico da região, além do cálculo estimativo do tamanho do reservatório. Apesar de não se tratar do reúso de efluentes industriais, a norma é útil principalmente pela grande área de telhado das indústrias, que permite a coleta de quantidade considerável de água.

A ausência de legislação específica, acaba restringindo as possibilidades de reúso (BERTONCINI, 2008). Como forma de viabilizar o reúso da água, pode-se utilizar como referência padrões de qualidade para diferentes parâmetros, de acordo com valores os expostos na literatura. Fappi (2015) citou vários estudos com parâmetros de qualidade de águas de reúso para diversos processos industriais, podendo ser visualizado na Tabela 6 (foram inseridas as especificações para DBO<sub>5</sub>, fosfato, óleos e graxas e nitrogênio amoniacal).

Tabela 6 – padrões de qualidade para águas de reúso citados por Fappi (2015).

Parâmetro	Unidade	Potenciais locais de utilização da água de reúso						
		Torres de resfriamento	Lavagem de pisos	Irrigação de áreas verdes industriais	Lavagem de veículos	Proteção contra incêndio	Descarga sanitária	Geração de vapor (Cadeiras de baixa pressão <10 bar)
pH	-	6 – 9 <sup>(1)</sup> <sup>(3)</sup> <sup>(9)</sup>						7 – 10 <sup>(8)</sup> <sup>(13)</sup>
		6,5 – 9,5 <sup>(7)</sup>	6 – 9 <sup>(1)</sup>		6 – 9 <sup>(1)</sup> 6 –		6 – 9 <sup>(1)</sup>	8,3 – 10 <sup>(12)</sup>
		6,9 – 9 <sup>(10)</sup> <sup>(13)</sup>	6 -8 <sup>(17)</sup>	6 – 9 <sup>(1)</sup> <sup>(17)</sup>	8 <sup>(15)</sup> <sup>(17)</sup> <sup>(18)</sup>	6 – 9 <sup>(1)</sup>	6 -8 <sup>(17)</sup>	7,5 – 10 <sup>(14)</sup>
		7 – 9 <sup>(11)</sup>						
Turbidez	NTU	2 – 10 <sup>(1)</sup> ≤3 <sup>(2)</sup> ;	≤2 <sup>(1)</sup> <sup>(17)</sup> ;	≤2 <sup>(1)</sup> ; 2 – 5 <sup>(5)</sup>	≤2 <sup>(1)</sup> <sup>(17)</sup> ;		≤2 <sup>(1)</sup> <sup>(17)</sup> ≤5 <sup>(4)</sup> ; 2	SE
		2 – 5 <sup>(5)</sup> 50 <sup>(9)</sup> <sup>(10)</sup> <sup>(13)</sup> <sup>(20)</sup>	2 – 5 <sup>(5)</sup> ≤5 <sup>(15)</sup>	≤5 <sup>(15)</sup> <sup>(17)</sup>	≤5 <sup>(15)</sup>	≤2 <sup>(1)</sup> ;	– 5 <sup>(5)</sup> ≤10 <sup>(15)</sup>	
DQO	mg L <sup>-1</sup>	≤75 <sup>(3)</sup> <sup>(7)</sup> <sup>(9)</sup> <sup>(10)</sup> <sup>(13)</sup> <sup>(17)</sup> <sup>(20)</sup>	SE	SE	SE	SE	SE	5 <sup>(8)</sup> <sup>(13)</sup>
		50 <sup>(6)</sup> 200 <sup>(11)</sup>						
DBO <sub>5</sub>	mg L <sup>-1</sup>	25 <sup>(19)</sup> <sup>(20)</sup>						1-50 <sup>(19)</sup>
ST	mg L <sup>-1</sup>	≤530 <sup>(18)</sup>	SE	SE	SE	SE	SE	SE
SDT	mg L <sup>-1</sup>	≤500 <sup>(3)</sup> <sup>(9)</sup> <sup>(10)</sup> <sup>(13)</sup> <sup>(17)</sup> <sup>(20)</sup>	≤1000 <sup>(4)</sup>	≤1000 <sup>(4)</sup>	≤200 <sup>(15)</sup>		≤1000 <sup>(4)</sup>	700 <sup>(8)</sup> <sup>(13)</sup>
		1000 <sup>(7)</sup> 9600 <sup>(11)</sup>	≤500 <sup>(17)</sup>		≤500 <sup>(17)</sup>	SE	≤500 <sup>(17)</sup>	
NH <sub>4</sub> -N	mg N L <sup>-1</sup>	1,0 <sup>(20)</sup>						
Condutividade	µS cm <sup>-1</sup>	800 – 1200 <sup>(1)</sup>	SE	SE	SE	SE	SE	1100 – 5400 <sup>(12)</sup>
								3500 <sup>(14)</sup>
Fosfato	mg L <sup>-1</sup>	4,0 <sup>(20)</sup>	SE	SE	SE	SE	SE	SE
Óleos e Graxas	mg L <sup>-1</sup>	1,0 <sup>(21)</sup>	SE	SE	SE	SE	SE	SE

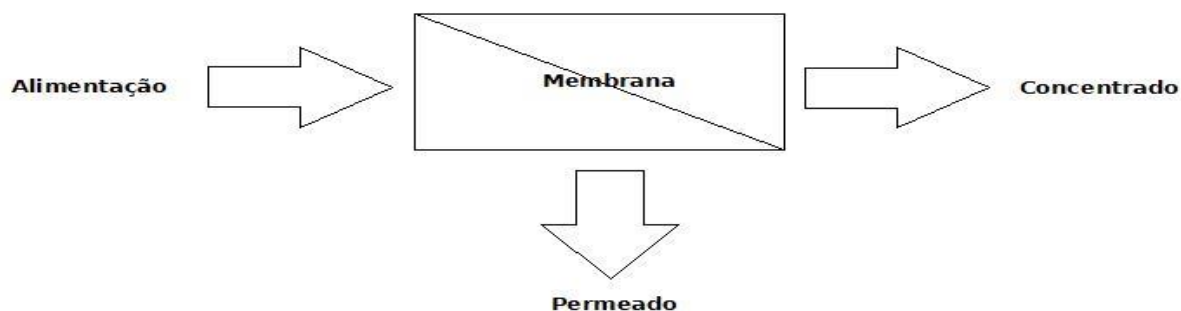
Fonte: <sup>(1)</sup> US EPA, 2004; <sup>(2)</sup> US EPA, 2004, valores para o Estado do Texas; <sup>(3)</sup> Metcalfy e Eddy, 2003; <sup>(4)</sup> Valor máximo recomendado para água potável, de acordo com a Portaria do Ministério da Saúde no 2914 de 12/12/2011; <sup>(5)</sup> Hammer e Hammer, 2007; <sup>(6)</sup> Asano e Levine, 1998; <sup>(7)</sup> Pinjing et al., 2001; <sup>(8)</sup> Metcalfy e Eddy, 1991; <sup>(9)</sup> Mancuso e Santos, 2003; <sup>(10)</sup> Mierzwa, 2002; <sup>(11)</sup> Eble e Feathers, 1992; <sup>(12)</sup> Macedo, 2001; <sup>(13)</sup> Crook e Surampalli, 1996; <sup>(14)</sup> Lenntech, 2015; <sup>(15)</sup> NBR 13969/1997; <sup>(16)</sup> US EPA, 2004, valores para a cidade de San Francisco; <sup>(17)</sup> PIO, 2005; <sup>(18)</sup> Oenning Junior e Pawlowsky, (2007); <sup>(19)</sup> Riera, Suárez e Muro, 2013; <sup>(20)</sup> Mancuso, 2001; <sup>(21)</sup> Chmiel, Mavrov e Belières, 2000; SE – Sem Especificação encontrada.

## 2.5 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Os processos de separação por membranas utilizam como barreira seletiva membranas sintéticas, nas quais tenta-se imitar as características desejáveis das membranas naturais (biológicas), principalmente as de permeabilidade e seletividade. Não acontece nenhuma transformação química durante o tratamento por membranas, apenas o material fica retido durante a filtração (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Tais sistemas são utilizados para separar da água substâncias e sólidos que têm pequenos diâmetros, além de moléculas e compostos iônicos, através da aplicação de algum tipo de força externa. As forças externas utilizadas na filtração em membranas podem ser a pressão, a sucção ou ainda o potencial elétrico.

Após a passagem do líquido pela membrana este passa a ser chamado de permeado; o que é retido é chamado de concentrado ou retentado. Na Figura 1, tem-se o esquema simplificado de entrada e saída da solução na membrana.



**Figura 1 – Esquema representando a entrada do líquido, a saída do permeado e do concentrado (retentado).**

Fonte: Adaptado de Mierzwa, 2007.

Apesar de alguns estudos na área de membranas já ocorrerem desde a década de 1930, somente na década de 1950 os estudos com membranas passaram a gerar maior interesse. Nos Estados Unidos, passou-se a investir em pesquisas para a dessalinização de água do mar, ocorrendo avanços com relação as técnicas de produção das membranas e aumento do fluxo permeado de água (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006). Mais recentemente a sua utilização

aconteceu na indústria química, na década de 1970, aliada a outros tipos de processos clássicos de separação como a filtração, absorção, troca iônica e demais processos (HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

Schneider e Tsutiya (2001) afirmam que, somente a partir dos anos 90 a tecnologia passou a ser utilizada para o tratamento de água e esgoto. Nesse sentido, o tratamento por membranas torna-se importante pela possibilidade de geração de águas de reúso e pela possibilidade de recuperação de solutos retidos pelas membranas (BENÍTEZ et al., 2009).

Dacanal e Beal (2010) citam que, a tecnologia de separação por membranas possibilita sistemas compactos de tratamento de esgotos e efluentes, que produzem água de reúso de boa qualidade a um preço cada vez mais competitivo, se comparado com outros tipos de tratamento.

Nesse sentido, os processos de separação por membranas, no tratamento de efluentes se mostram como uma das tecnologias mais promissoras, apresentando grandes possibilidades de reutilização de águas, especialmente nas indústrias (ANDRADE et al., 2012).

### 2.5.1 Classificação dos processos de separação por membranas

Os processos utilizando membranas são basicamente cinco: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose reversa e eletrodialise (SCHNEIDER e TSUTYIA, 2001). A diferença de cada um é a dimensão das partículas e moléculas que são retidas e com qual intensidade a força motriz promove a separação, conforme se pode visualizar na Figura 2 e na Tabela 7, respectivamente.

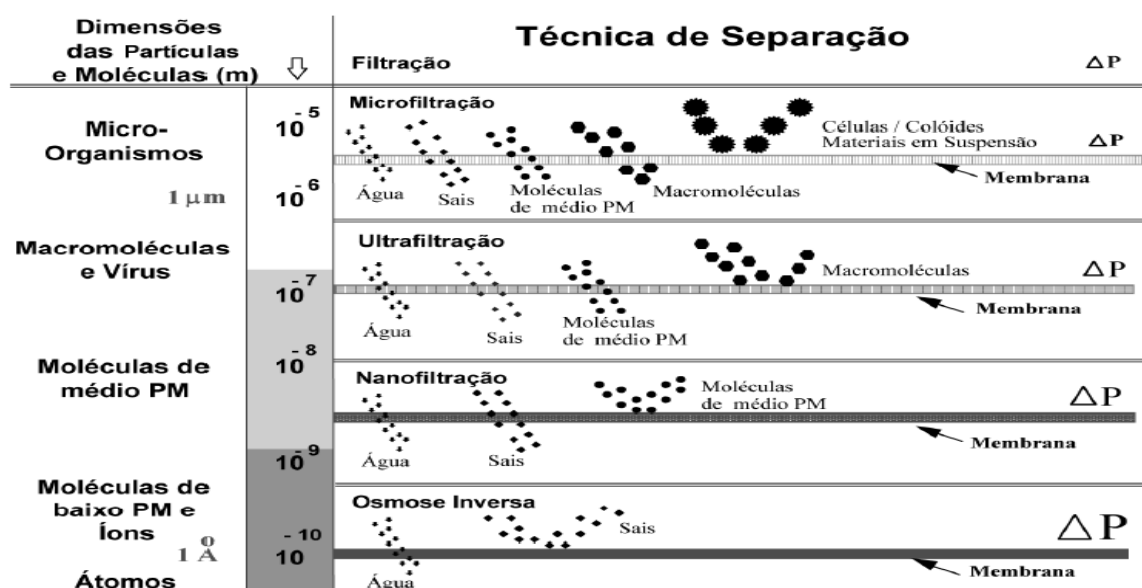


Figura 2 – Partículas e moléculas retidas de acordo com o tipo de processo de separação por membranas.

Fonte: Habert, Borges e Nobrega (2006).

Tabela 7 – Tipo de membrana, porosidade e força motriz.

Membrana	Porosidade	Força Motriz
Microfiltração (MF)	0,1 a 3 $\mu\text{m}$	<2 bar
Ultrafiltração (UF)	0,025 a 0,1 $\mu\text{m}$	1-10 bar
Nanofiltração (NF)	0,001 $\mu\text{m}$	5-35 bar
Osmose Reversa (OR)	<0,001 $\mu\text{m}$	Diferença de Concentração (15-150 bar)
Eletrodialise	-	Tensão e corrente elétrica

Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2012); Wagner (2001).

De acordo com Cavalcanti (2012), a microfiltração é o processo de separação por membranas mais antigo. Esclarece ainda que, determinados tipos de membranas como a diálise e a eletrodialise reversa, utilizam como força motriz a diferença de concentração e as tensões elétricas, respectivamente.

Comparando-se com técnicas físico-químicas tradicionais os sistemas de tratamento por membranas apresentam vantagens como necessidade de tratamento químico somente para a limpeza da membrana e alta taxa de transferência, mantendo a pureza do produto em condições ambientes (ACERO et al., 2010).

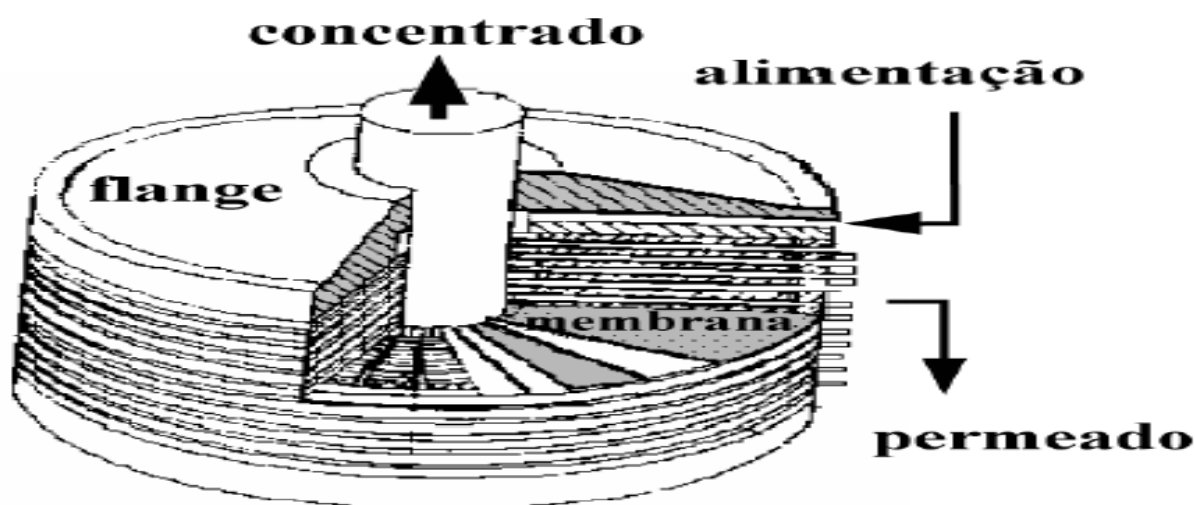
Para a utilização dos sistemas de tratamento por processos de separação por membranas é necessária a utilização dos chamados módulos de membranas. De acordo com Schneider e Tsutyia (2001), o módulo é um sistema básico que possibilita a utilização das membranas como unidade de separação. A sua



composição é a seguinte: membranas, estruturas de suporte de pressão (vácuo ou corrente elétrica), canais de alimentação, remoção do concentrado e do permeado.

De acordo com Schneider e Tsutiya (2001) os principais módulos são:

- Módulos com placas de membrana: é o mais simples, tais sistemas dominam o mercado de eletrodialise, porém, também são utilizados na UF, RO e NF e utilizados em reatores de membranas submersas. O sistema de placas é adaptado dos sistemas filtro-prensa, que são utilizados para desidratar lodo de ETEs e ETAs. Membranas planas e placas de suporte são empilhadas, tanto na vertical quanto na horizontal. A densidade do volume de tal sistema é pequena ( $100$  a  $400 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ ), comparando-se com fibras ocas e enrolamento espiral. Na Figura 3 visualiza-se imagem ilustrativa de um módulo de placas.

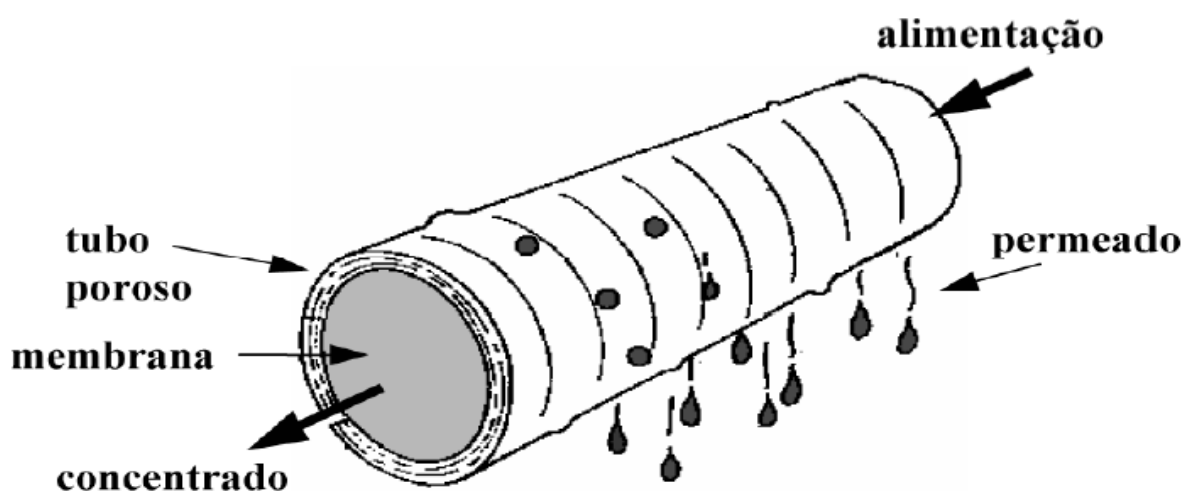


**Figura 3 – Exemplo de Módulo de placas.**

Fonte: Habert, Borges e Nobrega (2006).

- Módulos tubulares: é o formato mais simples de módulo, apresenta um tubo revestido internamente com a membrana, o diâmetro variando entre 6 e 40 mm. Tubos individuais ou conjuntos de blocos com tubos se encontram no interior do cilindro, empacotados. A membrana filtrante é colocada no interior dos tubos como filme fino. Tal sistema apresenta como desvantagem baixa área de membrana, pelo tamanho do módulo, porém, a velocidade em que o líquido é transportado no interior dos tubos é maior. Outra desvantagem é o

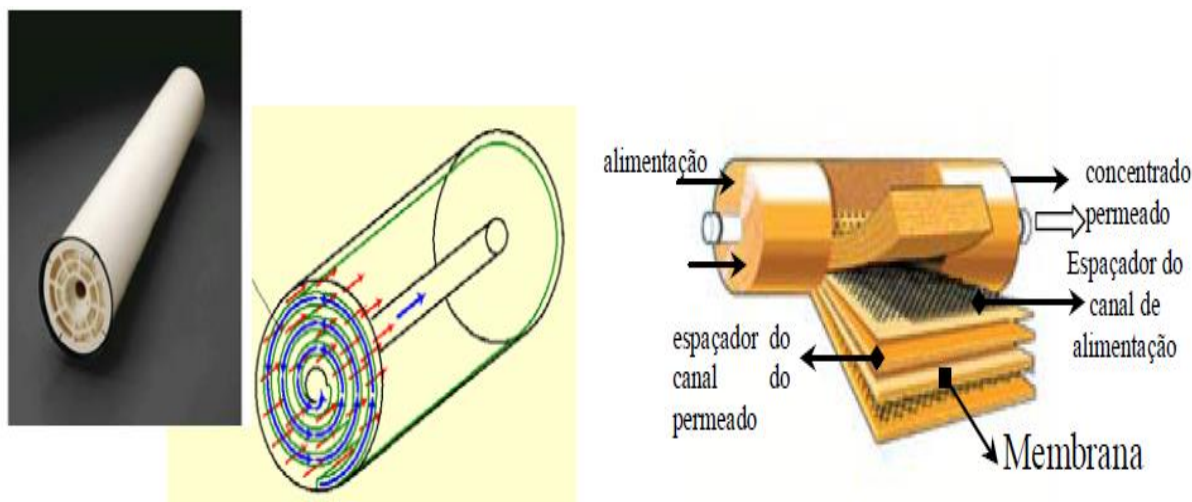
consumo maior de energia, e não são utilizados em grande escala de tratamento de água. Na Figura 4 visualiza-se imagem ilustrativa de um módulo tubular.



**Figura 4 – Exemplo de Módulo Tubular.**

Fonte: Habert, Borges e Nobrega (2006).

- Módulos espirais: são os mais utilizados para pressões mais altas acima de 3 atmosferas, ou seja, na NF e RO. O Módulo de membranas espirais consiste em um conjunto de tubos que podem ser de PVC ou de aço inoxidável, com cartuchos de membrana inseridos no interior desse tubo. Cada cartucho é um pacote de membrana e espaçadores que são enrolados no tubo que coleta o permeado, posicionado no centro. Na Figura 5 visualiza-se um exemplo de módulo de membranas espiral.



**Figura 5 – Exemplo de Módulo Espiral.**

Fonte: Constanzi (2007).

- Módulos com fibras ocas: Utilizados para a produção de água em escala industrial através da microfiltração, ultrafiltração e osmose reversa. Há dois tipos distintos destes módulos no mercado, sendo que para a MF e UF as fibras ocas atravessam o módulo inteiro, variando a quantidade de fibras de várias centenas até 22.500, dependendo do fabricante do módulo. Para os módulos RO, a quantidade de fibras é alta (650.000), e estas fibras são finas com 41  $\mu\text{m}$  de diâmetro interno e 110  $\mu\text{m}$  de diâmetro externo (capilares), e com comprimento de 3,28 metros que são inseridas em forma de U ou em pacotes de fibras.
- Módulos com discos rotatórios: utilizados principalmente para MF e UF de água ou em biorreatores. Neste tipo de módulo, as membranas são inseridas sobre placas redondas e montadas em um eixo giratório. Tem como desvantagem o alto consumo de energia e a impossibilidade do aumento de escala.

Na Tabela 8 estão dispostos comparativos entre os diferentes tipos de módulos em relação a densidade de empacotamento (volume do módulo em relação a área da membrana para permeação).

**Tabela 8 – Densidade de empacotamento dos diferentes tipos de módulos de membranas.**

<b>Tipo de Módulo</b>	<b>Densidade de empacotamento (m<sup>2</sup> m<sup>-3</sup>)</b>
Tubular	30
Placa/quadro	500
Espiral	900
Capilar	1.000
Fibra Oca	10.000

Fonte: Adaptado de Habert, Borges e Nobrega (2006).

### 2.5.2 Materiais para produção de membranas

Os materiais utilizados na produção das membranas variam. Há membranas preparadas com materiais poliméricos – orgânicos –, e aquelas que são produzidas com materiais inorgânicos. Tais materiais já são utilizados na produção de membranas há mais de 20 anos, porém, ganharam maior espaço no mercado apenas recentemente. Os materiais orgânicos para produção das membranas são basicamente os polímeros, e os inorgânicos são os metais e as cerâmicas. Os materiais mais utilizados na fabricação de membranas são expostos no Quadro 1.

<b>Membrana</b>	<b>Material</b>
Microfiltração (MF)	Cerâmica Polipropileno (PP)
Ultrafiltração (UF)	Cerâmica Acetato de Celulose (AC) Polisulfona (PS) Polietersulfona (PES) Polivinilpirrolidona Poliacrinonitrila (PAN) Fluoreto de polivinilideno (PVDF)
Nanofiltração (NF)	Poliacrilamida
Osmose Reversa (OR)	Poliamida Poliacrilamida

**Quadro 1 - Tipos de materiais utilizados na produção das diferentes membranas.**

Fonte: Adaptado de Cavalcanti (2012); Wagner (2001).

### 2.5.3 Operação dos processos de separação por membranas e fatores que influenciam no fluxo

Analisando um sistema de tratamento por membranas, Schneider e Tsutyia (2001) afirmam que, somando-se ao módulo, estes sistemas são formados por um sistema de pressurização para pressurizar o canal que alimenta a membrana, uma válvula no canal do concentrado que regula a pressão no canal de alimentação, um canal de coleta do permeado e os elementos de remoção do material retido na superfície.

Nos processos de separação por membranas, o fluxo permeado é independente do tempo, dependendo especificamente do potencial de pressão aplicado ou da difusão pelo material da membrana. Essa independência do tempo, indica a estabilidade mecânica da membrana, da pureza do solvente e da sua baixa interação com o material de fabricação da membrana. Quando não há observação de uma dessas condições, o fluxo permeado irá diminuir com o tempo, indicando que, ocorre alguma alteração com a membrana (HABERT; BORGES; NOBREGA (2006).

Habert, Borges e Nobrega (2006) indicam como principais causadores do decaimento do fluxo, a deformação mecânica, quando ocorre o inchamento da matriz mecânica, a interação do solvente com o material da membrana, ou então pela presença de impurezas no solvente que causa o entupimento dos poros.

