

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIAS AMBIENTAIS**

DEVANIR ANDRÉ FAPPI

**MICRO E ULTRAFILTRAÇÃO COMO PÓS-TRATAMENTO PARA
REÚSO DE EFLUENTES DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO DE
SUÍNOS**

DISSERTAÇÃO

MEDIANEIRA

2015

DEVANIR ANDRÉ FAPPI

**MICRO E ULTRAFILTRAÇÃO COMO PÓS-TRATAMENTO PARA
REÚSO DE EFLUENTES DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO DE
SUÍNOS**

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: Devanir André Fappi

Orientador (a): Dra Eliane Rodrigues dos Santos Gomes

Coorientador (a): Dra Juliana Bortoli Rodrigues Mees

MEDIANEIRA

2015

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

F218m Fappi, Devanir André.

Micro e ultrafiltração como pós-tratamento para reuso de efluentes de abatedouro e frigorífico de suínos. / Devanir André Fappi. – 2015.
126 f.: il.; 30 cm.

Orientadora: Eliane Rodrigues dos Santos Gomes.

Co-orientadora: Juliana Bortoli Rodrigues Mees.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. Medianeira, 2015.

Inclui bibliografias.

1. Águas residuais – Aspectos ambientais. 2. Indústrias – Aspectos ambientais. 3. Resíduos industriais. I. Gomes, Eliane Rodrigues dos Santos, orient II. Mees, Juliana Bortoli Rodrigues, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais. IV. Título.

CDD: 363.7 - Ed. 22

Biblioteca Câmpus UTFPR Medianeira
Marci Lucia Nicodem Fischborn 9/1219



TERMO DE APROVAÇÃO

MICRO E ULTRAFILTRAÇÃO COMO PÓS-TRATAMENTO PARA REÚSO DE EFLUENTES DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO DE SUÍNOS

Por

DEVANIR ANDRÉ FAPPI

Essa dissertação foi apresentada às 08:00 horas, do dia 26 de março de dois mil e quinze, 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 candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dra. Eliane Rodrigues dos Santos Gomes (Orientadora – PPGTAMB)

Prof. Dra. Juliana Bortoli Rodrigues Mees (Coorientadora – PPGTAMB)

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

Prof. Dr. Gilberto da Cunha Gonçalves (Membro Interno – UTFPR)

Prof. Dr. Vandré Barbosa Brião (Membro Externo – UPF)

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

Dedico esta dissertação a todos que direta
ou indiretamente colaboraram para a
realização da mesma.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar a Deus pela vida, fé e força para superar todos os obstáculos durante a caminhada.

Aos meus pais, pelo incentivo e apoio em mais esta etapa e durante toda minha vida.

A minha orientadora Professora Dra Eliane Rodrigues dos Santos Gomes pela dedicação, orientação, correções, sugestões durante o desenvolvimento deste trabalho.

A minha coorientadora Professora Dra Juliana Bortoli Rodrigues Mees pelos ensinamentos e orientação.

A agroindústria de abatedouro e frigorífico de suínos pelo apoio e disponibilidade de material para a execução deste projeto.

A Fundação Araucária e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais, professores da UTFPR, Câmpus Medianeira, pelo conhecimento transmitido.

Agradeço a todo o colegiado do PPGTAMB pela oportunidade de realização do Mestrado.

Aos Professores Doutores Luiz Alberto Vieira Sarmiento e Gilberto da Cunha Gonçalves pelas sugestões e considerações no exame de qualificação.

Agradeço a todos os colegas discentes, que contribuíram para o crescimento de todos, a partir de suas experiências, troca de informações, auxílio e companheirismo.

Agradeço aos técnicos laboratoriais pela colaboração e auxílio na realização da investigação experimental.

Enfim, agradeço a todos que ajudaram nos momentos difíceis, aos amigos pelas palavras de incentivo, os meus sinceros agradecimentos.

“Não se mede o valor de um homem pelas suas roupas ou pelos bens que possui, o verdadeiro valor do homem é o seu caráter, suas ideias e a nobreza dos seus ideais. (CHARLES CHAPLIN)”.

RESUMO

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

As indústrias alimentícias utilizam considerável volume de água para suprir a demanda de processos. Devido a isso, observa-se um grande volume gerado de efluentes que necessitam ser tratados para garantir o destino final adequado. Tendo em vista a crescente escassez de água, procedimentos de racionalização do uso da água e o reúso de efluentes tratados surgem como soluções para estes problemas. A aplicação de processos de separação por membranas no tratamento de efluentes da indústria alimentícia para reúso apresenta-se como um processo de tratamento avançado apropriado. Deste modo, o objetivo deste estudo foi avaliar a utilização dos processos de separação por membranas como tratamento avançado de águas residuárias agroindustriais providas de um abatedouro e frigorífico de suínos, da região oeste do Paraná, visando à possibilidade de reúso destes efluentes. Para isso, foi necessário: realizar a caracterização físico-química dos efluentes agroindustriais; avaliar o emprego de microfiltração, ultrafiltração, e microfiltração seguida de ultrafiltração em diferentes condições operacionais de pressão aplicada à membrana, e avaliar a qualidade do efluente obtido pelos processos de separação com membranas, considerando o atendimento das exigências técnicas, legais e sanitárias para diferentes usos industriais. Os resultados mostraram que os processos de separação por membranas apresentaram, de uma maneira geral, uma sensível melhora na qualidade do efluente final quando comparados com o atual sistema de pós-tratamento empregado pela indústria (flotador físico-químico), que promove eficiências de remoção nas faixas oscilantes de 3% a 29%, 44% a 70%, 40% a 46% e 50% a 58,5%, aproximadamente, para os parâmetros sólidos totais voláteis, turbidez, nitrogênio amoniacal e DQO, respectivamente. A microfiltração apresentou as seguintes faixas de eficiência de remoção, aproximadas: sólidos totais voláteis (51% - 64%), turbidez (83% - 99%), nitrogênio amoniacal (21% - 24%) e DQO (64% - 72%). A ultrafiltração apresentou as seguintes faixas de eficiência de remoção, aproximadas: sólidos totais voláteis (23% - 51%), turbidez (87% - 99%), nitrogênio amoniacal (54% - 69%) e DQO (77% - 85%). A realização do ensaio de microfiltração seguido de ultrafiltração nas melhores condições experimentais investigadas obteve resultados satisfatórios na remoção de aproximadamente 97% para a turbidez, 17% para os sólidos totais voláteis, 67% para a DQO, 38% para o nitrogênio amoniacal, 96% a 99,95% para os coliformes termotolerantes e 93 a 99,69% para os coliformes termorresistentes. Com o aumento da pressão para a microfiltração e ultrafiltração foi obtido maior fluxo permeado e melhor qualidade do efluente final. Embora os efluentes tenham proporcionado distintos valores de fluxo permeado, foram obtidas curvas de desempenho bastante semelhantes, caracterizando-se por uma queda do fluxo permeado nos primeiros minutos de filtração, seguido de um período onde ocorre declínio gradual, com uma tendência ao equilíbrio. De acordo com os requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos

exigidos para o reúso de efluentes tratados, a microfiltração e a ultrafiltração atenderam alguns dos parâmetros monitorados, alcançando a qualidade exigida para o reúso em torres de resfriamento, lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos, proteção contra incêndio e descarga sanitária.

Palavras-chave: Indústria Alimentícia. Processos de Separação por Membranas. Água Residuária. Reúso. Tratamento Terciário.

ABSTRACT

FAPPI, Devanir André. **Micro and ultrafiltration as post-treatment for the reuse of wastewater and swine slaughterhouse**. 2015. 126 f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Ambientais) Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Medianeira, 2015.

The food industry uses large volumes of water to meet the demand processes. Because of this, there is a large volume of generated waste that need to be addressed to ensure proper final destination. In view of the growing scarcity of water, the use rationalization of procedures of the water and the reuse of treated effluent arise as solutions to these problems. Application of separation processes by membranes in the treatment of wastewater for reuse food industry presents itself as an appropriate advanced treatment process. Thus, the aim of this study was to evaluate the use of membrane separation processes as advanced treatment of agro-industrial wastewater stemmed from a swine slaughterhouse, the western region of Paraná, aiming at the possibility of recycling these effluents. For this it was necessary: to define the physical-chemical characterization of the agro-industrial effluents; evaluate the use of microfiltration, ultrafiltration, microfiltration and ultrafiltration then under different conditions of pressure applied to the membrane, and evaluate the quality of the effluent obtained by separation processes with membranes, considering the care of the technical, legal and health requirements for different uses industrial. The results showed that membrane separation processes presented in a general way a considerable improvement in final effluent quality compared with the current tertiary treatment system used by the industry (physico-chemical flotation) which promotes removal efficiencies in oscillating ranges from 3% to 29%, 44% to 70%, 40% to 46%, 50% to 58.5%, approximately, for the parameters: total volatile solids, turbidity, ammonia nitrogen and COD, respectively. Microfiltration had the following removal efficiency ranges, approximate: total volatile solids (51% - 64%), turbidity (83% - 99%), ammonia nitrogen (21% - 24%) and COD (64% - 72%). Ultrafiltration showed the following removal efficiency ranges, approximate: total volatile solids (23% - 51%), turbidity (87% - 99%), ammonia nitrogen (54% - 69%) and COD (77% - 85%). The completion of the test microfiltration followed by ultrafiltration under the best experimental conditions investigated achieved satisfactory results in the removal of approximately 97% for the turbidity, 17% total volatile solids, 67% for COD, 38% for ammonia nitrogen, 96% to 99.95% for thermotolerant and 93 to 99.69% for the heat-resistant coliforms coliforms. With increasing pressure to microfiltration and ultrafiltration permeate flux was increased and better quality of the final effluent. Although the effluents have provided separate permeate flow rates, very similar performance curves were obtained, characterized by a drop in permeate flux during the first minute filtration followed by a period where there is a gradual decline, with a tendency toward equilibrium. According to the physicochemical requirements and minimum microbiological required for the reuse of treated wastewater, microfiltration and ultrafiltration attended some of the monitored parameters, achieving the required quality for reuse in cooling towers, floor washing, irrigation of green areas , washing vehicles, fire protection and sanitary discharge.

Keywords: Food Industry. Membrane Separation Processes. Wastewater. Reuse. Tertiary Treatment.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição do consumo de água em abatedouro e frigorífico de suínos.	25
Figura 2 - Representação de um módulo de microfiltração com a definição das correntes de permeado e concentrado.....	42
Figura 3 - Fotomicrografias da seção transversal das membranas de microfiltração (a) e ultrafiltração (b)	48
Figura 4 - Fotomicrografias da membrana de microfiltração de polieterimida. (a) ampliação da parede porosa na seção transversal (aumento de 870 vezes) e (b) poros da superfície externa da membrana (aumento de 11.362 vezes)	49
Figura 5 - Fotomicrografias da membrana de ultrafiltração de polietersulfona. (a) ampliação da parede da seção transversal da membrana (aumento de 1.240 vezes) e (b) detalhes da camada seletiva (superfície mais externa) da fibra oca (aumento de 5.240 vezes).....	49
Figura 6 - Principais processos de separação por membranas.....	50
Figura 7 - Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes da indústria.....	59
Figura 8 - Foto do sistema de bancada de micro e ultrafiltração.....	63
Figura 9 - Esquema representativo da unidade experimental mostrando os principais equipamentos.....	64
Figura 10 - Amostras de efluentes coletadas antes (AIF) e após (AFF) flotador físico-químico.....	71
Figura 11 - Comportamento do fluxo permeado com água destilada em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo quando da pressurização e despressurização da membrana de microfiltração	74
Figura 12 - Comportamento do fluxo permeado com água destilada em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo quando da pressurização e despressurização da membrana de ultrafiltração.....	75
Figura 13 - Comportamento do fluxo permeado estacionário de água destilada em função do diferencial de pressão aplicado durante a pressurização e despressurização da membrana de microfiltração	76
Figura 14 - Comportamento do fluxo permeado estacionário de água destilada em função do diferencial de pressão aplicado durante a pressurização e despressurização da membrana de ultrafiltração.....	76
Figura 15 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente coletada após lagoa de decantação (AIF) em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo, para a membrana de microfiltração	78
Figura 16 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente coletada após lagoa de decantação (AIF) em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo, para a membrana de ultrafiltração	78
Figura 17 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente coletada após flotador físico-químico (AFF) em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo, para a membrana de microfiltração	79
Figura 18 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente coletada após flotador físico-químico (AFF) em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo, para a membrana de ultrafiltração	79

Figura 19 - Comportamento do fluxo permeado estacionário de água destilada, amostra de efluente após o flotador físico-químico (AFF) e de amostra de efluente após a lagoa de decantação (AIF) em função do diferencial de pressão aplicado à membrana de microfiltração	80
Figura 20 - Comportamento do fluxo permeado estacionário de água destilada, amostra de efluente após o flotador físico-químico (AFF) e de amostra de efluente após a lagoa de decantação (AIF) em função do diferencial de pressão aplicado à membrana de ultrafiltração.....	81
Figura 21 - Comportamento do fluxo permeado de todos os tratamentos testados (AIF = Amostra no Início do Flotador; AFF = Amostra no Final do Flotador)	82
Figura 22 - Comportamento do fluxo permeado nos tratamentos utilizando microfiltração	85
Figura 23 - Comportamento do fluxo permeado nos tratamentos utilizando ultrafiltração.....	88
Figura 24 - Aspecto visual das amostras de efluentes microfiltradas.....	95
Figura 25 - Aspecto visual das amostras de efluentes ultrafiltradas.....	95
Figura 26 - Comportamento da turbidez.....	100
Figura 27 - Comportamento dos sólidos totais	100
Figura 28 - Comportamento dos sólidos totais fixos.....	100
Figura 29 - Comportamento dos sólidos totais voláteis.....	101
Figura 30 - Comportamento da condutividade	101
Figura 31 - Comportamento da salinidade	101
Figura 32 - Comportamento da DQO	102
Figura 33 - Comportamento do nitrogênio amoniacal	102
Figura 34 - Índice de qualidade do permeado (IQP) dos diferentes tratamentos testados a partir dos fatores de concentração.....	104
Figura 35- Comportamento do fluxo permeado.....	105
Figura 36 - Comportamento do fluxo permeado da microfiltração.....	106
Figura 37 - Comportamento do fluxo permeado da ultrafiltração	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reúso de efluentes.....	35
Tabela 2 - Parâmetros para caracterização das amostras de efluentes e permeados	61
Tabela 3 - Propriedades da membrana de microfiltração.....	63
Tabela 4 - Matriz do planejamento experimental.....	66
Tabela 5 - Parâmetros monitorados durante a execução da investigação experimental.....	67
Tabela 6 - Características físico-químicas dos efluentes coletados após a lagoa de decantação (AIF).....	72
Tabela 7 - Características físico-químicas dos efluentes coletados após flotador físico-químico (AFF)	72
Tabela 8 - Permeabilidade das membranas com água destilada e com amostras de efluentes.....	81
Tabela 9 - Percentual médio de redução de fluxo permeado para a microfiltração e a ultrafiltração com amostras de efluentes após a lagoa de decantação (AIF)	83
Tabela 10 - Percentual médio de redução de fluxo permeado para a microfiltração e a ultrafiltração com amostras de efluentes após flotador físico-químico (AFF)	84
Tabela 11 - Eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos utilizando flotador físico-químico, microfiltração e ultrafiltração com amostras de efluentes após lagoa de decantação (AIF)	89
Tabela 12 - Eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos utilizando flotador físico-químico, microfiltração e ultrafiltração com amostras de efluentes após flotador físico-químico (AFF)	90
Tabela 13 - Comportamento dos parâmetros físico-químicos em função do tempo de filtração, para a microfiltração com amostras de efluentes coletadas após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF).....	92
Tabela 14 - Comportamento dos parâmetros físico-químicos em função do tempo de filtração, para a ultrafiltração com amostras de efluentes coletadas após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF).....	93
Tabela 15 - Características físico-químicas e eficiência média das amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) microfiltradas com 0,5 bar de pressão – tratamento 1	96
Tabela 16 - Características físico-químicas e eficiência média das amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) microfiltradas com 0,75 bar de pressão – tratamento 2	96
Tabela 17 - Características físico-químicas e eficiência média das amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) ultrafiltradas com 0,75 bar de pressão – tratamento 3	97
Tabela 18 - Características físico-químicas e eficiência média das amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) ultrafiltradas com 1,0 bar de pressão – tratamento 4	97

Tabela 19 - Eficiências de remoção do flotador físico-químico, da microfiltração e da ultrafiltração.....	99
Tabela 20 - Índice de qualidade do permeado - IQP.....	104
Tabela 21 - Características físico-químicas e eficiência de remoção das amostras de efluentes microfiltradas, a partir dos fatores de concentração	107
Tabela 22 - Características físico-químicas e eficiência média de remoção das amostras de efluentes ultrafiltradas (tendo como alimentação, amostra de efluente microfiltrada), a partir dos fatores de concentração	108
Tabela 23 - Eficiências de remoção máximas alcançadas para os parâmetros físico-químicos monitorados, mediante o funcionamento do flotador físico-químico, tratamentos utilizando microfiltração, ultrafiltração, e microfiltração seguida de ultrafiltração.....	109
Tabela 24 - Resultados das análises microbiológicas de coliformes termotolerantes e termorresistentes e a eficiência de remoção	110
Tabela 25 - Requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reúso de efluentes e médias encontradas para o flotador físico-químico, microfiltração, ultrafiltração e microfiltração seguida de ultrafiltração	112

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo Geral	18
1.1.2 Objetivos Específicos	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA E A SUA ESCASSEZ	20
2.2 A AGROINDÚSTRIA DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO DE SUÍNOS	22
2.3 A UTILIZAÇÃO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA E A GERAÇÃO DE EFLUENTES	22
2.4 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES	25
2.5 REÚSO E USO RACIONAL DE ÁGUA NA INDÚSTRIA	27
2.5.1 Tipos de reúso de água em indústrias	31
2.5.2 Qualidade da água para o reúso	33
2.5.3 Recomendações para o reúso	37
2.6 A UTILIZAÇÃO DE MEMBRANAS PARA O REÚSO DE EFLUENTES	38
2.7 OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS	42
2.7.1 Classificação das membranas	45
2.7.2 Configuração das membranas	47
2.7.3 Classificação dos processos de separação por membranas	49
2.7.3.1 Microfiltração	50
2.7.3.2 Ultrafiltração	51
2.7.3.3 Nanofiltração	52
2.7.3.4 Osmose inversa	52
2.7.3.5 Características gerais	53
2.8 PERMEABILIDADE DAS MEMBRANAS	55
2.9 DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO COM MEMBRANAS	56
3 MATERIAIS E MÉTODOS	58
3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE COLETA DAS AMOSTRAS	58
3.2 COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS	59
3.2.1 Coleta e Preservação das Amostras de Efluentes	59
3.2.2 Coleta e Preservação das Amostras de Permeado	60
3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS DE EFLUENTES E PERMEADOS	60
3.3.1 Métodos Analíticos	61
3.4 UNIDADE EXPERIMENTAL	62
3.4.1 Propriedades das Membranas de Microfiltração e Ultrafiltração	62
3.4.2 Módulo de Filtração por Membranas	63
3.5 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DOS EFLUENTES POR MEMBRANAS	65
3.5.1 Parâmetros Monitorados Durante a Execução da Investigação Experimental	67
3.5.2 Limpeza das Membranas e Controle do Fluxo Permeado	68
3.6 ÍNDICE DE QUALIDADE DO PERMEADO - IQP	70
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS	71
4.2 PERMEABILIDADE DAS MEMBRANAS	73
4.2.1 Permeabilidade das Membranas com Água Destilada	73

4.2.2 Permeabilidade das Membranas com Amostras de Efluentes	77
4.3 COMPORTAMENTO DO FLUXO PERMEADO NOS TRATAMENTOS TESTADOS	82
4.3.1 Fluxo Permeado nos Tratamentos Utilizando Microfiltração	85
4.3.2 Fluxo Permeado nos Tratamentos Utilizando Ultrafiltração.....	87
4.4 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO NOS TRATAMENTOS TESTADOS.....	88
4.4.1 Eficiência de Remoção para a Microfiltração e Ultrafiltração com Amostras após Lagoa de Decantação.....	88
4.4.2 Eficiência de Remoção Complementar para a Microfiltração e Ultrafiltração com Amostras após Flotador Físico-químico	89
4.4.3 Eficiência de Remoção Comparando a Microfiltração com a Ultrafiltração	90
4.5 COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DURANTE A INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL.....	92
4.6 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO NOS TRATAMENTOS TESTADOS A PARTIR DOS FATORES DE CONCENTRAÇÃO	94
4.6.1 Comportamento dos Parâmetros Físico-químicos Durante a Investigação Experimental a Partir dos Fatores de Concentração.....	99
4.6.2 Índice de Qualidade do Permeado – IQP	103
4.7 RESULTADOS PARA O TRATAMENTO EMPREGANDO A MICROFILTRAÇÃO SEGUIDA DE ULTRAFILTRAÇÃO	106
4.7.1 Resultados Microbiológicos.....	109
4.8 AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE REÚSO DE EFLUENTES	111
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	114
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	116
REFERÊNCIAS.....	117

1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento econômico deve incluir o equilíbrio ambiental para empregar os recursos naturais de forma sustentável. Dessa forma, deve-se debater a temática ambiental de forma sistemática e associada, almejando soluções apropriadas ao meio ambiente, empregando-se tecnologias modernas capazes de viabilizar equilibradamente o crescimento econômico e a preservação ambiental, seja para a gestão de empresas ou para agroindústrias. Deste modo, a gestão ambiental abarca no gerenciamento integral do processo produtivo, atividades de planejamento e ação, procedimentos, processos e recursos para desenvolver, implantar, alcançar e avaliar continuamente, além de manter a política ambiental dentro de uma empresa.

A produção agroindustrial gera resíduos que necessitam ser gerenciados de forma apropriada para garantir um destino final adequado. A agroindústria utiliza considerável volume de água, principalmente para atender a demanda de processos, devido a isso, observa-se um grande volume gerado de efluentes industriais provindo de indústrias alimentícias, como abatedouros e frigoríficos.