Schneider e Tsutyia (2001) citam que, o fluxo do líquido através da membrana é dependente de alguns fatores, como diâmetro dos poros; porosidade da membrana (fração da área de membrana ocupada por poros); espessura da membrana; camada de concentração e polarização; tortas de filtro (material retido); *fouling* químico (sais precipitados ou géis); e biofilmes.

Um dos piores problemas citados pelos autores durante a operação dos sistemas de membranas é o decaimento do fluxo com o tempo. Esse fenômeno é denominado de *fouling* ou colmatação da membrana (LAUTENSCHLAGER; FILHO; PEREIRA; 2009; HASAN, et al., 2013; GIACOBBO et al., 2010; SONG, 1998; VIDAL; CAMPOS; 2009).

Essa diminuição do fluxo ocorre por dois motivos essenciais: bloqueio dos poros da membrana, que aumenta a resistência ao fluxo e a formação de uma

camada de incrustação, a qual cria uma camada adicional de resistência ao fluxo permeado. Outros fatores como adsorção do soluto, depósito de partículas dentro dos poros da membrana, e mudança nas características da camada de incrustação, podem afetar o *fouling* da membrana ou aumentá-lo, ou ainda modificar ambos os fenômenos essenciais do *fouling* (entupimento dos poros e formação da camada de incrustação). A formação da camada de concentração de polarização pode também acrescentar uma camada de resistência (SONG, 1998).

Giacobbo *et al.* (2010) afirma que, o *fouling* refere-se ao acúmulo de contaminantes na superfície ou dentro dos poros da membrana, ocasionando a diminuição do fluxo permeado. Já o fenômeno de polarização por concentração é o aumento da concentração de soluto na interface membrana/solução, o que acaba gerando uma retrodifusão do soluto em direção ao seio da solução. Ou seja, o soluto fica concentrado na região próxima da interface membrana/solução impedindo a passagem do solvente.

Segundo Lautenschlager, Filho e Pereira (2009), a redução no fluxo permeado durante a filtração, aplicando-se pressão constante, ocorre devido a deposição de partículas coloidais e macromoléculas na superfície da membrana. Dessa forma, a limpeza da membrana deve ser realizada periodicamente durante a operação do sistema, para prevenir a possibilidade de colmatação extrema da membrana e até mesmo sua colmatação irreversível.

O *fouling* acaba aumentando a complexidade de operação dos sistemas de separação por membranas, pois, o sistema precisa ser parado frequentemente para restabelecimento do fluxo através da retrolavagem, resultando em aumento dos custos econômicos e tornando menos viáveis a utilização de sistemas de UF e MF para muitos processos (SONG, 1998).

As formas de limpeza das membranas podem ser físicas e químicas. As físicas são dependentes de forças mecânicas para remoção das partículas acumuladas na superfície da membrana. Incluem a lavagem na direção do fluxo (*flushing*) e/ou *flushing* reverso e retrolavagem (LAUTENSCHLAGER; FILHO; PEREIRA, 2009).

Os métodos químicos dependem de reações químicas, que quebram as forças que ligam as substâncias aderidas na superfície da membrana. Formas de limpeza química são a hidrólise, digestão, saponificação, solubilização e dispersão (LAUTENSCHLAGER; FILHO E PEREIRA, 2009).

#### 2.5.4 Alguns estudos utilizando os processos de separação por membranas

Os estudos utilizando os processos de separação por membranas tem variado muito, principalmente pela grande capacidade deste processo em concentrar, separar, purificar e tratar substâncias. Na área ambiental, principalmente nos últimos anos, houveram diversos estudos utilizando as membranas, nos tratamentos de água, esgoto, efluentes industriais, entre outros.

Susuki et al. (2012) produziram membranas porosas a partir de Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) e analisaram a capacidade de tais membranas na remoção de contaminantes presentes em água tratada. Obtiveram capacidade de retenção de 85% para a cor, 70% para a turbidez, 30% para os Sólidos Totais Dissolvidos, além de remover a totalidade de *Escherichia coli*.

Silva (2008) avaliou a capacidade da ultrafiltração (UF) por membrana na remoção de células de cianobactérias e microcistina para águas de abastecimento. A utilização da membrana de ultrafiltração, segundo o autor, se deve a sua ampla utilização no tratamento de água e por seu preço competitivo.

A eficiência encontrada, segundo o autor, foi satisfatória para a remoção da turbidez, estando abaixo de 0,45 NTU, valor de referência para a Portaria de potabilidade da água (2914/2011 do Ministério da Saúde). A remoção da cor foi de 90%, as microcistinas não foram removidas totalmente. Já as cianobactérias não foram encontradas no permeado. Entretanto, apesar da boa remoção, não houve a eliminação dos coliformes totais por completo.

Referente ao tratamento de esgoto, Constanzi (2007) afirma a importância de estudos associados entre tratamentos por membranas e outros tipos de processos como o tratamento por lodos ativados. A autora afirma a grande importância de tais estudos para o reúso das águas.

Acero et al. (2010) encontraram grande queda no fluxo das membranas de ultrafiltração e nanofiltração no tratamento de efluentes domésticos. Os autores explicam que tal fato ocorre pelas características de rejeição das membranas, e a sua colmatação, que é o acúmulo de substâncias, macromoléculas e partículas nos poros da membrana. Encontraram remoção total de coliformes tanto no tratamento por Ultrafiltração quanto de Nanofiltração.

Vidal e Campos (2009), estudando a microfiltração no tratamento de esgotos domésticos, associaram a coagulação ao processo, encontrando maiores taxas de filtração e maior remoção de fósforo total (acima de 90%) do esgoto, quando comparado aos testes realizados sem a coagulação (68% de remoção).

A utilização os processos de separação por membranas, no tratamento de efluentes industriais, possibilitam elevada eficiência e a possibilidade de reutilização dos efluentes na própria indústria. Com isso, o reúso de águas residuárias, tem se tornado uma opção ambiental e economicamente viável para as indústrias (ANDRADE et al., 2012).

As indústrias estudadas referentes a reutilização dos efluentes têm variado bastante. Podem ser citadas a indústria de papel (AMARAL et al., 2013; BULLÓN et al., 2007); a indústria de cosméticos (ALVES, 2009); a indústria metal-mecânica (OENNING JR., 2006); a indústria de laticínios (BRIÃO; TAVARES, 2007; BALDASSO, 2008); entre outras.

A opção pelas membranas no tratamento de efluentes de indústrias apresenta um outro atrativo muito importante. Em tais processos, além do efluente tratado ser reutilizado como águas de reúso dentro dos processos, há a possibilidade de concentração do material retido pela membrana, e sua reutilização na fabricação de novos produtos.

Estudos como o de Brião; Tavares (2007), que utilizaram a ultrafiltração como processo de tratamento e reutilização de efluentes de laticínios, encontraram a possibilidade da reutilização do permeado na limpeza de equipamentos e do concentrado, após pasteurização, na produção de subprodutos lácteos como o doce de leite.

Baldasso (2008) utilizou as membranas para separar e fracionar proteínas específicas encontradas no soro de leite, material descartado no tratamento de efluentes de laticínios e que é responsável por grande poluição, especialmente pela grande quantidade de matéria orgânica.



### 3. OBJETIVOS

#### 3.1. OBJETIVO GERAL

Avaliar os processos de separação por membranas como pós-tratamento e reúso de água, em uma indústria de laticínios no Oeste do Paraná.

#### 3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização físico-química de efluente de laticínio.
- Avaliar a utilização de processo de separação por membranas, por microfiltração e ultrafiltração, no pós-tratamento de efluente de indústria de laticínios.
- Controlar condições de pressão de operação e o tipo de membrana, selecionar, dentre os parâmetros, os melhores indicadores da modificação da qualidade do efluente ao longo do estudo.
- Verificar o efeito de colmatação das membranas.
- Calcular o Índice de Qualidade do permeado e definir as melhores condições de operação das membranas de microfiltração e ultrafiltração.
- Analisar a capacidade de remoção microbológica das membranas.
- Estudar a eficiência na remoção de nutrientes do efluente pelas membranas.
- Realizar a caracterização físico-química do efluente após os processos de tratamento por membranas e propor formas de reúso na indústria.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE COLETA DE AMOSTRAS

O efluente utilizado na presente pesquisa foi obtido em uma Unidade de Laticínios situada na região oeste do Estado do Paraná. Foram realizadas visitas periódicas para conhecimento do processo industrial, semanal ou quinzenalmente, conforme disponibilidade de acompanhamento pelos funcionários do Setor de Meio Ambiente da indústria, durante o período de janeiro a dezembro de 2015.

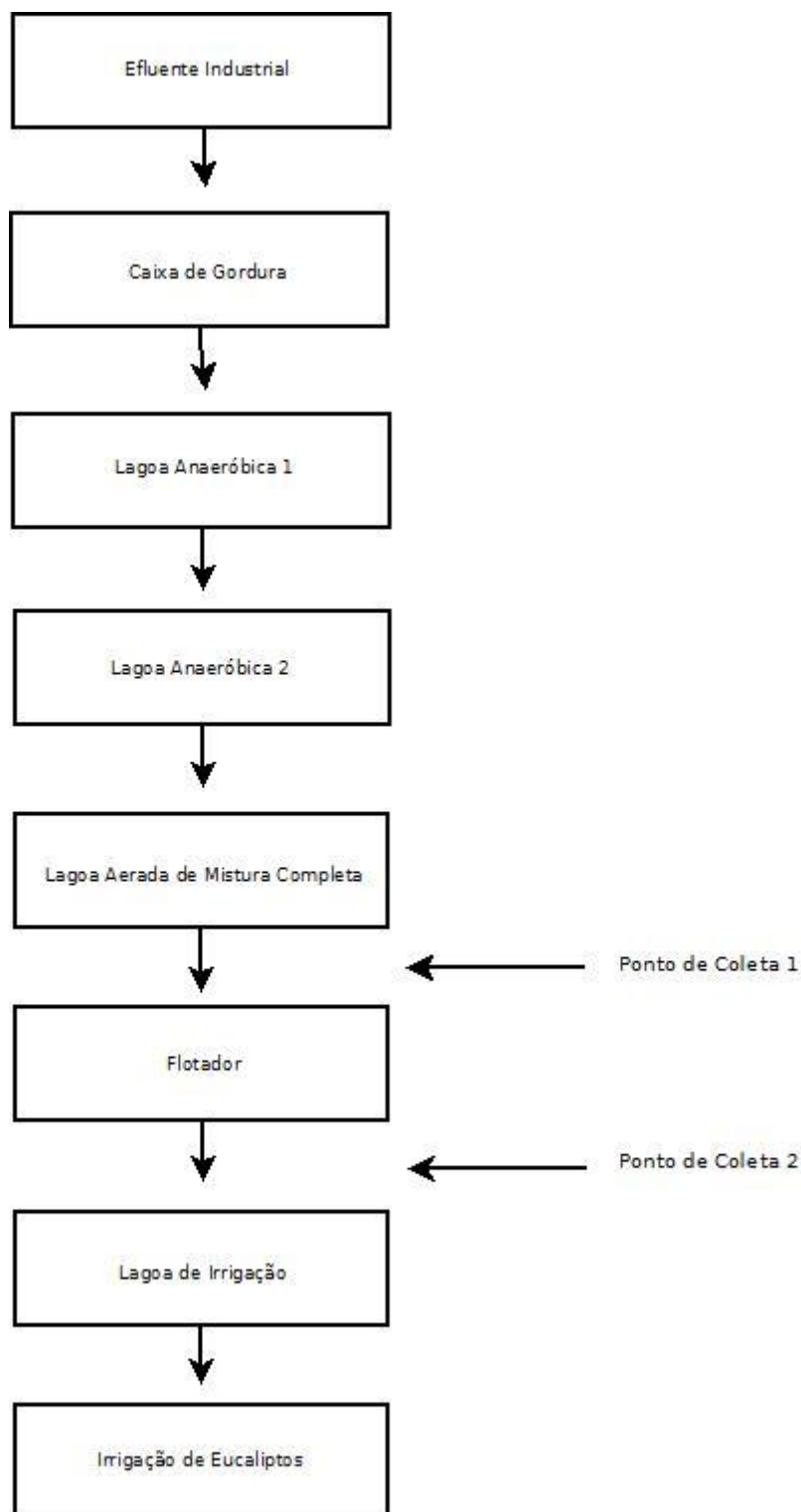
De acordo com os dados fornecidos pela indústria, os produtos atualmente produzidos são iogurtes de diversas linhas de produção; bebida láctea; e creme de leite. O total produzido no primeiro semestre de 2015 foi de 3.000 toneladas por mês, aproximadamente 100 toneladas produzidas diariamente.

Após o processo de produção, o efluente gerado na indústria é encaminhado para estação de tratamento de efluentes industriais, onde é tratado e utilizado na irrigação de eucaliptos.

### 4.2 COLETA DE AMOSTRAS NO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

A estação de tratamentos de efluentes (ETE) da indústria é composta por uma caixa de gordura, duas lagoas anaeróbias, uma lagoa aerada, um flotador e uma lagoa de irrigação. Não há lançamento do efluente em corpos hídricos, o qual é encaminhado para irrigação de plantação de eucalipto nos fundos da indústria.

Para os experimentos foram realizadas coletas de 6 lotes de amostras, dos quais 5 foram oriundos do sistema de tratamento de efluente da indústria, após o tratamento secundário (AATS) e um lote de efluente coletado após o Flotador Físico-químico (AAF) da indústria (Pós-tratamento). O fluxograma da estação de tratamento de efluentes com os indicativos dos pontos de coleta pode ser visualizado na Figura 6.



**Figura 6 – Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes industrial e pontos de coleta.**

Foram coletados em cada lote de amostra, 30 litros de efluente para a realização dos ensaios e das análises dos parâmetros físico-químicos e biológicos, conforme Tabela 9.

Na tabela 9, tem-se os parâmetros físico-químicos que foram analisados e o método utilizado (APHA, 2012).

**Tabela 9 - Parâmetros para caracterização dos efluentes agroindustriais**

<b>Parâmetro</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método (APHA, 2012)</b>
DQO	mg.L <sup>-1</sup>	5220 B (refluxo aberto)
DBO	mg.L <sup>-1</sup>	5210 B (teste DBO 5 dias)
Ph	-	Potenciométrico 4500 - H+ B
Turbidez	UNT	Nefelométrico 2130 B
Nitrogênio Total	mg.L <sup>-1</sup> N	4500 (NTK)
Fósforo Total	mg.L <sup>-1</sup>	4500-P E
Óleos e Graxas	mg.L <sup>-1</sup>	5520 D
Sólidos Totais (ST)	mg.L <sup>-1</sup>	2540 B – gravimétrico
Sólidos Totais Fixos (STF)	mg.L <sup>-1</sup>	2540 E – gravimétrico
Sólidos Totais Voláteis (STV)	mg.L <sup>-1</sup>	2540 E – gravimétrico
Sólidos Sedimentáveis (SS)	mg.L <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	2540 F

Para a coleta de amostras foram seguidas as normas brasileiras NBR 9897 (planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores) e NBR 9898 (preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores) (ABNT, 1987<sup>a</sup>; ABNT, 1987<sup>b</sup>).

#### 4.3 UNIDADE EXPERIMENTAL DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

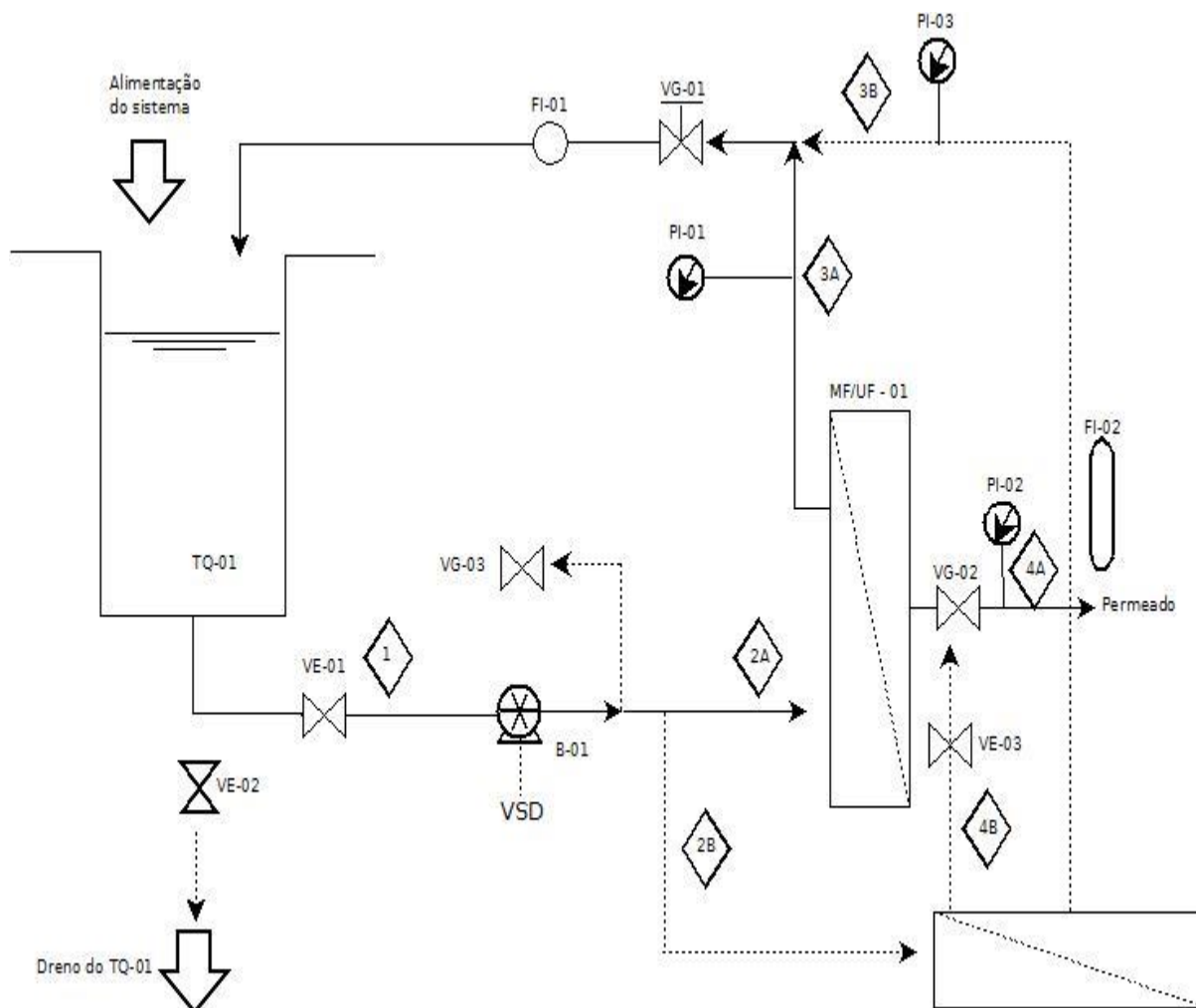
Os processos de separação por membranas foram realizados através de um módulo de bancada existente no Laboratório de Águas e Efluentes da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR Câmpus Medianeira), conforme foto ilustrativa na Figura 7.



**Figura 7 – Módulo de Tratamento por membranas de bancada.**

O equipamento é próprio para a utilização em bancadas de laboratório e possibilita o uso de membranas de Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF) e Nanofiltração (NF). No presente estudo utilizou-se membranas de MF e UF.

No módulo são operados os dispositivos para entrada do líquido e passagem na membrana, regulação da bomba, abertura e fechamento das válvulas de concentrado e permeado para estabelecer a pressão que se deseja utilizar. A Figura 8 traz o esquema com as funcionalidades para a operação do módulo.



**Figura 8 – Esquema com os equipamentos, instrumentos e válvulas de operação do módulo.**

(Equipamentos - TQ-01: Tanque PP – 10L; B-01: Bomba diafragma, 150 psi, 10 bar – máximo; MF/UF-01: Módulo de membrana de fibra oca de micro ou ultrafiltração; MF/UF/NF-02: célula de membrana plana de micro, ultra ou nanofiltração – Inox; Instrumentos - PI-01: indicador de pressão, 0-5 bar; PI-02: indicador de pressão, 0-5 bar; PI-03: indicador de pressão, 0-15 bar; FI-01: indicador de vazão, 0,8-8 LPM; FI-02: Indicador de vazão, 10 mL; Válvulas - VE: válvula esfera, ½"; VG: válvula gaveta, bronze, ½").

O funcionamento do módulo é iniciado com a alimentação da água ou efluente que será tratado no tanque de alimentação (TQ-01). Através de uma bomba (B-01), o efluente é encaminhado para a membrana, onde ocorre a separação da alimentação em permeado e retentado. Por meio das válvulas gaveta (VG-01, VG-02 e VG-03) controla-se a pressão aplicada a membrana, a qual é acompanhada pelos indicadores de pressão (PI-01, PI-02 e PI-03).

A vazão do retentado é medida através do indicador FI-01, sendo que a vazão do permeado mede-se por meio do fechamento da válvula esfera (VE-02) e

medição por meio da pipeta graduada (10 mL) em FI-02. Calcula-se o tempo para permeação dos 10 mL, dividindo-se pela área da membrana (equação 1).

#### 4.4 CARACTERÍSTICAS DOS MÓDULOS DE MICROFILTRAÇÃO E ULTRAFILTRAÇÃO

Os módulos utilizados no estudo foram de Microfiltração e Ultrafiltração (MF 158 e UF 257), adquiridos da Pam-membranas seletivas, mesma fabricante do módulo de bancada. Cada uma das membranas apresenta constituição e capacidade de retenção diferente.

As imagens ilustrativas de ambos os módulos estão expostas na Figura 9-A e das fibras da membrana de ultrafiltração visualiza-se na Figura 9-B. O módulo de microfiltração é maior que o de ultrafiltração, como é possível visualizar na Figura 9-A, apresentando maior área de filtração.

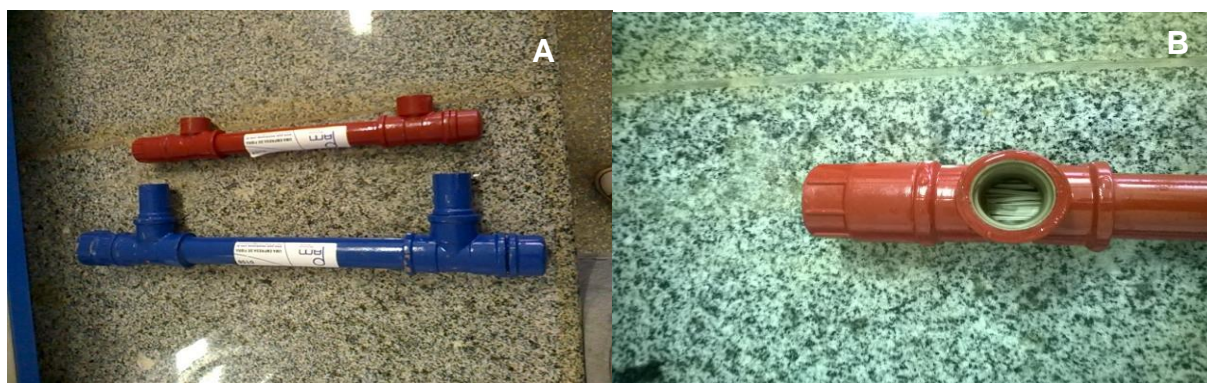


Figura 9 – (A) Módulos de MF (azul) e UF (vermelho); (B) Imagem das fibras internas da membrana de UF.

No Quadro 2 estão dispostas as informações das membranas de MF e UF, utilizadas durante o estudo (PAM MEMBRANAS, 2012).



Microfiltração (158)		Ultrafiltração (257)	
<b>Geometria</b>	Tipo fibra oca	<b>Geometria</b>	Tipo fibra oca
<b>Material</b>	polieterimida (PEI)	<b>Material</b>	polietersulfona (PES)
<b>Camada seletiva</b>	Externa	<b>Camada seletiva</b>	Externa
<b>Diâm. Externo (mm)</b>	0,95	<b>Diâm. Externo (mm)</b>	0,70
<b>Tamanho de poro (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	0,40	<b>Ret. Molar (MWCO*)</b>	50
<b>Limites de pH</b>	2-13	<b>Limites de pH</b>	2-13
<b>Área de filtração (<math>\text{m}^2</math>)</b>	0,172	<b>Área de filtração (<math>\text{m}^2</math>)</b>	0,09
<b>Densidade de empacotamento (<math>\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}</math>)</b>	800	<b>Densidade de empacotamento (<math>\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}</math>)</b>	1000
<b>Permeabilidade Hidráulica (<math>\text{L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}</math>)</b>	99,7	<b>Permeabilidade Hidráulica (<math>\text{L} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{bar}</math>)</b>	25,37
<b>Comprimento útil (mm)</b>	350	<b>Rejeição (%)</b>	99,91
<b>Temperatura máxima de Operação (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	55	<b>Temperatura máxima de Operação (<math>^{\circ}\text{C}</math>)</b>	55

Quadro 2 – Propriedades das membranas de microfiltração (MF 158) e de ultrafiltração (UF 257).

\* Molecular Weight Cutt-off (peso molecular de corte, tamanho das partículas retidas).

#### 4.5 EXPERIMENTOS DE FILTRAÇÃO POR MEMBRANAS

No módulo de bancada foram monitoradas as seguintes variáveis: vazão do permeado ( $\text{L h}^{-1}$ ); vazão do concentrado ( $\text{L min}^{-1}$ ); rotação da bomba (RPM); pressão de permeado, de recirculação e de alimentação (bar); e o volume de alimentação (L).

Para cada ensaio foram utilizados 5 litros de efluente oriundos do sistema de tratamento da indústria, exceto para o ensaio de MF seguida de UF, no qual utilizou-se 10 litros de efluente, durante a primeira etapa do ensaio (MF). Em todos os ensaios ocorre retorno do concentrado para o tanque de armazenamento, caracterizando um processo em batelada. A Tabela 10 apresenta as condições experimentais estabelecidas.



**Tabela 10 – Condições experimentais estabelecidas para os processos de separação por membranas.**

Tratamento	Membrana	Pressão (Bar)	Ponto de coleta
E1	MF 158	0,50	AATS
E2	MF 158	0,75	AATS
E3	MF 158	1,0	AATS
E4	UF 257	0,50	AATS
E5	UF 257	1,0	AATS
E6	UF 257	1,5	AATS
E7	MF 158	PMF	AATS
E8	UF 257	PUF	AATS
E9	MF 158 + UF 257	PMF + PUF	AATS
E10	MF 158	PMF	AATS
E11	UF 257	PUF	AATS
E12	MF 158	PMF	AAF

(MF 158 = Membrana Microfiltração série 158; UF 257 = Ultrafiltração série 257; AATS = Amostra Após Tratamento Secundário; AAF = Amostra Após Flotador; PMF = Pressão Para Microfiltração; PUF = Pressão Para Ultrafiltração).

Para os 6 primeiros experimentos, utilizaram-se 3 pressões diferentes para cada membrana. Por meio dos 3 ensaios de MF (E1 a E3) e os 3 ensaios de UF (E4 a E6) foi calculado o Índice de Qualidade do Permeado (IQP), encontrando-se a melhor condição para a utilização destas membranas. Com a melhor condição de operação para as duas membranas realizaram-se os demais ensaios (E7 à E12).

Realizou-se mais 1 ensaio utilizando-se o melhor tratamento encontrado para MF e para UF, realizando-se um ensaio de MF seguido de UF (E9). Além destes, ocorreu mais 1 ensaio para MF (E7) e mais 1 para UF (E8), para verificar a capacidade de retenção microbiológica da membrana.

Realizaram-se mais 2 ensaios, um com a melhor condição para a MF (E10) e outro com a melhor condição para a UF (E11), para verificar a capacidade de retenção das membranas para nutrientes (Fósforo e Nitrogênio) e óleos e graxas.

O último ensaio foi realizado com efluente coletado após o pós-tratamento industrial (Flotador – AAF), somente para a melhor condição de microfiltração, para estudo da eficiência e do comportamento da membrana para este efluente, quando comparado com o tratamento já existente na indústria (E12).

As amostras de permeado foram coletadas para análise conforme fatores de concentração (Fc) 1,25, 1,50, 1,75, 2,00 e 2,25, para os 6 primeiros tratamentos. Para os demais tratamentos, coletou-se apenas uma amostra para o fator de concentração 1,25.

Para verificar a permeabilidade das membranas de MF e UF, foi realizada, primeiramente, a análise da permeabilidade destas com água destilada e com

efluente de laticínios, através da pressurização e despressurização do módulo. O diferencial de pressão transmembrana aplicado foi de 0,5 bar a 1,5 bar (pressurização) para a membrana de microfiltração (MF 158) com água destilada e de 0,5 a 1,75 bar com efluente de laticínio; para a membrana de UF foi de 0,5 a 1,75 tanto para água destilada quanto para o efluente de laticínio.

A elevação da pressão para as duas membranas ocorreu em intervalos de 0,25 bar, retornando a pressão para 0,5 bar (despressurização) em intervalos de 0,25 bar, em seguida. O fluxo da água destilada foi medido durante 60 minutos para cada pressão.

As membranas foram avaliadas quanto aos parâmetros de processo:

a) Efeito da pressão – Pressão Transmembrana ( $\Delta P$ );

b) Fluxo em função do tempo. O fluxo permeado (J) foi determinado pela equação:

$$J = V_p / A \times t \quad (1)$$

Na equação 1,  $V_p$  é o volume permeado,  $A$  é a área de filtração da membrana e  $t$  é o tempo.

c) Coeficiente de retenção ou rejeição que representa a eficiência do processo, o qual será calculado pela equação:

$$\%R = ((X_f - X_i) / X_i) \times 100. \quad (2)$$

Na equação 2,  $X_i$  é o valor inicial e  $X_f$  o valor final do parâmetro no permeado (por exemplo pH, condutividade, DQO, etc);

d) Coeficiente de Colmatação que refere-se a mensuração da incrustação na superfície da membrana após a realização dos ensaios. O valor do coeficiente varia de 0 (sem colmatação) até 1,0 (membrana completamente colmatada).

O cálculo do Coeficiente foi realizado de acordo com Rao (2002):

$$CC = \text{Fluxo de água destilada após filtração com efluente} / \text{Fluxo de água com a membrana limpa} \quad (3)$$

e) Fator de Concentração ( $F_c$ ) pela equação:  $F_c = V_i / (V_i - V_p)$ ; (4)

Na equação 4,  $F_c$  é o Fator de concentração,  $V_i$  é o volume inicial de efluente utilizado e  $V_p$  corresponde ao volume permeado.

#### 4.5.1 Índice de Qualidade do Permeado (IQP)

A definição dos melhores experimentos para a MF e a UF foi realizada com auxílio de um Índice de Qualidade do Permeado (IQP), conforme Fappi (2015). Este índice engloba os parâmetros encontrados durante a caracterização das amostras (Tabela 9), após o sistema de tratamento por membranas, com amostras coletadas após o sistema de tratamento secundário da indústria (AATS). Os valores dos parâmetros para o cálculo deste índice foram obtidos nos experimentos E1 a E6 (Tabela 10).

Um valor maior para o parâmetro, significa menor qualidade. Foram atribuídos valores de mínimo e máximo, de 0 a 100 pontos, respectivamente, aos parâmetros e ao fluxo de permeado. Por exemplo, para o parâmetro sólidos totais, uma maior concentração de sólidos totais na amostra do permeado significa menor qualidade, atribuindo-se nota próxima a zero. Para uma concentração de sólidos totais menor, atribui-se uma nota maior (100). No caso do fluxo permeado, o oposto é realizado, sendo atribuído nota menor ao menor fluxo encontrado e nota maior para o maior fluxo, pois, nos processos de separação por membranas, maior fluxo é desejável.

Quanto maior a diferença entre os valores, maior a diferença entre os tratamentos. O IQP é obtido por meio do somatório dos valores atribuídos, no qual um índice de melhor qualidade refere-se ao que apresentar maior valor.

#### 4.6 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E MICROBIOLÓGICA DAS AMOSTRAS DE EFLUENTE

As amostras coletadas no sistema de tratamento de efluentes da indústria de laticínio nos pontos 1 e 2, bem como as amostras coletadas após os tratamentos de

MF e UF foram caracterizados para os parâmetros: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), pH, Turbidez, Nitrogênio Total, Fósforo Total, Óleos e Graxas, Sólidos Totais, Sólidos Totais Fixos, Sólidos Totais Voláteis, Sólidos Sedimentáveis. As análises foram realizadas conforme a referência do Livro de Métodos (APHA, 2012).

As análises da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Nitrogênio Total, Fósforo Total e Óleos e Graxas foram realizadas no Laboratório Central da Cooperativa Agroindustrial Lar, em Medianeira.

Também foi analisada a capacidade de retenção de coliformes termotolerantes utilizando-se as membranas de microfiltração e de ultrafiltração. Os procedimentos para a análise microbiológica foram realizados no Laboratório Central segundo a Instrução Normativa nº 62, de 2003 (BRASIL, 2003).

#### 4.7 LIMPEZA DAS MEMBRANAS

Após os tratamentos realizados com efluente de laticínio (Experimentos de 1 a 12 da Tabela 10), ocorreu a limpeza das membranas conforme recomendação do fabricante. A limpeza é realizada até que a membrana apresente o fluxo permeado encontrado nos ensaios de pressurização e despressurização das membranas de MF e UF, tolerando-se valores de fluxo inferiores ou superiores a 20%, conforme orientações do fabricante das membranas. Utilizou-se os seguintes métodos para limpeza das membranas de MF e de UF:

- Lavagem da membrana no sentido contrário ao da filtração (retrolavagem), utilizando-se água microfiltrada gerada no próprio módulo, com inversão da entrada de água para a saída do permeado do módulo. A saída de concentrado é totalmente fechada através de plug, e a água que sai do módulo é descartada.
- Limpeza através de produto químico, chamada de limpeza oxidante. Utiliza-se como oxidante o Hipoclorito de Sódio (500 mg/L). Circula-se 1 litro da solução durante um período não superior a duas horas.

A retrolavagem é denominada de limpeza física das membranas, enquanto o segundo método denomina-se limpeza química. Após a utilização das membranas a retrolavagem é realizada todas as vezes para a limpeza das membranas.

A limpeza química é utilizada somente quando não se restabelece o fluxo das membranas de MF e UF por meio da limpeza física. A limpeza química é mais agressiva e pode danificar os componentes da membrana caso não seja realizada conforme informado pelo fabricante.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA

O laticínio recebe, armazena e processa creme de leite e leite oriundos de produtores da região oeste do Paraná, transformando em bebidas lácteas, iogurtes e creme de leite.

Os volumes mensais ( $m^3 d^{-1}$ ) e os valores médios em litros de leite recebidos por dia ( $L d^{-1}$ ), nos meses de janeiro a junho de 2015, estão dispostos na Tabela 11.

**Tabela 11 – Recebimento de leite de janeiro a junho de 2015.**

Ano	2015						
Mês	Unidade	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Recebimento de leite	$M^3 \text{ mês}^{-1}$	5251	3863	3916	3518	3627	3565
	$L d^{-1}$	201.961,54	148.576,92	150.615,38	135.307,69	139.500	137.115,38

Como é possível observar, no mês de janeiro houve a maior quantidade em litros recebidos por dia, tal valor passando dos 200 mil litros. No mês de fevereiro houve uma queda na quantidade recebida, de aproximadamente 27%. A partir de abril, a quantidade recebida não chegou a 150 mil litros diários. O total em metros cúbicos de leite recebidos cumulativamente de janeiro a junho chegou a  $23.740 m^3$ , o que equivale a, aproximadamente  $3.956,67 m^3$  por mês.

De acordo com os dados repassados pela indústria, os produtos atualmente produzidos são: iogurte - garrafa 850g; iogurte - 170g; iogurte copo - 165g; iogurte bandeja - 540g; iogurte - decor 540g; bebida láctea; *petit suisse*; iogurte - grego; flan; sobremesa; leite fermentado; iogurte - copo pedaços; e creme de leite.

O sistema de produção funciona conforme demanda, ou seja, de acordo com o que é solicitado pelo mercado ocorre a produção, quase não ocorrendo estocagem de produtos (*Just in time*). Nesse sentido, a quantidade produzida varia bastante durante os meses. O valor médio total de produção realizado no primeiro semestre de 2015 foi de 3.000 toneladas por mês, o que equivale a aproximadamente 100 toneladas produzidas diariamente.

A jornada de trabalho na indústria é composta por três turnos diários, nos quais trabalham 90 funcionários em cada turno. Assim, o total de colaboradores da indústria atualmente corresponde a 270 funcionários, enquadrando-se como empresa de médio porte, conforme os critérios de classificação do Serviço Brasileiro de Apoio às Micros e Pequenas empresas – SEBRAE (SEBRAE, 2015).

## 5.2 COMPOSIÇÃO DO SISTEMA DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

De acordo com os dados disponibilizados pela indústria, o sistema de tratamento de efluentes (ETE) é responsável pelo tratamento de todo o efluente gerado nos setores industriais (Figura 6). Excetuam-se apenas aqueles gerados nos sanitários e na cozinha que são encaminhados para fossas sépticas e, posteriormente, os resíduos são recolhidos por um serviço auto fossa. A Figura 6, citada anteriormente é o fluxograma referente ao sistema de tratamento de efluentes da indústria.

O sistema de tratamento de efluentes apresenta como tratamento preliminar uma caixa de gordura, não passando por tratamento primário e sim seguindo diretamente para tratamento biológico por duas lagoas anaeróbicas e uma lagoa aerada. Como pós-tratamento é utilizado um flotor físico-químico.

O efluente final é encaminhado para a irrigação de eucaliptos ao fundo do terreno da indústria, não havendo despejo em corpos hídricos. O lodo gerado é encaminhado atualmente para a correção de solos, fertilização, etc., e é retirado por empresa especializada.

Durante a realização da pesquisa, a indústria estava modificando seu sistema de tratamento de efluentes e realizando adaptações na indústria, para aumentar a estrutura produtiva, o que implicou em coleta de lotes de amostras de efluentes com diferenças em suas características físico-químicas.

Na Figura 10 podem ser observadas as diferentes amostras coletadas no sistema de tratamento de efluentes em cones Imhoff, durante a realização das análises de Sólidos Sedimentáveis.

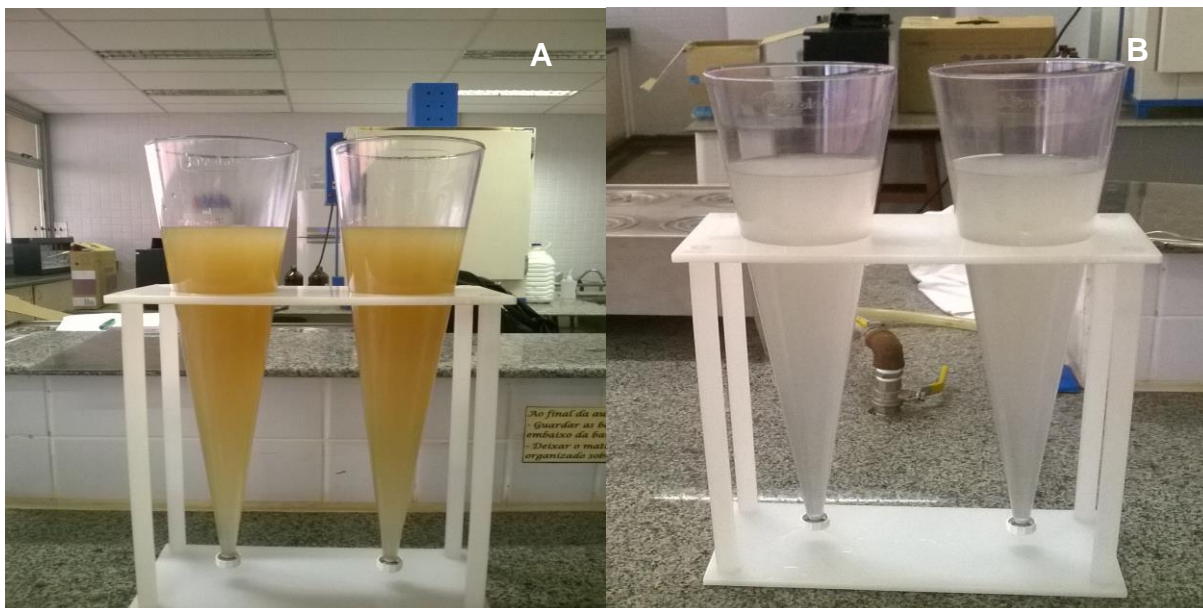


Figura 10 – Amostras de efluente: (A) Amostra de efluente após lagoa aerada (AATS); (B) Amostra efluente após o flotador (AAF).

Na Tabela 12 estão dispostas as características das 6 amostras coletadas no sistema de tratamento de efluentes da indústria de laticínio (AATS e AAF).

Tabela 12 – Características qualitativas das amostras de efluente utilizadas nos ensaios.

Parâmetro	Efluente (Lote 1)	Efluente (Lote 2)	Efluente (Lote 3)	Efluente (Lote 4)	Efluente (Lote 5)	(continua)	
						Média*	Efluente (Lote 6)**
Data da Coleta	5/10/15	7/10/15	13/11/15	1/12/15	14/12/15	-	14/12/15
Temperatura de Coleta (°C)	27	27	23,5	30,60	27	-	26
Sólidos Totais (mg L <sup>-1</sup> )	2.876,50	3.484	2.622	2.438,50	2.661	2.661±404,37	1.927,5
Sólidos Totais Fixos (mg L <sup>-1</sup> )	1.841,50	1.953	1.795	1.479,50	1.441	1.795±228,44	804,5
Sólidos Totais Voláteis (mg L <sup>-1</sup> )	1.035	1.531	827	959	1.220	1.035±272,84	1.123
Ph	8,55	8,52	8,83	8,63	8,54	8,55±0,13	7,74
Turbidez (NTU)	673	595	441	533	540	540±85,47	128
Sólidos Sedimentáveis (mL L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	<0,1	<0,1	0,2	<0,1	<0,1	-	<0,1
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	467	-	119,53	293,265±245,7	48,94
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	-	-	894	917	1.169	917±152,57	322



Tabela 12 – Características qualitativas das amostras de efluente utilizadas nos ensaios.

	<b>(conclusão)</b>						
<b>Coliforme Termotolerante (UFC 100 mL<sup>-1</sup>)</b>	-	-	-	6.000	-	-	-
<b>Nitrogênio Total (mg de N L<sup>-1</sup>)</b>	-	-	-	-	111,69	-	52,65
<b>Óleos e Graxas Total (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	-	-	-	7,30	-	6,20
<b>Fósforo Total (mg L<sup>-1</sup>)</b>	-	-	-	-	39	-	5
<b>Condutividade (µS cm<sup>-1</sup>)</b>	-	-	-	-	2.458	-	2527
<b>Sól. Dissol. Totais (ppm TDS)</b>	-	-	-	-	1.213	-	1263

(\*) Média referente aos lotes 1 a 5 (AATS).

(\*\*) Amostra de efluente após flotor (AAF).

De acordo com os dados dispostos na Tabela 12, as características físico-químicas dos lotes de efluente apresentaram variação. Especificamente as concentrações de sólidos no efluente, podem ter influenciado os fenômenos de *fouling* das membranas de MF e UF.

Para os 6 primeiros ensaios (E1 a E6) foram realizados menor número análises de parâmetros (SS, ST, STF, STV, pH e Turbidez), pois tais ensaios foram utilizados para estabelecer as melhores condições de pressão para as membranas de MF e UF, e um maior número de análises tornaria a pesquisa onerosa. Nos demais experimentos, após as melhores condições para MF e UF estabelecidas, ampliou-se o número de análises realizadas, acrescentando-se as análises de DQO, DBO, Nitrogênio Total, Fósforo Total, Óleos e Graxas, Condutividade, Sólidos Dissolvidos Totais e Coliformes Termotolerantes.

### 5.2.1 Pressurização e despressurização das membranas com água destilada e com efluente de laticínio

Nas Figuras 11 e 12 tem-se a variação do fluxo das membranas de MF e de UF, respectivamente, utilizando água destilada.

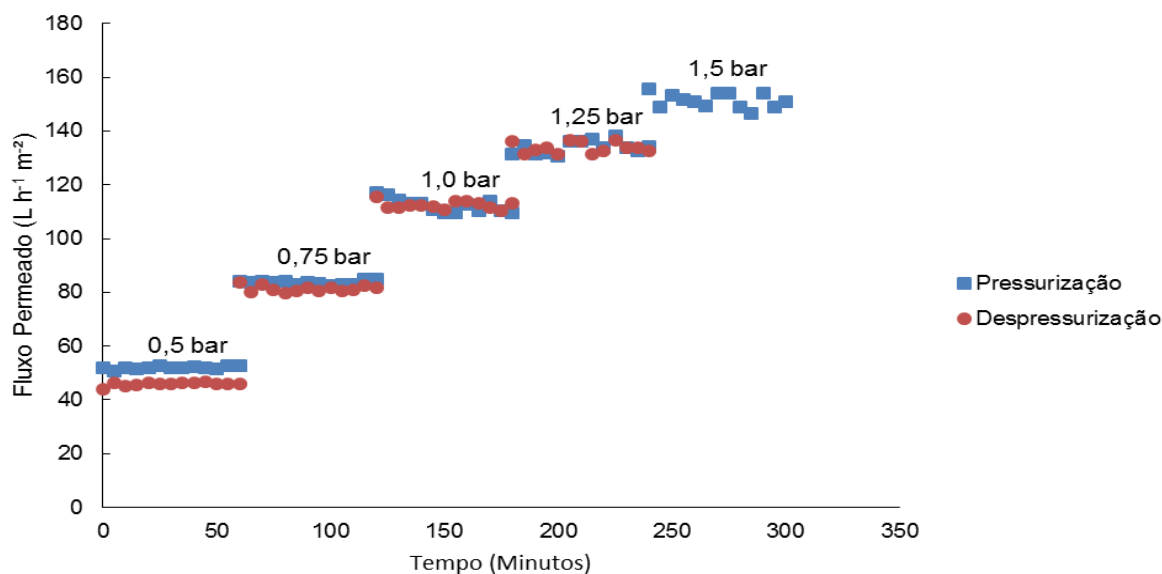


Figura 11 – Fluxo permeado no decorrer do tempo e à variação da pressão (pressurização e despressurização) da membrana MF 158, com água destilada.

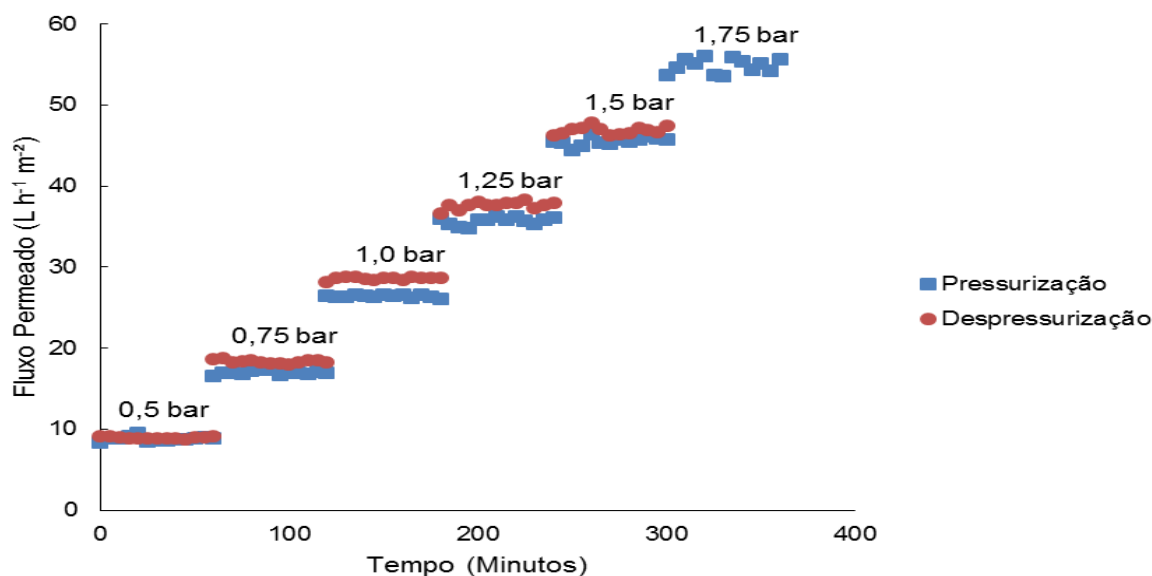


Figura 12 – Fluxo permeado no decorrer do tempo e à variação da pressão (pressurização e despressurização) da membrana UF 257, com água destilada.

Através da pressurização e da despressurização é possível verificar o fenômeno de compactação dos poros, ou histerese, que modifica o comportamento da membrana com relação a seletividade e fluxo (SARMENTO, 2007).

Nas Figuras 11 e 12, verifica-se pouca diminuição do fluxo das membranas na despressurização do módulo, ocorrendo pouca compactação e entupimento dos

poros quando realizadas os ensaios com água destilada. Tal fenômeno fica mais evidente somente na membrana de MF a pressões mais baixas (0,5 e 0,75 bar), quando há queda no fluxo permeado na despressurização.

Para a membrana de ultrafiltração, quando da despressurização, observa-se que houve aumento do fluxo permeado nas diferentes pressões. A alteração na estrutura dos poros do polímero da membrana pode ter contribuído para esse aumento do fluxo.

Nas Figuras 13 e 14 estão ilustradas a variação da permeabilidade hidráulica das membranas de microfiltração e ultrafiltração, respectivamente, com relação a água destilada e a variação de pressão, pressurização e despressurização, aplicadas as membranas.

É possível observar a linearidade do comportamento do fluxo com relação ao aumento da pressão e o aumento do fluxo quando da despressurização, especialmente na membrana de ultrafiltração. Para água destilada houve boa reversibilidade do fluxo as condições iniciais do processo.

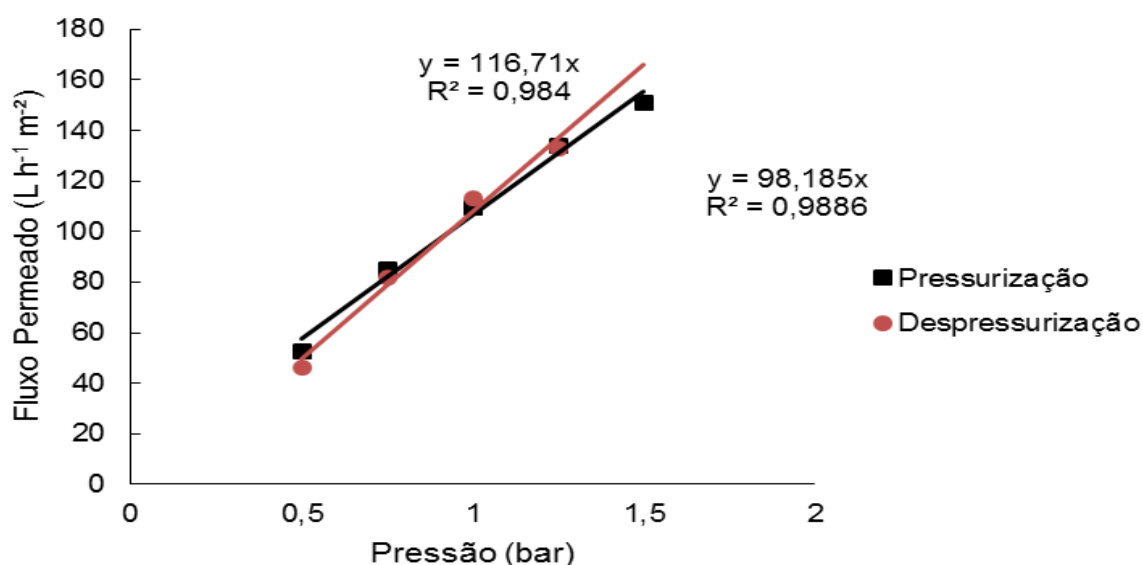


Figura 13 – Permeabilidade para água destilada da membrana de MF 158.