Krieger e Rodriguez (2007), ao realizarem o balanço hídrico de um frigorífico de suínos, encontraram como volume final utilizado, a quantidade de 727 litros por suíno, equivalente ao consumo em frigoríficos de média tecnologia.

Atualmente as indústrias buscam maneiras mais eficientes para o gerenciamento do uso da água e da geração de efluentes, devido a diversos fatores como o crescente custo da água, com qualidade e quantidade disponíveis e seguras, sendo necessário o tratamento das águas residuárias para atender a legislação ambiental vigente. Dessa forma, a racionalização e o reúso da água surgem como alternativas apropriada à questão.

A água é um recurso escasso em muitas regiões, portanto o reúso da água não é mais uma necessidade, mas quase uma questão de sobrevivência para indústrias que queiram manter ou maximizar seus padrões de produção, evitando a sobrecarga nos sistemas de tratamento e servindo como uma ferramenta na redução de custos.

Não apenas devido à necessidade de formar uma cultura e uma política de consumo da água em todas as esferas da sociedade, o reúso de águas de baixa

qualidade, sobretudo efluentes industriais, constitui-se em uma ferramenta atualizada e eficaz para garantir a sustentabilidade dos recursos hídricos (MANCUSO e SANTOS, 2003).

Ainda existem grandes e complexas restrições para o reúso de água que são os limites conferidos pela legislação aplicável, além das especificações higiênicas. Parâmetros legais (diretrizes, normas, leis, regulamentos, etc) têm sido elaborados permitindo ou restringindo a utilização de água fora dos padrões de potabilidade e de água oriunda de reúso potável direto e indireto. Não obstante, em indústrias de alimentos são indispensáveis análises criteriosas de cada evento fundamentado no conhecimento do risco envolvido para a garantia dos produtos e, por conseguinte, para a saúde dos consumidores.

No espaço industrial existem inúmeras alternativas de aproveitamento de reúso de efluentes tratados, tais como: água de alimentação de caldeiras, torres de resfriamento, irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos, construção civil, lavagem de gases, pisos e peças, dentre outras.

Contudo, o reúso de água na indústria possui uma variação considerável, e na maior parte das vezes, demanda um tratamento suplementar das águas residuárias após o tratamento biológico, dependendo do aproveitamento à que se destina a água de reúso e também da origem dos efluentes que serão utilizados. Geralmente, a técnica de reúso é uma opção que diminui o consumo, mas não a carga de poluentes.

Brião e Tavares (2007), argumentam que diferentes alternativas podem ser escolhidas para tratar águas residuárias para reúso, sendo que distintas podem ser as necessidades e tendências de cada agroindústria ou área onde está localizada a atividade. A aplicação dos processos de separação por membranas no tratamento de efluentes da indústria alimentícia para reúso apresenta-se como um desafio, visto que o volume e a carga dos efluentes apresentam uma grande alteração, dependendo, principalmente, da água utilizada, da escolha do processo e do controle feito sobre os vários despejos de resíduos.

Para que a alternativa de reúso total do efluente tratado se concretize, processos de tratamento avançados devem ser incorporados ao sistema de tratamento de efluentes das indústrias, como é caso dos processos de separação por membranas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar os processos de separação por membranas (PSM) como tratamento avançado de águas residuárias agroindustriais provindas de um abatedouro e frigorífico de suínos, visando à possibilidade de reúso destes efluentes.

1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a) Realizar a caracterização físico-química dos efluentes do frigorífico de suínos;
- b) Caracterizar membranas poliméricas com relação às suas permeabilidades com água destilada e com amostras de efluentes monitorando a redução do fluxo permeado quando da pressurização e despressurização das membranas;
- c) Avaliar o emprego de microfiltração (MF) e da ultrafiltração (UF) na remoção e variação dos parâmetros físico-químicos analisados, em diferentes condições operacionais de pressão aplicada à membrana;
- d) Examinar a utilização de microfiltração seguida de ultrafiltração visando à possibilidade de reúso dos efluentes do frigorífico de suínos;
- e) Definir as condições operacionais ótimas do sistema de microfiltração e ultrafiltração que resultam em um maior fluxo permeado, com melhor eficiência de remoção dos parâmetros analisados, a partir de um índice de qualidade;
- f) Avaliar a qualidade do efluente líquido obtido pelos processos de separação com membranas, considerando o atendimento das exigências técnicas, legais e sanitárias para diferentes usos industriais; e

- g) Comparar os processos de separação por membranas com a utilização do flotor físico-químico como forma de pós-tratamento de efluentes do frigorífico de suínos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 A IMPORTÂNCIA DA ÁGUA E A SUA ESCASSEZ

A água é um elemento fundamental na manutenção da vida no planeta. Constitui o princípio para o desenvolvimento da vida, como meio interno, onde todas as reações celulares ocorrem em meio aquoso, sendo parte integrante da constituição dos seres vivos e, como meio externo, sendo elemento de transporte e desenvolvimento econômico.

De acordo com Telles e Costa (2010), a água é um líquido essencial para todos os organismos vivos, imprescindível para consumo humano e também para o desenvolvimento de atividades agropecuárias e industriais, determinando-se, deste modo, como atributo de importância global, responsável por aspectos ambientais, econômicos, sociais e de mercado.

Para Mierzwa e Hespanhol (2005) é necessária a implementação de técnicas que permitam tornar mínimos os riscos potenciais relacionados com a escassez hídrica, advertindo-se que é imprescindível a ruptura do paradigma de abundância de água que se instituiu em nosso país.

Atualmente, o crescente consumo mundial aliado à degradação torna a água um produto de inestimável valor econômico, um bem finito, vital, competitivo no mercado global. A escassez hídrica já é comum em vários países, soma-se a este problema o desperdício, intrínseco à cultura da população. Os recursos hídricos devem ser considerados como um insumo cuja disponibilidade é restrita, o que os torna dotado de valor econômico (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Para tanto, no cenário nacional surgem políticas harmonizando o desenvolvimento econômico aliado à preservação dos recursos naturais. Neste sentido é elaborada a Lei Federal nº 9.433 de 08 de Janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), que estabelece a Política Nacional dos Recursos Hídricos.

A partir desta, a água é reconhecida como um recurso natural dotado de valor econômico e limitado. São estabelecidos por esta lei, instrumentos de gestão das águas, como a outorga e a cobrança pela captação de água e pelo lançamento de efluentes líquidos nos corpos receptores, instigando, dessa forma, a conservação

e o reúso da água, pelo fato de ser mais conveniente reutilizar os efluentes tratados do que simplesmente lançá-los (KRIEGER, 2007).

A cobrança pela utilização da água tem como finalidade incitar de forma direta ou indiretamente o reúso de água, esgotos ou efluentes, como medida para racionalizar o reaproveitamento dos recursos hídricos, objetivando a diminuição de sua demanda (MANCUSO e SANTOS, 2003).

Contudo, a deficiência na coleta e tratamento das águas residuárias adjunto com o conseqüente lançamento de efluentes não tratados nos corpos hídricos, o desperdício, a destinação inadequada dos resíduos sólidos, a poluição do ar, a infraestrutura do sistema de drenagem, a falta de sensibilização ambiental da população, empresários e governantes, enfim, os inúmeros impactos ambientais ocasionados pela imprudência da sociedade refletem-se na degradação da água. Sendo, deste modo, indispensável a adoção de ações adequadas para a utilização da água devido a sua escassez. A água pode ser avaliada como o produto mais valioso do mundo, abrindo novas fronteiras para os investidores privados (TELLES e COSTA, 2010).

Metcalf e Eddy (2003) abordam ainda que, a poluição das águas, tanto superficiais quanto subterrâneas, a disparidade na oferta dos recursos hídricos, aliada as estiagens, cada vez mais frequentes, obriga as concessionárias à busca de novas fontes de abastecimento. Além disso, observa-se um elevado volume de águas residuárias e de esgotos tratados, que merecem mais atenção como uma alternativa a este problema. Cabe salientar ainda que, o desenvolvimento e gerenciamento de novos recursos, além do uso eficiente de fontes já existentes são outras soluções que devem ser consideradas.

Por este motivo, é de suma importância a elaboração de métodos que conjuguem o uso da água nas atividades humanas à ideia de que os recursos hídricos não são abundantes no país. Isto expressa que os conceitos recentes sobre o uso da água e tratamento e despejo dos efluentes devem ser repensados. Do mesmo modo, a racionalização do uso e reúso da água tornam-se práticas fundamentais de segurança à sobrevivência das atividades antrópicas, perante este panorama de escassez dos recursos hídricos (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

2.2 A AGROINDÚSTRIA DE ABATEDOURO E FRIGORÍFICO DE SUÍNOS

No Brasil, o mercado agroindustrial da carne suína está em livre expansão devido a diversidade de produtos produzidos, aliado a exportação internacional e investimentos na cadeia suinícola. Deste modo, este ramo de negócio apresenta um futuro próspero para o crescimento econômico do país, considerando principalmente sua potencialidade na geração de renda e empregos.

A partir dos dados divulgados pela Associação Brasileira da Indústria Produtora e Exportadora de Carne Suína (ABIPECS, 2015) durante o ano de 2014 o Brasil exportou 494.228 toneladas de carne suína. Comparando com o ano de 2013, ocorreu uma pequena queda de 4,47% do montante nacional, contudo o faturamento foi 16,94% maior. Desta quantidade, os cinco maiores importadores da carne suína brasileira no ano de 2014, foram Rússia, Hong Kong, Angola, Cingapura e Uruguai.

O Estado do Paraná ocupa a terceira posição nacional na produção de suínos, possuindo 22 frigoríficos inscritos no SIF (Serviço de Inspeção Federal). Sendo que, no SIE (Serviço de Inspeção Estadual) possui 55 frigoríficos inscritos. Além disso, é estimada a existência de aproximadamente 130.000 propriedades que possuem suínos, entretanto, destes, apenas, em torno de 31.000 tem produção regular e significativa de caráter comercial (SEAB PR, 2013).

Os frigoríficos de suínos estão situados em diferentes regiões do Estado do Paraná, sendo que algumas já se deparam com o problema da redução da disponibilidade de recursos hídricos ou deterioração da qualidade da água disponível, o que incita as indústrias a implementarem processos de racionalização e reúso da água.

2.3 A UTILIZAÇÃO DE ÁGUA NA INDÚSTRIA E A GERAÇÃO DE EFLUENTES

Telles e Costa (2010), destacam que o acelerado desenvolvimento econômico associado à incipiente tecnologia sustentável, bem como a exploração descontrolada dos recursos naturais, fizeram com que o assunto tivesse importância

pública, contribuindo para a gênese de ações políticas e econômicas que forçaram os órgãos fiscalizadores a nortear as indústrias na adoção de atitudes sustentáveis.

De acordo com Mierzwa e Hespanhol (2005), toda atividade que abranja o uso ou o tratamento de água possui potencialidade de gerar efluentes que, na maior parte das vezes, são lançados no meio ambiente, cujo gerenciamento apropriado é indispensável para que não ocasionem impactos ambientais.

Atualmente a minimização e a conservação da água é um fator significativo para o crescimento industrial, em decorrência da escassez desse recurso. As indústrias, sobretudo agroindústrias, diferenciam-se não apenas por utilizar água no seu processo industrial, mas também por gerar um grande volume de água residuária com alta carga orgânica. Do mesmo modo, constata-se o consumo de água em outros processos como geração de vapor, sistemas de resfriamento, e limpeza geral da empresa. O reaproveitamento da água, a redução do consumo e a melhoria da qualidade dos efluentes gerados, estabelecem amplos desafios para este setor (NOSCHANG, 2011).

Geralmente, independente do uso dado à água, invariavelmente as atividades industriais originam resíduos ou subprodutos, pelo fato da conversão da matéria-prima em produto final não ser totalmente eficiente. Caso existam impurezas na matéria-prima, na água e nos compostos intermediários produzidos, podem ocorrer problemas que originam produtos fora das especificações aceitáveis. Desse modo, alguns produtos deixam de ser embalados. Além disso, todos os equipamentos e componentes utilizados nas atividades de transformação e fracionamento devem ser lavados depois do uso (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

As indústrias consomem elevado volume de água, devido à diversidade de atividades desenvolvidas pelo ser humano, sobretudo, aquelas envolvidas com a fabricação de bens de consumo, partindo da transformação e do processamento dos recursos naturais. Em um processo industrial, a água pode ser tanto matéria prima, incorporada ao produto final, como um insumo auxiliar na preparação de matérias-primas, fluido de aquecimento e/ou refrigeração, fluido de transporte ou nos processos de limpeza de equipamentos (MIERZWA e HESPANHOL, 2005; SILVA, 2005; FRACACIO, 2009).

Segundo Telles e Costa (2010), os despejos industriais apresentam alterações quantitativas e qualitativas em suas características, em decorrência alteram-se ainda os parâmetros a serem considerados na sua caracterização, com

importância relativa à atividade industrial. No que se refere a indústrias alimentícias, como abatedouros e frigoríficos, parâmetros como DQO, DBO, óleos e graxas, sólidos suspensos e pH devem ser monitorados.

Cabe ressaltar ainda que, as características dos efluentes alteram a partir da tecnologia utilizada, custo da matéria-prima e insumos, do fluxo de operação (intermitente ou contínuo), da qualificação dos funcionários e do tempo de funcionamento da indústria. Deste modo, definir uma composição comum para todos efluentes originados nas múltiplas áreas industriais é praticamente impossível (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Desse modo, Mierzwa e Hespanhol (2005), afirmam ser necessário um diagnóstico minucioso de todos os processos utilizados pela indústria, originando dados precisos e confiáveis. Não obstante, para alguns efluentes originados em um processo específico, é necessária a caracterização físico-química e microbiológica, para que possam ser considerados realisticamente.

Além disso, a legislação e a fiscalização, cada vez mais rigorosas, a pressão da opinião pública, e o aumento do custo da água exigem a otimização do seu uso. A nova perspectiva tem sido a reutilização dos efluentes já utilizados e ainda aproveitáveis que, anteriormente, tinham como destino o tratamento de efluentes líquidos. Atualmente, três fatores conduzem os estudos para a redução tanto do consumo de água bruta, como da descarga de efluentes pela indústria: a proteção ambiental, a crescente indisponibilidade de água e o custo crescente dos tratamentos. (TELLES e COSTA, 2010).

De acordo com a Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP, 2006), os usos prioritários da água nas indústrias são:

- a) Matéria-prima: inclusão ao produto final acabado ou como insumo;
- b) Fluido auxiliar: transporte de substâncias, auxiliar em processos via úmida, como algumas moagens, operações de lavagem e preparo de soluções;
- c) Geração de eletricidade: por transformação de energia cinética, potencial ou térmica em processos termoelétricos ou hidrelétricos;
- d) Transporte de calor: como líquido para aquecimento ou resfriamento, incluindo o uso de vapor em caldeiras;
- e) Consumo humano: bebedouros, sanitários, refeitórios, vestiários, dentre outros usos;
- f) Outros usos: irrigação, combate a incêndios, limpeza de pisos, etc.

Mierzwa e Hespanhol (2005) salientam ainda que, as atividades de alimentação de caldeira, refrigeração e construção pesada são as que consomem maior volume de água no setor industrial, contudo seus padrões de qualidade são pouco restritivos, não impedindo que se realize o reúso, contanto que as características da água atendam aos requisitos de qualidade pré-estabelecidos.

Na Figura 1 é apresentada a distribuição do consumo de água em diferentes áreas do processo produtivo em um abatedouro e frigorífico de suínos (ENVIROWISE, 2000).

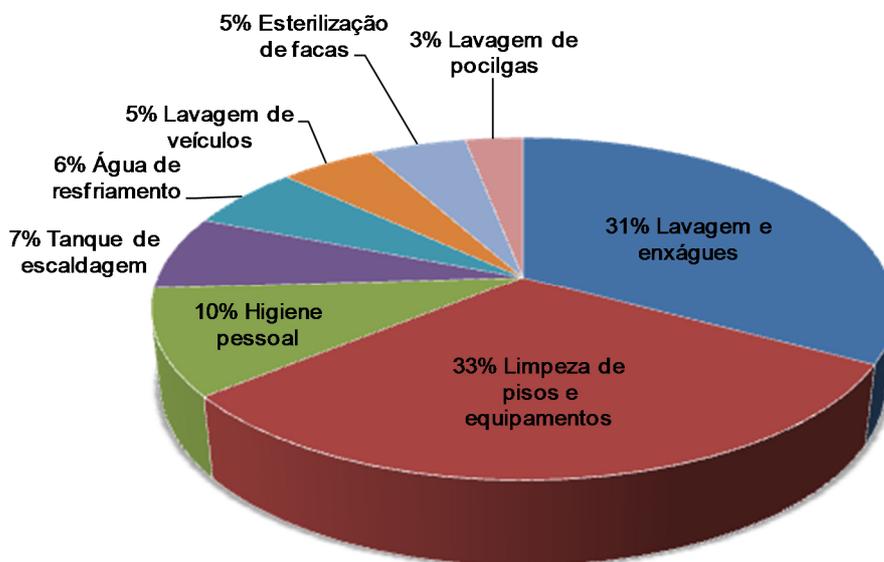


Figura 1 - Distribuição do consumo de água em abatedouro e frigorífico de suínos

2.4 OPERAÇÕES UNITÁRIAS DOS SISTEMAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES

Os efluentes agroindustriais possuem uma composição variada. Dessa forma, são necessárias combinações entre diferentes operações unitárias para a obtenção de efluentes com as qualidades exigidas pelos padrões de lançamento nos corpos receptores, que na grande maioria dos casos é o corpo hídrico mais próximo (SCARASSATI et al., 2003).

O sistema de tratamento de efluentes pode variar de empresa para empresa, devido a diversos fatores, como disponibilidade de área, custo de implantação, vazão de efluentes gerados, porte da indústria, etc (GIORDANO, 1999; SPERLING, 2006).

As principais operações unitárias utilizadas durante o tratamento de efluentes englobam (METCALF e EDDY, 2003):

- a) Operações físicas unitárias: configurações de tratamento dos efluentes onde utiliza-se forças físicas para remoção de contaminantes. Por exemplo: sedimentação, flotação, gradeamento, filtração, dentre outros;
- b) Processos químicos unitários: técnicas de tratamento nas quais, por meio da adição de produtos químicos e/ou de reações químicas ocorre a remoção ou conversão de contaminantes contidos nos efluentes. Cabe destacar, por exemplo a desinfecção, precipitação e adsorção; e
- c) Processos biológicos unitários: metodologias de tratamento nas quais por meio da atividade biológica ocorre a remoção e/ou conversão de contaminantes presentes nos efluentes. Entre tais atividades, pode-se mencionar a nitrificação e a desnitrificação.

Cabe ressaltar ainda, que em muitos casos, é necessário a combinação das operações unitárias para atingir o percentual de remoção desejado. Além disso, Giordano (1999) e Sperling (2006), dividem, didaticamente, os sistemas de tratamento nos seguintes níveis:

- a) Tratamento preliminar: o objetivo principal é a remoção de sólidos grosseiros (materiais de maiores dimensões e areia), por ação física;
- b) Tratamento primário: predominam mecanismos físicos removendo sólidos sedimentáveis e parte da matéria orgânica;
- c) Tratamento secundário: predominam mecanismos biológicos na remoção da matéria orgânica dissolvida e em suspensão e ainda de nutrientes (fósforo e nitrogênio) por meio da transformação desta em sólidos sedimentáveis (flocos biológicos), ou gases. Predominam-se as lagoas de estabilização.
- d) Tratamento terciário/avançado/pós-tratamento: visa a remoção de poluentes específicos (usualmente compostos não biodegradáveis ou usualmente tóxicos) ou ainda a remoção complementar de poluentes que não foram eficientemente removidos no tratamento secundário.

2.5 REÚSO E USO RACIONAL DE ÁGUA NA INDÚSTRIA

Silva (2005), explica que alguns fatores e restrições estão sendo impostas para o lançamento de efluentes, como o acréscimo da demanda de água para suprir, principalmente, os consumos humano, agrícola e industrial, a restrição de reservas de água doce no planeta, a prioridade de uso dos recursos hídricos disponíveis para consumo humano. Para tanto, é necessário o aporte de estratégias para racionalizar o uso de fontes hídricas com objetivo de mitigar impactos advindos à geração de efluentes por indústrias.

Ademais, a desigualdade da distribuição dos recursos hídricos, além das populações nos distintos países, ocasiona problemas intrincados com o abastecimento de algumas regiões, excepcionalmente as grandes áreas urbanas, tendo por consequência o aumento das taxas de abastecimento de água (NOSCHANG, 2011).

Dessa forma, as técnicas conservacionistas como o uso eficiente e o reúso da água, constituem uma atitude perspicaz de expandir a quantidade de usuários de um sistema de distribuição, não necessitando de vultosos investimentos na instalação ou ampliação de novos sistemas.

Para Lobo (2004), mediante as exigências cada vez maiores pela legislação ambiental aplicável, a diminuição na distribuição e qualidade da água, os custos relacionados aos sistemas de tratamento de efluentes, a atual cobrança pelo uso da água, em paralelo com a busca pela auto-suficiência estão gerando progressivamente a gênese de planos de reúso de água na indústria.

Contudo, mesmo com a implementação de um sistema avançado de tratamento de águas residuárias, a segurança e os impactos sobre o meio ambiente, a longo prazo, ainda são arriscados de mensurar, pelo fato de não ter conhecimento sobre quais componentes devem ser removidos (METCALF e EDDY, 2003).

Os padrões de qualidade exigidos para a água industrial estão sujeitos ao seu uso, podendo ser até mais restritivos que os padrões de qualidade da água potável, como por exemplo, no caso de indústrias farmacêuticas e alimentícias, em que a água pode ser matéria prima ou auxiliar de processo, podendo entrar em contato com as substâncias manuseadas em qualquer etapa do processo (MIERZWA E HESPANHOL, 2005).

Para Mancuso e Santos (2003), em muitos processos industriais os padrões mínimos de qualidade não são satisfatoriamente conhecidos, podendo dificultar uma estimativa sobre a possibilidade de reúso da água ou de efluentes tratados. Assim, muitas indústrias podem continuar utilizando água potável, proveniente da concessionária ou de poços de seus domínios. Em alguns usos, em que poderia ser utilizada água de qualidade inferior, o reúso torna-se uma alternativa atrativa na diminuição dos custos.