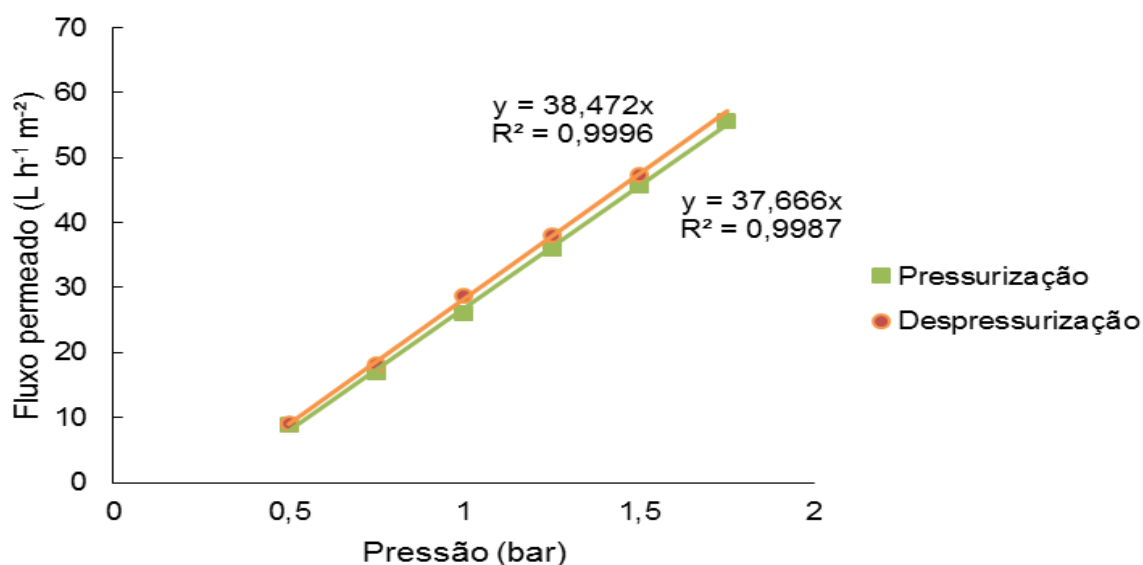


Figura 14 – Permeabilidade para água destilada da membrana de UF 257.

Os fluxos permeados encontrados nos ensaios de pressurização e despressurização (MF: 109,47 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> bar<sup>-1</sup>; UF: 26,07 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> bar<sup>-1</sup>), estão acima dos estabelecidos no manual de operação do módulo (PAM MEMBRANAS, 2012) e dispostos no Quadro 2 (MF: 99,7 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> bar<sup>-1</sup>; UF: 25,37 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> bar<sup>-1</sup>). Porém, as condições de realização foram diferentes. No manual, para a membrana de microfiltração, os ensaios foram realizados com água previamente microfiltrada. Para a membrana de ultrafiltração, os dados disponibilizados no manual informam que os ensaios foram realizados com água da concessionária de abastecimento público. Nos ensaios dispostos nas Figuras 13 e 14 foi utilizado água destilada.

Os dados de pressurização e despressurização foram utilizados para estabelecer a permeabilidade das membranas de MF e UF com água destilada, padronizando tais valores, para o restabelecimento do fluxo permeado após a limpeza das membranas.

Nas Figuras 15 e 16, estão dispostos os fluxos encontrados para a pressurização e despressurização dos módulos de microfiltração e ultrafiltração, quando realizados com efluente de laticínio coletado após a lagoa aerada (AATS), ponto de coleta 1 (Figura 6).

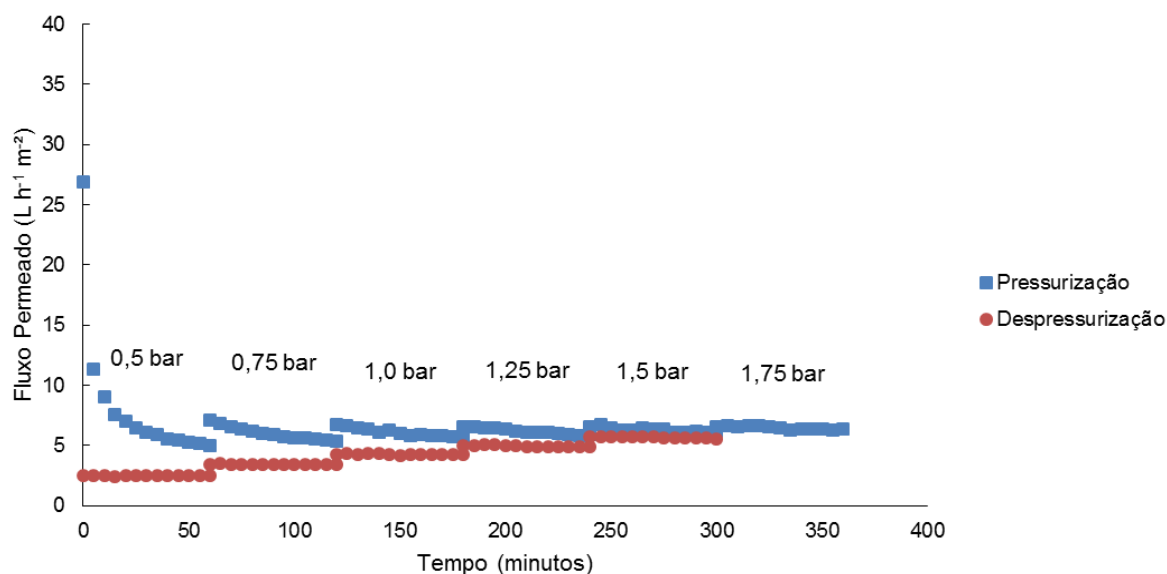


Figura 15 – Fluxo permeado no decorrer do tempo e à variação da pressão (pressurização e despressurização) da membrana de microfiltração (MF 158) com efluente de laticínio.

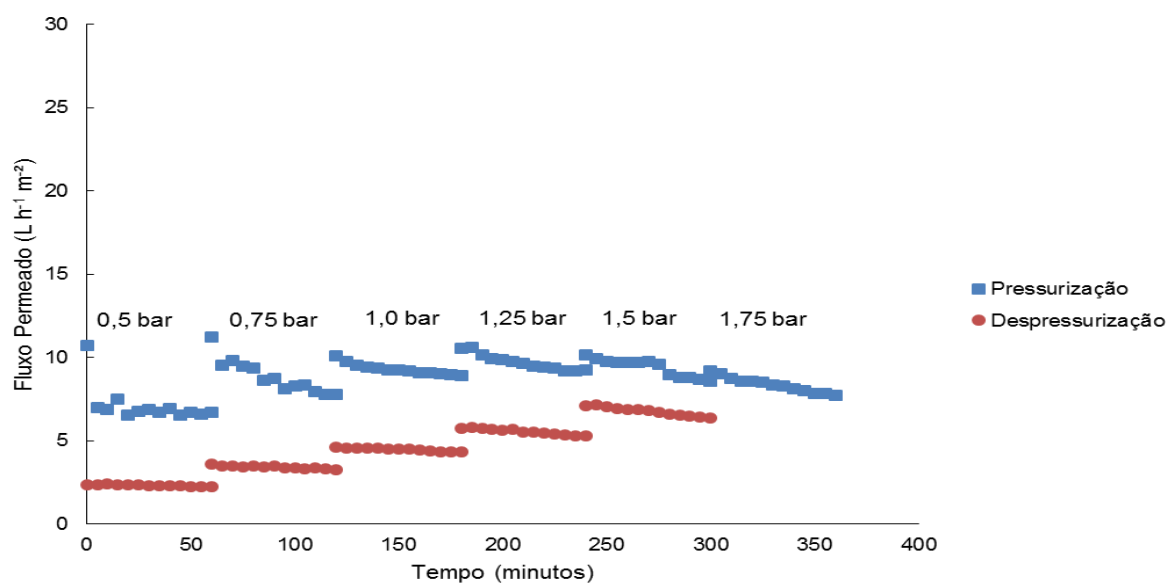


Figura 16 – Fluxo permeado no decorrer do tempo e à variação da pressão (pressurização e despressurização) da membrana de ultrafiltração (UF 257) com efluente de laticínio.

Para os ensaios com a utilização do efluente de laticínio, é mais evidente o fenômeno de histerese de ambas as membranas quando comparadas com o fluxo encontrado quando da passagem de água. Para todas as pressões das duas membranas, houve queda do fluxo na despressurização, evidenciando o

entupimento dos poros e a influência da compactação destes na redução do fluxo permeado.

A queda do fluxo foi mais evidente para as pressões menores, em ambas as membranas. Essa redução indica que, o efluente oriundo do tratamento secundário da indústria, favorece a formação de incrustação na superfície da membrana, aumentando o entupimento do poro e, conseqüentemente, os fenômenos de colmatação e polarização de concentração.

Resultados semelhantes ao do presente estudo foram também encontrados por Fappi (2015), que estudou membranas de MF e UF, da Pam-Membranas Seletivas, semelhantes às utilizadas no presente trabalho, e encontrou diminuição do fluxo na pressurização e despressurização usando efluente de matadouro frigorífico.

As Figuras 17 e 18, expõem a linearidade referente ao fluxo permeado das membranas de micro e ultrafiltração para a água e para o efluente, de acordo com as pressões. Observa-se que a permeabilidade das membranas para o efluente de laticínio é menor.

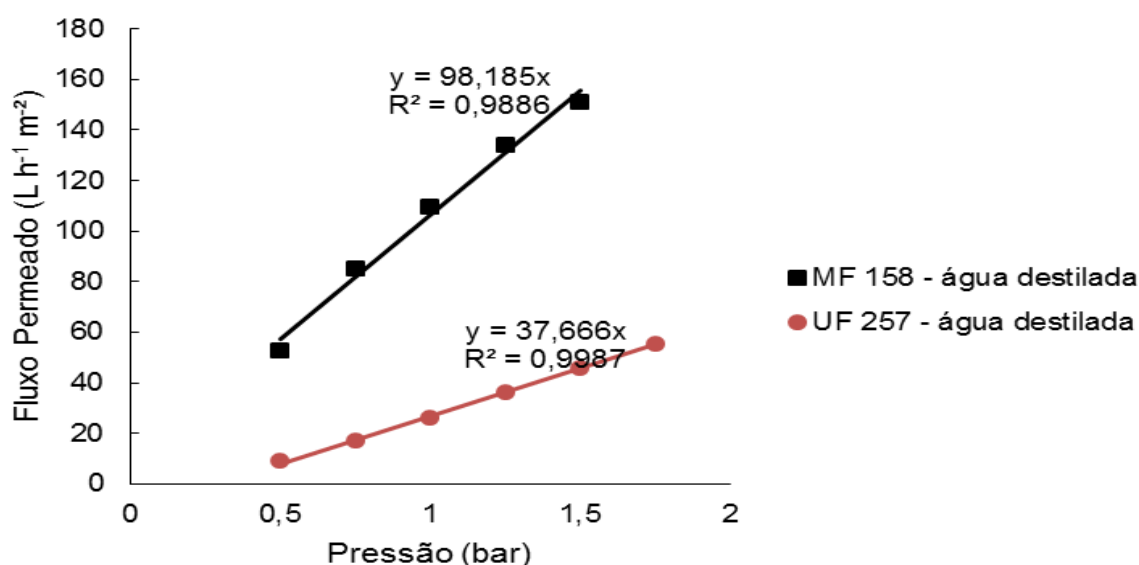
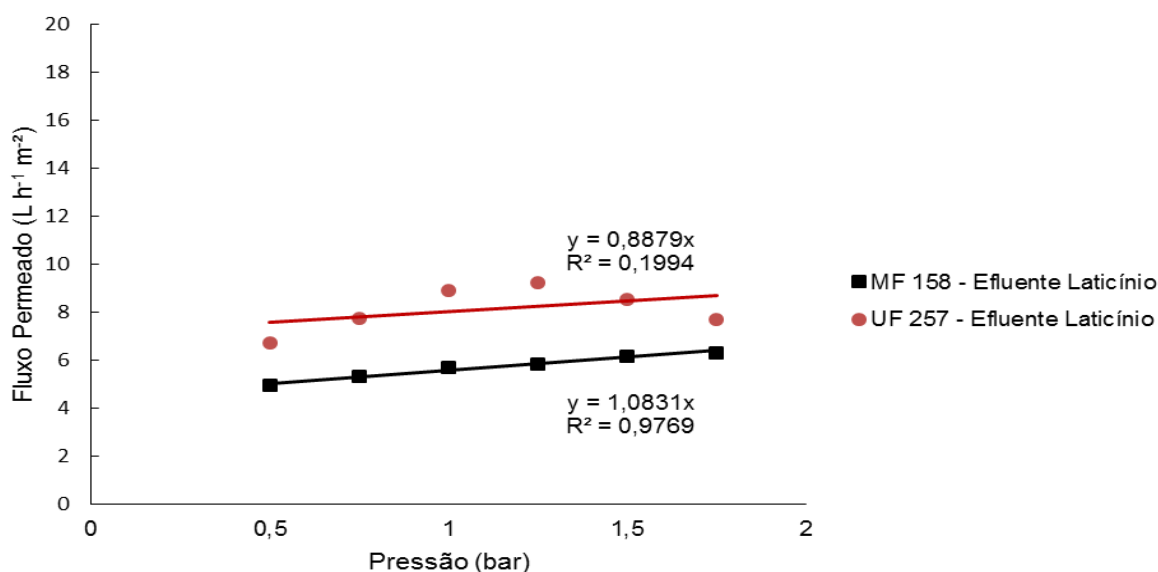


Figura 17 - Comportamento do fluxo permeado de água destilada em função do diferencial de pressão aplicado à membrana de microfiltração (MF 158) e de ultrafiltração (UF 257).



**Figura 18 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente após o tratamento secundário (AATS) em função do diferencial de pressão aplicado às membranas de microfiltração (MF 158) e ultrafiltração (UF 257).**

O aumento no fluxo permeado de água destilada das membranas de MF e UF fica visível com o aumento da pressão. Entretanto, a permeabilidade das membranas de MF e UF para o efluente de laticínio é menor que para água destilada, e a visualização do aumento do volume de permeado com o aumento da pressão fica pouco visível.

A linearidade do fluxo permeado com o aumento da pressão ocorre, para a membrana de MF, tanto com água destilada quanto com o efluente de laticínio (Figuras 17 e 18). Já para a membrana de UF, a linearidade ocorre apenas para a água destilada. Quando ocorreu a filtração de efluente de laticínio, a partir do aumento da pressão de 1,25 para 1,5 e em seguida para 1,75 bar, o fluxo permeado teve um pequeno decréscimo (Figura 18). A não linearidade do fluxo permeado com o aumento da pressão pode indicar o acúmulo de partículas na superfície da membrana.

É possível perceber que a colmatação afeta ambas as membranas quando há permeação de efluente oriundo de laticínio. A diferença nos fluxos permeados já era esperada, comparando-se com os resultados obtidos em outros estudos (AMARAL et al., 2013; FAPPI, 2015; ANDRADE et al., 2001).

Pode-se atribuir a não linearidade do fluxo e a queda do fluxo ao entupimento dos poros e formação de incrustação na superfície da membrana, o que

amplia a resistência à permeabilidade do fluxo, quando da existência de poluentes na solução que é permeada (HABERT; BORGES; NOBREGA; 2006).

### 5.3.2 Coeficiente de Colmatação para as membranas de microfiltração e ultrafiltração

O cálculo do coeficiente de colmatação (CC) foi realizado conforme a equação 3. Para o cálculo, inicialmente, ocorreu durante 60 minutos (estabilização do fluxo permeado), a passagem de água destilada pelo módulo. Em seguida, ocorreu a filtração de efluente de laticínio, durante 60 minutos até a estabilização do fluxo permeado. Por fim, ocorreu uma nova passagem por 60 minutos de água destilada. O fluxo foi medido durante 5 minutos, e realizou-se as corridas para as 3 pressões (0,5, 0,75 e 1,0 bar), calculando-se o coeficiente de colmatação para cada pressão conforme Rao (2002).

De acordo com Rao (2002), o coeficiente de colmatação indica o acúmulo de partículas na superfície da membrana, que diminuem a passagem do líquido a ser permeado pelos poros. Na Tabela 13 estão dispostos os valores para os coeficientes de colmatação das membranas de MF e UF, para as diferentes pressões utilizadas, e nos tempos de 30 e 60 minutos.

**Tabela 13 – Coeficiente de Colmatação das membranas de MF e UF, nas diferentes pressões e nos tempos de 30 e 60 minutos.**

	Membrana de Microfiltração			Membrana de Ultrafiltração		
<b>Pressão (bar)</b>	0,5	0,75	1,0	0,5	1,0	1,5
<b>Tempo (minuto)</b>	30	30	30	30	30	30
<b>Coeficiente de Colmatação (CC)</b>	0,76	0,75	0,89	0,10	0,21	0,41
<b>Tempo (minuto)</b>	60	60	60	60	60	60
<b>Coeficiente de Colmatação (CC)</b>	0,79	0,78	0,89	0,14	0,17	0,44

A membrana de MF apresentou valores altos de CC, para todas as pressões e nos tempos de 30 e 60 minutos. Os CC foram bem superiores aos de UF em todas as pressões. À pressão de 0,75 bar apresentou os menores CC, 0,75 e 0,78, nos



tempos de 30 e 60 minutos, respectivamente, valores semelhantes aos da pressão de 0,5 bar que foram de 0,76 e 0,79, nos tempos de 30 e 60 minutos, respectivamente. Os maiores valores do CC foram à pressão de 1,0 bar, 0,89 nos tempos de 30 e 60 minutos, chegando-se próximo ao entupimento da membrana.

A membrana de UF apresentou CC menores, principalmente comparando-se com a membrana de MF. Para as pressões de 0,5 e 1,0 bar, aos 60 minutos, o CC foi de 0,14 e 0,17, respectivamente.

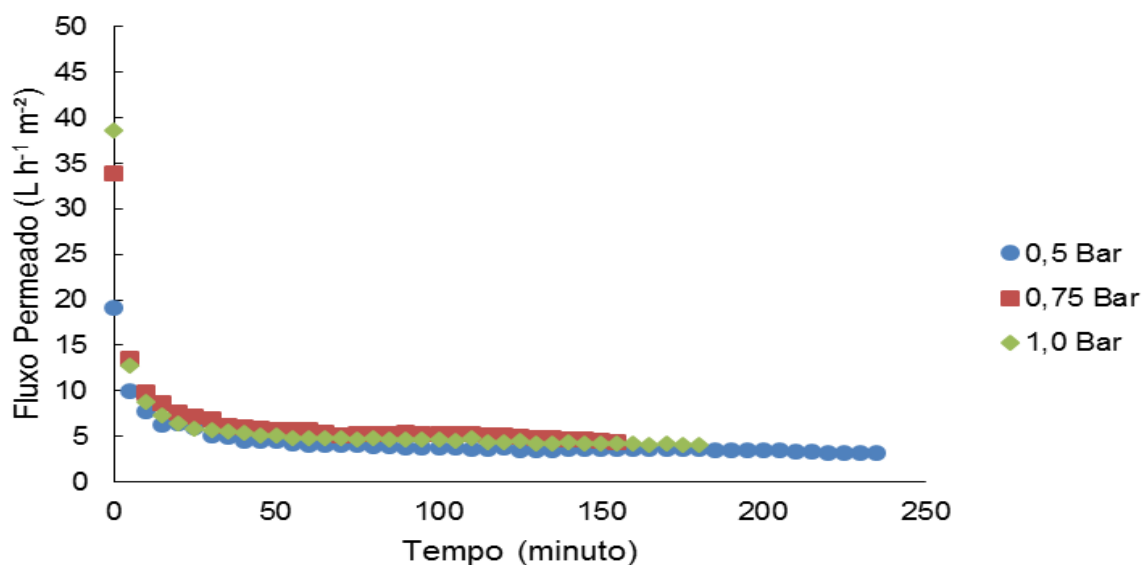
Os valores elevados de colmatação para a membrana de UF ocorreram à pressão mais alta, sendo maiores principalmente na pressão de 1,5 bar, na qual, no tempo de 60 minutos, chegou a 0,44.

Conforme afirmam Vidal e Campos (2009), a fração coloidal presente nos efluentes que são microfiltrados, a qual compreende a faixa de partícula próxima do diâmetro dos poros da membrana de microfiltração, é a mais relevante na colmatação dessas membranas, causando na maior parte das vezes, obstrução interna dos poros. Mesmo a retrolavagem e o escoamento tangencial pela membrana não são suficientes para a remoção destas partículas nas membranas.

O *fouling* aliado a concentração de polarização representam as maiores limitações para a aplicação de membranas no tratamento de efluentes (RAO, 2002). Verifica-se através dos valores de CC encontrados que a membrana de MF tem maior acúmulo de partículas em sua superfície se comparada com a membrana de UF. Isso pode significar que a aplicação de tal membrana pode ser limitada para o efluente oriundo de laticínio. A membrana de UF sofre menor influência dos fenômenos de *fouling*.

### 5.3.3 Comportamento do fluxo permeado para membrana de microfiltração

Os ensaios E1, E2 e E3, da matriz experimental (Tabela 10) foram realizados com a membrana de MF, nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar. O efluente do Lote 1 foi utilizado para a realização dos ensaios sendo o comportamento do fluxo permeado nas três pressões com as amostras de efluente coletadas após o tratamento secundário da indústria de laticínios (AATS) apresentado na Figura 19.



**Figura 19 – Comportamento do fluxo permeado na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio.**

Os dados dispostos na Figura 19 demonstram que, com o aumento da pressão, o fluxo permeado inicial ( $J_i$ ) também aumentou. Entretanto, houve grande queda do fluxo permeado nos primeiros minutos de operação, para as 3 pressões (47,98, 60,14 e 66,83%, para as pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar, respectivamente). A partir de 60 minutos, aproximadamente, ocorreu a estabilização do fluxo permeado em 4,11, 5,62 e 4,81  $L h^{-1} m^{-2} bar^{-1}$ , para as pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar, respectivamente.

O fluxo não apresentou linearidade com o aumento da pressão, como pode ser visto através da Figura 19, o que indica, de acordo com Habert, Borges e Nobrega (2006) que pode haver transformação na estrutura dos poros da membrana, bem como acúmulo de substâncias em sua superfície. Acero et al. (2010) cita que a não linearidade do fluxo permeado com o aumento da pressão indica o acúmulo de partículas na superfície da membrana.

Em processos de separação por membranas de MF e UF o comportamento do fluxo permeado, de acordo com Song (1998) é composto por 3 estágios. O estágio 1 é caracterizado por um rápido declínio do fluxo de filtração; seguido por um longo decréscimo do fluxo (estágio 2) finalizando com a estabilização do fluxo permeado (estágio 3). A autora explica que o estágio 2 ocorre em todos os

processos de *fouling* das membranas, independentemente das condições de operação. Os estágios 1 e 3 podem não ocorrer por vários motivos, especificamente porque a estabilização do fluxo precisa de um longo tempo de operação para ocorrer.

A redução do fluxo permeado no decorrer do tempo de filtração, gera uma curva característica de processos de separação por membranas, em especial utilizando-se membranas de microfiltração e ultrafiltração. A variação típica do fluxo da membrana em relação ao tempo refere-se ao rápido decréscimo inicial do fluxo de permeado, seguido de um longo e gradual período onde há também o declínio do fluxo (FIELD et al., 1995).

Segundo Lautenschlager, Filho e Pereira (2009) e Bullón et al. (2007) a causa da redução do fluxo o acúmulo de substâncias na superfície da membrana. Além disso, essa curva característica é encontrada em diversos estudos, podendo-se citar Acero et al. (2010), Amaral et al. (2013) e Brião e Tavares (2007), por exemplo.

Os fluxos iniciais da membrana de MF para as pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar foram de 19,07, 33,95 e 38,69 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>, respectivamente. Com 150 minutos de ensaio, os fluxos permeados para as pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar diminuiram para 3,58, 4,52 e 4,22 L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>, respectivamente. O percentual de diminuição no fluxo para a membrana de MF 158, no decorrer dos ensaios é exposto na Tabela 14.

**Tabela 14 – Percentual de redução do fluxo (%) referente a membrana de microfiltração (158) nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de indústria de laticínio após o tratamento secundário.**

Membrana	MF 158 0,5 Bar		MF 158 0,75 Bar		MF 158 1,0 Bar	
	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo
0	19,07	-	33,96		38,69	
5	9,92	47,98	13,53	60,14	12,83	66,83
10	7,73	59,46	9,88	70,91	8,83	77,18
20	6,45	66,19	7,57	77,71	6,43	83,37
30	5,06	73,44	6,82	79,91	5,66	85,38
60	4,11	78,45	5,62	83,44	4,81	87,56
90	3,76	80,29	5,38	84,14	4,62	88,06
120	3,71	80,54	5,03	85,18	4,39	88,65
150	3,58	81,23	4,52	86,68	4,22	89,10

A membrana de MF para a pressão de 1,0 bar teve maior queda do fluxo se comparada com as pressões de 0,5 e 0,75 bar, o que pode estar associado a compactação dos poros, segundo Sarmiento (2007), bem como com os fenômenos de incrustação, concentração de polarização e colmatação da membrana, citados por Schneider e Tsutyia (2001).

O coeficiente de colmatação (CC) para a membrana de MF (Tabela 13) foi mais alto para a pressão de 1,0 bar, podendo correlacionar-se com a maior porcentagem de redução do fluxo permeado no decorrer do ensaio.

Nos primeiros cinco minutos ocorreu grande queda do fluxo permeado para as três pressões, de 47,98, 60,14 e 66,83% para as pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar, respectivamente. Após os 60 minutos o fluxo caiu mais de 80% para as três pressões.

Considerando-se o fluxo médio a partir dos 60 minutos para a três pressões, o maior fluxo foi para a pressão de 0,75 bar. Os fluxos médios para as pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar foram de 3,79, 5,14 e 4,51 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, respectivamente.

Para uma membrana polimérica com dimensão de poro de 0,1 µm e material de produção poliamida, aplicando pressão transmembrana de 2,0 bar no tratamento de água produzida de petróleo, Weschenfelder, Borges e Campos (2015) também encontraram queda considerável do fluxo permeado ao final do experimento (60%).

#### 5.3.4 Comportamento do fluxo permeado para membrana de ultrafiltração

Para a membrana de UF, a Figura 20 demonstra o comportamento do fluxo permeado nos três ensaios (T4, T5 e T6) com as amostras de efluente coletadas após o tratamento secundário da indústria de laticínios (Lote 2, Tabela 12).

Optou-se por utilizar maiores pressões para a membrana de ultrafiltração, pois para esse tipo de membrana, há maior amplitude na utilização da força motriz (SCHNEIDER; TSUTYIA, 2001; HABERT; BORGES; NOBREGA, 2006).

A curva característica do fluxo permeado no decorrer dos ensaios também ficou evidente para a membrana de UF, havendo grande queda no fluxo permeado nos primeiros minutos e posterior estabilização após 60 minutos.

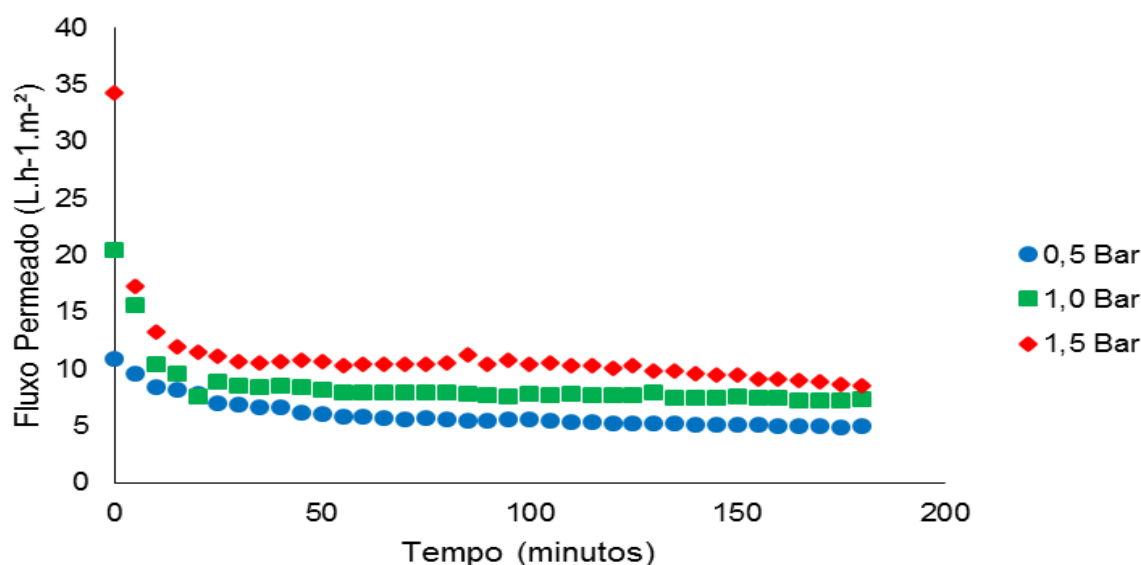


Figura 20 – Comportamento do fluxo permeado na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio.

Após o período de 60 minutos, semelhante a membrana de MF, para a membrana de UF também há estabilização no fluxo permeado. As pressões mais altas apresentaram fluxo maior no decorrer do tempo, para a membrana de ultrafiltração.

Para Brião e Tavares (2007), ao estudarem dois tipos de membranas de ultrafiltração no tratamento de efluentes de laticínio, e também encontraram rápido declínio do fluxo permeado nos primeiros minutos da operação do sistema.

Os dados referentes a porcentagem de queda do fluxo ao longo do tempo para a membrana de UF estão expostos na Tabela 15.

Tabela 15 – Percentual de queda do fluxo referente a membranas de ultrafiltração (257) às pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de indústria de laticínio após o tratamento secundário.

(continua)

Membrana	UF 257 0,5 Bar		UF 257 1,0 Bar		UF 257 1,5 Bar	
	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo
Tempo (min.)						
0	10,88		20,45		34,33	
5	9,64	11,36	15,61	23,68	17,34	49,50
10	8,45	22,27	10,42	49,04	13,31	61,24

**Tabela 15 – Percentual de queda do fluxo referente a membranas de ultrafiltração (257) às pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de indústria de laticínio após o tratamento secundário.**

Membrana	UF 257 0,5 Bar		UF 257 1,0 Bar		UF 257 1,5 Bar	
	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo	Fluxo Permeado (L h <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> )	(%) Red. Fluxo
20	7,81	28,19	7,56	63,01	11,46	66,63
30	6,89	36,62	8,48	58,52	10,68	68,88
60	5,81	46,62	7,91	61,32	10,46	69,54
90	5,51	49,33	7,71	62,32	10,41	69,67
120	5,27	51,55	7,69	62,38	10,11	70,55
150	5,09	53,24	7,57	63,00	9,45	72,48

Nos primeiros cinco minutos ocorreu queda considerável do fluxo permeado, de 11,36, 23,68 e 49,50% para as pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar, respectivamente. Após os 60 minutos o fluxo caiu mais de 60% para as pressões de 1,0 e 1,5 bar. Para as pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar, ao final do ensaio ocorreu redução no fluxo de 53,24, 63,00 e 72,48%, respectivamente.

Para maiores pressões é possível perceber por meio dos dados dispostos na Tabela 15, que a redução do fluxo é maior para a membrana de UF, do que para as menores pressões.

O maior fluxo médio a partir dos 60 minutos para a três pressões utilizadas, o maior fluxo foi determinado para a pressão de 1,5 bar. Os fluxos médios para as pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar foram de 5,42, 7,72 e 10,11 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, respectivamente.

Se comparado o fluxo da membrana de UF com o da membrana de MF, verifica-se que o fluxo permeado foi mais elevado para a UF. Esse fato pode ser explicado, pelo maior efeito de colmatação e entupimento dos poros apresentado pela membrana de microfiltração, que influencia diretamente na queda do fluxo. Fappi (2015) encontrou condições contrárias para o fluxo permeado estudando membranas de MF e UF semelhantes as utilizadas no presente trabalho, no tratamento de efluente de matadouro frigorífico. O autor citado encontrou maiores fluxos permeados para a membrana de microfiltração em comparação com as de ultrafiltração que utilizou no estudo. Isso pode ser atribuído a diferença nas

características do efluente, sendo que as partículas presentes no efluente de laticínio contribuem para a colmatação da membrana de MF.

No mesmo sentido, Schmitt et al. (2013) utilizaram uma membrana de UF de cerâmica, com diâmetro de poro de 0,1  $\mu\text{m}$  e retenção molar de 4 kDa, no tratamento de efluente oriundo de processo de limpeza de pasteurizadores de uma indústria de laticínios. Também encontraram grande queda no fluxo permeado no decorrer do estudo, próximo de 80%, utilizando pressão transmembrana de 2 bar.

Analisando-se os dados referentes ao coeficiente de colmatação apresentado pelas membranas de UF e comparando-se com a porcentagem de redução do fluxo nas três pressões, pode-se verificar uma menor colmatação da membrana de UF comparando-se com a membrana de MF (MF 158) (ver Tabela 13).

Os fluxos permeados da membrana de UF foram maiores que os da membrana de MF, tal fator pode ser atribuído ao maior efeito de colmatação, concentração de polarização, entupimento e compactação dos poros na membrana de MF.

O aspecto visual das amostras de permeado coletadas após os tratamentos por membranas de microfiltração (MF 158) e ultrafiltração (UF 257) estão demonstradas na Figura 21.

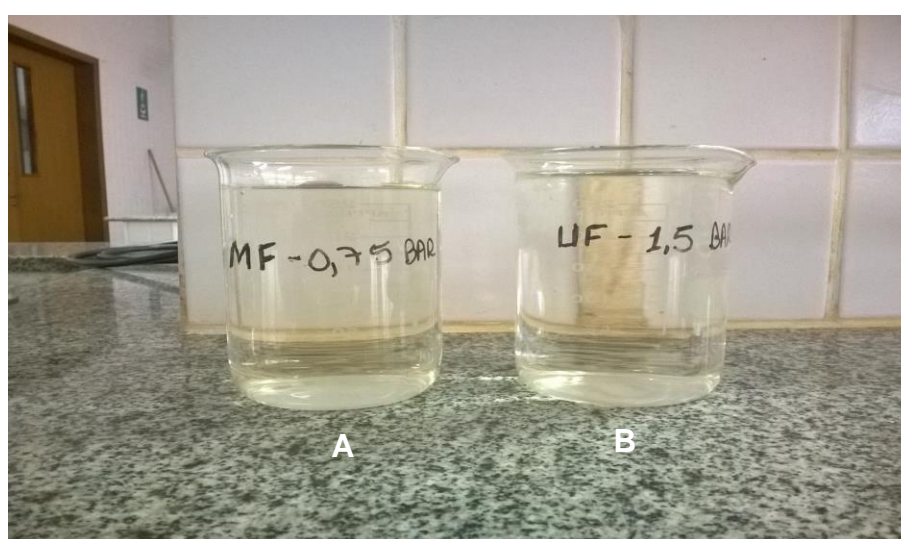


Figura 21 – Aspecto visual das amostras de permeado de MF 158 (A) e UF 257 (B).

### 5.3.5 Eficiência do sistema de tratamento de microfiltração em relação aos fatores de concentração

Para os 3 primeiros tratamentos utilizando as 3 pressões para a membrana de MF, foram coletadas amostras nos fatores de concentração 1,25, 1,5, 1,75, 2,0 e 2,25. Foram analisados os parâmetros sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, pH, turbidez e sólidos sedimentáveis. É relevante o monitoramento dos sólidos no efluente, pois são responsáveis pela colmatação das membranas e reduzem o fluxo que é permeado por elas, muitas vezes inviabilizando o processo.

Para todos os ensaios em todos os fatores de concentração ocorreu remoção de 100% tanto da Turbidez, quanto dos Sólidos Sedimentáveis. Os dados encontrados após os tratamentos e a eficiência do tratamento, por pressão utilizada e por fator de concentração, estão dispostos nas Tabelas 16, 17 e 18.

**Tabela 16 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de MF 0,5 bar.**

Parâmetro	Concentração por Fatores de Concentração (Fc) e eficiência do tratamento (E)									
	1,25	E (%)	1,50	E (%)	1,75	E (%)	2,00	E (%)	2,25	E (%)
ST (mg L)	1.662	42,22	1.243	56,79	1.901	33,91	2.015	29,95	2.075	27,86
STF (mg L)	1.391	24,46	1.049	43,04	1.605	12,84	1.785	3,07	1.789	2,85
STV (mg L)	271	73,82	194	81,26	296	71,40	230	77,78	223	78,45
pH	8,76	-	9,05	-	9,27	-	9,31	-	9,31	-

**Tabela 17 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de MF 0,75 bar.**

Parâmetro	Concentração por Fatores de Concentração (Fc) e eficiência do tratamento (E)									
	1,25	E (%)	1,50	E (%)	1,75	E (%)	2,00	E (%)	2,25	E (%)
ST (mg L)	1.996	30,61	2.330	19,00	1.747	39,27	1.753	39,06	1.566	45,56
STF (mg L)	1.730	6,05	1.704	7,47	1.258	31,69	1.404	23,76	1.473	20,01
STV (mg L)	266	74,30	426	58,84	489	52,75	349	66,28	93	91,01
pH	8,04	-	8,21	-	8,39	-	8,49	-	8,50	-

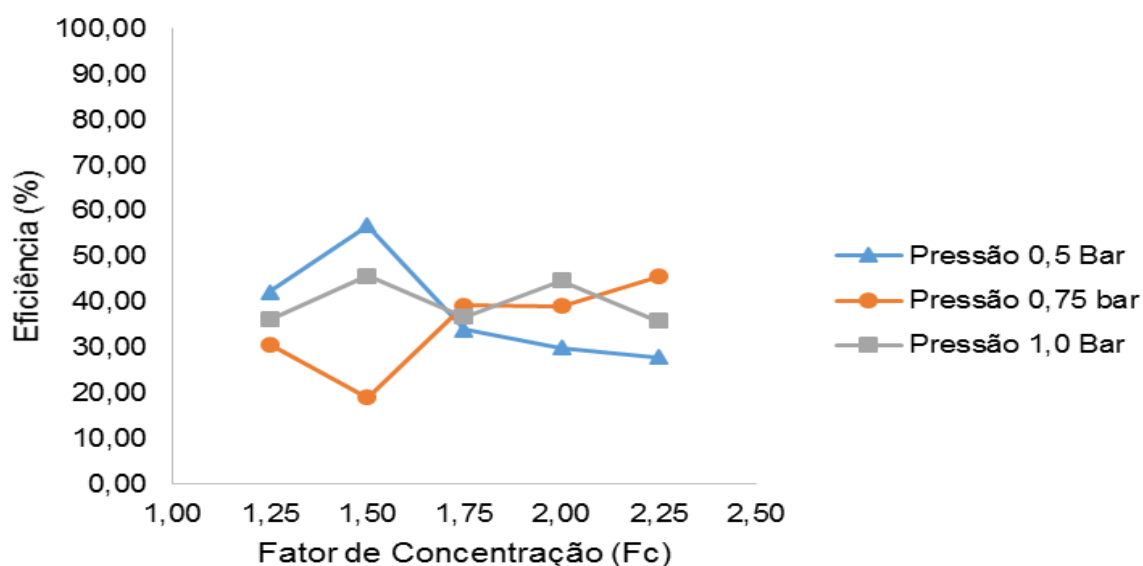


**Tabela 18 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de MF 1,0 bar.**

Parâmetro	Concentração por Fatores de Concentração (Fc) e eficiência do tratamento (E)									
	1,25	E (%)	1,50	E (%)	1,75	E (%)	2,00	E (%)	2,25	E (%)
ST (mg L)	1.837	36,14	1.562	45,70	1.819	36,76	1.590	44,72	1.845	35,86
STF (mg L)	1.563	15,12	1.345	26,96	1.456	20,93	1.181	35,87	1.508	18,11
STV (mg L)	274	73,53	217	79,03	363	64,93	409	60,48	337	67,44
pH	8,09	-	8,2	-	8,52	-	8,43	-	8,47	-

Neta, Habert e Borges (2005), encontraram para a microfiltração de cerveja, também encontraram valores altos de remoção da turbidez, chegando a 98% de eficiência, utilizando membrana de microfiltração (0,4  $\mu\text{m}$ ) semelhante a utilizada na presente pesquisa. A remoção da turbidez tem grande importância, pois influencia no aspecto visual do efluente, tornando o efluente mais aceitável quando há menor turbidez.

Para uma melhor visualização dos dados referentes a eficiência dos sólidos durante os tratamentos por MF, nas Figuras 22, 23 e 24, estão dispostos os dados de acordo com a pressão e os fatores de concentração de 1,25, 1,5, 1,75, 2 e 2,25.



**Figura 22 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais por fator de concentração, na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio.**

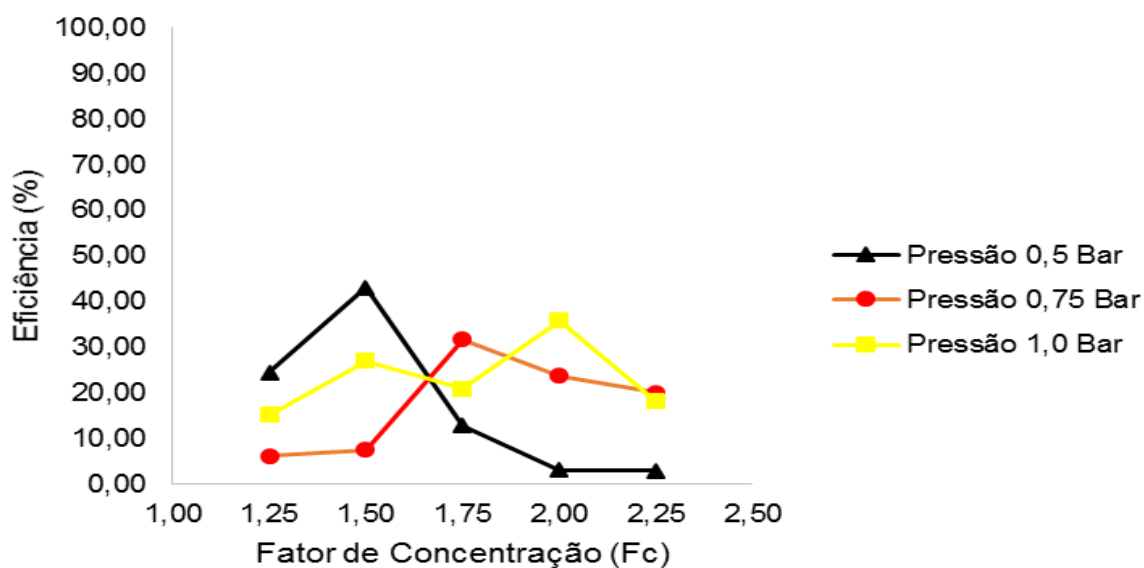


Figura 23 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais Fixos por fator de concentração, na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio.

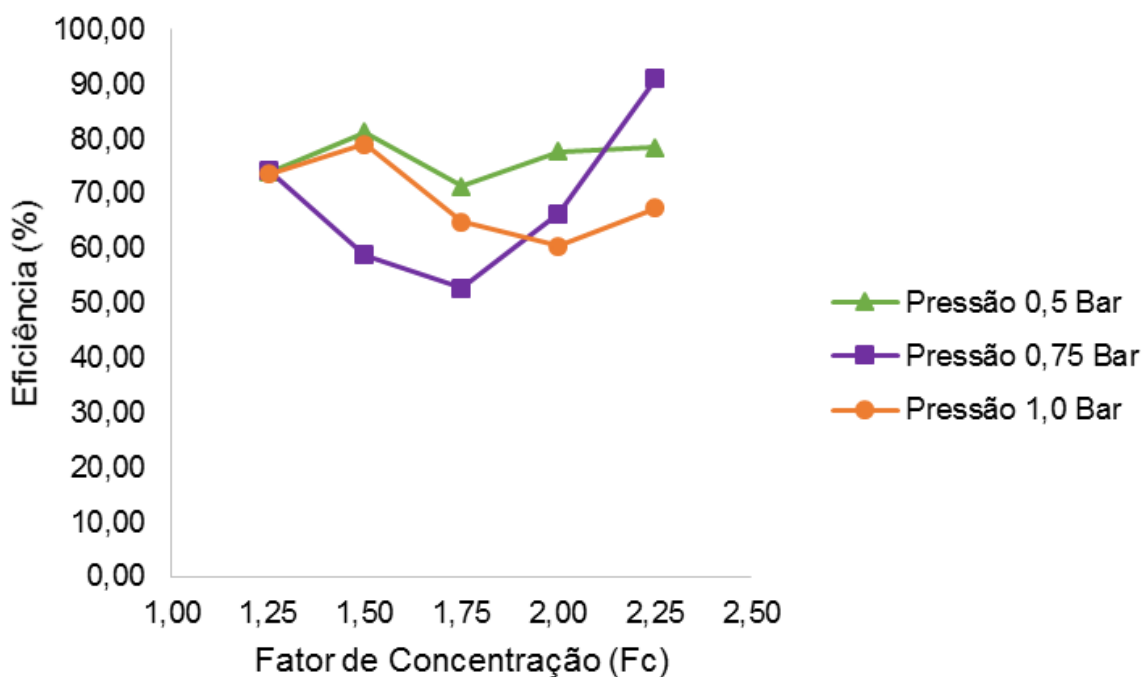


Figura 24 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais Voláteis por fator de concentração, na membrana de microfiltração (MF 158) nas pressões de 0,5, 0,75 e 1,0 bar com efluente de laticínio.

Os dados dispostos nas Figuras 24 a 26 demonstram que houve variação para os diferentes fatores de concentração, na eficiência de retenção encontrada de sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis.

A eficiência de retenção de sólidos totais foi mais alta para o fator de concentração de 1,5, nas pressões de 0,5 e 1,0 bar, condição oposta visualizada para a pressão de 0,75 bar. Para os três últimos fatores de concentração houve diminuição na eficiência, sendo semelhante as eficiências encontradas para os três fatores de concentração.

O comportamento para a retenção de sólidos totais fixos foi menos eficiente se comparada com a retenção de sólidos totais voláteis. Para a pressão de 0,5 bar ocorreu queda considerável na eficiência de retenção dos sólidos totais fixos nos fatores de concentração de 1,75, 2,00 e 2,25, sendo que a eficiência para os dois últimos fatores de concentração foi de 3,07 e 2,85%, respectivamente, demonstrando que houve passagem dos sólidos totais fixos pela membrana.

A retenção de sólidos totais voláteis foi mais eficiente na membrana de MF, para as diferentes pressões comparando-se com os totais fixos. A eficiência chegou a mais de 90% para a pressão de 0,75 bar, no fator de concentração de 2,25.

As diferentes eficiências apresentadas pelas membranas nas diferentes pressões e nos diferentes fatores de concentração, demonstram que a concentração do efluente a ser tratado pode influenciar a eficiência da membrana, além de ser possível visualizar que a retenção de sólidos totais, sólidos totais fixos e sólidos totais voláteis não é constante.

### 5.3.6 Eficiência do sistema de tratamento de ultrafiltração em relação aos fatores de concentração

Para a membrana de UF foram coletadas amostras em menor número de fatores de concentração, pois a área de filtração do módulo é bastante inferior ao de microfiltração, precisando de tempos muito longos para atingir os fatores de concentração estipulados.

Os valores após os tratamentos e a eficiência, por pressão utilizada e por fator de concentração, estão nas Tabelas 19, 20 e 21. A eficiência foi calculada para

cada fator de concentração, utilizando o valor do parâmetro encontrada no efluente Lote 2 (Tabela 12) e concentração encontrada no permeado após a UF.

**Tabela 19 – Resultados por fator de concentração (Fc) e eficiência do processo (%) para a membrana de UF 0,5 bar.**

Parâmetro	1,25	E (%)	1,50	E (%)
ST (mg L)	1.924	44,78	1.811	48,02
STF (mg L)	1.608	17,67	1.517	22,32
STV (mg L)	316	79,36	294	80,80
pH	8,89	-	9,00	-

**Tabela 20 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de UF 1,0 bar.**

Parâmetro	1,25	E (%)	1,50	E (%)	1,75	E (%)	2,00	E (%)
ST (mg L)	2.002	42,54	1.889	45,78	1.976	43,28	1.574	54,82
STF (mg L)	1.879	3,79	1.786	8,55	1.857	4,92	1.285	34,20
STV (mg L)	123	91,97	103	93,27	119	92,23	289	81,12
pH	8,76	-	8,89	-	9,00	-	9,00	-

**Tabela 21 – Resultados por fator de concentração e eficiência do processo para a membrana de UF 1,5 bar.**

Parâmetro	1,25	E (%)	1,50	E (%)	1,75	E (%)	2,00	E (%)
ST (mg L)	1784	48,79	1812	47,99	1857	46,70	1861	46,58
STF (mg L)	1601	18,02	1599	18,13	1658	15,10	1674	14,29
STV (mg L)	183	88,05	213	86,09	199	87,00	187	87,79
pH	8,84	-	8,89	-	9	-	9	-

A membrana de UF apresentou eficiência na remoção da Turbidez de 100% nas três pressões e nos diferentes fatores de concentração, mesmo com a elevada Turbidez encontrada no Efluente de laticínio do Lote 2 (Tabela 12).

Para uma melhor visualização dos dados referentes a concentração dos sólidos durante os tratamentos por UF, nas Figuras 25, 26 e 27, estão dispostos os dados de acordo com a pressão e os fatores de concentração de 1,25, 1,5, 1,75 e 2.

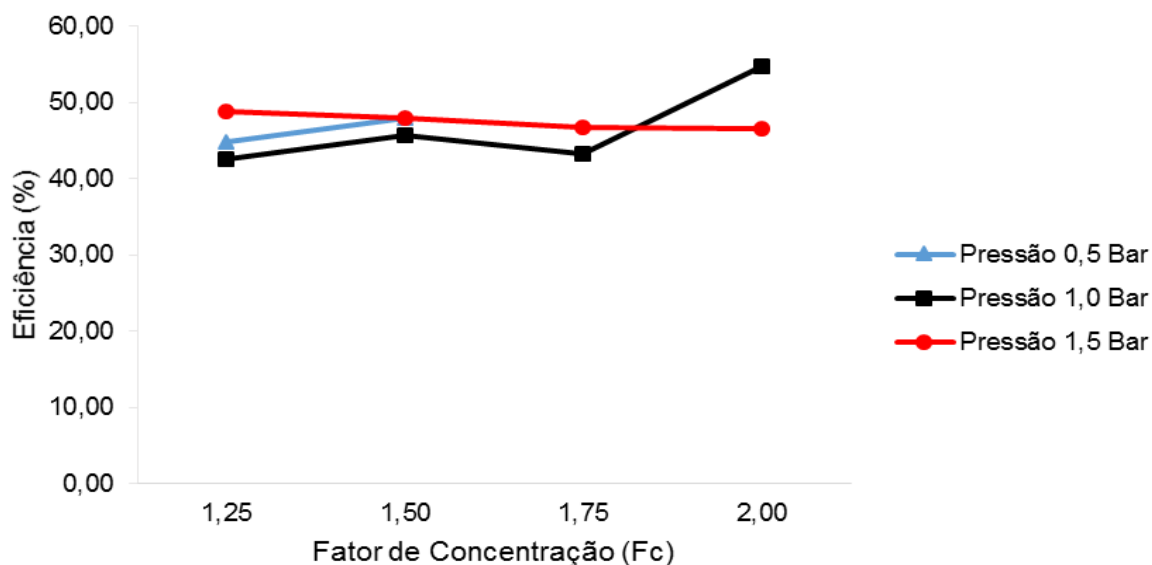


Figura 25 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais por fator de concentração, para a membrana de UF (257) nas pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de laticínio.