Para Mierzwa e Hespanhol (2005), em algumas utilidades, os padrões de qualidade podem ser menos restritivos, como por exemplos em sistemas de refrigeração. O que pode acontecer, é que uma determinada indústria pode utilizar recursos hídricos com diferentes requisitos de qualidade, variando desde uma água com elevada pureza até uma água que não tenha recebido nenhum tratamento.

As indústrias geralmente utilizam consideráveis volumes de água de fontes originais e usam em diferentes processos, regressando a grande quantidade ao manancial de origem, para ser empregada em alguma outra atividade. Dependendo da qualidade destas águas residuárias, elas podem ser reutilizadas de várias maneiras, seja como água de resfriamento, alimentação de caldeiras, processamento, transporte de material ou lavagem (TELLES e COSTA, 2010).

Cassani et al. (2005), retratam que, particularmente, as indústrias de alimentos possuem um elevado consumo de água, entretanto, sua reutilização é ainda limitada, devido, sobretudo, às legislações e restrições quanto o seu uso, principalmente restrições de ordem sanitária.

Apesar de ser comum em alguns lugares do planeta, o reúso de águas ainda é uma técnica pouco espargida no Brasil. Deste modo, são necessárias pesquisas para definir as melhores formas de emprego de águas residuárias tratadas e os parâmetros e recomendações a serem analisados (MOTA, 2000).

A implantação do sistema de reúso no Brasil apresenta-se como um caminho próspero, pois pode-se averiguar que a poluição é comum em nossas fontes hídricas e que ao mesmo tempo há uma insuficiência notável de água potável. Portanto, para a gestão hídrica sustentável, uma das soluções é a utilização do reúso (TELLES e COSTA, 2010).

De acordo com Mota (2000), a utilização de efluentes tratados em indústrias, irrigação, piscicultura ou outros fins, permite destinar a água de fontes naturais para

usos mais nobres que exigem um produto de melhor qualidade, como é o caso do abastecimento humano.

Recentemente, por meio do aumento da conscientização ambiental e pela tendência de aumento da valoração econômica dos recursos hídricos, o reúso de águas servidas de utilidade nasce como uma ampla fonte excepcional para prover a carência mundial, incorporada à obrigação de um gerenciamento mais adequado dos enormes volumes de efluentes provindos das estações de tratamento de esgotos e indústrias. Os procedimentos abarcados no reúso enfatizam-se como uma nova aplicação, podendo ainda, substituir fontes, com o objetivo de economizar as águas de mananciais para aplicações mais nobres. Busca-se, afinal, cada vez mais, escolhas de uso de água de qualidade inferior para fins direcionados (TELLES e COSTA, 2010).

Para Telles e Costa (2010), a ausência de regulamentação ou resolução exclusiva para o reúso, em suas várias configurações, vem inibindo seu emprego. Pela sua conveniente viabilidade técnica e econômica e pela carência de legislação, a atividade do reúso é mais comum em usos não potáveis.

Mierzwa e Hespanhol (2005) conceituam reúso como: “uso de efluentes tratados ou não para fins benéficos, tais como irrigação, uso industrial e fins urbanos não potáveis”.

Mancuso e Santos (2003), Telles e Costa (2010), sugerem algumas potencialidades de usos para a água de reúso: água para refrigeração, processos industriais, sistema de incêndio, água de lavagem (pisos, pátios, galerias de águas pluviais), descarga dos vasos sanitários, fertirrigação (fertilizante para culturas não rasteiras), rega (jardins, campos de futebol, áreas verdes), tanques para piscicultura, recarga do lençol freático, regularização de vazão de cursos d'água.

Conforme Telles e Costa (2010), o reúso objetivando fins industriais garante o controle de qualidade dessa água, de acordo com seu desígnio. Esta técnica, além de economicamente lucrativa, segue a tendência ambiental de preservação das fontes de água bruta, como ação preventiva contra o caos total que a escassez geraria.

Devido à extensa gama de processos e de produtos da indústria alimentícia, a água consumida nos processos de uma indústria de alimentos, geralmente contém uma grande combinação de constituintes, devendo ser considerado quando desejar-se realizar o reúso (CASANI et al., 2005).

Ainda de acordo com Casani et al. (2005), o aperfeiçoamento para um melhor uso da água durante o processamento e limpeza, a adoção de práticas que empregam menos água, e a aplicação de reúso e de reciclo diretos ou após acondicionamento são estratégias para minimizar o consumo de água industrial. O custo real da água no processamento de alimentos é a soma dos custos de: fornecimento, perda no potencial de rendimento pelo rejeito de produtos como efluentes e perda de energia com o efluente final lançado.

Oenning Junior e Pawlowsky (2007), afirmam que para alcance do potencial de reúso de efluentes deve-se considerar, primeiramente, as atividades nas quais pode-se utilizar o efluente gerado, a demanda de água requerida e os parâmetros de qualidade para a água.

Mierzwa e Hespanhol (2005), indicam que é de relevada importância ressaltar que a prioridade pelo reúso só deve ser considerada após o emprego de procedimentos de otimização do uso da água para diminuir o máximo possível os desperdícios, haja vista que podem afetar expressivamente os efluentes gerados.

O reúso no âmbito industrial pode ser alcançado por meio do aproveitamento das águas residuárias provenientes da própria indústria, admitindo-se ou não tratamento precedente, ou ainda pelo uso dos esgotos tratados oriundos das estações de tratamento das empresas de saneamento. A existência de uma rede paralela para o fornecimento das indústrias, facilita a implementação do reúso. A construção de Estações de Tratamento de Efluentes nas circunvizinhanças das áreas industriais são obras basilares para viabilizar a operação dos projetos de abastecimento com efluente tratado, devido a redução de custos para a edificação de uma rede desde a ETE até o pólo industrial (SILVA FILHO, 2009).

Mancuso e Santos (2003), expressam que uma política prudente de reúso converte a problemática poluidora e agressiva dos efluentes em uma solução econômica e ambientalmente segura.

Metcalf e Eddy (2003) dividem as águas de reúso oriundas de efluentes tratados na seguinte ordem decrescente de consumo: irrigação (agricultura), irrigação paisagística (parque, campos de esporte, praças, estradas, etc), atividades industriais (principalmente águas de refrigeração), recarga de aquíferos (águas subterrâneas ou barreira hidráulica contra intrusão de água salina), usos recreativos/ambientais (lagos, aumento de vazão de recursos hídricos, paisagem urbana, etc), usos urbanos não potáveis (proteção contra incêndio, construção civil,

etc, podendo ser em conjunto com outras aplicações), reúso potável (por misturas em reservatórios de abastecimento de água ou diretamente no sistema de distribuição). Embora, potencialmente grandes volumes de águas residuárias podem ser usados nas cinco primeiras categorias, atualmente as quantidades associadas com a sexta e sétima categorias são de pouca importância, particularmente o reúso de água potável.

2.5.1 Tipos de reúso de água em indústrias

De acordo com o Manual de Conservação e Reúso de Água na Indústria da Federação das Indústrias do Estado de São Paulo (FIESP, 2006), a utilização do reúso de água em indústrias possui duas possibilidades a serem analisadas. O reúso macro externo que consiste no uso de águas residuárias tratadas providas de indústrias ou estações de tratamento de esgoto administradas por concessionárias e, o reúso macro interno, que consiste no uso interno de efluentes, tratados ou não, advindos do processamento da indústria. A adoção do reúso macro interno pode ser feita pelo reúso em cascata ou reúso de efluentes tratados.

No reúso em cascata, a água residuária originária de um processo industrial é diretamente aproveitada, sem tratamento posterior, devido ao fato do efluente gerado atender os padrões de qualidade exigidos no processo seguinte. Uma diferença existente no reúso em cascata é o uso de uma parcela do efluente gerado, sendo recomendado quando ocorre oscilação na concentração dos constituintes da água residuária. Ocorrência comum em operações contínuas de lavagem com alimentação de água e descarte do efluente (FIESP, 2006).

Partindo da premissa de minimização do consumo de água e da geração de efluentes, é importante optar pelo reúso em cascata, pelo fato da demanda de água ser menor e produzir menor volume de efluentes a ser tratado (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Partindo das especificações de qualidade de água a ser utilizada em um processo, estuda-se o potencial de reúso em cascata a partir das características físico-químicas e microbiológicas do efluente originado. Inicialmente, a caracterização de todos os parâmetros pode ter alto custo, dessa forma, deve-se

analisar parâmetros críticos ou gerais que representam com segurança um grupo de substâncias (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Além disso, a segregação dos efluentes após a coleta é importante. Na maioria das vezes as tubulações de coleta são centralizadas misturando os efluentes gerados em distintas áreas, impedindo a implantação do reúso em cascata. Deste modo, a primeira etapa é analisar cada ponto de geração de efluente individualmente, a partir de amostras obtidas de processos e atividades com alto potencial de geração de efluentes, que em alguns casos, podem ter efluentes com baixas concentrações de substâncias indesejadas proporcionando um sistema mais simples e econômico (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Além desta identificação do efluente com potencial para o reúso, é extremamente relevante identificar também onde o reúso em cascata poderá ser utilizado. Sendo imprescindível existir uma afinidade entre a qualidade e a quantidade de efluente disponível, com os padrões exigidos ao uso e sua demanda (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Mierzwa e Hespanhol (2005), alertam que algumas vezes não é viável a substituição total das águas de abastecimento por efluentes. Assim, os seguintes procedimentos devem ser adotados:

- a) Empregar apenas uma parte do efluente gerado para reúso: esta prática é preconizada quando a concentração do poluente no sistema de produção de efluentes diminui no transcorrer do processo, ou seja, varia com o tempo. É corriqueiro nas operações repetitivas de lavagem em que existe alimentação de água e produção de efluente de forma ininterrupta.
- b) Originar a combinação do efluente gerado com água procedente do sistema de abastecimento – este processo busca adequar as características do efluente às especificidades de qualidade exigidas pela aplicação na qual se pretende fazer o reúso, promovendo uma mistura de uma parte do efluente com a água do sistema de abastecimento.

É importante avaliar a performance da atividade que utiliza a água de reúso, para realizar possíveis ajustes no processo, indiferente o método de reúso em cascata adotado. Testes de bancada e piloto devem ser elaborados antes da instalação da infra-estrutura para a prática de reúso (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

É recomendável o emprego de sistemas automatizados no controle da qualidade da água de reúso almejando maximizar a credibilidade do sistema, com relação às características do efluente (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

O reúso de efluentes tratados caracteriza a forma mais utilizada na indústria. Incide no uso de efluentes produzidos no próprio local, após tratamento exigido para o alcance da qualidade exigida aos usos preponderantes (FIESP, 2006).

Quando o volume consumido de água e a geração de efluentes diminuem, a concentração de poluentes no efluente aumenta devido ao fato da carga destes poluentes aumentarem. Deste modo, o reúso de efluentes tratados deverá ser implementado caso o reúso em cascata não ser possível (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Analisar a potencialidade dessas duas opções requer um estudo minucioso sobre a complexidade da atividade em que será desenvolvido o reúso. Para a alternativa de reúso de efluentes tratados, um dos principais limitantes é a concentração de compostos específicos, que restringe o potencial de reúso e pode inviabilizar as atividades que utilizarão essa água. No caso de reúso em cascata, são necessárias alterações nos sistemas de coleta e armazenamento dos efluentes (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

2.5.2 Qualidade da água para o reúso

Para Mancuso e Santos (2003), o ajuste da qualidade da água às condições exigidas é um fator fundamental para a prática do reúso.

A água de reúso deve oferecer parâmetros físico-químicos e biológicos apropriados ao uso a que se destinam. Deve-se atentar, ao mesmo tempo, que a concentração de determinados compostos eleva-se mediante a aplicação do reúso. Se a prática de reúso for implementada sem observar estes aspectos, todas as atividades que utilizarem o reúso podem ser comprometidas. Por estes motivos que, antes da operação de um projeto de reúso, é primordial o levantamento de informações quanto à água disponível para uso, do efluente produzido, além dos padrões de lançamento destes. Com base nessas informações e utilizando um

balanço de massas, pode-se quantificar a parcela a ser reutilizada. (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Os critérios de reúso de água atuais e diretrizes são baseados no controle de parâmetros convencionais, tais como a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Sólidos Suspensos Totais (SST) e coliformes, utilizados, sobretudo para a formulação e monitoramento da qualidade das águas residuárias (METCALF e EDDY, 2003).

Além destes, Mierzwa e Hespanhol (2005) aponta outros parâmetros, como a Demanda Química de Oxigênio (DQO), a concentração de Sais Dissolvidos Totais (SDT) e da Condutividade Elétrica (CE), pH, cor e turbidez podem ser utilizados na avaliação do reúso.

Em linhas gerais, a implantação do reúso só pode ser adotada quando as características do efluente estiverem ajustadas aos parâmetros de qualidade exigidos para seus devidos fins. No entanto, é importante analisar aplicações potenciais para o efluente comparadas com os parâmetros de qualidade exigidos para tal uso.

Embora exista forte ensejo quanto à utilização do reúso, tem-se ainda muita obstinação e incertezas sobre a qualidade da água tratada ou reusada. Isso decorre, pela carência de informação sobre a qualidade da água indispensável para determinadas técnicas produtivas e, também de requisitos mínimos para mensurar a garantia da água.

Dessa forma, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre os requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reúso de efluentes para diferentes usos industriais, conforme pode-se observar na Tabela 1.

Cabe ressaltar que os dados apresentados na Tabela 1 são valores indicativos, pois muitos se referem a indústrias de outros países, mas que podem ser úteis para uma avaliação inicial. Os valores indicados na tabela não devem ser considerados definitivos, mas sim uma orientação para a prática de reúso.

Mancuso e Santos (2003) esboçam ainda que, águas de menor qualidade, como esgotos e efluentes podem ser fontes alternativas para usos menos nobres. Para tanto, tecnologias avançadas devem ser utilizadas como ferramenta na solução de problemas críticos, como a escassez da água.

Tabela 1 - Requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reúso de efluentes

(continua)

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)
Temperatura	°C	Ambiente 6 – 9 ^{(1) (3) (9)}	Ambiente	Ambiente	Ambiente	Ambiente	Ambiente	Ambiente
pH	-	6,8 – 7,2 ⁽⁶⁾⁽¹⁷⁾	6 – 9 ⁽¹⁾	6 – 9 ⁽¹⁾⁽¹⁷⁾	6 – 9 ⁽¹⁾ 6 – 8 ⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾⁽¹⁸⁾	6 – 9 ⁽¹⁾	6 – 9 ⁽¹⁾ 6 – 8 ⁽¹⁷⁾	7 – 10 ⁽⁸⁾⁽¹³⁾
		6,5 – 9,5 ⁽⁷⁾	6 – 8 ⁽¹⁷⁾					8,3 – 10 ⁽¹²⁾
		6,9 – 9 ⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾ 7 – 9 ⁽¹¹⁾						7,5 – 10 ⁽¹⁴⁾
Turbidez	NTU	2 – 10 ⁽¹⁾ ≤3 ⁽²⁾ ; 2 – 5 ⁽⁵⁾ 50 ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾	≤2 ⁽¹⁾⁽¹⁷⁾ ; 2 – 5 ⁽⁵⁾ ≤5 ⁽¹⁵⁾	≤2 ⁽¹⁾ ; 2 – 5 ⁽⁵⁾ ≤5 ⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾	≤2 ⁽¹⁾⁽¹⁷⁾ ; ≤5 ⁽¹⁵⁾	≤2 ⁽¹⁾ ;	≤2 ⁽¹⁾⁽¹⁷⁾ ≤5 ⁽⁴⁾ ; 2 – 5 ⁽⁵⁾ ≤10 ⁽¹⁵⁾	SE
Cor	Pt Co	SE	≤10 ⁽¹⁷⁾	≤30 ⁽¹⁷⁾	≤10 ⁽¹⁷⁾	SE	≤10 ⁽¹⁷⁾	SE
DQO	mg L ⁻¹	≤75 ⁽³⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾ 50 ⁽⁶⁾ 200 ⁽¹¹⁾	SE	SE	SE	SE	SE	5 ⁽⁸⁾⁽¹³⁾
ST	mg L ⁻¹	≤530 ⁽¹⁸⁾	SE	SE	SE	SE	SE	SE
SDT	mg L ⁻¹	≤500 ⁽³⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾	≤1000 ⁽⁴⁾	≤1000 ⁽⁴⁾	≤200 ⁽¹⁵⁾	SE	≤1000 ⁽⁴⁾	700 ⁽⁸⁾⁽¹³⁾
		1000 ⁽⁷⁾ 9600 ⁽¹¹⁾	≤500 ⁽¹⁷⁾		≤500 ⁽¹⁷⁾		≤500 ⁽¹⁷⁾	
Condutividade	µS cm ⁻¹	800 – 1200 ⁽¹⁾	SE	SE	SE	SE	SE	1100 – 5400 ⁽¹²⁾ 3500 ⁽¹⁴⁾

Tabela 1 – Requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reúso de efluentes

(conclusão)

Potenciais locais de utilização da água de reúso								
Parâmetro	Unidade	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)
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹ N	1,3 ⁽⁶⁾ ≤20 ⁽¹⁷⁾	SE	SE	≤20 ⁽¹⁷⁾	SE	≤20 ⁽¹⁷⁾	0,1 ⁽⁸⁾⁽¹³⁾
		10 – 20 ⁽⁷⁾ 1 ⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾ 20 – 40 ⁽¹¹⁾						
SST	mg L ⁻¹	≤5 ⁽¹⁷⁾ ≤30 ⁽¹⁾ 13 ⁽⁶⁾ 10 ⁽⁷⁾ 100 ⁽³⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾⁽¹³⁾⁽¹⁷⁾ 40 – 200 ⁽¹¹⁾	SE	≤20 ⁽¹⁷⁾	≤5 ⁽¹⁷⁾	SE	≤5 ⁽¹⁷⁾	10 ⁽⁸⁾⁽¹³⁾
Coliformes Totais	NMP 100 mL ⁻¹	≤2,2 ⁽¹⁷⁾	SE	SE	SE	SE	SE	SE
Coliformes Fecais	NMP 100 mL ⁻¹	≤200 ⁽¹⁾⁽¹²⁾	≤500 ⁽¹⁵⁾ Ausente ⁽¹⁾	≤500 ⁽¹⁵⁾⁽¹⁷⁾ Ausente ⁽¹⁾	≤200 ⁽¹⁵⁾ Ausente ⁽¹⁾	Ausente ⁽¹⁾	≤500 ⁽¹⁵⁾ Ausente ⁽¹⁾	SE
Dureza	mg L ⁻¹	650 ⁽⁹⁾ 50 – 180 ⁽¹⁶⁾	500 ⁽¹⁶⁾	500 ⁽¹⁶⁾	SE	SE	500 ⁽¹⁶⁾	350 ⁽¹³⁾

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

2.5.3 Recomendações para o reúso

O investimento na segurança do manuseio da água de reúso é necessário para empresas que selecionarem esta matéria prima em suas instalações, pois se trata de um produto não potável e por possuir uma concentração ainda que pequena em sua composição de microrganismos e poluentes pode ocorrer contaminação com o seu consumo (TELLES e COSTA, 2010).

Telles e Costa (2010), salientam que a indústria que utilizar água de reúso deve implantar uma política de segurança para o seu quadro de funcionários, haja vista que a possível ingestão desta água poderá causar inúmeros problemas à saúde destes, pois essa água não pode ser consumida, sendo de uso somente industrial.

Dessa forma, deve haver uma constante divulgação por meio de palestras para nortear os funcionários, divulgação visual (com cartazes internos) e sinalização dos pontos de reúso. Em determinados países, é comum, utilizar a cor magenta para identificar a tubulação de água de reúso, treinamentos de pessoal de manutenção, caminhões pipa para o transporte identificado como de água de reúso, válvulas triangulares para identificar a válvula de irrigação, válvulas de incêndio, dentre outras formas (TELLES e COSTA, 2010). Essas são atitudes necessárias para identificação da água de reúso, com a finalidade de evitar o seu uso de maneira inadequada, ou ainda a interligação com água potável.

Metcalf e Eddy (2003) salientam ainda que, algumas medidas de segurança adicionais podem ser implementadas para aplicações de reúso de água não potável, incluindo instalação de sistemas de armazenamento e de distribuição separados para reutilização potável, uso de tubos com diferenciação de cor e rótulos para distinguir a água de reúso da tubulação de distribuição de água potável, conexão e dispositivos de refluxo para prevenção, corantes para detectar a ocorrência de contaminação cruzada nas linhas de fornecimento de água potável, e ainda, irrigação durante as horas de folga para minimizar ainda mais a possibilidade de um potencial contato humano.

2.6 A UTILIZAÇÃO DE MEMBRANAS PARA O REÚSO DE EFLUENTES

Atualmente as tecnologias avançadas disponíveis buscam conseguir uma maior eficiência de remoção dos parâmetros (físicos, químicos e eventualmente biológicos) para água de reúso. Tratamentos como a oxidação com ozônio, dióxido de cloro e peróxido de hidrogênio, adsorção em carvão ativado, eletrólise reversa, troca iônica, destilação, precipitação química e separação por membranas (microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa), são alguns exemplos de tratamento final de águas residuárias para o reúso (METCALF e EDDY, 2003; MANCUSO e SANTOS, 2003; MIERZWA e HESPANHOL, 2005). A escolha de uma ou o ajuste entre duas ou mais tecnologias, auxiliará no potencial de remoção, atentando-se aos mecanismos envolvidos na redução do poluente de interesse na qualidade da água de reúso que se pretende alcançar (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Segundo Nascimento (2004), o emprego de uma técnica específica, ou ainda, de um conjunto de técnicas de tratamento de água, com a finalidade de se obter um grau de qualidade almejado, está sujeito ao que se deseja e carece remover. Na maioria das vezes, os poluentes presentes no efluente ou na água não são degradados, ocorrendo apenas sua passagem de um meio para outro, isto é, são removidos da fase líquida que se espera tratar para outra fase que pode ser gasosa, sólida, ou, ainda, uma fase líquida mais concentrada. Estes processos podem envolver processos físicos, químicos ou físico-químicos e levam ao alcance de uma fase líquida de melhores características que a outra, onde os contaminantes estão dispersos, que podem necessitar de tratamento ou destinação especial. Geralmente, o nível de pureza almejado e o que se pretende remover do efluente ou da água indicam um conjunto de alternativas de tratamento, que determinam o conjunto de processos e operações unitárias que irão compor os sistemas utilizados nos tratamentos daquelas águas ou efluentes.

De um modo geral, Mierzwa e Hespanhol (2005) dividem os contaminantes em seis classes:

- a) Compostos orgânicos dissolvidos (solventes, açúcares, pesticidas, tensoativos, herbicidas, dentre outros);

- b) Sais inorgânicos dissolvidos (íons metálicos e não metálicos como Cl^- , Ca^{2+} , F^- , SO_4^{2-} , Cr^{6+} , NO_3^- , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , Mg^{2+} , CN^- , NH_4^+);
- c) Partículas em suspensão (sólidos suspensos diversos, areia, sais insolúveis, sílica coloidal);
- d) Gases dissolvidos (H_2S , NH_3);
- e) Microorganismos (bactérias, fungos, vírus, protozoários, leveduras);
- f) Óleos e graxas.

É comum no reúso de efluentes a necessidade de tratamentos que antecedem o reúso, pela necessidade de reduzir a concentração de determinado poluente para garantir o uso posterior. Dessa forma, a definição do tipo de tratamento a ser utilizado varia de acordo com as características da indústria. Por exemplo, em casos exclusivos em que se demanda uma qualidade elevada da água de reúso, pode ser exigida a separação por membranas. A seleção do formato da membrana e do tipo de separação é efetuada com base nas características da água que se objetiva obter. Com o desenvolvimento da tecnologia e de novos materiais, o uso de membranas tornou-se mais comum, com a redução dos custos e popularização dos seus sistemas. Há casos de grandes instalações convencionais serem substituídas por sistemas compactos, equipados com sistemas de separação por membranas. Em linhas gerais, o reúso de água no escopo industrial requer a estimativa da qualidade de água determinada em cada processo e a compatibilidade da água de reúso com cada necessidade desejada (TELLES e COSTA, 2010).

Segundo Lautenschlager et al. (2009), a utilização da separação por membranas para o tratamento de efluentes apresenta-se em expansão, devido principalmente, aos padrões de lançamento mais restritivos estabelecidos para lançamento de águas residuárias em corpos receptores e sistemas de coleta de esgotos sanitários, a necessidade de implantação de programas de conservação de água, além da escassez de mananciais. Desse modo, tem-se viabilizado projetos de reúso de efluentes como água industrial, irrigação, dentre várias outras aplicações de água não potável.

De acordo com Dacanal e Beal (2010), os processos de separação por membranas colaboram para viabilizar a edificação de sistemas compactos de tratamento de águas residuárias, produzindo água de reúso de elevada qualidade a um preço cada vez mais concorrente com o preço de origem de água de reúso por sistemas convencionais.

Segundo Schneider e Tsutiya (2001), membranas filtrantes compõem, recentemente, uma nova tecnologia para o tratamento de água e efluentes, sendo a grande inovação inicial, desde o advento das tecnologias tradicionais de tratamento de água no início do século XX.

Os processos de separação por membranas foram primeiramente comercializados para a produção de água potável a partir da água do mar, no início da década de 60, na configuração por osmose inversa. A nanofiltração, uma das formas desta tecnologia que opera a pressões menores que a osmose inversa, começou a ser construída em escala comercial para remover a dureza de águas subterrâneas no estado da Flórida nos EUA, e remoção de cor em águas provenientes de zonas com turfa na Noruega, na década de 1980. Estas duas fatias de mercado, no entanto, representam ínfima representatividade comparada aos demais sistemas usados no tratamento da água e de esgoto de saneamento básico (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Dacanal e Beal (2010), ressaltam ainda que membranas de separação de partículas que operam com menores pressões, na configuração de microfiltração e ultrafiltração, surgiram nos anos 80, sendo utilizadas no tratamento de águas residuárias, garantindo uma grande melhoria na área de Engenharia Ambiental.

Schneider e Tsutiya, (2001), destacam que no início da década de 1990, a tecnologia de membranas apresentou um progresso significativo, a partir do surgimento de membranas para o saneamento básico, membranas de separação de frações (microfiltração e ultrafiltração), provenientes de tecnologia de membranas utilizados na hemodiálise, para produção de água potável.

Cabe salientar que alguns fatores foram relevantes na aplicação de membranas para o tratamento de esgoto sanitário, a saber, (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- a) Legislação: a concentração mínima de microorganismos patogênicos e de poluentes químicos em águas para o abastecimento público e águas residuárias de estações de tratamento de esgotos estão sendo paulatinamente restringidos pelas autoridades competentes, sendo que as tecnologias convencionais de tratamento não estão atendendo as novas legislações. A operação e produção de água estão sujeitas a implementação de tecnologias complementares de elevado custo, optando-se, dessa forma, pela utilização da tecnologia de membranas;

- b) Diminuição significativa do preço de construção e operação de sistemas de tratamento com membranas, viabilizando esta tecnologia quando comparada aos sistemas convencionais de tratamento;
- c) A escassez hídrica nas grandes cidades faz necessária a busca por novas metodologias de tratamento. No entanto, alguns usos da água em cidades não demandam água com qualidade potável, onde pode ser utilizada água de reúso de qualidades inferiores.

De acordo com Metcalf e Eddy (2003), os processos de separação por membranas possuem algumas aplicações no tratamento de efluentes em geral: a microfiltração e a ultrafiltração são utilizadas para o tratamento biológico aeróbio e anaeróbio, como processo de pré-tratamento para desinfecção e ainda como pré-tratamento para nanofiltração e osmose inversa. Quanto à nanofiltração, pode ser utilizada para o reúso de efluentes e abrandamento de efluentes. A osmose inversa é indicada para o reúso e dispersão do efluente e ainda na alimentação de caldeiras de alta pressão.

A utilização de membranas para o tratamento de águas residuárias aumentou significativamente nos últimos anos, sobretudo, devido à legislação ambiental e ao barateamento dos custos relacionados a esta tecnologia (FUGÈRE et al., 2005).

Luiz (2010), ao estudar combinações de processos avançados para o tratamento de efluentes da indústria frigorífica visando o reúso da água, argumenta que os processos de separação por membranas não apenas transferem de fase (ao final do tratamento tem-se efluente tratado e outra fase concentrada) como retiram do efluente os poluentes a partir da porosidade da membrana, podendo remover, em outra fase, partículas sólidas de diâmetros pequenos, compostos iônicos dissolvidos, moléculas de proteínas e gorduras, e alguns microorganismos, como bactérias.

Arévalo et al. (2012), destacam que, a escassez e a poluição dos recursos hídricos são problemas que afetam várias regiões do planeta. Deste modo, nos últimos anos tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de tratamento, como é o caso do biorreator com membranas (MBR), que combina o processo de separação com membranas com a tecnologia de lodos ativados, tornando-se uma tecnologia viável para o tratamento de efluentes visando o reúso.

2.7 OS PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Na filtração tangencial por membranas, a vazão do efluente se separa em duas linhas diferentes, designadas de permeado e concentrado, onde o concentrado é parte que fica enriquecida com solutos, ou sólidos retidos pela membrana e, o permeado é a parcela que passa através da membrana. Nesse processo, o solvente, geralmente água, é obrigado a transpor a membrana pela aplicação de uma força motriz, pressão positiva ou negativa, como, por exemplo, a pressão hidrostática, normalmente utilizada para remoção de material particulado e coloidal presente no meio líquido, conforme Figura 2. Convém destacar que não ocorre reação química ou alteração biológica dos elementos durante o processo de filtração. A permeabilidade das membranas é alterada por meio da modificação no diâmetro dos poros ou pela mudança nas características físico-químicas dos materiais que constituem a membrana. (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001; MANCUSO e SANTOS, 2003; BAKER, 2004; VIDAL, 2006; HABERT et al., 2006).

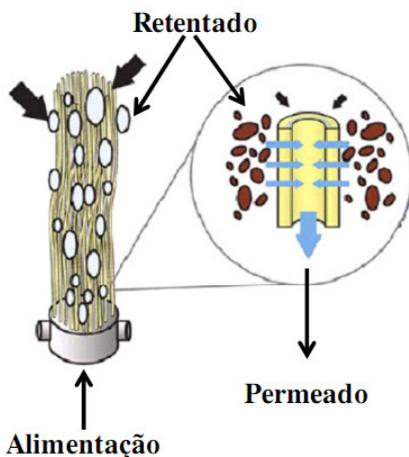


Figura 2 - Representação de um módulo de microfiltração com a definição das correntes de permeado e concentrado

Fonte: Adaptado de Dias, 2009.

Mancuso e Santos (2003) explicam que, de uma maneira geral, as membranas assemelham-se aos processos naturais que acontecem nas raízes dos vegetais e no sistema digestivo dos animais para a remoção de material indesejável e transferência de nutrientes. Quando uma membrana semipermeável é empregada para o fracionamento de soluções em água, o solvente atravessa os poros, devido uma força motriz aplicada ao processo, separando parte de suas impurezas contidas na corrente de alimentação, na forma de um concentrado.

Schneider e Tsutiya, (2001), afirmam ainda que o objetivo do tratamento de água e efluentes é a remoção ou degradação de substâncias indesejáveis ao homem ou ao meio ambiente. As águas captadas de fontes naturais e os efluentes possuem partículas, íons e moléculas. A separação destes contaminantes pode ser feita por grades (para componentes de maior tamanho) ou por membranas (material microscópico).

Os processos de separação por membranas apresentam variações nos materiais que compõem a membrana e a força utilizada no processo para obter a separação de diferentes substâncias presentes no meio líquido (TELLES e COSTA, 2010).

De acordo com Eckenfelder (2000), a eficiência deste tipo de processo depende da diferença entre o tamanho do poro da membrana e a partícula a ser removida.

Os processos de separação por membranas se fundamentam no princípio de que uma mistura pode ser parcialmente fracionada ao passar através de uma membrana, que retém os constituintes maiores, permitindo a passagem de componentes de pequena granulometria através de sua composição (PIVELI, 2007).

Membranas são elementos filtrantes, fabricados a partir de materiais poliméricos ou materiais inorgânicos, que possuem poros de tamanhos variados. Estes poros têm todos os atributos que tornam as membranas úteis em suas diversas aplicações, seja na separação de partículas ou no fracionamento de moléculas com distintas massas molares. Membranas podem ainda ser definidas como barreiras seletivas que operam semelhantes a um filtro, sendo comum acontecer separações em sistemas onde filtros comuns não são eficientes. Generalizando, a membrana é o resultado da deposição química sobre um suporte (MULDER, 1991; DIAS, 2006; HABERT et al., 2006).

Filtração por membranas é um processo de separação física em que a vazão do permeado através da membrana é diretamente proporcional a diferença de pressão existente dos dois lados e inversamente proporcional a resistência por ela oferecida. Neste processo a principal característica é a separação de moléculas de diferentes tamanhos e propriedades. A membrana de filtração é uma barreira física que envolve a passagem do fluxo de alimentação sob pressão no sistema de membranas, onde o que passa através da membrana é denominado de permeado e o que fica retido chama-se retentado (SIVIERI, 2010).

Para Telles e Costa (2010), os processos de separação por membranas, podem ainda, ser chamados de tratamentos avançados, nos quais se empregam membranas (naturais ou sintéticas) para retenção dos sólidos presentes. Apresentam múltiplas aplicações, comumente como pós-tratamento de efluentes industriais aplicados ao reúso. O uso de membranas tem por finalidade central efetuar a separação de substâncias de diferentes propriedades (tamanho, forma, difusibilidade, etc). Em um sistema de separação com membranas, ocorre a retenção física dos solutos presentes no líquido, ocorrendo também, mecanismos de adsorção de materiais na superfície e no interior dos poros da membrana, ou ainda na torta formada na superfície destas e que opera como membrana secundária na remoção dos contaminantes. Devido a existência de inúmeras propriedades das substâncias que deseja-se remover do meio líquido, os processos de separação por membranas também variam, como material empregado, tecnologia e, a força motriz necessária para cada processo.

Na filtração convencional, retira-se material particulado e em estado coloidal. No caso de separação por membranas, as partículas removidas podem conter também materiais dissolvidos. As partículas em suspensão geralmente são irregulares, com vários tamanhos e apresentam diferentes propriedades físico-químicas (TELLES e COSTA, 2010).

Eckenfelder (2000) explica que, os critérios de desempenho de uma membrana são o grau de impermeabilidade (como a membrana rejeita o fluxo do soluto) e o grau de permeabilidade (a facilidade com que o solvente é deixado fluir através da membrana).

Para Silva Filho (2009), os processos de separação utilizando membranas poliméricas empregam um conjunto de características seletivas (tipo de material, porosidade, distribuição de poros) com a força motriz aplicada ao processo (concentração, pressão, temperatura, potencial químico) para realizar a retenção.

Teoricamente, os processos de separação com membranas que utilizam variação de pressão podem ser correlacionados com processos de filtração convencional. Entretanto, três características dos processos de separação por membranas podem diferenciar estes processos, para a água (MIERZWA e HESPANHOL, 2005):

- a) A pressão utilizada nos processos de separação por membranas é significativamente maior que nos sistemas de filtração convencional;

- b) A corrente de alimentação flui paralelamente às membranas, assim, não é necessário que todo o volume de efluente atravessasse a membrana; e
- c) As membranas são eficientes para a remoção de partículas sólidas de pequenos diâmetros e compostos inorgânicos e orgânicos dissolvidos;

Algumas vantagens podem ser destacadas no tratamento com membranas, tais como (TELLES e COSTA, 2010):

- a) Remoção de bactérias, com ou sem adição de coadjuvantes químicos;
- b) Grande e estável produção de água;
- c) A adição de coagulantes químicos pode ser evitada em alguns casos, produzindo, assim, lodo sem substâncias químicas;
- d) Em certos casos, o tratamento de lodo pode ser relativamente mínimo;
- e) Sistemas de tratamento de água compactos;
- f) Água ultrapura para propósitos industriais;
- g) Pode ser economicamente viável para pequenos sistemas de abastecimento de águas.

Por ser a separação por membranas um processo físico, os principais compostos poluentes presentes na corrente do concentrado originada por essa tecnologia são aqueles inicialmente contidos na solução de alimentação, todavia numa concentração maior. A geração de efluentes, dessa forma, será superior, pelo fato dos sistemas de separação por membranas necessitar uma periodicidade de limpeza química, cujo objetivo é garantir a eficiência de operacionalização das membranas (e, conseqüentemente, todo o sistema) (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

2.7.1 Classificação das membranas

Morfologicamente as membranas podem ser divididas em densas e porosas. Quando o transporte dos componentes envolve uma etapa de dissolução e difusão através do material que compõe a membrana, ela é densa. Quando o transporte dos permeantes ocorre em uma fase fluida contínua, que preenche os poros da membrana, ela é porosa (HABERT et al., 2006; TELLES e COSTA et al., 2010).

As membranas podem ser produzidas a partir de materiais (orgânicos ou não) que comportam a composição de filmes com porosidade controlada, variando a textura em função da sua aplicabilidade. Existem membranas de textura física (densas ou porosas) e de textura de origem (natural ou artificial) (HABERT et al., 2006; TELLES e COSTA, 2010).

Membranas artificiais sintéticas podem ser fabricadas de material polimérico orgânico ou inorgânico (HABERT et al., 2006; TELLES e COSTA, 2010).

Materiais poliméricos orgânicos possuem elevada versatilidade, podendo ser obtidos pela síntese ou extração de produtos naturais. Apresenta consideráveis forças intermoleculares permitindo boas propriedades mecânicas, facilidade de formar filmes autossuportáveis e coesão.

Com relação às membranas inorgânicas, geralmente são fabricadas de material cerâmico que permitem filtrar soluções quimicamente agressivas a temperaturas altas, superiores a 150 °C.

Membranas microporosas inorgânicas podem ser originadas de vidros e grafites de composição variada. O grafite é uma forma cristalina do carbono e o vidro é composto basicamente de sílica amorfa (TELLES e COSTA, 2010).

A partir do tipo de material que as membranas são confeccionadas, inorgânica ou orgânica, e pelo seu diâmetro/simetria, elas podem ser distribuídas em (HABERT et al., 2006; TELLES e COSTA, 2010):

- a) Membranas simétricas ou isotrópicas (primeira geração): apresentam poros regulares, quase cilíndricos, que cruzam toda a espessura da membrana. Devido ao baixo fluxo de permeado, perdas de cargas expressivas e baixa remoção de microorganismos, elas são pouco utilizadas na área industrial.
- b) Membranas anisotrópicas ou assimétricas (segunda geração): apresentam um gradiente de porosidade em seu interior onde uma película fina permanece sobre uma superfície mais espessa. Na maioria das vezes formadas de um único tipo de polímero. Oferecem melhor fluxo de permeado e possuem boas propriedades mecânicas; resistentes aos ataques bacterianos e químicos; todavia não toleram valores extremos de pH e elevadas temperaturas.
- c) Membranas compostas (terceira geração): a membrana filtrante é assentada na forma de um filme fino sobre a composição de suporte, que na maioria das vezes é uma membrana assimétrica. Devido ao menor custo operacional, são

as mais usadas; possuem melhor performance, como boa resistência as substâncias químicas ($1 < \text{pH} < 14$), aos oxidantes, aos solventes, a temperaturas superiores e intensas pressões.

2.7.2 Configuração das membranas

De acordo com Tambosi (2008), existem quatro configurações de membranas: planas (em placas), espiral, tubulares e fibra oca. As planas, em placas, oferecem diversas configurações, a mais comum consiste em placas delgadas, recobertas em ambas as faces pelas membranas. Nessas placas existem pequenas ranhuras em que flui o permeado depois de atravessar a membrana. O permeado chega a um tubo central por onde é recolhido. A conformação de membrana em espiral é organizada por uma envoltória de membrana em torno de uma matriz a qual é conectada a um tubo perfurado. A solução a ser filtrada escoia sobre a membrana enquanto o solvente filtrado que passa pela membrana flui para um sistema coletor, por mediação de um tubo interno. Os dispositivos tubulares consistem em feixes paralelos de tubos de paredes duras, porosos ou perfurados. A alimentação pressurizada escoia no interior dos tubos e o permeado goteja pela superfície externa e é agregado por dutos ou vasos específicos. No formato de membranas com fibras ocas, o líquido de entrada escoia sobre a superfície externa das fibras sob pressão e o permeado é coletado pela parte interna das fibras ocas.

Eckenfelder (2000) também divide a configuração das membranas em quatro tipos:

- a) Tubular: geralmente produzida a partir de cerâmica, ou quaisquer materiais poliméricos porosos, estes materiais têm diâmetros internos, que varia de 1/8 de polegada (3,2 mm) até aproximadamente uma polegada (2,54 cm). A membrana é revestida no interior do tubo, e a solução de alimentação passa através do interior de uma extremidade para a outra, o permeado ou filtrado que passa através da parede é então recolhida no exterior do tubo;
- b) Fibra oca: seu formato é análogo aos elementos tubulares, são, na maioria das vezes, menores em diâmetro. Assim como acontece com os sistemas tubulares, o fluxo de alimentação geralmente flui para dentro do núcleo da

fibra. O empacotamento das membranas de fibra oca pode ser 10 vezes maior que as demais. O fluxo, geralmente, diminui com o tempo de funcionamento e em um período de 1 ou até 2 anos de operação pode ser reduzido de 10 a 50%;

- c) Em espiral: esta configuração é construída a partir de um conjunto de membranas de folhas enroladas em torno de um tubo de permeado que é perfurado para garantir a recolha do permeado ou filtrado; e
- d) Placa e armação: este formato agrupa membranas de folhas que é estendida sobre uma estrutura para espaçar as camadas e auxiliar a recolha do permeado.

Com relação as membranas de fibras ocas, Habert et al. (2006), ressaltam que a relação entre a área superficial da membrana (área de permeação) e o volume do módulo é superior as demais geometrias, resultando na melhor utilização do espaço e redução no custo do equipamento.

Na Figura 3, estão ilustradas fotomicrografias das seções transversais de membranas de fibra oca análogas as utilizadas neste estudo.

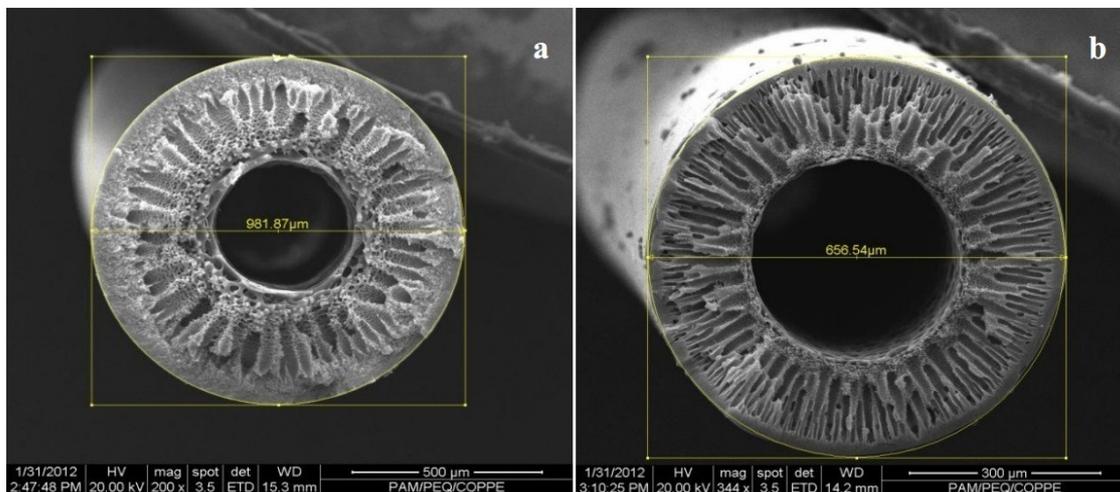


Figura 3 - Fotomicrografias da seção transversal das membranas de microfiltração (a) e ultrafiltração (b)

Fonte: Mororó, 2013.