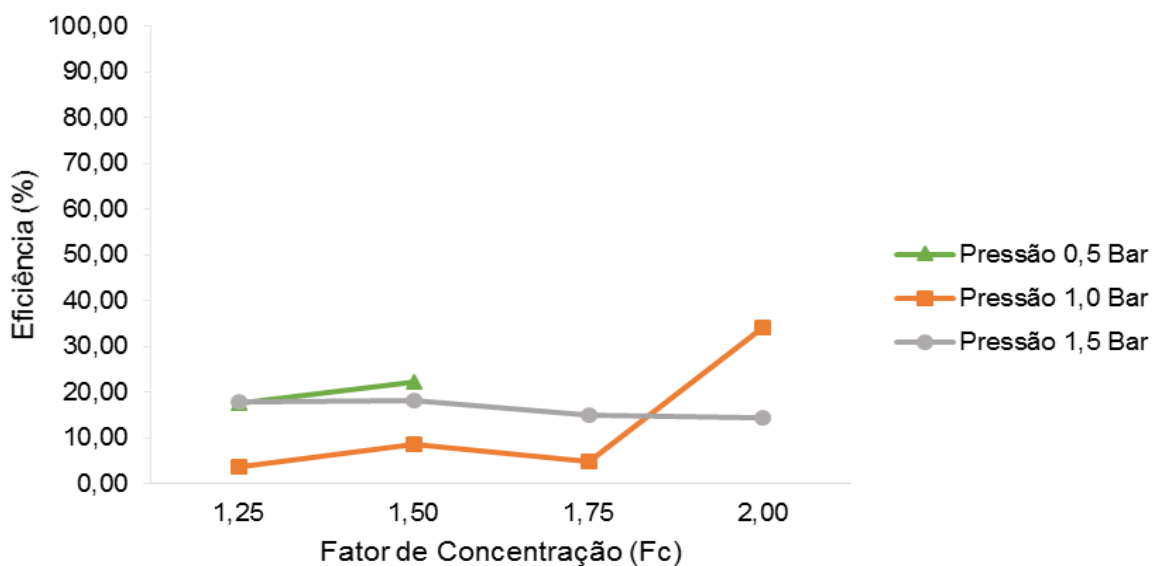
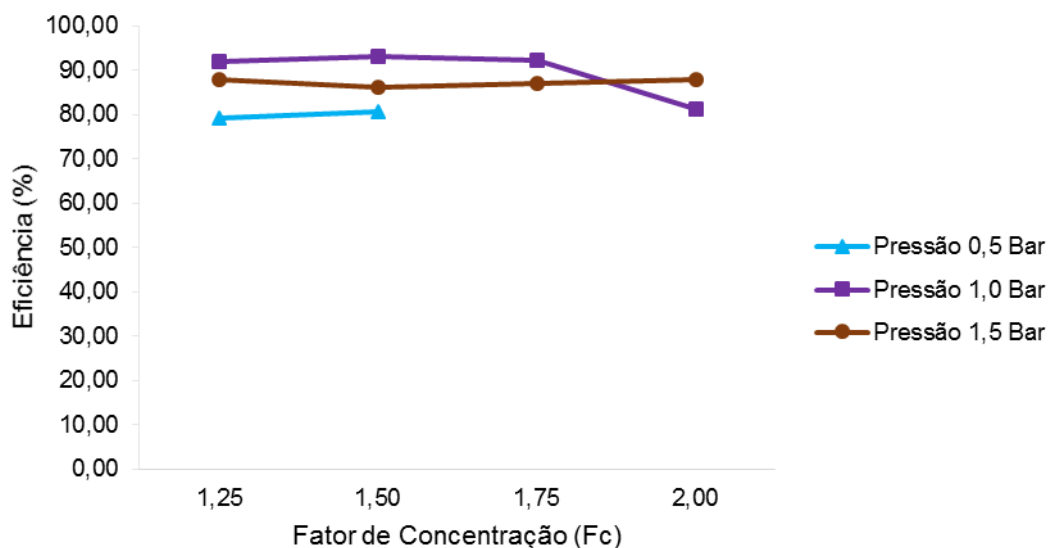


Figura 26 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais Fixos por fator de concentração, para a membrana de UF (257) nas pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de laticínio.



**Figura 27 – Eficiência de retenção de Sólidos Totais Voláteis por fator de concentração, para a membrana de UF (257) nas pressões de 0,5, 1,0 e 1,5 bar com efluente de laticínio.**

Os dados referentes a retenção dos sólidos pela membrana de UF demonstraram eficiência mais constante por parte da membrana de UF, especialmente para os Sólidos Totais, na faixa de remoção de 42,54 – 54,82%, e Sólidos Totais Voláteis, na faixa de 79,36 – 93,27%. Isso demonstra menor efeito da concentração do efluente na eficiência da membrana.

Foram encontradas maiores eficiências de retenção de sólidos voláteis, nos diferentes fatores de concentração, para a membrana de UF. As eficiências foram maiores para as pressões de 1,0 e 1,5 bar, variando entre 80 e 90% para os fatores de concentração (1,25, 1,5, 1,75 e 2,00).

A membrana de UF apresentou menor eficiência na retenção dos sólidos totais fixos. Para a pressão de 1,0 bar as eficiências para os 3 primeiros fatores de concentração (1,25, 1,5 e 1,75) foram de apenas 3,79, 8,55 e 4,92%, respectivamente. A eficiência de remoção mais alta foi na pressão de 1,0 bar no fator de concentração 2,0 (34,20%).

## 5.4 CÁLCULO DO ÍNDICE DE QUALIDADE DO PERMEADO (IQP)

O Índice de Qualidade do Permeado (IQP) foi calculado com o objetivo de definir a melhor condição de pressão para as membranas de MF e de UF, para utilização nos demais tratamentos propostos. No cálculo do índice entraram como parâmetros: Sólidos Totais, Totais Fixos, Totais Voláteis, Sólidos Sedimentáveis, Turbidez e fluxo permeado médio (para os fatores de concentração 1,25, 1,50, 1,75, 2,00 e 2,25).

Para cada parâmetro foram atribuídos valores sendo o menor valor encontrado para o parâmetro igual a 100 pontos e o maior valor igual a 0 pontos. Os valores intermediários receberam valores relativos ao percentual entre a diferença do valor máximo e mínimo. Para o parâmetro fluxo permeado médio ocorreu o contrário, atribuindo-se menor valor para o menor fluxo e maior valor para o maior fluxo, pois, nos processos de separação por membranas, um fluxo alto é desejável.

Para o cálculo do Índice de Qualidade do Permeado (IQP) considerou-se o exposto por Fappi (2015). Para cada fator de concentração, somou-se os valores de qualidade atribuídos aos parâmetros, chegando-se a um valor final, o IQP.

### 5.4.1 Índice de Qualidade do Permeado para a membrana de microfiltração

Os índices encontrados para a membrana de microfiltração para os diferentes fatores de concentração estão demonstrados na Tabela 22, e os melhores índices foram destacados (\*).

**Tabela 22 – Índice de qualidade do permeado, por pressão e fator de concentração para a membrana de MF.**

(continua)

Membrana	Pressão	Fator de Concentração	IQP
MF 158	0,5	1,25	362
		1,50	<b>600*</b>
		1,75	300

Tabela 22 – Índice de qualidade do permeado, por pressão e fator de concentração para a membrana de MF.

Membrana	Pressão	Fator de Concentração	(conclusão)
			IQP
MF 158	0,5	2,00	300
		1,25	247
	0,75	1,25	500*
		1,50	400
		1,75	600*
		2,00	506
		2,25	696*
	1	1,25	489
		1,50	559
		1,75	448
		2,00	594*
		2,25	530

(\*) Maiores valores de IQP nas diferentes pressões e fatores de concentração.

Na pressão de 0,75 bar a membrana de MF apresentou os melhores IQPs para os fatores de concentração de 1,25, 1,75 e 2,25. Nas demais pressões, apenas um dos fatores de concentração (1,5 para a pressão de 0,5 bar e 2,0 para a pressão de 1,0 bar) apresentou maior qualidade. Desta forma, através do IQP, a pressão de 0,75 bar foi escolhida como a melhor pressão de operação para a membrana de MF.

#### 5.4.2 Índice de Qualidade do Permeado para a membrana de ultrafiltração

Durante a execução dos três primeiros ensaios para a membrana de UF (E4, E5 e E6), optou-se por diminuir os fatores de concentração. Assim, para a definição do IQP, utilizaram-se os fatores de 1,25 e 1,5 apenas, pois, foram realizadas coleta de amostra em tais fatores de concentração para as três pressões.

Os índices de qualidade do permeado encontrados para a membrana de ultrafiltração para os diferentes fatores de concentração estão demonstrados na Tabela 23, sendo os melhores índices destacados (\*).



**Tabela 23 – Índice de qualidade do permeado, por pressão e fator de concentração para a membrana de UF.**

Membrana	Pressão	Fator de Concentração	IQP
Membrana - UF 257	0,5	1,25	234
		1,5	487
	1	1,25	444
		1,5	444
	1,5	1,25	630*
		1,5	500*

(\*) Maiores valores de IQP nas diferentes pressões e fatores de concentração.

Para a membrana de UF, para os dois fatores de concentração, a pressão de 1,5 bar mostrou-se mais adequada, atingindo o maior IQP. Nesse sentido, essa pressão foi considerada a melhor operação para a membrana.

## 5.5 ENSAIOS DE MICROFILTRAÇÃO SEGUIDA DE ULTRAFILTRAÇÃO (MF+UF)

O ensaio T9, foi realizado com a melhor condição de pressão para a membrana de MF (0,75 bar) e da membrana de UF (1,5 bar), utilizando o efluente do Lote 3.

No ensaio de MF, utilizou-se uma quantidade maior de efluente (10 litros), devido a necessidade de permeação de 5 litros para utilização posterior na UF. Foram coletadas amostras nos fatores de concentração de 1,25 para as duas membranas.

Na Figura 28, para o ensaio de microfiltração, o tempo de permeação foi bastante extenso até que houvesse a coleta de 5 litros de amostra a ser utilizada durante a UF. Para um tempo maior de filtração, foi possível verificar os 3 estágios citados por Song (1998): rápido decaimento do fluxo (estágio 1), seguido de longo decaimento do fluxo (estágio 2) e posterior estabilização do fluxo permeado (estágio 3).

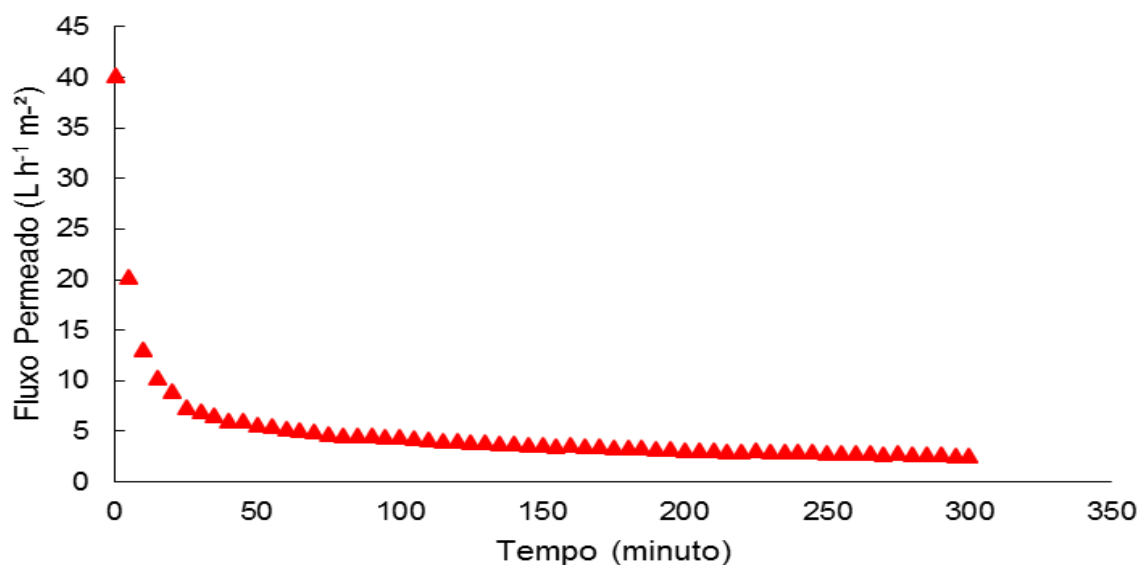


Figura 28 – Fluxo permeado para a membrana de MF, pressão 0,75 bar, durante os ensaios de MF+UF (T9).

O fluxo permeado durante a UF a partir do permeado da MF, foi bastante diferente dos demais ensaios realizadas. Na Figura 29, verifica-se que não houve decaimento inicial do fluxo permeado para a membrana de UF. Esse fato pode estar associado a menor concentração de sólidos no permeado da MF.

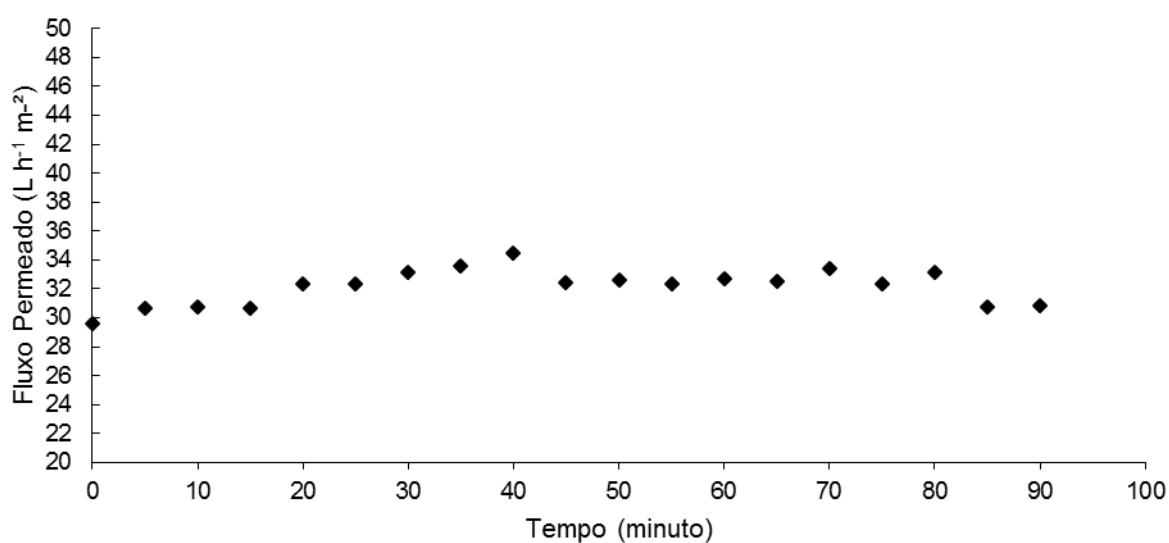


Figura 29 – Fluxo permeado para a membrana de UF, pressão 1,5 bar, durante os ensaios de MF+UF (T9).

A qualidade do permeado encontrada neste ensaio, bem como a eficiência das membranas são apresentadas na Tabela 24. Para melhor verificação da qualidade do permeado, foram realizadas análises da demanda bioquímica de oxigênio (DBO<sub>5</sub>) e Demanda Química de Oxigênio (DQO).

**Tabela 24 – Eficiência no tratamento de efluente de laticínio da membrana de MF seguida de UF.**

Membrana – Pressão	Amostra Lote 3	Membrana MF 158 - 0,75 bar		Membrana UF 257 - 1,5 bar		MF+ UF
		Fc=1,25	E (%)	Fc=1,25	E (%)	
<b>Fator de Concentração</b>	-	Fc=1,25	E (%)	Fc=1,25	E (%)	E (%)
<b>ST (mg L<sup>-1</sup>)</b>	2.622	1.737	33,75	1.663	4,26	36,58
<b>STF (mg L<sup>-1</sup>)</b>	1.795	1.606	10,53	1.571	2,18	12,48
<b>STV (mg L<sup>-1</sup>)</b>	827	166	79,93	57	65,66	93,11
<b>Ph</b>	8,83	9,13	-	9,32	-	-
<b>DBO (mg L<sup>-1</sup>)</b>	467	15	96,79	11	26,67	97,64
<b>DQO (mg L<sup>-1</sup>)</b>	894	<25	97,20	<25	NC*	≈ 97,20

NC\*: Não calculado.

Por meio da Tabela 24 é possível perceber que a membrana de UF após a MF acrescenta uma eficiência na retenção de sólidos totais voláteis acima de 65% e para a DBO<sub>5</sub> em torno de 27%. Para os demais parâmetros não há uma retenção complementar considerável.

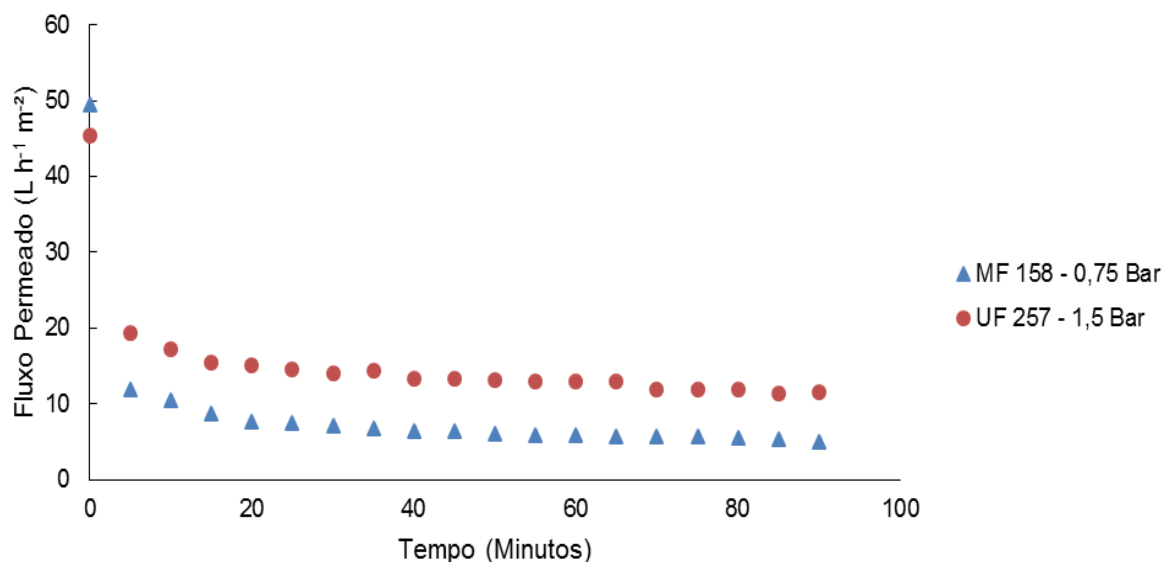
Realizando a MF seguida da UF, a retenção da DQO e da DBO foram bastante consideráveis (acima de 97%), bem como a remoção de sólidos totais voláteis (93%). As remoções de Turbidez e de Sólidos Sedimentáveis foi de 100%.

Os parâmetros sólidos totais tiveram percentual de eficiência de retenção médio, de 36,58, enquanto a remoção de sólidos totais fixos foi pouco considerável, apenas 12,48%. Comparando-se com os ensaios E1 a E8 (Tabela 10) percebe-se que, mesmo com a realização do ensaio de MF seguida de UF, não houve elevação considerável na eficiência de remoção dos parâmetros sólidos totais e sólidos totais fixos.

## 5.6 RETENÇÃO DE COLIFORMES TERMOTOLERANTES PELAS MEMBRANAS DE MICROFILTRAÇÃO E ULTRAFILTRAÇÃO

Os ensaios para visualização da retenção de coliformes termotolerantes foram realizados para as membranas de MF (tratamento T7, Tabela 10) e UF (tratamento T8, Tabela 10), nas melhores pressões, de acordo com o IQP de cada membrana. Dessa forma, para a membrana de MF utilizou-se a pressão de 0,75 bar e para a membrana de UF utilizou-se a pressão de 1,5 bar.

Os fluxos encontrados durante os ensaios microbiológicos para as membranas de MF e UF estão dispostos na Figura 30. Salienta-se que a coleta das amostras para as análises durante os ensaios foi realizada apenas no fator de concentração 1,25. Para os ensaios, estabeleceu-se o tempo limite de 90 minutos, realizando-se a medida do fluxo permeado a cada 5 minutos.



**Figura 30 – Fluxo permeado para a membrana de MF, pressão 0,75 bar, e UF, 1,5 bar, durante os ensaios de retenção de coliformes termotolerantes.**

Para as duas membranas observou-se comportamento do fluxo semelhante aos dos ensaios anteriores (E1 a E6), com queda bastante acentuada do fluxo permeado durante os primeiros minutos. Observa-se também que a membrana de

UF apresentou maior fluxo no decorrer e ao final da corrida, se comparada com a membrana de MF.

Para os ensaios de filtração utilizou-se amostra do Lote 4 (Tabela 12). As eficiências de remoção dos parâmetros físico-químicos e de coliformes termotolerantes para ambas as membranas podem ser visualizadas nas Tabelas 25 e 26.

**Tabela 25 – Eficiência no tratamento de efluente Laticínio para a membrana de MF 158.**

<b>MF 158 0,75 BAR</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Amostra Lote 4</b>	<b>Resultado</b>	<b>E (%)</b>
<b>Turbidez (NTU)</b>	533	2	99,62
<b>Ph</b>	8,63	8,98	-
<b>SS (mL L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	<0,1	0	100
<b>Coliformes termotolerantes (UFC 100 mL<sup>-1</sup>)</b>	6.000	Ausente	100
<b>DQO (mg L<sup>-1</sup>)</b>	917	<25	≈ 97,27
<b>ST (mg L<sup>-1</sup>)</b>	2.438,50	1.244,5	48,96
<b>STF (mg L<sup>-1</sup>)</b>	1.479,50	1.074,5	27,37
<b>STV (mg L<sup>-1</sup>)</b>	959	170	82,27

**Tabela 26 – Eficiência no tratamento de efluente Laticínio para a membrana de UF 257.**

<b>UF 257 1,5 BAR</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Amostra Lote 4</b>	<b>Resultado</b>	<b>Eficiência (%)</b>
<b>Turbidez (NTU)</b>	533	1	99,81
<b>Ph</b>	8,63	8,9	-
<b>SS (mL L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	<0,1	0	100
<b>Coliformes termotolerantes (UFC 100 mL<sup>-1</sup>)</b>	6.000	Ausente	100
<b>DQO (mg L<sup>-1</sup>)</b>	917	<25	≈ 97,27
<b>ST (mg L<sup>-1</sup>)</b>	2.438,50	1552	36,35
<b>STF (mg L<sup>-1</sup>)</b>	1.479,50	1378,5	6,83
<b>STV (mg L<sup>-1</sup>)</b>	959	173,5	81,91

Ambas as membranas apresentaram eficiência de 100% de remoção dos coliformes termotolerantes, o que pode ser esperado de membranas de micro e ultrafiltração, pois os tamanhos dos poros nestas membranas são menores que o tamanho das bactérias (HABERT; BORGES, NOBREGA, 2006).

Susuki et al. (2012) produziram membranas de Fluoreto de Polivinilideno (PVDF) e de Polimetacrilato de Metila (PMMA). Utilizaram essas membranas no

tratamento de águas remanescentes do pós-tratamento de água potável, sendo que, encontraram remoção total microbiológica (*E. coli*) de água tratada utilizada nos estudos.

Passarini et al. (2012) realizaram tratamento através da decantação e posterior microfiltração por meio de membrana com 0,4 µm de diâmetro de poro, de águas residuárias residenciais. O efluente bruto utilizado foi oriundo da estação de tratamento de esgoto de Campinas – SP – e foi coletado após o sistema de gradeamento inicial. Os autores encontram 100% de eliminação das bactérias presentes no efluente.

A eficiência na remoção de Turbidez ficou próxima dos 100%, bem como houve retenção de 100% dos sólidos sedimentáveis do efluente, tanto para a membrana de MF e UF, semelhante aos demais ensaios realizados (T1 a T6). Houve maior remoção dos sólidos totais voláteis e menor eficiência na remoção de sólidos totais fixos.

A eficiência na retenção da DQO para os ensaios foi considerável, aproximadamente 97,27%, para a MF e para a UF. Esse resultado pode ser considerado relevante, pois efluentes de laticínios possuem grandes concentrações de DQO e sua remoção é extremamente importante antes do lançamento em corpos hídricos.

Diferentemente do encontrado no presente trabalho, Giacobbo et al. (2010) encontraram remoção de 40% de DQO, tratando efluente bruto oriundo de um curtume. Para o experimento, utilizaram um módulo de MF de diâmetro de poro de 0,4 µm, produzido pela PAM – membranas seletivas.

Schmitt et al. (2013) utilizaram uma membrana de UF cerâmica, com poro de 0,1 µm e retenção molar de 4 kDa, no tratamento de efluente bruto de laticínio. Encontraram remoções de DQO e de turbidez acima de 96%, em tratamentos utilizando UF e UF associada a coagulação por Moringa Oleífera.

## 5.7 ENSAIOS DE RETENÇÃO DE NUTRIENTES PARA AS MEMBRANAS DE MF E UF

Os três últimos ensaios E10, E11 e E12 (Tabela 10) foram realizados para verificar a capacidade de retenção de nutrientes específicos (nitrogênio e fósforo) pelas membranas.