A ampliação da seção transversal e da superfície externa das membranas de microfiltração e ultrafiltração são apresentadas nas Figuras 4 e 5.

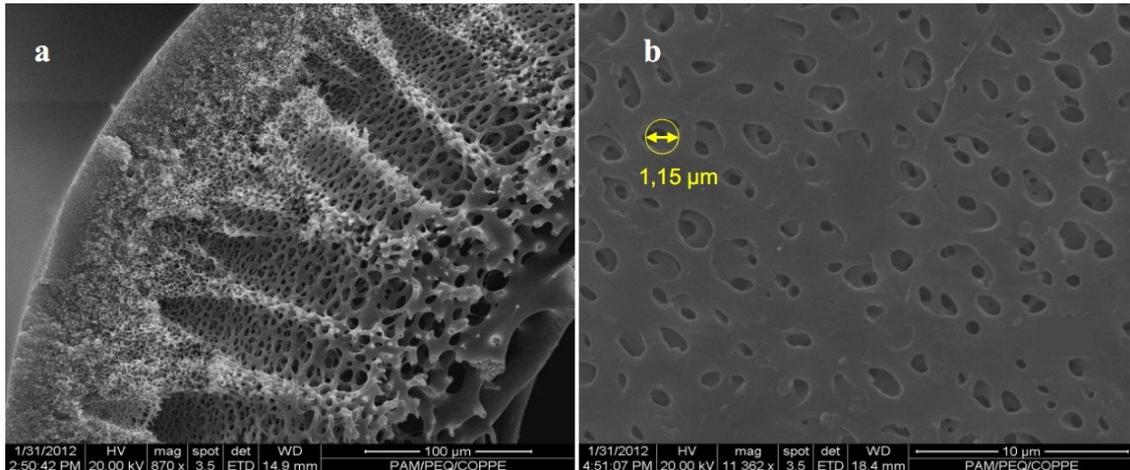


Figura 4 - Fotomicrografias da membrana de microfiltração de polieterimida. (a) ampliação da parede porosa na seção transversal (aumento de 870 vezes) e (b) poros da superfície externa da membrana (aumento de 11.362 vezes)

Fonte: Mororó, 2013.

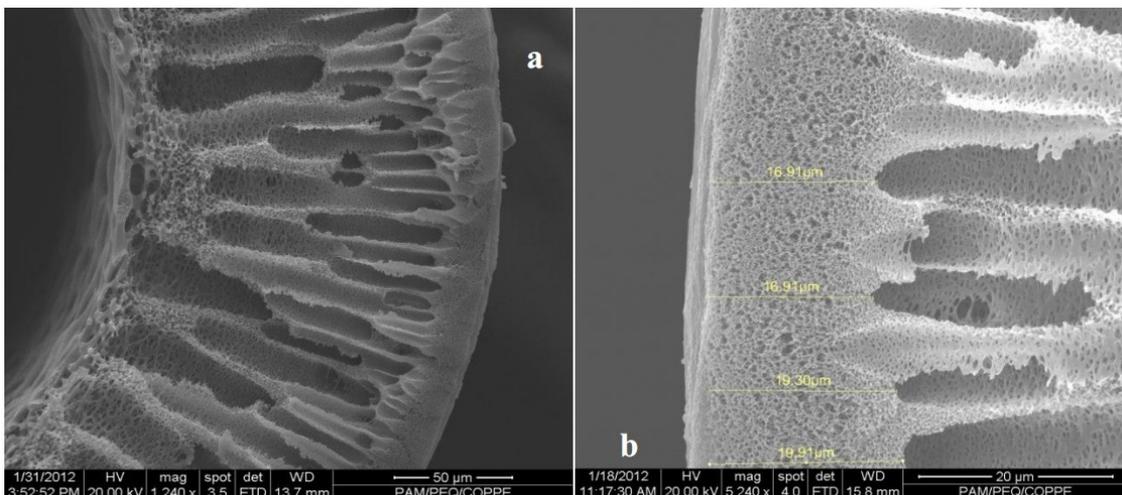


Figura 5 - Fotomicrografias da membrana de ultrafiltração de polietersulfona. (a) ampliação da parede da seção transversal da membrana (aumento de 1.240 vezes) e (b) detalhes da camada seletiva (superfície mais externa) da fibra oca (aumento de 5.240 vezes)

Fonte: Mororó, 2013.

2.7.3 Classificação dos processos de separação por membranas

Os processo de separação por membranas que utilizam a variação de pressão como força motriz podem ser divididas em: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose reversa (OR) ou osmose inversa (OI) (Figura 6). Duas características diferenciam cada uma das categorias, o diâmetro dos poros da membrana, e o tipo e intensidade da força motriz que promove a separação dos

contaminantes. Deste modo, as membranas de osmose inversa são as mais restritivas, sendo que as de microfiltração são as menos restritivas.

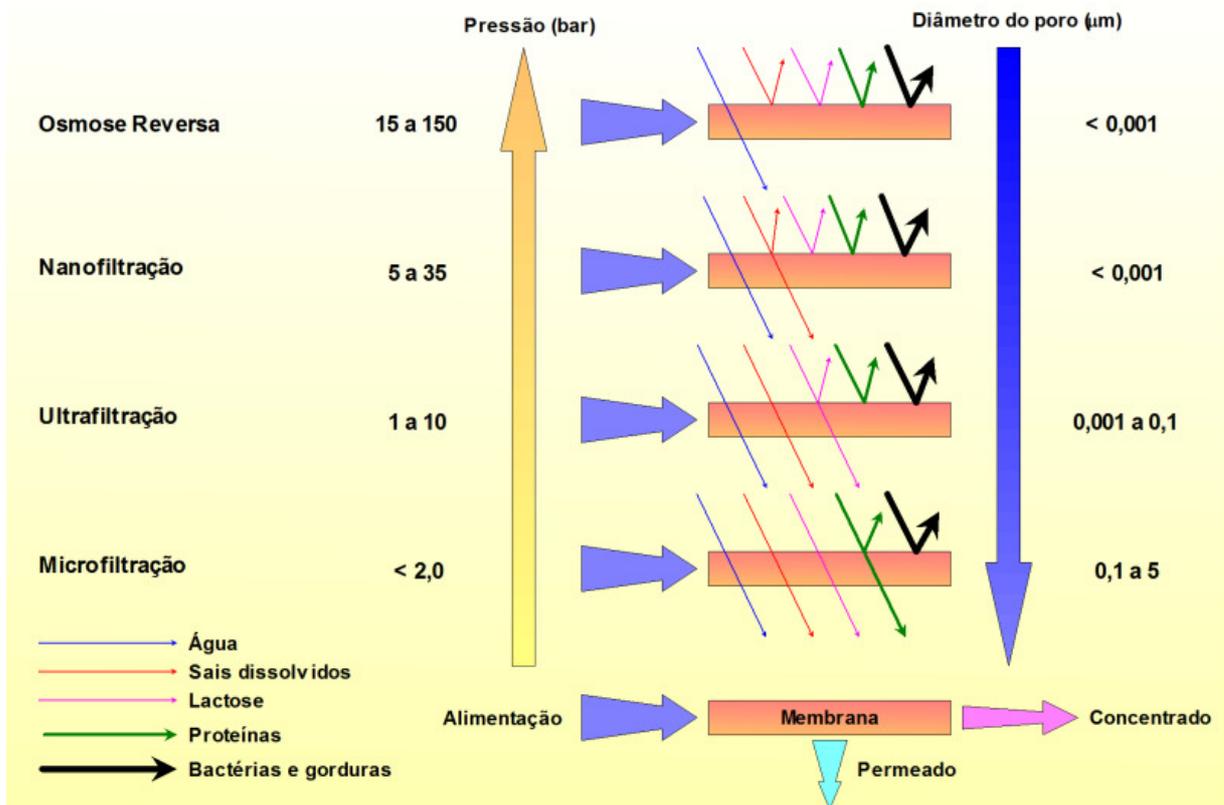


Figura 6 - Principais processos de separação por membranas
Fonte: Mierzwa, 2007.

2.7.3.1 Microfiltração

Telles e Costa (2010), definem microfiltração como um processo de separação por membranas, que opera a baixas pressões menor que 2,0 bar (usualmente entre 0,3 a 1,7 bar) removendo partículas coloidais e em suspensão (0,05 a 10 micra). Pode ser empregada na clarificação de caldos, fermentação, clarificação e recuperação de biomassa, clarificação de bebidas, dentre outras utilidades. Geralmente são fabricadas com materiais poliméricos, metálicos ou cerâmicos. No processo de separação por microfiltração pode-se conseguir um concentrado com volume inferior a 5% do volume alimentado, com uma concentração de sais que pode atingir a 70% em sólidos.

Devido à escassez hídrica, necessidade do controle de qualidade da água e progressiva adoção do reúso, a microfiltração apresenta vantagens potenciais quando comparada ao tratamento convencional (TELLES e COSTA, 2010):

- a) Proporciona plantas compactas e de fácil implantação e operação;
- b) Menor energia utilizada para operação e manutenção;
- c) Adição de produtos químicos em menor quantidade;
- d) Produção de água com qualidade superior;
- e) Pode ser utilizado para retirada seletiva de metais; e
- f) Remove: bactérias, protozoários e sólidos suspensos;

Telles e Costa (2010), apontam ainda algumas desvantagens do processo de microfiltração:

- a) Gases dissolvidos e substâncias iônicas não são removidos;
- b) A solução de alimentação deve apresentar pequena concentração de sólidos;
- c) Desenvolvimento de uma camada de solutos (e outras espécies que se pretende remover ou concentrar) que pode proporcionar resistência ao fluxo permeado;
- d) Muitas membranas estão propícias ao ataque químico; e
- e) A corrente de retentado pode apresentar dificuldade para disposição final para alguns componentes, no entanto, alguns podem ser reutilizados.

Mancuso e Santos (2003) diferenciam a microfiltração da ultrafiltração a partir do tamanho dos poros que, na microfiltração, é de aproximadamente 0,1 μm .

2.7.3.2 Ultrafiltração

Na ultrafiltração a pressão utilizada é maior (0,7 a 6,9 bar) utilizando membranas com diâmetro de poro inferior a 0,1 μm , reduzindo, dessa forma, a permeabilidade. Pode ser usada na remoção de compostos orgânicos de alto peso molecular e na remoção de colóides (TELLES e COSTA, 2010; MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Para Mancuso e Santos (2003), alguns autores apontam ser a ultrafiltração uma atividade de desinfecção e clarificação por membranas, meios porosos que

aceitam a rejeição de solutos com maior dimensão (macromoléculas), além de diversos tipos de microrganismos, como bactérias e vírus.

2.7.3.3 Nanofiltração

A nanofiltração e a osmose inversa se diferenciam pouco, porque nestas, a separação não ocorre unicamente por barreira física, mas por efeitos de exclusão de donnan e por difusão (BAKER, 2004).

Utilizando pressão maior que a usada nos sistemas de ultrafiltração, os processos de nanofiltração são adequados para remoção de compostos orgânicos com uma massa molecular variando entre 250 e 1000 g mol⁻¹ e alguns sais, geralmente bivalentes. Além disso, estes processos de separação operam de maneira adequada como abrandadores, não apresentando problemas de poluição relacionados com processos convencionais (TELLES e COSTA, 2010).

Nos sistemas de nanofiltração e osmose inversa é possível maximizar a recuperação de água permeada, uma vez que esses sistemas são esquematizados de forma que o concentrado do primeiro estágio alimenta o segundo estágio e assim consecutivamente (TELLES e COSTA, 2010).

Também denominada de osmose inversa de baixa pressão ou ainda abrandamento por membranas, este processo encontra-se entre a osmose inversa e a ultrafiltração, em termos de seletividade. Na nanofiltração, os íons monovalentes são fracamente separados pelas membranas, o que explica a contrapressão osmótica inferior do que aquelas aplicadas na osmose inversa, como resultado, as pressões usadas em nanofiltração são menores (MANCUSO e SANTOS, 2003).

2.7.3.4 Osmose inversa

Os sistemas de osmose inversa apresentam como vantagens: baixo custo de investimento e operação, por não ocorrer mudança de fase na solução de

alimentação, e são indicados para o tratamento de soluções que possuam íons dissolvidos como principais componentes (MIERZWA e HESPANHOL, 2005).

Não obstante, Mierzwa e Hespanhol (2005) citam as seguintes limitações da osmose inversa: gases dissolvidos e compostos orgânicos de baixo peso molecular não são removidos; a membrana não tolera ataque químico pela solução de alimentação; não é adequada para tratar efluentes com material em suspensão; substâncias com baixa solubilidade são capazes de precipitar na superfície da membrana, e a corrente do concentrado pode ser problemática para o destino final.

Mancuso e Santos (2003) definem a osmose inversa como operação em que através de uma membrana semipermeável não porosa, o solvente é separado de uma solução. A osmose inversa é recomendada para retenção de sais e solutos de baixo peso molecular.

Outras características são típicas dos sistemas de osmose inversa (MANCUSO e SANTOS, 2003):

- a) No equilíbrio, a pressão osmótica da solução salina corresponde à diferença de nível entre os líquidos nos dois compartimentos;
- b) Se uma solução salina concentrada é excluída de água pura utilizando osmose inversa, a diferença de potencial químico gera a passagem de água do local com água pura para o local com a solução salina, para igualar as concentrações; e
- c) Na prática, são utilizadas pressões superiores a pressão osmótica da solução, para produzir água pura.

2.7.3.5 Características gerais

Schneider e Tsutiya (2001), explicam que a pressão positiva ou negativa (vácuo) utilizada é a força motriz que estimula a separação na maioria dos processos de separação por membranas. O líquido a ser filtrado é forçado a cruzar uma barreira semipermeável formada pela membrana, onde ficam retidos os particulados e/ou contaminantes químicos. A produção de permeado e concentrado está associada ao fluxo de água através da membrana, que por sua vez é

dependente de uma cadeia de fatores que, em conjunto, compõem a resistência da membrana à filtração, tais como:

- a) Porosidade da membrana (fragmento da extensão de membrana ocupada por poros);
- b) Espessura da membrana;
- c) Diâmetro dos poros;
- d) Fenômenos operacionais, como por exemplo, a camada de concentração-polarização;
- e) Camadas de material detido na superfície das membranas (torta de filtro);
- f) Géis ou conjuntos de sais precipitados (*fouling* químico);
- g) Biofilmes (*fouling* biológico).

Inúmeros fatores, a maior parte pouco compreendida, controla a rejeição de solutos por membranas: morfologia dos materiais retidos pela membrana, dimensões do soluto (molécula, íon ou partícula), dimensão dos poros da membrana, carga elétrica dos solutos e da membrana, rugosidade e características químicas da superfície da membrana, propriedades químicas da solução a ser filtrada além de fatores hidrodinâmicos, que determinam a tensão de arraste, o grau de compactação da torta de filtro e as forças de cisalhamento na superfície da membrana. A importância relativa de cada fator está sujeita ao tipo de membrana empregado, a operação do módulo e a natureza do soluto rejeitado (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

Nas membranas de microfiltração e ultrafiltração o principal mecanismo de rejeição é a retenção física de material particulado. Para a nanofiltração e osmose inversa predominam processos de exclusão química e/ou difusão na remoção de espécies químicas. Em processos de filtração por membranas, os principais mecanismos de rejeição são (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- a) Retenção física de partículas, moléculas ou íons com tamanho superior que os poros na superfície da membrana;
- b) Bloqueio físico de poros por partículas ou moléculas com diâmetro análogo ao diâmetro dos poros;
- c) Adsorção de contaminantes no interior dos poros; e
- d) Barreira ou taxas reduzidas de difusão de elementos através do polímero da membrana.

2.8 PERMEABILIDADE DAS MEMBRANAS

Determinadas características devem ser analisadas em processos de filtração por membranas, dentre estas, a afinidade existente entre os elementos presentes na solução de alimentação e a membrana pode interferir na filtração exercendo uma determinada seleção dos compostos, além disso, a afinidade entre o polímero da membrana e a composição da alimentação pode causar alterações na cadeia do polímero, interferindo o desempenho dos processos de separação por membranas (SARMENTO, 2007; TRINDADE, 2010).

Sarmiento (2007) ressalta que, em determinados casos as alterações na membrana ocasionam mudanças irreversíveis, devido o rearranjo da cadeia do polímero, deformando a densidade da cadeia e o espaço intersticial. Por conseguinte, a dilatação da membrana em operações preliminares pode afetar o volume livre e, dessa forma, sua distribuição da camada denso-seletiva induzindo a resistência ao transporte e eficiência da separação para as operações posteriores. O comportamento de uma membrana é verificado, assim, não só pela estrutura morfológica e o material que compõem a membrana, mas também está relacionado às condições de operação e possibilidade de interações entre os componentes da alimentação e a estrutura basilar da membrana.

Trindade (2010) elucida ainda que, a medição do fluxo permeado em membranas porosas pode ser empregada para estimar o tamanho do poro dessas membranas, onde o mecanismo de transporte é o fluxo capilar convectivo, onde cada poro é assimilado a um capilar e a soma de todos os escoamentos fornece o fluxo total. A permeabilidade da membrana com água é de fundamental importância para sua caracterização, ela permite analisar a sua porosidade superficial e da subestrutura da membrana, resultando em dados sobre as propriedades hidrofílicas e/ou hidrofóbicas.

2.9 DISPOSIÇÃO DOS REJEITOS DA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO COM MEMBRANAS

Geralmente os rejeitos produzidos a partir da água de reúso proveniente de esgoto bruto são retornados à rede coletora de esgotos (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001).

No caso da disposição final dos rejeitos provenientes do processamento de efluente secundário, estes rejeitos são mais complexos:

- a) Microfiltração e ultrafiltração: efluente de retrolavagem das membranas, efluente de lavagem química;
- b) Nanofiltração e osmose inversa: efluente concentrado de limpeza química.

Todo e qualquer sistema que utilize membranas de filtração (MF, UF, NF ou OI) devem ser antecidos de uma análise físico-química e microbiológica da água de alimentação, pelo fato que as membranas podem ser comprometidas por depósitos de sais ou pela ação de oxidantes químicos. Os parâmetros a serem avaliados são os seguintes (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001):

- a) Temperatura;
- b) pH;
- c) Alcalinidade: alcalinidade total, alcalinidade de carbonatos, dureza total;
- d) Condutividade elétrica;
- e) Sólidos dissolvidos totais;
- f) Turbidez;
- g) Demanda bioquímica de oxigênio, demanda química de oxigênio, carbono orgânico total, carbono orgânico solúvel;
- h) Bactérias;
- i) Oxidantes: cloro, ozônio ou outros componentes eventualmente presentes;
- j) Outros: cheiro, cor, etc.
- k) Poluentes orgânicos voláteis ou não, de baixo peso molecular: organoclorados, hidrocarbonetos, pesticidas;
- l) Outros íons: metais pesados, no caso de esgotos, arsênio, etc;
- m) Cátions: NH_4^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+} , Mn^{2+} ;
- n) Ânions: CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , SiO_2^- ;
- o) Gases: CO_2 , H_2S ;

- p) Colóides: SiO_2 (total), Fe (total);
- q) Um dos parâmetros de *fouling*: SDI, MFI (para a osmose inversa);

Mancuso e Santos (2003) apontam ainda que os seguintes métodos são utilizados como disposição final do concentrado produzido em 137 estações de tratamento nos Estados Unidos, que utilizam filtração por membranas:

- a) Lançamento em corpos receptores: 48%;
- b) Lançamento em sistemas públicos de esgotamento sanitário: 23%;
- c) Acondicionamento no solo: 12%;
- d) Injeção no solo: 10%; e
- e) Tanques de evaporação: 6%.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 DESCRIÇÃO DO LOCAL DE COLETA DAS AMOSTRAS

As coletas de amostras de efluentes foram realizadas em um abatedouro e frigorífico de suínos, localizado no Município de Medianeira, na região extremo oeste do Estado do Paraná, ao sul do Brasil.

De acordo com os dados fornecidos pela agroindústria em estudo, são abatidos diariamente cerca de 6.000 suínos, com um consumo médio de água de 750 litros por suíno abatido, gerando aproximadamente 4.500 metros cúbicos de efluentes líquidos ao dia. Além disso, a agroindústria conta com aproximadamente 5.000 funcionários, que consomem cerca de 70 litros per capita (BRAILE, 1993). Contribuindo, a partir destes dados, com 350 metros cúbicos de esgoto sanitário ao dia, que após tratamento (fossa séptica), seguem para o sistema de tratamento de efluentes, totalizando aproximadamente 4.850 metros cúbicos de águas residuárias geradas ao dia. O volume de água utilizado é proveniente de poço tubular profundo (92%), vertente (7%) e de concessionária (1%).

No abatedouro e frigorífico de suínos em estudo, ocorre a segregação dos efluentes provenientes do processo industrial em duas linhas: a) verde: efluentes oriundos da recepção de animais, lavagem de caminhões e triparia, e b) vermelho: efluentes advindos do abate, processamento de carne e vísceras, desossa, corte e graxaria.

Após o processo industrial, a água residuária resultante é tratada, cada qual em sua linha, em etapas de tratamento preliminar, com peneiras estáticas, seguida por tratamento primário, com decantadores. Posteriormente as linhas se unem seguindo à etapa secundária, com o tratamento biológico, constituído por lagoas de estabilização em série, sendo duas lagoas anaeróbias, uma lagoa aerada de mistura completa e uma lagoa de decantação. Há ainda uma etapa de pós-tratamento com um flotor físico-químico utilizando coagulante orgânico e polímero catiônico para a remoção da carga orgânica remanescente.

O fluxograma do sistema de tratamento de efluentes da indústria pode ser visualizado na Figura 7.

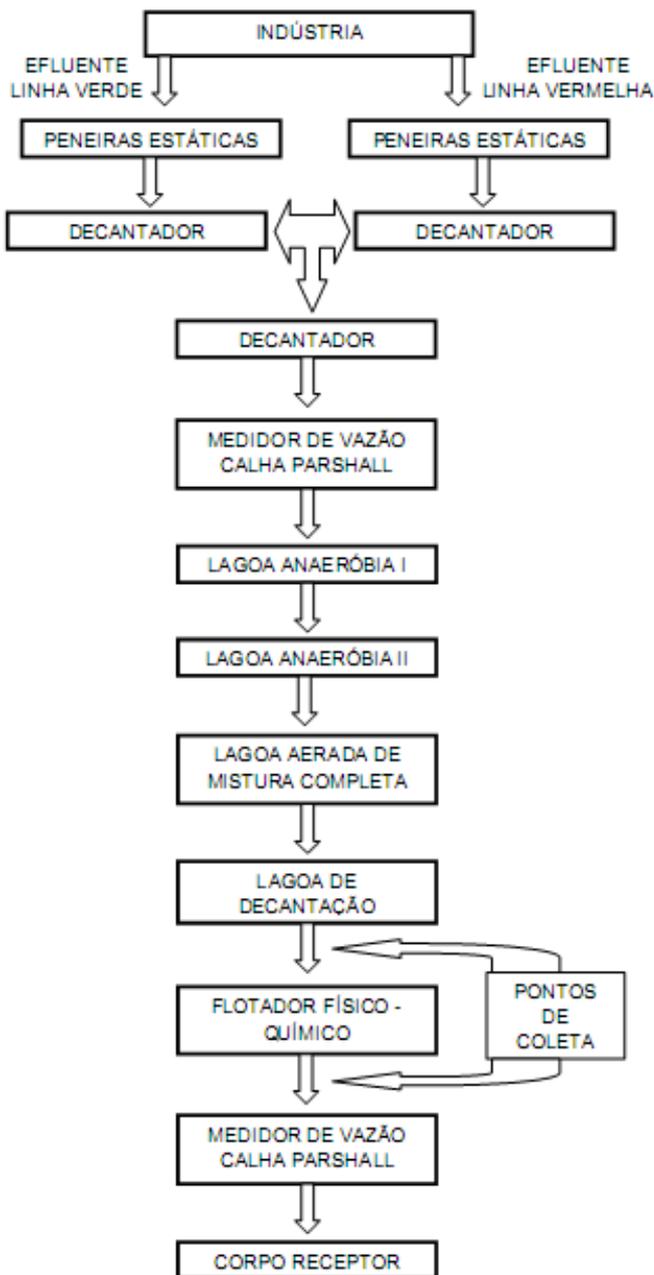


Figura 7 - Fluxograma do sistema de tratamento de efluentes da indústria

3.2 COLETA E PRESERVAÇÃO DAS AMOSTRAS

3.2.1 Coleta e Preservação das Amostras de Efluentes

As amostras de efluentes do frigorífico foram coletadas de acordo com a norma brasileira NBR 9898/1987 (preservação e técnicas de amostragem de

efluentes líquidos e corpos receptores). Os pontos/locais de coleta das amostras foram após o tratamento secundário (lagoa de decantação - AIF) e após o tratamento terciário (flotador físico-químico – AFF), conforme Figura 7.

Foram feitas cinco coletas em datas distintas, sendo que, em cada data, eram coletadas amostras simples, com volume de 10 L para cada ponto, sempre no período da manhã.

Para as amostras de efluentes coletadas para análises microbiológicas, utilizaram-se frascos de polipropileno esterilizados, fornecidos pelo laboratório responsável pela realização das análises.

3.2.2 Coleta e Preservação das Amostras de Permeado

As amostras de efluentes eram microfiltradas e/ou ultrafiltradas logo após a coleta, caso não fosse possível, as mesmas eram congeladas e armazenadas durante menor período de tempo possível, até a realização dos ensaios de separação com membranas. Após o processo de tratamento por membranas, as amostras de permeado eram submetidas a caracterização físico-química o mais breve possível, em alguns casos as mesmas foram congeladas.

No caso das análises microbiológicas, as amostras de permeado foram coletadas em frascos de polipropileno esterilizados. No momento do ensaio foi utilizado um bico de bunsen na bancada, para propiciar um ambiente asséptico. Nestes casos, as amostras de efluentes do frigorífico eram coletadas e microfiltradas e/ou ultrafiltradas imediatamente, sendo armazenadas em geladeira na temperatura 10 ± 2 °C, até a realização da análise.

3.3 CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS AMOSTRAS DE EFLUENTES E PERMEADOS

A caracterização físico-química das amostras de efluentes coletadas nos dois pontos do sistema de tratamento do frigorífico, além das amostras provenientes

do tratamento com membranas, foi feita quanto aos parâmetros: DQO, pH, turbidez, nitrogênio amoniacal, sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, sólidos sedimentáveis, sendo realizadas de acordo com APHA et al., 2012.

Na Tabela 2, têm-se os parâmetros e os métodos analíticos utilizados para a caracterização físico-química das amostras de efluentes e das amostras obtidas após os ensaios de microfiltração e ultrafiltração.

Tabela 2 - Parâmetros para caracterização das amostras de efluentes e permeados

Parâmetro	Unidade	Método (APHA et al., 2012)
DQO	mg L ⁻¹	5220 D (refluxo fechado)
pH	-	Potenciométrico 4500 - H+ B
Turbidez	UNT	Nefelométrico 2130 B
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹ N	4500 - NH ₃ F - Método do Fenato
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	2540 B – gravimétrico
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	2540 E – gravimétrico
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	2540 E – gravimétrico
Sólidos Sedimentáveis	mL ⁻¹ L ⁻¹ h ⁻¹	2540 F

3.3.1 Métodos Analíticos

Devido à diversidade de substâncias que compõem o efluente, ele deve ser caracterizado em termos de padrões acumulativos, ou de características comuns às substâncias que o compõem.

Os métodos analíticos empregados para a caracterização das amostras de efluentes e permeados são oficiais e estão descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA et al., 2012), sendo utilizados os laboratórios e equipamentos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) Câmpus Medianeira, Laboratório de Biotecnologia e Saneamento Ambiental e Laboratório de Águas, Efluentes e Emissões, exceto as análises de DQO e nitrogênio amoniacal que foram feitas no Laboratório Central da Cooperativa Agroindustrial Lar. Com relação as análises de coliformes termotolerantes e temoresistentes, estas foram realizadas no Laboratório de Análises Microbiológicas e Físico-químicas de Alimentos e Água (LAMAG) da Universidade Tecnológica

Federal do Paraná (UTFPR) Câmpus Medianeira. Todas as análises foram feitas à temperatura ambiente, em duplicata e os resultados expressos são a média dos valores encontrados.

Os parâmetros condutividade e salinidade foram obtidos utilizando uma sonda multiparâmetros da marca Hanna Instruments, modelo HI 769828 multisensor para HI 9828 meter, e calibrada conforme procedimento descrito no manual do aparelho.

Para a contagem dos coliformes termotolerantes e termorresistentes foi utilizada como metodologia a Instrução Normativa nº 62, de 26 de agosto de 2003, do Ministério da Agricultura, que estabelece os métodos analíticos oficiais para análises microbiológicas para controle de produtos de origem animal e água (BRASIL, 2003). Os resultados são expressos em número mais provável por mililitro.

3.4 UNIDADE EXPERIMENTAL

3.4.1 Propriedades das Membranas de Microfiltração e Ultrafiltração

As membranas de microfiltração e ultrafiltração possuem baixa incrustação e elevado fluxo, por proporcionar uma filtração superficial com exclusão por tamanho molecular. As propriedades típicas das membranas de microfiltração e ultrafiltração utilizadas estão na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades da membrana de microfiltração e ultrafiltração

Identificação	MF 128	UF 162
Geometria	Cilíndrica do tipo fibra oca	Cilíndrica do tipo fibra oca
Material	Polieterimida (PEI)	Polietersulfona (PES)
Camada Seletiva	Externa	Externa
Diâmetro Externo (mm)	25	25
Retenção Molar (MWCO - KDa)	-	50
Tamanho do Poro (μm)	0,40	-
Comprimento Útil (mm)	260	260
Empacotamento ($\text{m}^2 \cdot \text{m}^{-3}$)	650	650
Área de Filtração ($\times 10^{-3} \text{ m}^2$)	59	59
Permeabilidade ($\text{L h}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Bar}^{-1}$)	204,83	150,7
Limites de pH	2 – 13	2 – 13

Fonte: PAM Membranas, 2012.

3.4.2 Módulo de Filtração por Membranas

Na Figura 8 apresenta-se uma foto ilustrativa do sistema de bancada de microfiltração e ultrafiltração, e na Figura 9 um esquema representativo da unidade experimental mostrando os principais equipamentos: bomba, válvulas, reservatórios, rotâmetro, membranas, etc.



Figura 8 - Foto do sistema de bancada de micro e ultrafiltração

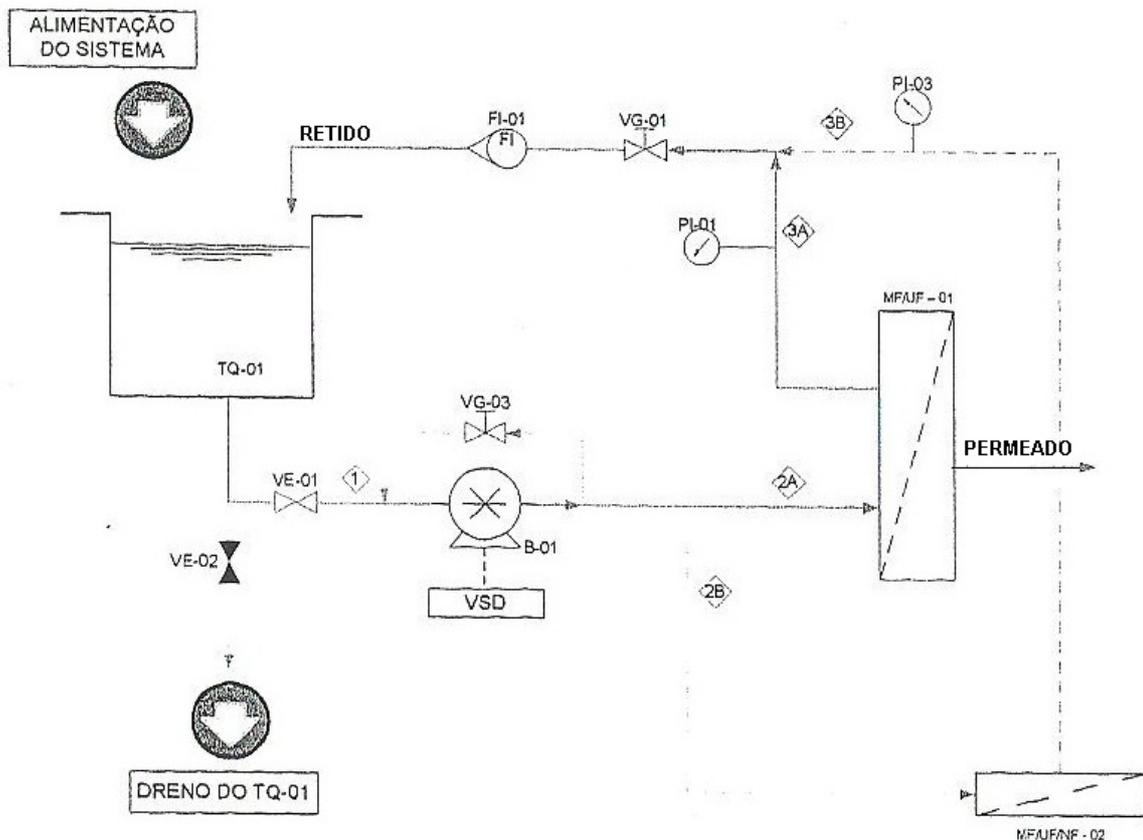


Figura 9 - Esquema representativo da unidade experimental mostrando os principais equipamentos

(TQ-01: tanque PP – 10 L; B-01: bomba diafragma, 150 psi (10 bar máx); 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); PI-01 e PI-02: indicadores 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); VE: válvula esfera (latão 1/2"); VG: válvula gaveta (bronze 1/2")).

O seguinte procedimento foi utilizado para operar o módulo de filtração por membranas (PAM MEMBRANAS, 2012):

1. Conferiu se todas as válvulas estão fechadas;
2. Abriu-se completamente a válvula VE-01, de alimentação, na saída do tanque TQ-01 para o sistema;
3. Abriu-se completamente a válvula VE-03, de saída de permeado;
4. Abriu-se completamente as válvulas VG-01, de controle de pressão de concentrado e, no caso de micro ou ultrafiltração, a VG-02, de controle de permeado;
5. Fechou-se completamente a válvula VG-03, de by-pass na bomba B-01;
6. Ligou-se a bomba B-01 no mínimo;

7. Micro ou ultrafiltração: controlou-se a diferença de pressão entre concentrado (lida em PI-01) e permeado (lida em PI-02), bem como a vazão de concentrado (lida em FI-01), pela;
 - Válvula de gaveta VG-01 (fechando aumentava a pressão em PI-01 e diminuía a vazão em FI-01);
 - Válvula gaveta VG-02 (fechando aumentava a pressão em PI-02);
 - Válvula gaveta VG-03 (abrindo diminuía a pressão em PI-01);
 - Ou pelo potenciômetro da bomba (maior velocidade causava aumento de pressão em PI-01 e PI-02);

Em alguns casos a combinação destes controles era necessária para refinar o controle e estabilizar o ponteiro dos manômetros (PI-01 e PI-02). A diferença entre os valores de PI-01 e PI-02 correspondia à diferença de pressão aplicada à membrana.

3.5 ENSAIOS DE FILTRAÇÃO DOS EFLUENTES POR MEMBRANAS

Após a caracterização físico-química dos efluentes agroindustriais de abatedouro e frigorífico de suínos, o estudo foi realizado em um sistema piloto utilizando um módulo de filtração com membranas fornecido pela PAM Membranas Seletivas Ltda. A membrana utilizada no processo de microfiltração era de polieterimida (PEI) e a membrana empregada no processo de ultrafiltração era de polietersulfona (PES).

Foram testadas três configurações de filtração por membranas para o sistema de tratamento proposto:

- a) Microfiltração por membrana em diferentes condições de pressão operacional.
- b) Ultrafiltração por membrana em diferentes condições de pressão transmembrana operacional aplicada.
- c) Microfiltração seguida de ultrafiltração. Sendo que as pressões de microfiltração e ultrafiltração aplicadas foram previamente selecionadas a partir das duas primeiras configurações.

Nas três configurações foram utilizadas duas pressões (0,5 e 1 bar). Foram feitos, portanto, 2 ensaios utilizando-se a microfiltração, 2 ensaios utilizando-se a ultrafiltração e 1 ensaio utilizando microfiltração seguida de ultrafiltração. Todos os ensaios de microfiltração e ultrafiltração com amostras de efluentes coletadas após o tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF) e após o tratamento terciário (flotador físico-químico – AFF). A matriz do planejamento experimental foi elaborada a partir de experimentos preliminares, e encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Matriz do planejamento experimental

Tratamento	Membrana	Pressão (Bar)	Ponto de coleta
1	MF 128	0,50	AIF
2	MF 128	0,75	AIF
3	UF 162	0,75	AIF
4	UF 162	1,0	AIF
5	MF 128	0,50	AFF
6	MF 128	0,75	AFF
7	UF 162	0,75	AFF
8	UF 162	1,0	AFF
9	UF 128 + UF 162	PMF + PUF	AIF

(AIF = Amostra no Início do Flotador; AFF = Amostra no Final do Flotador; PMF = Pressão para Microfiltração; PUF = Pressão para Ultrafiltração)

As pressões empregadas nos diferentes tratamentos foram selecionadas a partir de dados preliminares de fluxos atingidos durante os ensaios de permeação com águas residuárias de abatedouro e frigorífico de suínos, levando-se em consideração os seguintes critérios: maiores fluxos permeados; menores pressões, tendo por finalidade minimizar os custos de energia, facilidade de operação e estabilidade do módulo de filtração por membranas e maior eficiência de remoção para os parâmetros de controle. Além disso, cada processo de filtração apresenta uma faixa de pressão operacional, sendo fator limitante para a seleção da pressão de operação, contudo, as pressões operacionais podem se sobrepor.

Após a execução das três fases (microfiltração, ultrafiltração, microfiltração + ultrafiltração), foi executada uma nova caracterização físico-química dos permeados para verificar qual via foi a mais eficiente na remoção dos parâmetros monitorados

visando o reúso destas águas residuárias provenientes de abatedouro e frigorífico de suínos.

3.5.1 Parâmetros Monitorados Durante a Execução da Investigação Experimental

Antes do início de cada ensaio de filtração, as membranas novas foram permeadas com água destilada nas mesmas condições do ensaio realizado com efluente, para que a estrutura mecânica das membranas se adaptasse à pressão de operação do sistema.

As variáveis monitoradas para cada ensaio estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros monitorados durante a execução da investigação experimental

Parâmetro	Unidade
Vazão do Permeado	L h ⁻¹
Vazão do Concentrado	L min ⁻¹
Pressão de Alimentação, Recirculação e Permeado	Bar
Rotação da Bomba	rpm
Volume de Alimentação	L

O fluxo permeado foi medido durante a operação em diferentes condições de pressão de operação. Os ensaios foram realizados com concentrado retornando para o tanque de alimentação objetivando separar o permeado com potencial para o reúso.

O sistema foi operado em batelada, de modo que a corrente do concentrado retornava ao tanque de alimentação e o permeado era coletado continuamente, dessa forma, aumentava-se progressivamente a concentração na corrente de alimentação.

Todos os ensaios foram realizados com volume de 5 L de efluentes (exceto o ensaio de microfiltração seguido de ultrafiltração, onde foi utilizado 10 L) em temperatura ambiente, superior a 20 °C.

As coletas de amostras de permeado nos ensaios foram feitas logo no início da filtração, em 30, 60 e 90 minutos e uma coleta do permeado composto, após o término do ensaio. Foram realizados também, quatro ensaios (tratamentos 01 a 04, Tabela 3) onde foram coletadas amostras do permeado a partir dos fatores de concentração: 1,0; 1,25; 1,50; e 1,75.

As membranas foram avaliadas quanto aos parâmetros de processo:

- a) Efeito da pressão;
- b) Fluxo em função do tempo. O fluxo permeado (J) foi determinado pela equação: $J = V_p / A \times t$; (1)
- c) Fator de Concentração (Fc) pela equação: $F_c = V_i / (V_i - V_p)$; (2)
- d) Coeficiente de retenção ou rejeição (equivalente a eficiência), calculado pela equação: $\%R = ((X_f - X_i) / X_i) \times 100$. (3)

Sendo X_i o valor inicial e X_f o valor final do parâmetro no retido (por exemplo sólidos totais, turbidez, DQO, etc); e A (área de permeação), V_i (volume inicial) V_p (volume do permeado), t (tempo).

3.5.2 Limpeza das Membranas e Controle do Fluxo Permeado

Após o término de cada ensaio de filtração, o módulo era submetido ao processo de limpeza física (retrolavagem com água por 20 minutos e retrolavagem com água destilada por 20 minutos, não retornando o fluxo permeado e o fluxo concentrado para o tanque de alimentação) e química (utilizando hipoclorito de sódio com concentração de 500 ppm, por 20 minutos, retornando o fluxo permeado e o fluxo concentrado para o tanque de alimentação).

Posterior à limpeza física e química era feito enxágue com água destilada por 20 minutos, descartando o fluxo permeado e o fluxo concentrado do tanque de alimentação. Após era feito a medição de pH para verificar se o mesmo encontrava-se próximo da neutralidade.

O fluxo permeado com água destilada nas membranas limpas, em temperatura ambiente, foi monitorado como parâmetro para garantir que a membranas estivessem sempre limpas após cada ensaio de filtração.

Os diferenciais de pressão transmembrana aplicados nos testes de caracterização das membranas com água destilada foram de 0,5; 0,75; 1,0; 1,25; 1,50 e 1,75 bar e o fluxo correspondente de água destilada, para cada variação de pressão, foi medido até que se alcançou um valor constante.

Nos ensaios para caracterização foram medidas as permeabilidades das membranas para água destilada durante a elevação da pressão de 0,5 a 1,75 bar, durante a redução desta pressão de 1,75 a 0,5 bar, e ainda a permeabilidade da membrana com amostras de efluentes.

Os volumes permeados de água destilada e de efluentes foram determinados pela medida do fluxo através do medidor de vazão. Estas medidas foram feitas até que se verificou um fluxo constante através das membranas, o que durou aproximadamente 1 hora para a água destilada e 100 minutos para amostras de efluentes, para cada variação de pressão utilizada. As medidas, tanto para a caracterização da membrana com água destilada quanto para o efluente, foram realizadas a cada 05 minutos. Nesta etapa experimental, foram testados também os comportamentos das membranas com respeito à resistência mecânica em relação aos diversos diferenciais de pressão, além da histerese pela pressurização e despressurização do sistema. Estes experimentos foram realizados durante um período de 11 horas para se verificar também a estabilização do fluxo com água destilada e com amostras de efluentes.

A avaliação da incrustação foi realizada através da avaliação do perfil do fluxo de permeado do efluente em relação ao fluxo permeado de água destilada para a membrana nova.

Segundo as especificações técnicas contidas no manual de instalação, operação e manutenção fornecido pelo fabricante (PAM MEMBRANAS, 2012), tolera-se até cerca de 20% de perda do fluxo original devido a problemas de entupimento nas membranas. Esta porcentagem de perda é análoga à encontrada em outros estudos sobre processos de separação com membranas, como Gomes (2006) e Prato (2007).

3.6 ÍNDICE DE QUALIDADE DO PERMEADO - IQP

O Índice de Qualidade do Permeado utilizado neste estudo é análogo ao índice utilizado por Schulz e Kopke (1997), que realizaram uma abordagem holística para descrever a qualidade dos alimentos cultivados com diferentes técnicas de cultivo.