### 5.7.1 Membrana de MF 158 - efluente AATS

O comportamento do fluxo permeado da membrana de MF, durante os ensaios de retenção de nutrientes foi semelhante aos demais ensaios realizados (E1 a E3, E7 e E9). O fluxo inicial foi acima de  $50 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , com queda acentuada nos primeiros 5 minutos (próximo de  $10 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ), finalizando com o fluxo próximo a  $5 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  no tempo de 90 minutos. O comportamento do fluxo está exposto na Figura 31.

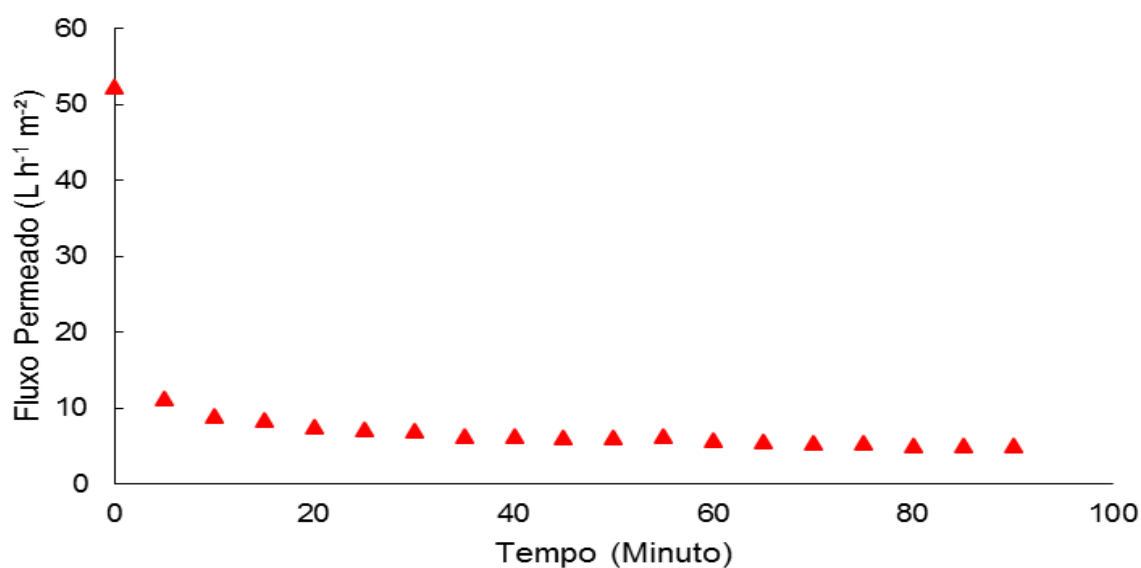


Figura 31 – Fluxo permeado para a membrana de MF, durante os ensaios de retenção de nutrientes, pressão 0,75 bar, MF (T10).

Os resultados das análises da concentração dos diferentes parâmetros presentes no permeado da membrana de MF, para o fator de concentração 1,25, estão dispostos na Tabela 27. A eficiência na retenção foi calculada referente a amostra de efluente utilizada (Lote 5 – Tabela 12).

**Tabela 27 - Eficiência na remoção de parâmetros físico-químicos pela MF (158) no tratamento de efluente de laticínio – AATS – ponto de coleta 1.**

<b>MF 158 0,75 BAR – AATS</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Amostra Lote 5</b>	<b>Resultado</b>	<b>E (%)</b>
<b>Turbidez (NTU)</b>	540	0	100,00
<b>Ph</b>	8,54	8,98	-
<b>SS (mL L<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup>)</b>	<0,1	0	100,00
<b>DQO (mg L<sup>-1</sup>)</b>	1.169	129	88,96
<b>DBO (mg L<sup>-1</sup>)</b>	119,53	18,75	84,31
<b>ST (mg L<sup>-1</sup>)</b>	2.661	1.449	45,55
<b>STF (mg L<sup>-1</sup>)</b>	1.441	1.037,5	14,96
<b>STV (mg L<sup>-1</sup>)</b>	1.220	411,5	71,44
<b>Nitrogênio Total (mg de N L<sup>-1</sup>)</b>	111,69	29,08	73,96
<b>Óleos e graxas (mg L<sup>-1</sup>)</b>	7,30	0,3	95,89
<b>Fósforo Total (mg L<sup>-1</sup>)</b>	39	24	38,46
<b>Condutividade (µS cm<sup>-1</sup>)</b>	2.458	2.260	8,06
<b>SDT (ppm TDS)</b>	1.213	1.130	6,84

A eficiência na remoção de Turbidez, Sólidos Sedimentáveis, Sólidos Totais, Totais Fixos e Voláteis foi semelhante aos demais ensaios realizados (E1 a E9). A remoção de DBO<sub>5</sub> foi menos eficiente que a realizada no ensaio E9, assim como a remoção de DQO também foi menor que nos ensaios realizados E7, E8 e E9. As eficiências de remoção de DQO e DBO<sub>5</sub> neste ensaio foram de 88,96 e 84,31%, respectivamente, enquanto que, no ensaio E9, a remoção de DBO<sub>5</sub> foi em torno de 97%, assim como a remoção de DQO nos ensaios E7 e E9.

A diminuição na remoção do parâmetro DQO pode estar associada a qualidade do efluente. No Lote 5, esta concentração foi de 1.169 mg L<sup>-1</sup>, sendo mais elevada que nos demais lotes de efluente utilizados. Entretanto, o parâmetro DBO<sub>5</sub> teve concentração inferior, no efluente, ao do utilizado no ensaio (E9), mesmo assim, a membrana apresentou menor eficiência na remoção deste parâmetro.

A retenção de Nitrogênio Total pela membrana de MF foi elevada, 73,96%, enquanto para o Fósforo Total, a retenção foi inferior, sendo de 38,46%.



Comparando-se os dados encontrados para a retenção de nitrogênio e fósforo, Silva, Rocha e Teran (2011), verificaram que as membranas foram mais eficientes na remoção de nitrogênio e fósforo, porém, a capacidade de remoção de nitrogênio amoniacal e fósforo orgânico foi constatada. As eficiências encontradas pelos autores na remoção de  $\text{N-NH}_4^-$  (nitrogênio amoniacal) e  $\text{P-PO}_4^{3-}$  (fósforo inorgânico) foram de 9% e 49%, respectivamente. A membrana utilizada no estudo foi de microfiltração com 0,4  $\mu\text{m}$  de tamanho de poro e o efluente foi oriundo da lagoa de estabilização da estação de tratamento do abatedouro.

Os autores Giacobbo et al. (2010) ao utilizarem um módulo de membrana de microfiltração de poliamida fibras ocas, e poros de 0,4  $\mu\text{m}$  produzido pela PAM – Membranas seletivas, no tratamento de efluente de curtume oriundo do início de uma planta de tratamento (sem tratamento), obtiveram para o parâmetro Nitrogênio Total, uma eficiência de retenção de 10%, inferior aos valores obtidos neste estudo, para efluente de laticínio.

### 5.7.2 Membrana de UF 257 - efluente AATS

O comportamento do fluxo permeado da membrana de UF, durante os ensaios de retenção de nutrientes foi semelhante aos demais ensaios realizados (E3 a E6 e E8), especialmente no que se refere ao rápido decaimento inicial do fluxo e posterior estabilização no fluxo permeado. O fluxo inicial ficou acima de  $27 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , com queda acentuada nos primeiros 5 minutos (próximo de  $12 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ ), finalizando com o fluxo próximo a  $5,6 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$  no tempo de 90 minutos. O comportamento do fluxo está exposto na Figura 32.

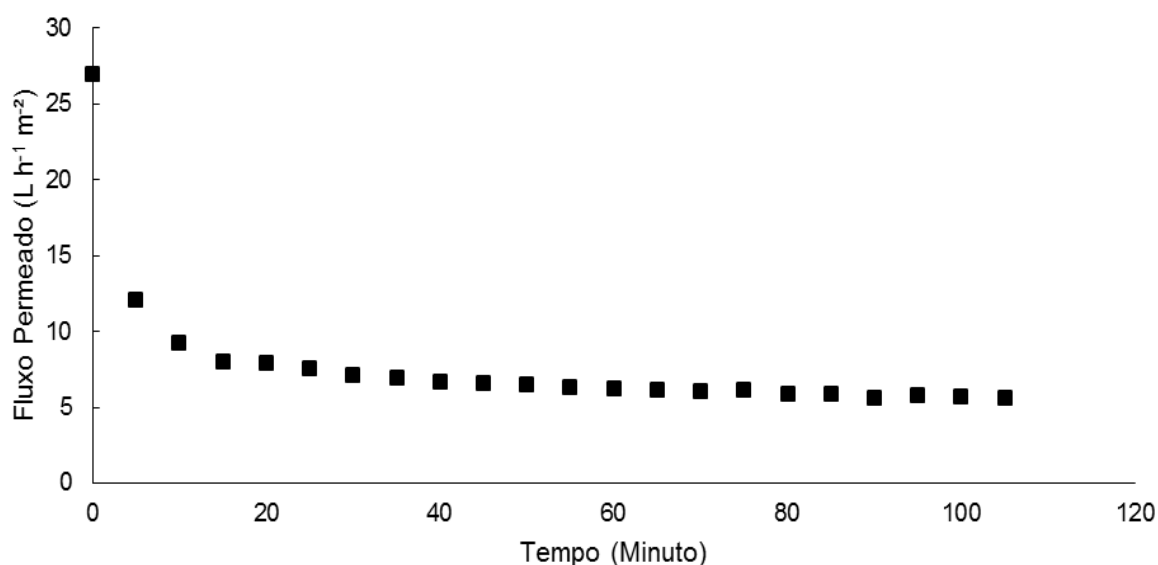


Figura 32 – Fluxo permeado para a membrana de UF, durante os ensaios de retenção de nutrientes, pressão 1,5 bar (T11).

Para a membrana de UF, os resultados encontrados para a análise do permeado no Fator de Concentração ( $F_c$ ) 1,25 estão expostos na Tabela 28. Para este ensaio também foi utilizada a amostra do Lote 5.

Tabela 28 - Eficiência na remoção de nutrientes pela membrana de UF (257) no tratamento de efluente de laticínio – AATS – ponto de coleta 1.

UF 257 1,5 BAR – AATS			
Parâmetro	Amostra Lote 5	Resultado	Eficiência
Turbidez (NTU)	540	0	100,00
Ph	8,54	8,66	-
SS (mL L <sup>-1</sup> h <sup>-1</sup> )	<0,1	0	100,00
DQO (mg L <sup>-1</sup> )	1.169	89	92,39
DBO (mg L <sup>-1</sup> )	119,53	11,61	90,29
ST (mg L <sup>-1</sup> )	2.661	1.293	51,41
STF (mg L <sup>-1</sup> )	1.441	891,5	26,93
STV (mg L <sup>-1</sup> )	1.220	401,5	72,14
Nitrogênio Total (mg de N L <sup>-1</sup> )	111,69	32,6	70,81
Óleos e graxas (mg L <sup>-1</sup> )	7,30	0,2	97,26
Fósforo Total (mg L <sup>-1</sup> )	39	31	20,51
Condutividade (µS cm <sup>-1</sup> )	2.458	2.103	14,44
SDT (ppm TDS)	1.213	1.051	13,36

A eficiência na remoção de Turbidez, Sólidos Sedimentáveis, Sólidos Totais, Totais Fixos e Voláteis foi bastante semelhante aos demais ensaios realizados (E1 a E9). A remoção de DBO<sub>5</sub> e DQO também foi menos elevada para o ensaio E11 que nos demais ensaios (E9 para DBO e E8 e E9, para DQO). As eficiências de remoção de DQO e DBO<sub>5</sub> no ensaio E11 ficaram acima de 90%, apresentando eficiência mais elevada se comparada ao E10 de MF, que foi de 88,96 e 84,31%, respectivamente, para DQO e DBO.

A retenção de Nitrogênio Total pela membrana de UF também foi elevada, 70,81%, enquanto para o Fósforo Total, a retenção foi inferior, sendo de 20,51%. Ambos os valores de remoção foram inferiores aos encontrados para a membrana de MF.

A eficiência de retenção de óleos e graxas, no entanto, foi elevada para as duas membranas, sendo de 97,26% para a membrana de UF e de 95,89% para a membrana de MF.

### 5.7.3 Membrana de MF 158 - efluente AAF

Com relação ao fluxo permeado da membrana com a amostra AAF, verificou-se decaimento do fluxo no decorrer do experimento, porém não tão elevado quanto para os tratamentos utilizando amostras AATS. O comportamento do fluxo no decorrer do estudo está demonstrado na Figura 33. Com o melhor fluxo, o ensaio foi mais rápido – aproximadamente 45 minutos.

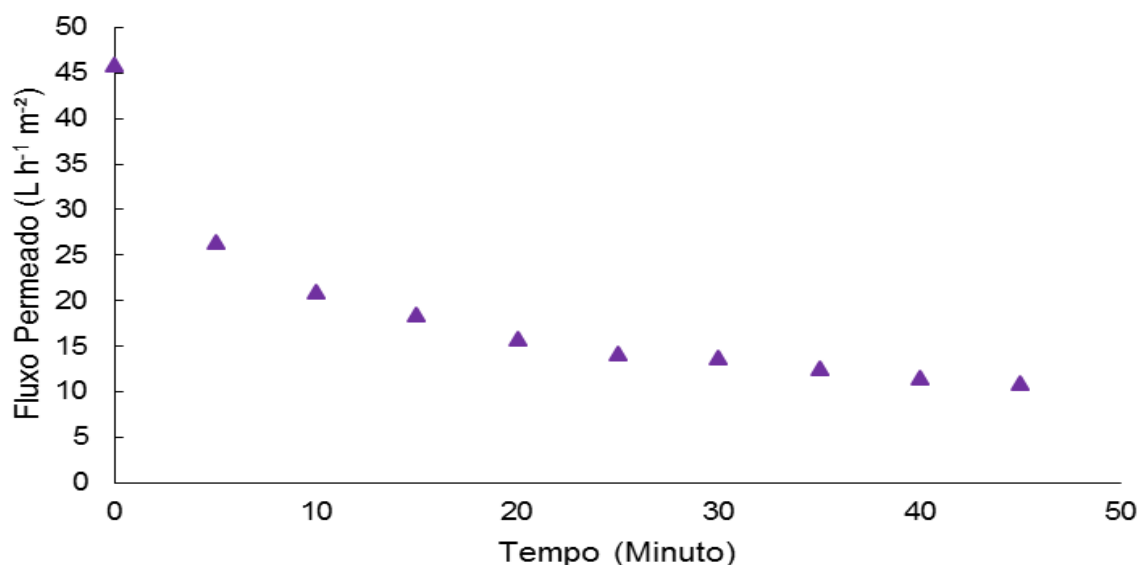


Figura 33 – Fluxo permeado para a membrana de MF com efluente de laticínio (AAF), durante os ensaios de retenção de nutrientes, pressão 0,75 bar (T12).

Na Tabela 29 é possível visualizar a porcentagem de redução do fluxo permeado durante a realização do ensaio de MF com amostra após o Flotador físico-químico (AAF).

Tabela 29 – Porcentagem de redução do fluxo no decorrer do ensaio de microfiltração com amostra coletada após o Flotador Físico-químico, no ponto de coleta 2 - AAF.

Membrana		MF 158 0,75 Bar	
Tempo (min.)	Fluxo Permeado (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	Fluxo Permeado (L.h <sup>-1</sup> .m <sup>-2</sup> )	Redução do fluxo (%)
0	45,90	45,90	-
5	26,39	26,39	42,50
10	20,99	20,99	54,26
20	15,83	15,83	65,51
30	13,70	13,70	70,16
40	11,59	11,59	74,75
45	10,92	10,92	76,20

A Figura 34 contém os fluxos permeados, no decorrer do tempo, dos ensaios E2 e E12, para a membrana de MF na pressão de 0,75 bar.

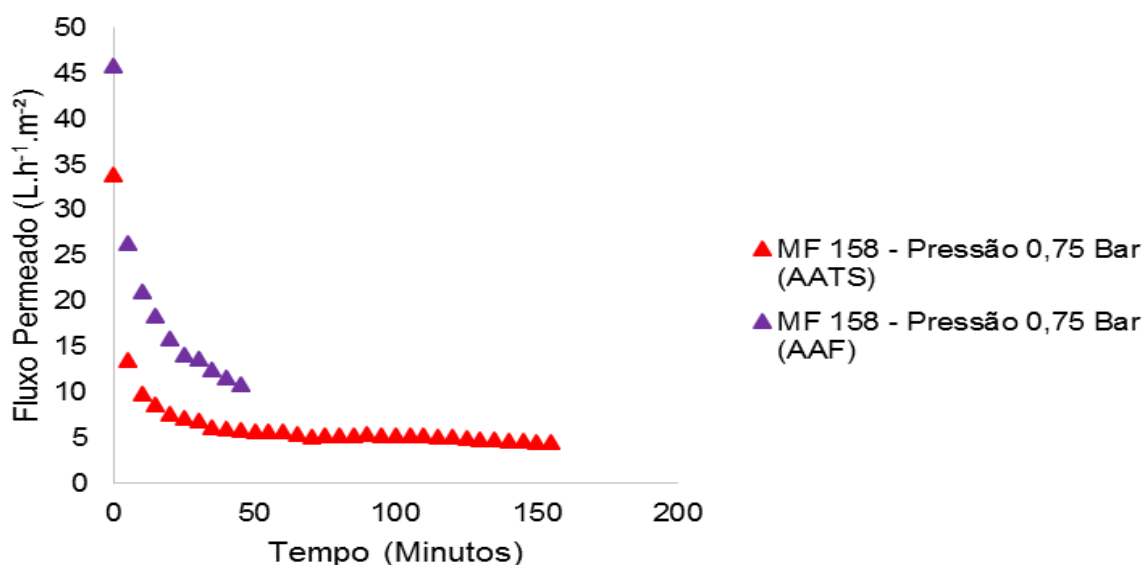


Figura 34 – Fluxo permeado para a membrana de MF com efluente de laticínio (AAF), durante os ensaios de retenção de nutrientes, pressão 0,75 bar (E12).

Comparando-se com o ensaio E2, no qual utilizou-se efluente após o tratamento secundário (AATS) para a membrana de MF, observa-se que houve menor diminuição do fluxo permeado para os 5 primeiros minutos (42,50% para a amostra AAF e 60,14% para a amostra AATS). O fluxo médio calculado, após o tempo de 20 minutos foi de  $13,01 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ , enquanto para o ensaio E2 após os 20 minutos, o fluxo médio encontrado foi de  $5,82 \text{ L h}^{-1} \text{ m}^{-2}$ .

Entretanto, mesmo com o efluente AAF, houve queda significativa do fluxo permeado após os 45 minutos, chegando-se a 76,20% de queda do fluxo permeado. Esse fato pode ser associado a presença de quantidade significativa de sólidos totais no efluente da amostra 6 (AAF) que foi de  $1.927,50 \text{ mg L}^{-1}$ , o que pode ter contribuído para a formação de incrustação na superfície da membrana e de sua colmatação.

O ensaio T12 da matriz experimental (Tabela 10) foi realizado com amostra de efluente oriunda do sistema de tratamento de efluentes da indústria de laticínio, após o Flotador Físico-químico (AAF – Lote 6, Tabela 12). O objetivo foi verificar a eficiência da membrana de microfiltração com um efluente com condições melhores que as amostras coletadas após o tratamento secundário (AATS).

Para comparação da eficiência do tratamento por microfiltração como tratamento complementar ao Flotador Físico-químico, a eficiência deste com relação a qualidade da amostra coletada após o tratamento secundário (Lotes 5 e 6) foi

comparada aos resultados obtidos após o tratamento por microfiltração da amostra AAF. As eficiências estão dispostas na Tabela 30.

**Tabela 30 – Características da amostra coletada após o Flotador físico-químico (AAF) e eficiência na remoção de nutrientes pela membrana de MF (158) no tratamento de efluente de laticínio com amostra coletada após o Flotador Físico-químico, no ponto de coleta 2 - AAF.**

Parâmetro	Flotador		MF 158 0,75 BAR – AAF	
	Resultado	E (%)	Resultado	E (%)
Turbidez (NTU)	128	76,29	0	100,00
Ph	7,74	-	8,4	-
Sólidos sedimentáveis (mL/L/h)	<0,1	-	0	100,00
DQO (mg/L)	322	72,46	106	67,08
DBO (mg/L)	48,94	59,06	12,12	90,53
Sólidos totais (mg/L)	1927,5	27,56	1466,5	23,92
Sólidos totais fixos (mg/L)	1123	7,95	1079,5	3,87
Sólidos totais voláteis (mg/L)	804,5	44,17	387	51,90
Nitrogênio Total (mg de N/L)	52,65	52,86	36,57	30,54
Óleos e graxas (mg/L)	6,2	15,07	0,1	98,39
Fósforo Total (mg/L)	5	87,18	<2	≈ 60,00
Condutividade (µS/cm)	2527	NC*	2230	11,75
Sólidos dissolvidos totais (ppm TDS)	1263	NC*	1115	11,72

\*NC: não calculado.

A eficiência do Flotador físico-químico é bastante elevada, chegando a, respectivamente, 72,46% e 59,06 de eficiência de remoção de DBO e DQO. Além destes, há grande eficiência na remoção de nutrientes como fósforo total e nitrogênio total, de 87,18 e 52,86%, respectivamente.

Com a amostra AAF, houve eficiência menor para a retenção de DQO do efluente, a qual foi de 67,08% e para o parâmetro nitrogênio total, que foi de 30,54%, se comparada com a eficiência do tratamento por membranas das amostras AATS. No entanto, para a remoção do fósforo total, no permeado, encontrou-se concentração menor que 2 mg/L, com eficiência do tratamento aproximada de 60%. Deve-se considerar, contudo, que a concentração de fósforo na amostra AAF também era inferior ao efluente AATS.

A microfiltração como tratamento complementar ao efluente do Flotador (amostra AAF) demonstrou eficiências bastante satisfatórias para os diferentes parâmetros. As remoções de Óleos e graxas, DBO<sub>5</sub>, DQO, fósforo e nitrogênio foram

de 98,39, 90,53, 67,08, 60 e 30,54%, respectivamente, havendo melhora considerável das características do efluente final.

Neste experimento, observa-se que com o fluxo permeado mais alto e a melhora na qualidade do efluente após o sistema de separação por membranas de MF, a utilização da MF como um tratamento complementar pode ser interessante para a indústria de laticínios, especialmente visando o reúso de água industrial.

Dacanal e Beal (2010) associando uma membrana de microfiltração a um filtro anaeróbio, no tratamento de lixiviado de aterro sanitário encontraram resultados que permitiram a conclusão de que a associação de uma unidade de microfiltração aumenta consideravelmente a eficiência do processo anaeróbio no tratamento de lixiviado. A remoção de DQO com a associação da membrana foi de 90,4%.

Bezerra e Matsumoto (2011) estudaram a remoção de matéria orgânica carbonácea e nitrogenada em águas residuárias através de biorreator de membranas. O reator apresentou médias de remoção de DQO, NTK e NT de 97, 98 e 92%, respectivamente. O sistema de ultrafiltração foi testado em vários fluxos entre 25 e 37 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup> e determinou-se o fluxo crítico de 28 L h<sup>-1</sup> m<sup>-2</sup>, quando operado com 11,4 g L<sup>-1</sup> de Sólidos Suspensos Totais (SST) e 35 dias de tempo de retenção celular.

## 5.8 ANÁLISE DOS PARÂMETROS COM RELAÇÃO AO ATENDIMENTO DOS PADRÕES DE REÚSO DE EFLUENTES

Há limitação para o reúso de água nas indústrias alimentícias, pela impossibilidade de reintrodução de água nos processos nos quais há contato com os alimentos, sendo permitidas somente no caso em que não tragam riscos à saúde (MATSUMURA; MIERZWA, 2008).

A ausência de parâmetros padronizados e de legislação específica é outro fator limitante para a aplicação de reúso de efluentes na indústria, pois não norteiam a qualidade do efluente tratado que deve ser alcançada para sua reutilização em processos industriais.

A resolução nº 54/2005 do CONAMA estabelece critérios para o reúso de água na indústria, porém, não padroniza parâmetros físico-químicos ou

microbiológicos para o reuso industrial. A NBR 13.969/1997, por outro lado, expõe alguns parâmetros a serem atendidos para o reuso, porém, de forma limitada.

Nesse sentido, optou-se por seguir os parâmetros de reuso expostos na literatura e contidos na Tabela 6, e compará-los com os melhores resultados encontrados para a microfiltração, a ultrafiltração e a microfiltração seguida da ultrafiltração.

Para embasar as proposições de reuso não potável de água para a indústria de laticínios, utilizou-se os melhores resultados encontrados para a MF e a UF nas condições de operação dos ensaios E7, E8, E10 e E11 (Tabela 10), o ensaio E12 para a MF com amostra após o flotor (AAF) e o ensaio E9 para a MF seguida da UF (MF+UF).

Seguindo-se os valores de reuso citados na literatura, todos os padrões, exceto para os sólidos dissolvidos totais, foram atendidos para o reuso industrial nos seguintes locais: lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos, proteção contra incêndio e descarga sanitária.

A Tabela 31 contém os dados referentes aos padrões para o reuso de água para as torres de resfriamento e para as caldeiras nas indústrias e os melhores resultados encontrados para a MF, UF e MF seguida de UF.