Este índice buscou integrar vários parâmetros diferentes de amostras de efluentes coletadas após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF). Os dados utilizados para calcular este índice foram obtidos através de quatro tratamentos diferentes, conforme Tabela 3. Dois tratamentos foram utilizados para microfiltração, utilizando as pressões de 0,5 e 0,75 bar (tratamentos 1 e 2) e dois tratamentos para a ultrafiltração, empregando as pressões de 0,75 bar e 1,0 bar (tratamentos 3 e 4). A partir das duas membranas, utilizando duas pressões, quatro diferentes tratamentos foram testados:

1. MF 128 0,5 Bar = microfiltração, 0,5 bar de pressão;
2. MF 128 0,75 Bar = microfiltração, 0,75 bar de pressão;
3. UF 162 0,75 Bar = ultrafiltração, 0,75 bar de pressão;
4. UF 162 1,0 Bar = ultrafiltração, 1,0 bar de pressão.

O índice foi calculado utilizando-se os nove parâmetros seguintes: fluxo permeado, turbidez, condutividade, salinidade, demanda química de oxigênio, nitrogênio amoniacal, sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis.

Para os quatro tratamentos citados, os valores de fluxo permeado e as concentrações obtidas para os oito parâmetros, tiveram seus valores codificados linearmente, sendo para os valores de máximo e mínimo, atribuídos 0 e 100 pontos, respectivamente. Isto ocorre para os parâmetros em que um valor mais alto significa menor qualidade. Para o fluxo permeado os terminais foram trocados para a interpretação, pois um maior fluxo é sempre desejável.

Quanto maior for a diferença entre os valores, maior a diferença entre os diferentes tratamentos, sendo o índice obtido do somatório desses valores, onde um índice de melhor qualidade é aquele de maior valor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DOS EFLUENTES AGROINDUSTRIAIS

O aspecto visual das amostras de águas residuárias coletadas em dois pontos do sistema de tratamento de efluentes do abatedouro e frigorífico de suínos, localizados após o tratamento secundário (lagoa de decantação - AIF), e após o tratamento terciário (flotador físico-químico - AFF), pode ser visualizado na Figura 10.



Figura 10 - Amostras de efluentes coletadas antes (AIF) e após (AFF) flotador físico-químico

As características físico-químicas dos cinco lotes de amostras de efluentes coletadas e utilizadas nos ensaios de microfiltração e ultrafiltração estão apresentadas nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Características físico-químicas dos efluentes coletados após a lagoa de decantação (AIF)

Parâmetro	Unidade	Lote 01	Lote 02	Lote 03	Lote 04	Lote 05	Média
pH	-	7,75	7,63	7,70	7,67	7,66	7,68±0,0455
Turbidez	UNT	40	33	39	43	32	37,4±4,7223
Sólidos Sedimentáveis	mL L ⁻¹ h ⁻¹	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	1742	1880	1929	1602	1698	1770,2±133,7655
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	1406	1594	1592	1323	1378	1458,6±126,2727
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	336	286	337	279	320	311,6±27,5191
Condutividade	μS cm ⁻¹	3738	4180	3478	3774	3666	3767,2±257,4785
Salinidade	PSU	1,98	2,23	1,83	1,92	1,93	1,98±0,1509
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	2,72	2,51	2,22	2,66	2,14	2,45±0,2596
DQO	mg L ⁻¹	192	190	189	186	188	189±2,2361

Tabela 7 - Características físico-químicas dos efluentes coletados após flotador físico-químico (AFF)

Parâmetro	Unidade	Lote 01	Lote 02	Lote 03	Lote 04	Lote 05	Média
pH	-	7,62	7,50	7,47	7,56	7,56	7,54±0,0585
Turbidez	UNT	16	10	22	18	14	16±4,4721
Sólidos Sedimentáveis	mL L ⁻¹ h ⁻¹	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	1673	1720	1860	1538	1626	1683,4±119,44879
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	1375	1444	1537	1278	1400	1406,8±94,8456
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	298	276	323	260	226	276,6±36,9026
Condutividade	μS cm ⁻¹	3702	4144	3465	3665	3644	3724±251,9157
Salinidade	PSU	1,96	2,19	1,82	1,89	1,92	1,96±0,1404
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	1,64	1,46	1,33	1,56	1,16	1,43±0,1903
DQO	mg L ⁻¹	88	87	94	86	78	86,6±5,7271

A partir dos cinco lotes de amostras de efluentes coletadas na indústria, durante o período de estudo, calculou-se as eficiências de remoção do flotador

físico-químico, atual sistema de pós-tratamento utilizado pela agroindústria em estudo, para alguns dos parâmetros caracterizados.

A turbidez apresentou faixa de eficiência de remoção variando de 44% a 70%, aproximadamente. Os sólidos totais voláteis (STV) apresentaram faixa de eficiência de remoção de 3% a 29%, aproximadamente. Para o parâmetro nitrogênio amoniacal (N-NH₃), a faixa de remoção variou de 40% a 46%, aproximadamente. Quanto a demanda química de oxigênio (DQO), a eficiência de remoção variou de 50% a 59%, aproximadamente.

A variação na faixa de eficiência de remoção, além da variabilidade expressa pelo desvio padrão da concentração de alguns parâmetros, como sólidos totais e condutividade, ocorre devido a flutuação no processo produtivo, originando maior ou menor vazão de efluentes, que afeta diretamente na concentração dos parâmetros, em razão da não uniformidade dos lotes utilizados.

4.2 PERMEABILIDADE DAS MEMBRANAS

Foram realizados ensaios com o objetivo de caracterizar as membranas com relação às suas permeabilidades com água destilada e com amostras de efluentes, monitorando a redução do fluxo permeado provocado pela compactação, pelo entupimento, resistência ao fluxo de massa devido à polarização de concentração e reversibilidade das condições após a compactação (histerese).

4.2.1 Permeabilidade das Membranas com Água Destilada

Os ensaios destinados a avaliar a permeabilidade das membranas de microfiltração e ultrafiltração com água destilada, tanto para a pressurização quanto para a despressurização foram feitos a temperatura ambiente, conforme descrito na metodologia. O diferencial de pressão transmembrana foi ajustado de 0,5 a 1,75 bar (pressurização) em intervalos de 0,25 bar e, posteriormente reduzido novamente a 0,5 bar (despressurização). O fluxo de água destilada foi medido por

aproximadamente 60 minutos para cada variação de pressão até que se atingisse um valor estacionário, sem substituir as membranas.

As Figuras 11 e 12 ilustram os resultados da variação do fluxo de água destilada através das membranas de microfiltração e ultrafiltração, com o tempo de filtração para cada variação de pressão, tanto para a pressurização, quanto para a despressurização.

Segundo Sarmiento (2007), o aumento progressivo da pressão seguido de sua redução, permite analisar o fenômeno de histerese e/ou compactação que pode influenciar no comportamento de uma membrana quanto ao fluxo de massa e seletividade.

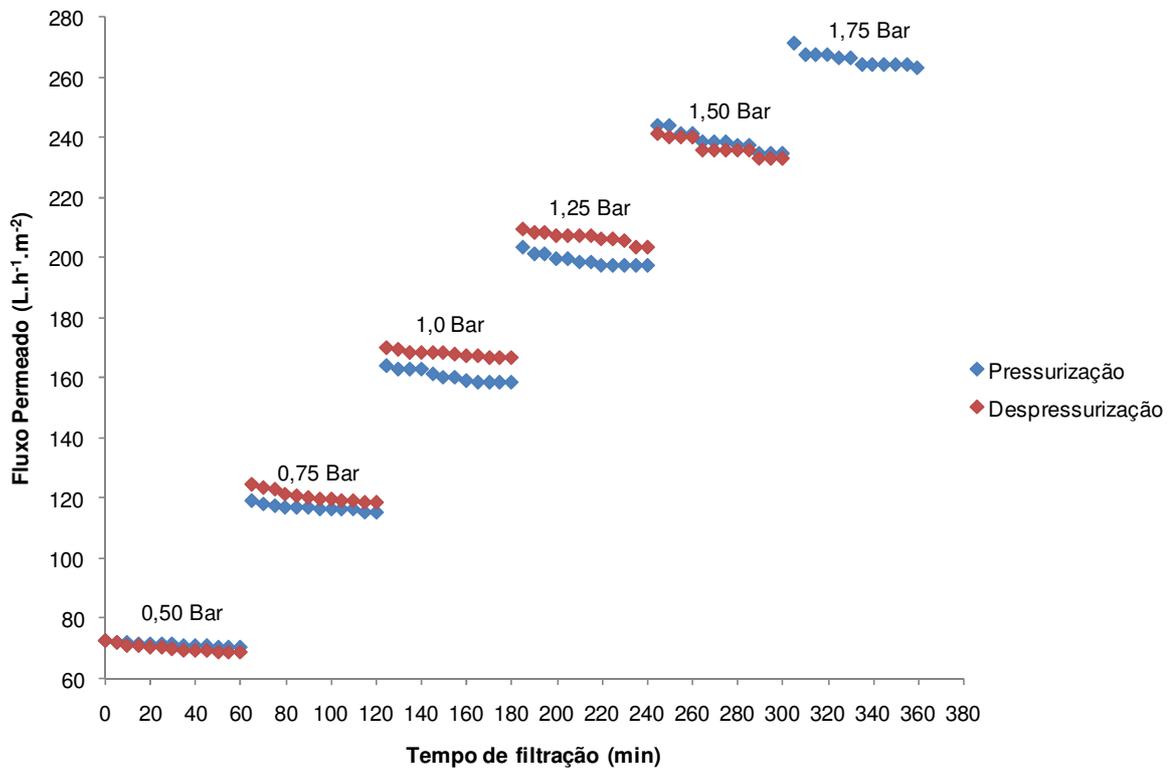


Figura 11 - Comportamento do fluxo permeado com água destilada em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo quando da pressurização e despressurização da membrana de microfiltração

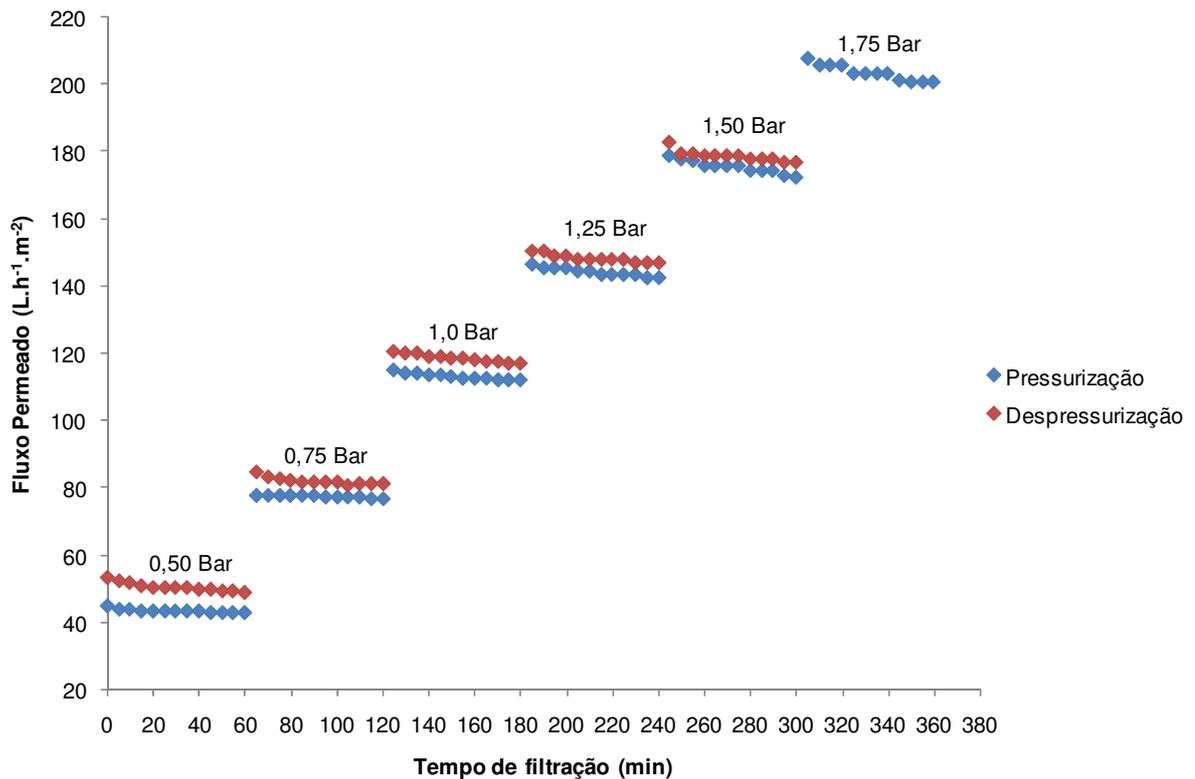


Figura 12 - Comportamento do fluxo permeado com água destilada em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo quando da pressurização e despressurização da membrana de ultrafiltração

Os resultados indicam que tanto a membrana de microfiltração quanto a membrana de ultrafiltração praticamente não tiveram redução de fluxo, demonstrando a ausência da influência dos fatores: entupimento de poros, incrustação e polarização da concentração. Além disso, para as duas membranas avaliadas, o fenômeno de histerese e/ou compactação do fluxo permeado foi pequeno, indicando boa reversibilidade, sendo verificado ainda, aumento de fluxo permeado quando da despressurização das membranas de microfiltração e ultrafiltração. Este pequeno aumento pode indicar uma pequena alteração na estrutura do polímero devido a vazão.

Nas Figuras 13 e 14 estão ilustrados os resultados de permeabilidade e variação do fluxo estacionário de água destilada de acordo com a variação do diferencial de pressão (pressurização e despressurização) aplicado sobre as membranas.

É notável, inicialmente, a variação linear do fluxo permeado quando da pressurização da membrana. Os resultados retratam também um aumento da

permeabilidade quando da reversibilidade (despressurização) da membrana às condições iniciais.

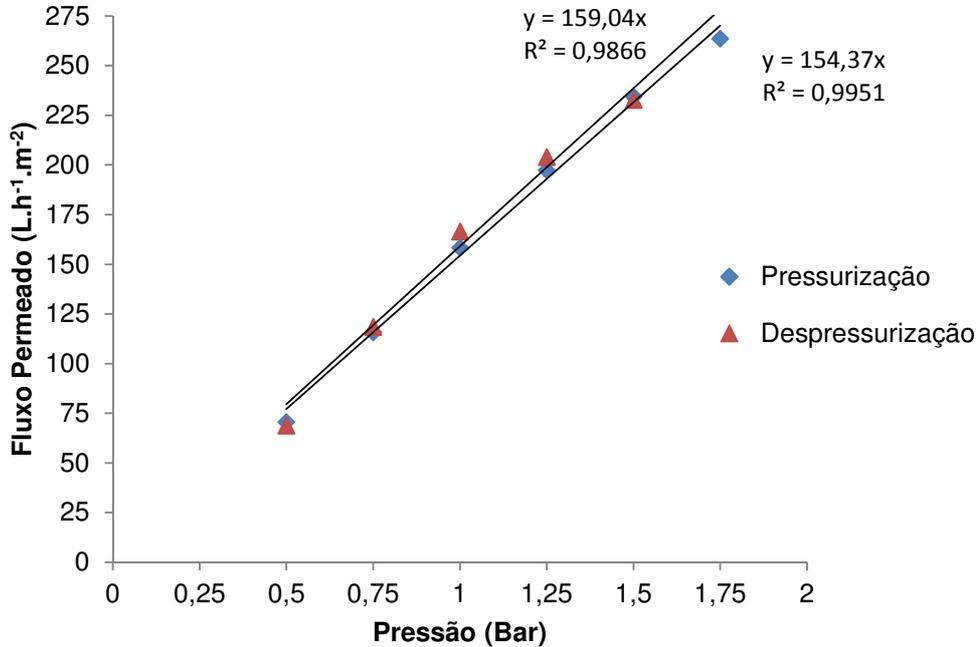


Figura 13 - Comportamento do fluxo permeado estacionário de água destilada em função do diferencial de pressão aplicado durante a pressurização e despressurização da membrana de microfiltração

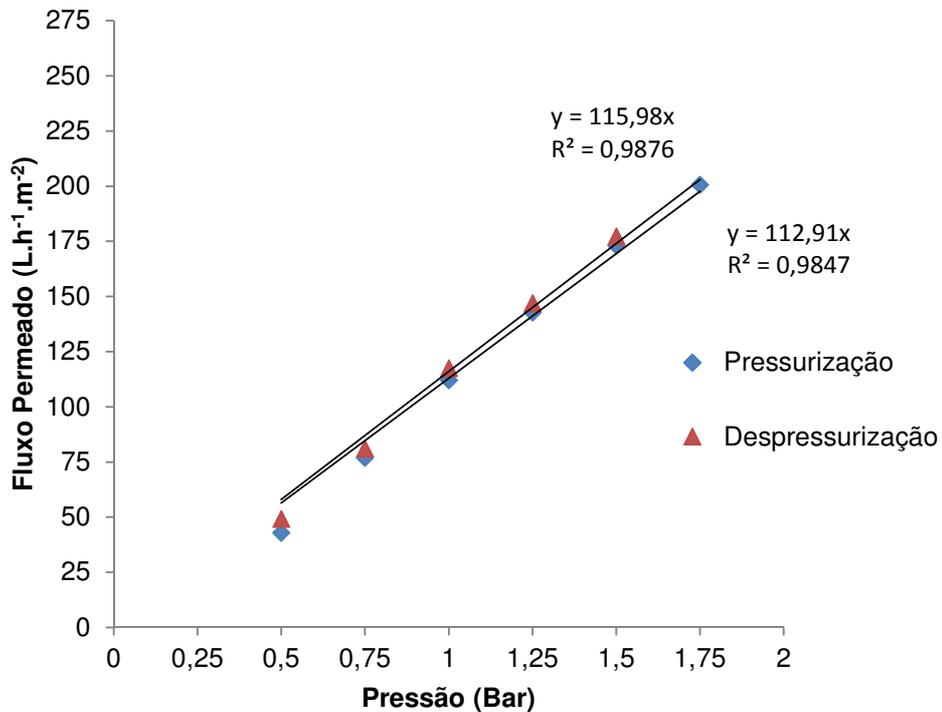


Figura 14 - Comportamento do fluxo permeado estacionário de água destilada em função do diferencial de pressão aplicado durante a pressurização e despressurização da membrana de ultrafiltração

Comparando os valores de permeabilidade encontrados durante a realização destes ensaios de microfiltração e ultrafiltração com os valores apresentados no manual de instalação, operação e manutenção do módulo de membranas, conforme Tabela 5, verifica-se que os valores de permeabilidade encontrados são ligeiramente menores, contudo, próximo ao recomendado pela literatura. Cabe ressaltar que nos testes de permeabilidade do manual foi utilizada água previamente microfiltrada. Com relação aos ensaios de permeabilidade realizados, foi utilizada água destilada.

4.2.2 Permeabilidade das Membranas com Amostras de Efluentes

De maneira análoga a etapa anterior, de permeabilidade com água destilada, as membranas foram avaliadas a partir dos mesmos fatores com amostras dos efluentes AIF e AFF, com o objetivo de examinar as influências sobre as membranas.

Nas Figuras 15 a 18 são apresentados os resultados dos fluxos permeados de amostras provenientes após o tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF) e após o tratamento terciário (flotador físico-químico – AFF), em função do tempo de filtração. Nestes ensaios, os fluxos foram medidos durante aproximadamente 100 minutos para cada uma das variações de pressão testadas até atingir um valor de fluxo estacionário. O diferencial de pressão transmembrana foi ajustado de 0,5 a 1,25 bar (pressurização) em intervalos de 0,25 bar e, posteriormente reduzido novamente a 0,5 bar (despressurização).