**Tabela 31 - Requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reuso de efluentes e médias encontradas para a MF (AATS), UF (AATS), MF (AAF) e MF+UF.**

(continua)

Parâmetro	Unid.	Torres de resfriamento*	Caldeiras de baixa pressão <10 bar*	MF	UF	MF	MF+UF
				(AATS)	(AATS)	(AAF)	
pH	-	6 – 9,5	7 – 10	8,98	8,66	8,4	9,32
Turbidez	NTU	2 – 10	SE	0	0	0	0
DQO	mg L <sup>-1</sup>	≤75	5	<25	<25	106	<25
DBO <sub>5</sub>	mg L <sup>-1</sup>	25	1-50	15	11,61	12,12	11
ST	mg L <sup>-1</sup>	≤530	SE	1244,5	1293	1466,5	1663
SDT	mg L <sup>-1</sup>	≤500	700	1130	1051	1115	NR
Nitrogênio Amoniacal***	mg N L <sup>-1</sup> 1	1,0	SE	29,08	32,6	36,57	NR**
Condutividade	µS cm <sup>-1</sup>	800 – 1200	1100 – 5400	2260	2103	2230	NR**
Fosfato***	mg L <sup>-1</sup>	4,0	SE	24	31	0,1	NR**



**Tabela 31 - Requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reúso de efluentes e médias encontradas para a MF (AATS), UF (AATS), MF (AAF) e MF+UF.**

Parâmetro	Unid.	Torres de resfriamento*	Caldeiras de baixa pressão <10 bar*	(conclusão)			
				MF (AATS)	UF (AATS)	MF (AAF)	MF+UF
Óleos e Graxas	mg L <sup>-1</sup>	1,0	SE	0,3	0,2	<2	NR**
Coliformes Termotolerantes	NMP 100 mL <sup>-1</sup>	≤ 2,2	SE	AUSENTE	AUSENTE	NR**	NR**

\*Fonte: US EPA, 2004; US EPA, 2004, valores para o Estado do Texas; Metcalfy e Eddy, 2003; Pinjing et al., 2001; Metcalfy e Eddy, 1991; Mancuso e Santos, 2003; Mierzwa, 2002; Macedo, 2001; Crook e Surampalli, 1996; PIO, 2005; Oenning Junior e Pawlowsky, (2007); Riera, Suárez e Muro, 2013; Mancuso, 2001; Chmiel, Mavrov e Belières, 2000; SE – Sem Especificação encontrada.

\*\*NR: Análise não realizada.

\*\*\*Utilizaram-se os parâmetros nitrogênio amoniacal e fosfato pela ausência de padrões de reúso para nitrogênio total e fósforo total.

Os parâmetros para o reúso de água industrial em torres de resfriamento e caldeiras foram atendidos por pelo menos um dos tratamentos realizados para os parâmetros: pH, turbidez, DQO, DBO, condutividade, fósforo, óleos e graxas e coliformes termotolerantes.

A utilização do efluente após os processos de separação por membranas nas torres de resfriamento foi limitada pelo não atendimento a alguns parâmetros, como: sólidos totais, sólidos dissolvidos totais, nitrogênio e a condutividade. O reúso nas caldeiras foi limitado para os parâmetros DQO e os sólidos dissolvidos totais.

Para a condutividade, não foram alcançadas as condições necessárias para o reúso da água em torres de resfriamento, que necessitam de maior qualidade. Essa condição podia ser esperada, pois as membranas de MF e UF não removem grande quantidade desse parâmetro. Para maiores remoções, uma possibilidade seria o uso de outro tipo de membrana, a de nanofiltração (NF) e Osmose Reversa (RO) (MURO et al., 2009).

As condições de esterilização encontradas para os processos de MF e UF são extremamente importantes quando do reúso de água na indústria, especialmente em locais onde há contato com trabalhadores ou formação de névoa (EPA, 2004).

Deve-se considerar que a utilização de sistemas de tratamentos para purificação da água e possibilidade de reúso, auxiliam na diminuição do total de

água consumida e a produção de efluentes pela indústria de laticínios (BALANNEC et al., 2005).

Nesse sentido, as membranas de MF e UF utilizadas na presente pesquisa demonstraram eficiência de retenção de poluentes bastante considerável, gerando águas de reúso de qualidade para a indústria de laticínios, especificamente para o reúso industrial não potável.

Comparando-se os padrões de lançamento para efluentes de indústrias de laticínios, Resolução CEMA nº 70/2009 – Condições e Padrões de Lançamento de Efluentes Líquidos Industriais, mais especificamente o anexo 7 dessa resolução, com os melhores resultados para MF e UF, pode-se verificar que os parâmetros de DQO, DBO e óleos e graxas foram atendidos. Na Resolução, os padrões de lançamento são os seguintes: 200 mg L<sup>-1</sup> para DQO, 50 mg L<sup>-1</sup> para DBO<sub>5</sub> e 50 mg L<sup>-1</sup> para óleos e graxas.

Mesmo atendendo os padrões de reúso de água dispostos na literatura, estes não devem ser considerados como os únicos. A falta de legislação específica acaba não norteando as possibilidades de reúso na indústria.

Para o reúso de água nas Caldeiras é necessário realizar análises mais específicas, com relação a dureza da água e a presença de íons como o cálcio (Ca<sup>2+</sup>), especificamente pela necessidade de atendimento a padrões seguros de utilização, análises que não foram realizadas no presente estudo.

É de fundamental importância maiores estudos com relação ao reúso de água na indústria. Os resultados encontrados no presente estudo enquadraram-se nos padrões estabelecidos na literatura, entretanto, torna-se crucial estudos relacionados a segurança do reúso da água industrial.

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando-se os objetivos propostos, a metodologia utilizada e os resultados obtidos através dos processos de separação por membranas como pós-tratamento de efluente de laticínio objetivando o reúso, pode-se concluir:

- a) As membranas de microfiltração e ultrafiltração, com relação a permeação de água destilada, praticamente não apresentaram redução de fluxo e influência dos fatores de polarização da concentração, colmatação, incrustação na superfície da membrana e entupimento de poros, sendo pouco sensíveis à histerese e/ou compactação do polímero da membrana, devido à reversibilidade das condições iniciais de fluxo, quando da pressurização e despressurização do módulo. Com a permeação de efluente pela membrana, contrariamente, houve influência dos fatores de polarização da concentração, colmatação, incrustação na superfície da membrana e entupimento de poros, o que causou a redução do fluxo permeado e entupimento das membranas de microfiltração e ultrafiltração.
- b) O fluxo de água destilada aumenta linearmente com o aumento da pressão aplicada a membrana de microfiltração e ultrafiltração, ou seja, quanto maior a pressão aplicada a membrana, maior o fluxo permeado. Quando emprega-se as mesmas condições operacionais, ocorre uma diferença significativa nos fluxos permeados utilizando amostras de água destilada e efluentes. Tanto para a microfiltração, quanto para a ultrafiltração, o fluxo de água destilada foi superior ao fluxo permeado das amostras de efluentes.
- c) A eficiência dos processos de separação por membranas de microfiltração e ultrafiltração como tratamento de efluente de laticínio, após o tratamento secundário, mostrou-se bastante considerável, tanto na retenção de matéria orgânica, microrganismos e na remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Como tratamento complementar de efluente de laticínio, após o tratamento pelo Flotador físico-químico, a membrana de MF apresentou melhora considerável na qualidade do

efluente tanto na retenção de DQO e DBO<sub>5</sub>, quanto na retenção de nutrientes como nitrogênio e fósforo.

- d) O efeito da concentração de partículas na superfície das membranas de microfiltração e ultrafiltração na queda do fluxo permeado, no decorrer do tempo, ficou bastante evidente nos tratamentos realizados.
- e) Apesar da limitação com o reúso de água nas indústrias que processam alimentos, como por exemplo os laticínios, o efluente após o tratamento por membranas de microfiltração e ultrafiltração de acordo com os requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos pesquisados e exigidos para o reúso industrial de efluentes tratados, mostrou-se adequado, excetuando-se alguns parâmetros, para o reúso em torre de resfriamento, lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos, proteção contra incêndio, descarga sanitária e geração de vapor. Porém, os parâmetros pesquisados e considerados para o reúso não podem ser considerados os únicos ou últimos, pois poderão ocorrer mudanças com relação a especificações e qualidades para o reúso de água, além da possibilidade de criação de legislação específica para o reúso de efluentes.
- f) O presente estudo poderá servir de fundamento para demais indústrias de laticínios da região, com relação a adoção de práticas de reúso de efluentes tratados e economia de água de qualidade superior para utilização em processos nos quais os requisitos de qualidade da água são maiores.

## REFERÊNCIAS

ACERO, J. L. BENITEZ, F. J. LEAL, A. I. REAL, F. J. TEVA, F. Membrane filtration Technologies applied to municipal secondary effluents for potencial reuse. **Journal of Hazardous Materials**. P. 390-398, 2010.

ALVES, S. S. **Conservação e reúso de água em indústria de Cosméticos – estudo de caso da Natura Cosméticos**. 2009. 130 p. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

AMARAL, M. C. S. ANDRADE, L. H. de. LANGE, L. C. BORGES, C. P. Avaliação do emprego de microfiltração para remoção de fibras do efluente de branqueamento de polpa celulósica. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 18, n. 1, p. 65-74. Jan-mar 2013.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Água de chuva – Aproveitamento de coberturas em áreas urbanas para fins não potáveis – Requisitos**. NBR 15.227. Rio de Janeiro, 2007.

\_\_\_\_\_. **Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**. NBR 13969. Rio de Janeiro, 1997.

\_\_\_\_\_. **Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Procedimento. NBR 9897. Rio de Janeiro, 1987<sup>a</sup>.

\_\_\_\_\_. Rio de Janeiro: **Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Procedimento. NBR 9898. Rio de Janeiro: 1987<sup>b</sup>.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIROMENT FEDERATION – WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22 ed., Washington, DC: APHA, 2012.

ANDRADE, J. F. ELIAS, R. J. WOLF, D. B. COSTA, R. H. R. LAPOLLI, F. R. **Microfiltração de efluente sanitário tratado através do processo de lodos ativados**. In: 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2001.

ANDRADE, L. H. MENDES, F. D. de S. ESPÍNDOLA, J. C. A. Nanofiltration as a post treatment to membrane bioreactor effluent for dairy wastewater reuse. **Procedia Engineering**. N. 4. p. 1956-1960. 2012.

ANDRADE, L. H. MENDES, F. D. de S. CERQUEIRA, N. ESPÍNDOLA, J. C. A. AMARAL, M. C. S. Distribuição de massa molar em um biorreator com membrana para tratamento de efluente de laticínios. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. V.19, n. 3, jul/set, 2014.

ÁREVALO, J. RUIZ, L. M. PARADA-ALBARRACÍN, J. A. GONZÁLEZ-PERÉZ, D. M. MORENO, B. GOMÉZ, M. A. Wastewater reuse after treatment by MBR. Microfiltration or ultrafiltration? **Desalination Journal**. V. 299, Aug, 2012.

ASANO, T; LEVINE, A. D. **Wastewater reclamation, recycling, and reuse: an introduction**. In: Asano T, ed. Wastewater reclamation and reuse. Lancaster, PA, Technomic Publishing Company, 56 p. 1998.

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, Purification and Technology**. N. 42, p. 195-200. 2005.

BALDASSO, C. **Concentração, purificação e fracionamento das proteínas do Soro Lácteo através da Tecnologia de Separação por Membranas**. 2008. 163 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Porto Alegre, 2008.

BENÍTEZ, F. J. ACERO, J. L. LEAL, A. I. GONZÁLEZ, M. The use of ultrafiltration and nanofiltration membranes for the purification of cork processing wastewater. **Journal of Hazardous Materials**. N. 162, p. 1438-1445, 2009.

BERTONCINI, E. I. Tratamento de efluentes e reúso da água no meio agrícola. **Revista Tecnologia e Inovação Agropecuária**. P. 152-169, jun. 2008.

BEZERRA, J. R. M. V. (coord.). **Introdução à tecnologia de leite e derivados**. Guarapuava: Unicentro, 2011.

BEZERRA, L. F. MATSUMOTO, T. Avaliação da remoção da matéria orgânica carbonácea e nitrogenada de águas residuárias em biorreator de membranas. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. V.15, n. 13, p. 253-260, Jul/set 2011.

BRASIL. Conselho Nacional dos Recursos Hídricos. **Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005 – Estabelece Critérios gerais para o reúso de água potável.**

\_\_\_\_\_. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Oficialização dos Métodos Analíticos Oficiais para Análises Microbiológicas para Controle de Produtos de Origem Animal e Água. **Instrução Normativa nº 62, de 26 de agosto de 2003.**

BRIÃO, V. B. TAVARES, C. R. G. Ultrafiltração como processo de tratamento para reúso de efluentes de laticínios. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental.** Vol. 12, n. 2. Abr/jun, 2007, p. 134-138.

BULLÓN, J. RENNOLA, L. SALAZAR, F. HOEGER, M. CÁRDENAS, A. ROJÁS, O. J. Tratamiento de aguas de circuitos cerrados de La industria papelera utilizando técnicas de separación por membranas. **Revista Técnica de La Facultad de Ingeniería Universidade Del Zulia.** V. 30, n. especial, Maracaibo, 2007.

CAVALCANTI, J. E. W. de A. **Manual de tratamento de efluentes industriais.** 2. ed. São Paulo: Engenho Editora Técnica Ltda., 2012.

CHMIEL, H. MAVROV, V. BELIÈRES, E. Reuse of vapour condensate from milk processing using nanofiltration. **Filtration+Separation.** P. 24-27, 2000.

CONSELHO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 70, de 1 de outubro de 2009 - Condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos industriais.**

CONSTANZI, R. N. **Tratamento de efluentes domésticos por sistemas integrados de lodos ativados e membranas de ultrafiltração visando o reúso de água.** 200 f. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) Escola Politécnica de São Paulo. São Paulo, 2007.

CROOK, J; SURAMPALLI, R. Y. **Water reclamation and reuse criteria in the U.S.** Water Science and Technology, Vol. 33, N°10-11, 1996.

DACANAL, M. BEAL, L. L. Filtro anaeróbio associado à membrana de microfiltração tratando lixiviado de aterro sanitário. **Revista Sanitária e Ambiental.** V. 15, n. 1. Jan-Mar 2010, p. 11-18.

EBLE, K. S; FEATHERS, J. **Process water reuse, part I.** Oil & Gas Journal 90 (38), 1992.

EPA – Environmental Protection Agency. **Guidelines for Water Reuse**. EPA/625/R-04/108, Washington, DC, September, 2004.

FAPPI, Devanir André. **Micro e ultrafiltração como pós-tratamento para o reúso de efluentes de abatedouro e frigorífico de suínos**. 2015. 126 p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Ambientais). Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - FIESP. **Conservação e reúso de Água: Manual de orientações para o setor industrial**. Centro Internacional de Referência em Reúso de Água, CIRRA/IRCWR e DCT Engenharia, São Paulo, vol. 1, 2004.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO – FIRJAN. **Manual de conservação e reúso da água na indústria**. Rio de Janeiro: DIM, 2006.

FEDERAÇÃO DAS INDÚSTRIAS DO ESTADO DE MINAS GERAIS – FIEMG. Guia técnico ambiental da indústria de laticínios. Minas Gerais, 2014.

FIELD, R. WU, D. HOWELL, J. A. GUPTA, B. B. W. Critical Flux concept for microfiltration fouling. **Journal of Membrane Science**. V. 100, p. 259-272, 1995.

GIACOBBO, A. RODRIGUES, M. A. S. BERNARDES, A. M. FERREIRA, J. Z. MENEGUZZI, A. Microfiltração aplicada ao tratamento de efluentes de curtume. In: **VII Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental**. Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2010.

HABERT, A. C.; BORGES, C. P.; NOBREGA, R. **Processos de separação por membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006.

HAMMER, M. J; HAMMER, M. J. **Water and wastewater technology**. Ed. Pearson Prentice Hall. 6 th ed. 553 p, 2007.

HASAN, A. PELUSO, C. R. HULL, T. S. FIESCHKO, J. CHATTERJEE, S. G. A surface-renewal model of cross-flow microfiltration. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. V. 30, n. 1, p. 167-186. Jan/mar, 2013.



HESPANHOL, I. Potencial de Reuso de Água no Brasil Agricultura, Indústria, Municípios, Recarga de Aquíferos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. V. 7, n. 4, p. 75-95. Out/dez, 2002.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Produção da Pecuária Municipal**. V. 42, Brasil, 2014.

JERÔNIMO, C. E. M. COELHO, M. S. MOURA, F. N. ARAÚJO, A. B. A. Qualidade ambiental e sanitária das indústrias de laticínios do município de Mossoró-RN. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. V. 7, nº 7, p. 1349-1356, MAR-AGO, 2012.

LÁSLÓ, Z. KERTÉSZ, S. BESZÉDES, S. HOVORKA-HORVÁTH, Z. SZABÓ, G. HODÚR, C. Effect of preozonation on the filterability of model dairy wastewater in nanofiltration. **Desalination**. Vol. 240, 2009, p. 170-177.

LAUTENSCHLAGER, R. S.; FILHO, S. S. F.; PEREIRA, O. Modelação matemática e otimização operacional de processos de membrana de ultrafiltração. **Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 14, n. 2, p. 215-222. Abr/jun 2009.

LEITE BRASIL. **18º Ranking maiores empresas de laticínios do Brasil – 2014**. Disponível em: <<http://www.leitebrasil.org.br/download/mayores%20laticinios%202014.pdf>>. Acesso em: 21 de nov 2015.

LENNTECH, Water Treatment Solutions. **Características da água de alimentação da caldeira**. 2015. Disponível em: <<http://www.lenntech.com.pt/aplicacoes/processo/caldeira/caldeira-agua-alimentacao-caracteristicas.htm>>. Acesso em 20 jan 2016.

LIMA, P. C. G. de. **Uso dos mecanismos de detoxificação e tolerância aos metais cromo e cobre em *Pseudokirchneriella subcapitata* e *Pistia stratiotes* e o uso das macrófitas *Typha sp* e *Phragmites sp* na remoção de nutrientes em wetlands construídos**. Tese (Doutorado Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo. São Carlos, 2010.

MACEDO, J. A. B. **Água e águas**. São Paulo: Livraria Varela, 2001.

MAGANHA, M. F. B. (Elab.). **Guia técnico ambiental da indústria de produtos lácteos – Série P+L**. São Paulo: CETESB, 2008.

MANCUSO, P. C. S. Reúso de água para torres de resfriamento. São Paulo, 2001.

MANCUSO, P. C. S. SANTOS, H. F. dos (edit.). Reúso de Água. São Paulo, Manole, 2003.

MATSUMURA, E. M. MIERZWA, J. C. Water conservation and reuse in poultry processing plant – A case study. **Reuse Conservation and Recycling**. V. 52, p. 835-842, 2008.

MENDES, P. R. A. **Integração de processos físico-químicos e oxidativos avançados no tratamento de efluentes da indústria de laticínios**. 2014. 167 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de Lorena, Universidade de São Paulo, Lorena, 2014.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering treatment and reuse**. Mc Graw-Hill: Higler Education. Fourth Edition, 2003. 1819p.

METCALF; EDDY. Wastewater reclamation and reuse. In: **Wastewater engineering treatment, disposal and reuse**. New York, McGraw Hill. Third Edition, 1991.

MILLER JR., G. T. **Ciência Ambiental**. São Paulo: Cengage Learning, 2008.

MIERZWA, J. C. **O uso racional e o reúso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria – estudo de caso da Kodak Brasileira**. 2002. 367 p. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MIERZWA, J. C. **Processos de separação por membranas: conceitos para uma aplicação eficiente**. São Paulo, 2007. Disponível em: <[http://www.cepema.usp.br/wp-content/uploads/2011/06/IV-EPOA\\_-4.pdf](http://www.cepema.usp.br/wp-content/uploads/2011/06/IV-EPOA_-4.pdf)>. Acesso em 15 março. 2015.

MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. **Água na indústria: uso racional e reúso**. São Paulo: Oficina de Textos, 2005.

MURO, C. ESCOBAR, J. ZAVALA, R. E. ESPARZA, M. CASTELLANOS, J. GOMÉZ, R. M. GARCÍA, M. Evaluación del proceso de microfiltración en un efluente residual de una industria alimenticia para su reuso. **Revista Internacional de contaminación ambiental**. V. 25, n.4, p. 229-238, 2009.

NETA, L. S. de F. HABERT, A. C. BORGES, C. P. Cerveja microfiltrada: processo e qualidade. **Brazilian Journal of Food Technology**. 2005.

OENNING JR, A. **Avaliação de tecnologias avançadas para o reúso de água em indústria metal-mecânica**. 2006. 223 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

PAM MEMBRANAS. **Manual de instalação, operação e manutenção**. Unidade de MF/UF/NF de bancada, 2012.

PASSARINI, K. C. GAMARRA, F. M. C. VANALLE, R. M. SANTANA, J. C. C. Reutilización de las aguas residuales en la irrigación de plantas y en la recuperación de los suelos. **Revista Información Tecnológica**. Vol. 23. N. 1, 2012. P. 57-64

PINJING, H; PHAN, L; GUOEWI, G; HERVOUET, G. **Reclaimed municipal wastewater – a potencial water resource in China**. Water Science Technology, v 43 (10), 2001. pp. 51-58.

PIO, A. A. B. (coord.). **Conservação e reúso de água em edificações**. São Paulo: Prol Editora Gráfica, 2005.152 p.

PIRES, E. C. DAMIANOVIC, M. H. R. Z. DEL NERY, V. Tratamento de águas residuárias industriais. In: CALIJURI, M. do C.; CUNHA, D. G. F. (coord). **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

RAO, R. H. G. Mechanisms of flux decline during ultrafiltration of dairy products and influence of pH on flux rates of whey and buttermilk. **Desalination**. Amsterdam, v. 144, n. 1-3, p. 319-324, 2002.

RIERA, F. A. SUÁREZ, A. MURO, C. Nanofiltration of UHT flash cooler condensates from a dairy factory: Characterisation and water reuse potential. **Dessalination**. V. 309, p. 52-63, 2013.

SARAIVA, C. B. MENDONÇA, R. C. S. SANTOS, A. de L. PEREIRA, D. A. Consumo de água e geração de efluentes em uma indústria de laticínios. **Revista Inst. Latic. “Cândido Tostes”**. N. 367/368, 64, p. 10-18. Mar/Jun, 2009.

SARMENTO, L. A. V. **Obtenção e separação de polifenóis de sementes de cacau por extração supercrítica associada a membranas**. 2007. 103 p. Tese (Doutorado

em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTYIA, M. T. **Membranas Filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso**. São Paulo: ABES, 2001.

SCHMITT, D. M. F. FAGUNDES-KLEN, M. R. VEIT, M. T. BERGAMASCO, R. FERRANDIN, A. T. Estudo da eficiência do composto ativo de *Moringa Oleífera* extraída com soluções salinas na tratabilidade de águas residuárias da indústria de laticínios. **Revista Engevista**. V. 16, n. 2, p. 221-231. Jun., 2014.

SCHMITT, D. M. F. VEIT, M. T. BERGAMASCO, R. VIEIRA, A. M. S. FAGUNDES-KLEN, M. R. Ultrafiltration Combined with Coagulation/Flocculation/Sedimentation Using Moringa oleifera as Coagulant to Treat Dairy Industry Wastewater. **Water Air Soil Pollut**. V. 224, n. 1682, p. 1-10, 2013.

SERVIÇO BRASILEIRO DE APOIO ÀS MICRO E PEQUENAS EMPRESAS – SEBRAE. **Critérios de classificação de empresas**. Disponível em: <<http://www.sebrae-sc.com.br/leis/default.asp?vcdtexto=4154>>. Acesso em: 8 de ago. 2015.

SILVA, Á. B. **Avaliação do emprego da ultrafiltração em membrana na remoção de células de cianobactérias e microcistina para águas de abastecimento**. 2008. 104 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SILVA, D. J. P. Gestão ambiental em uma indústria de produtos lácteos. **Revista Leite e Derivados**. Ano XV. n. 94, p. 52-63, Set/Out. 2006.

SILVA, T. O. da. ROCHA, A. W. S. TERAN, F. J. C. Microfiltração como processo de tratamento avançado para efluente industrial de abatedouro de bovinos. **Revista Engenharia Ambiental**. V. 8, n. 4, p. 23-30, out/dez, 2011.

SONG, L. Flux decline in crossflow microfiltration and ultrafiltration: mechanisms and modeling of membrane fouling. **Journal of Membrane Science**. V. 139, p. 183-200. 1998.

SUSUKI, F. F. BERGAMASCO, R. TAVARES, C. R. G. BALDASSO, T. Production and application of porous membrane for removal of contaminants in treated water. **Acta Scientiarum**. Maringá, v. 34, n. 4, p. 421-425, Oct.-Dec., 2012.

TCHAMANGO, S. NANSEU-NJIKI, N. P. NGAMENI, E. HADJIEV, D. DARCHEN, A. Treatment of dairy effluents by electrocoagulation using aluminium electrodes. **Science of the Total Environment**, 408, p. 947-952, 2010.

TELLES, D. D'; COSTA, R. H. P. G. (coord). **Reúso da água: conceitos, teorias e práticas**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

VASCONCELOS, Y. Água Reciclada – Reúso a partir do tratamento de efluentes é alternativa para ajudar no combate à crise de abastecimento. **Revista Fapesp**. Ed. 235, Setembro, 2015.

VIDAL, C. M. de S. CAMPOS, J. R. Coagulação associada à microfiltração para o tratamento avançado de esgoto sanitário. **Revista Ambiência**. Guarapuava, PR v.5 n.1 p.101 - 114 Jan./Abr. 2009.

VOURCH, M. BALLANEC, B. CHAUFER, B. DORANGE, G. Treatment of dairy industry wastewater by reverse osmosis for reuse water. **Dessalination**. V. 219, p. 190-202, 2008.

WAGNER, J. **Membrane Filtration Handbook: Practical Tips and Hints**. 2ª Ed. Osmonics, 2001.

WESCHENFELDER, S. E. BORGES, C. P. CAMPOS, J. C. Avaliação de membranas para o tratamento de água proveniente do processo de extração de petróleo. **Revista Ambiente e Água**. V. 10, n. 2, abr/jun, 2015.