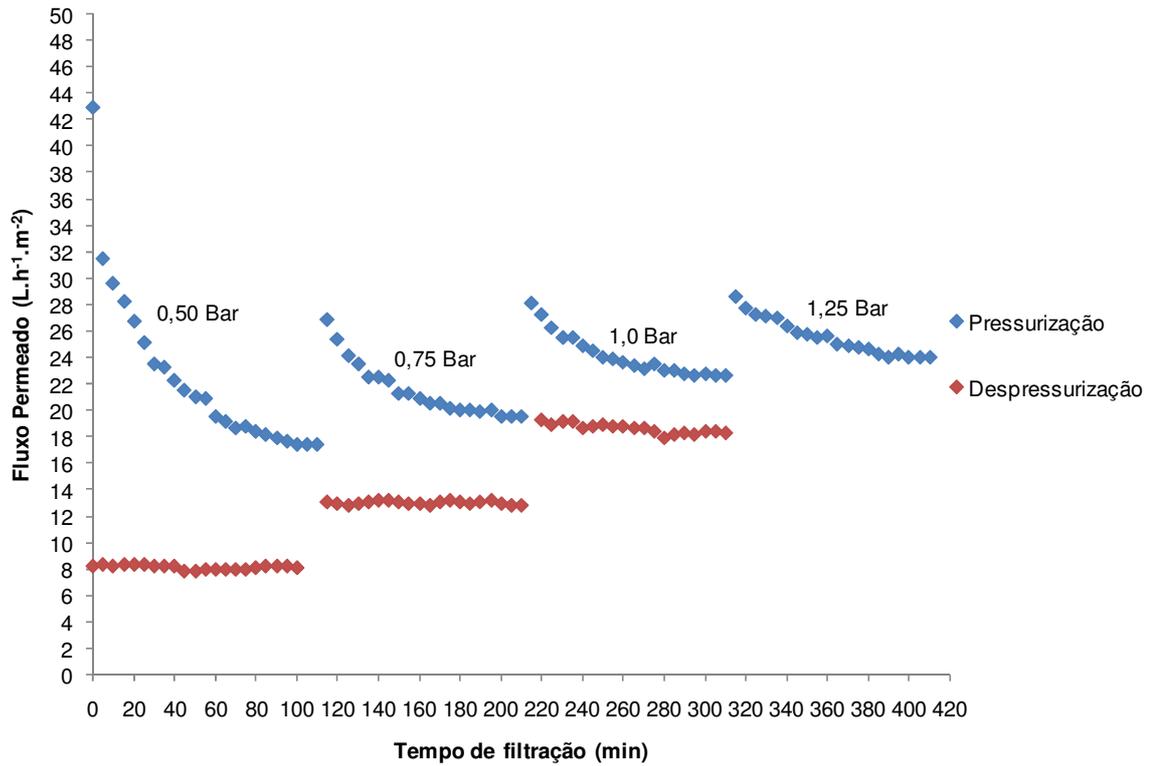


Figura 15 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente coletada após lagoa de decantação (AIF) em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo, para a membrana de microfiltração

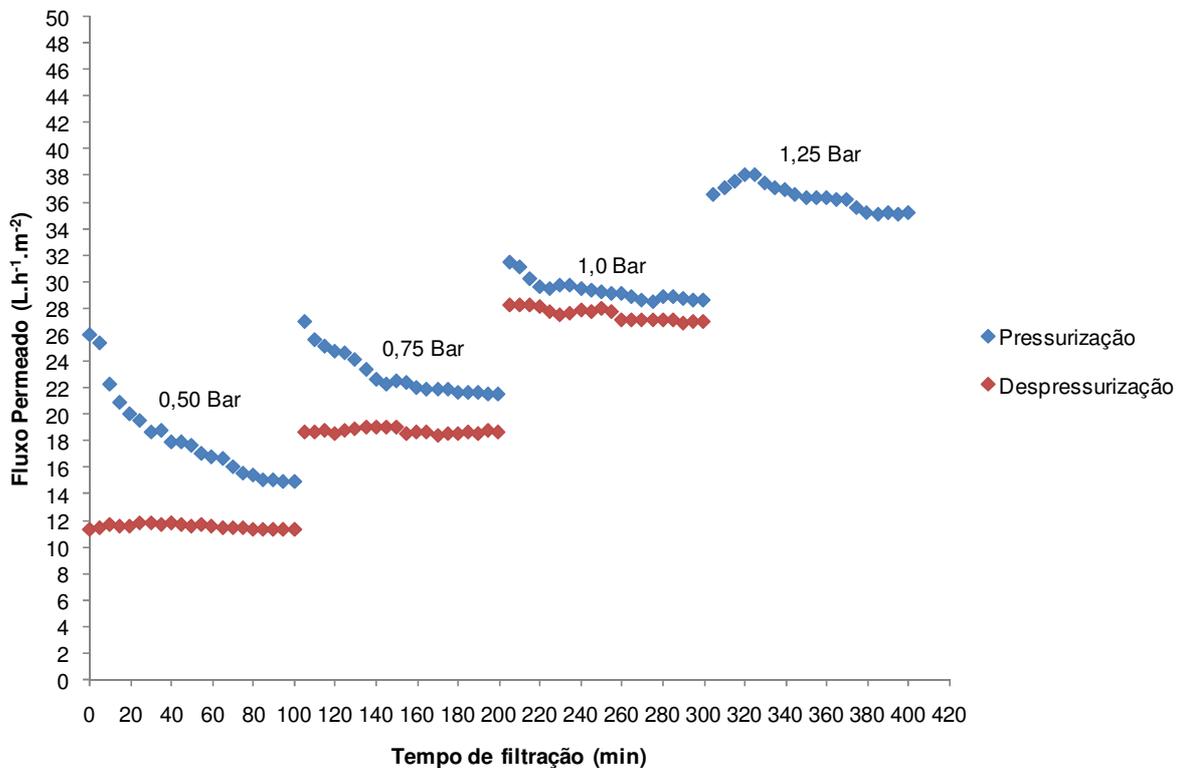


Figura 16 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente coletada após lagoa de decantação (AIF) em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo, para a membrana de ultrafiltração

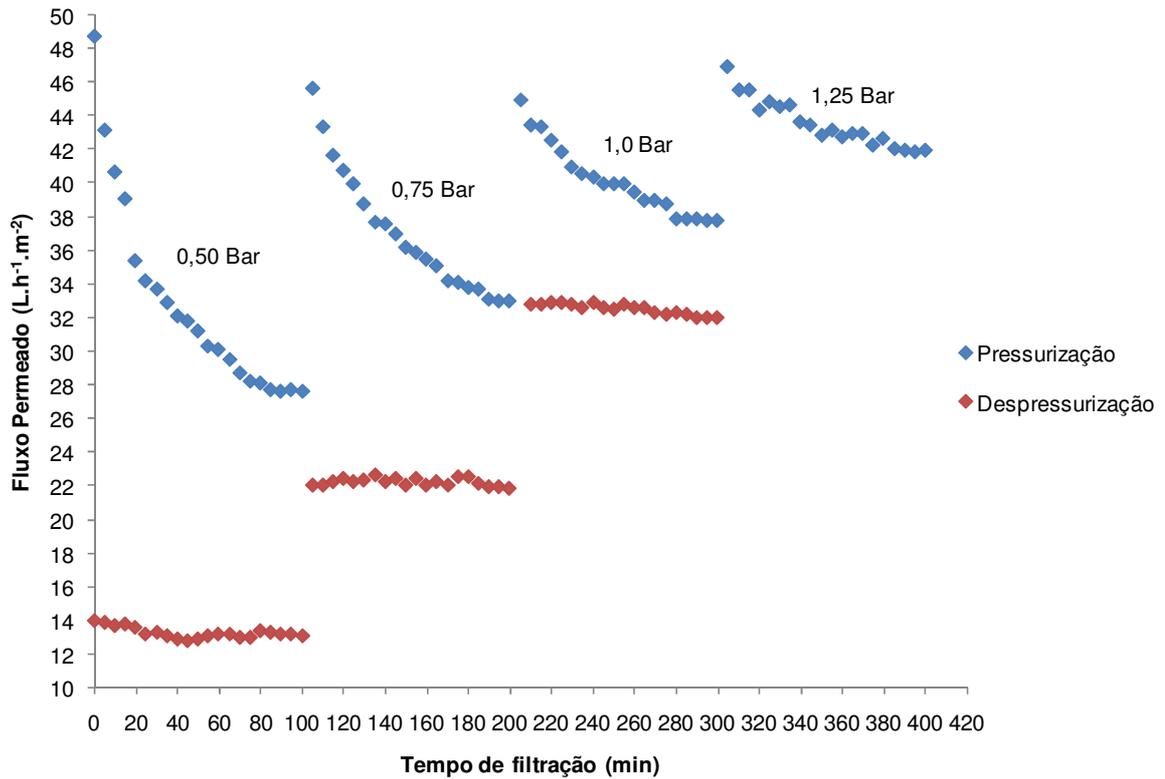


Figura 17 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente coletada após flotor físico-químico (AFF) em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo, para a membrana de microfiltração

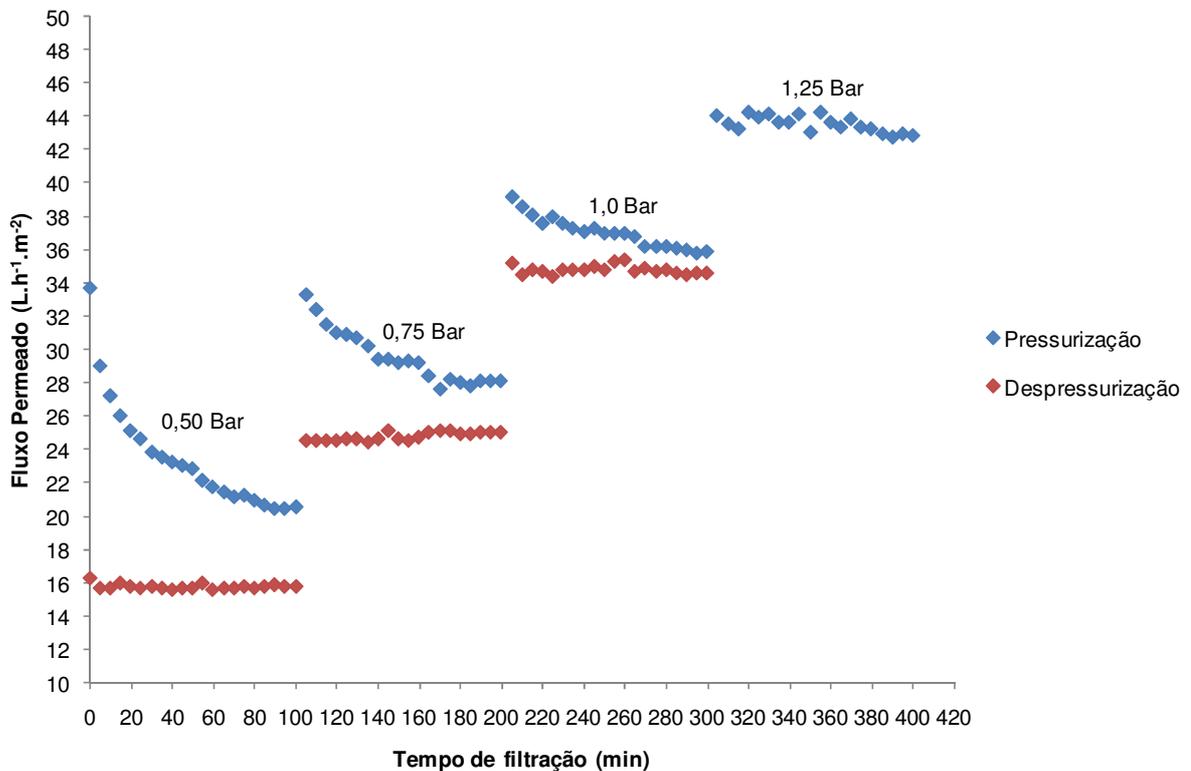


Figura 18 - Comportamento do fluxo permeado de amostra de efluente coletada após flotor físico-químico (AFF) em função do diferencial de pressão aplicado ao longo do tempo, para a membrana de ultrafiltração

Os resultados apontam que a redução do fluxo permeado com amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) e após o flotador físico-químico (AFF) é significativa quando comparados com os valores encontrados nos ensaios onde foi avaliada a permeabilidade das membranas com água destilada, indicando que as características das amostras de efluentes utilizadas na alimentação dos ensaios favorecem a ocorrência de incrustação e formação de uma película sobre a superfície das membranas, possibilitando fenômenos como a colmatação e polarização da concentração.

As Figuras 19 e 20 ilustram os resultados do comportamento do fluxo estacionário de água destilada e de amostras de efluentes após a lagoa de decantação e após o flotador físico-químico, em função da variação do diferencial de pressão, utilizando condições similares dos testes realizados com água destilada. Os resultados, análogos aos ensaios utilizando apenas água destilada, mostram que a variação do fluxo ocorre de forma linear e permitem avaliar, analisando a inclinação das retas encontradas, a permeabilidade das membranas com amostras de efluentes.

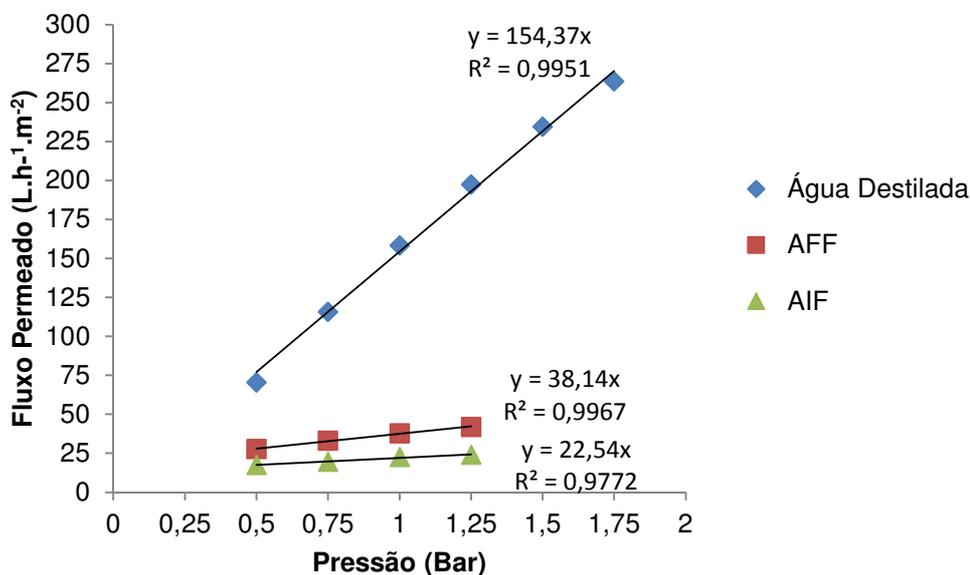


Figura 19 - Comportamento do fluxo permeado estacionário de água destilada, amostra de efluente após o flotador físico-químico (AFF) e de amostra de efluente após a lagoa de decantação (AIF) em função do diferencial de pressão aplicado à membrana de microfiltração

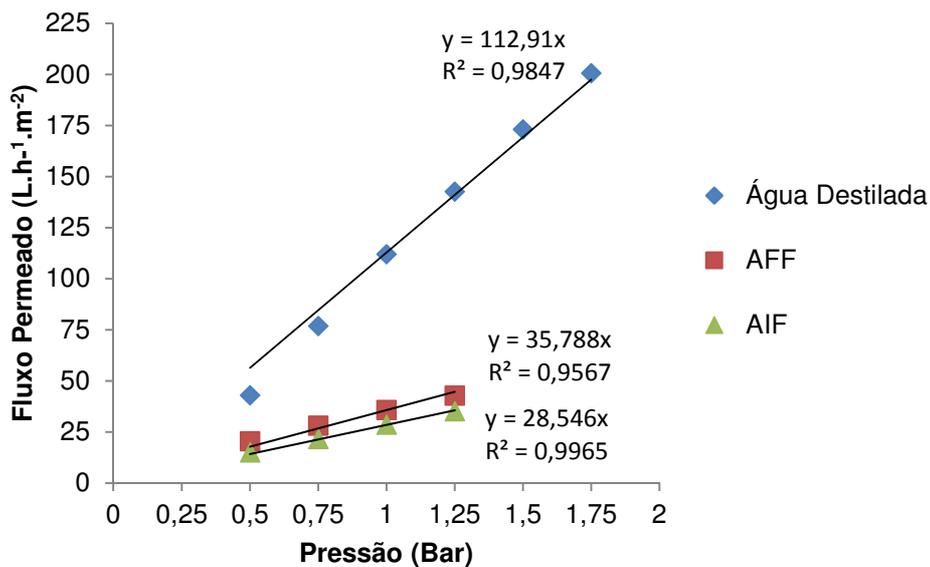


Figura 20 - Comportamento do fluxo permeado estacionário de água destilada, amostra de efluente após o flutuador físico-químico (AFF) e de amostra de efluente após a lagoa de decantação (AIF) em função do diferencial de pressão aplicado à membrana de ultrafiltração

Na Tabela 8 é apresentada uma comparação dos valores de permeabilidade das membranas durante a pressurização e despressurização com água destilada e com amostras de efluentes coletadas após a lagoa de decantação e após o flutuador físico-químico. Pode ser observada também a redução das permeabilidades comparadas com os valores observados com água destilada durante a pressurização, além da variação da permeabilidade de amostras de efluentes. As permeabilidades foram calculadas usando as inclinações das retas obtidas dos pontos dos gráficos das Figuras 19 e 20.

Tabela 8 - Permeabilidade das membranas com água destilada e com amostras de efluentes
Permeabilidade das Membranas (L h⁻¹ m⁻² bar⁻¹)

Memb.	Água Dest. Pres.	Água Dest. Despres.	Redução (%)*	AFF	Redução (%)*	AIF	Redução (%)*	Varição (%)**
MF 128	154,37	159,04	- 3%	38,14	75,3%	22,54	85,4%	40,9%
UF 162	112,91	115,98	- 2,6%	35,78	68,3%	28,54	74,7%	20,2%

* Redução em relação à permeabilidade com água destilada durante a pressurização

** Variação da permeabilidade de amostras coletadas após a lagoa de decantação e após flutuador físico-químico

Os resultados apresentados na Tabela 8 demonstram que a membrana de microfiltração (MF 128) apresenta maior permeabilidade quando comparada com a membrana de ultrafiltração (UF 162), quando utilizou-se água destilada e amostras de efluentes coletadas após o flotor físico-químico, para a realização dos ensaios. Contudo, para amostras de efluentes coletadas após a lagoa de decantação, com a ultrafiltração (UF 162) foi obtido maior permeabilidade, fato também observado pela variação da permeabilidade de amostras de efluentes coletadas em ambos os pontos. Com relação a redução da permeabilidade, quando foram realizados ensaios com água destilada e amostras de efluentes, a ultrafiltração apresentou menor percentual de redução.

4.3 COMPORTAMENTO DO FLUXO PERMEADO NOS TRATAMENTOS TESTADOS

Na Figura 21 é apresentado o comportamento do fluxo permeado comparando todos os tratamentos testados.

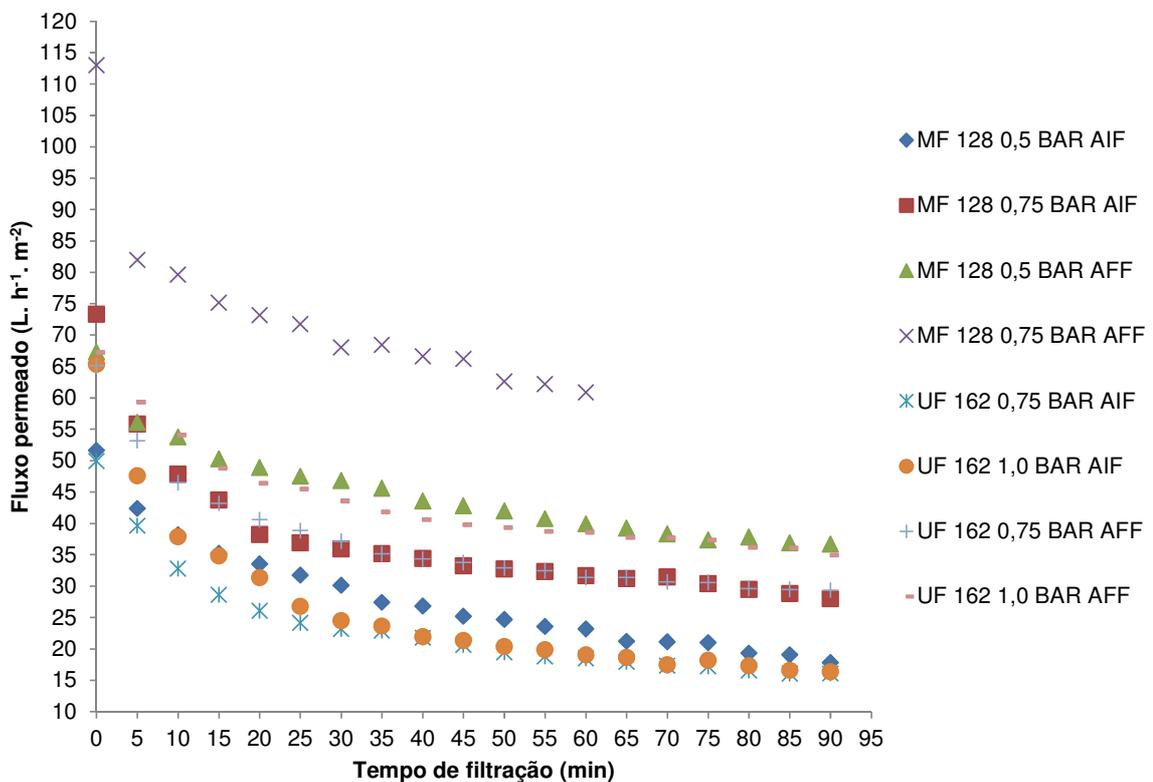


Figura 21 - Comportamento do fluxo permeado de todos os tratamentos testados (AIF = Amostra no Início do Flotador; AFF = Amostra no Final do Flotador)

A redução no fluxo permeado em função do tempo de filtração se ajusta a uma curva exponencial, típica de processos de filtração por membranas, sobretudo microfiltração e ultrafiltração.

A queda no fluxo permeado é atribuída a fatores como: incrustação (*fouling*) e/ou bloqueio de poros da membrana, polarização por concentração e aumento da concentração na corrente de alimentação devido o retorno da corrente do retentado (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001; HABERT et al., 2006; BENÍTEZ et al., 2008; ACERO et al., 2010).

Segundo Petrus (1997), geralmente, a resistência da camada de incrustação ao fluxo permeado será maior quando a massa molar da substância formadora da incrustação for maior, além disso, quanto menor a porosidade, maior sua interação com a membrana, e maior área específica deste depósito.

Segundo Habert et al. (2006), em processos de separação por membranas com escoamento tangencial, comumente ocorre a queda inicial no fluxo permeado, com posterior equilíbrio no decorrer do processo.

A diminuição do fluxo permeado e a incrustação de membranas de microfiltração, na maioria das vezes, acontecem mais rapidamente do que em membranas de ultrafiltração. Esse aumento de incrustação ocorre porque os diâmetros dos poros nas membranas de microfiltração são maiores, e também, devido à entrada de partículas com dimensões variadas (BAKER, 2004).

O percentual médio de redução de fluxo permeado para a microfiltração e a ultrafiltração utilizando amostras de efluentes após tratamento secundário (lagoa de decantação - AIF) pode ser observado na Tabela 9.

Tabela 9 - Percentual médio de redução de fluxo permeado para a microfiltração e a ultrafiltração com amostras de efluentes após a lagoa de decantação (AIF)

Tempo (min)	MF 128		UF 162	
	Fluxo (L h ⁻¹ m ⁻²) Pressão 0,5 Bar	Fluxo (L h ⁻¹ m ⁻²) Pressão 0,75 Bar	Fluxo (L h ⁻¹ m ⁻²) Pressão 0,75 Bar	Fluxo (L h ⁻¹ m ⁻²) Pressão 1,0 Bar
0	52	73	50	65
60	23	32	18	19
90	18	28	16	16
% Redução 60 min	55	57	63	71
% Redução 90 min	65	62	68	75

De maneira geral, tanto para a microfiltração quanto para a ultrafiltração, um aumento na pressão operacional ocasiona maior redução percentual no fluxo permeado até os 60 minutos de filtração, posteriormente, verifica-se uma sensível estabilização no fluxo permeado, sobretudo para a ultrafiltração.

Comparando-se a microfiltração com a ultrafiltração, verifica-se que a redução de fluxo permeado é maior na ultrafiltração. Isso ocorre porque o diâmetro dos poros das membranas de microfiltração são maiores que nas membranas de ultrafiltração, proporcionando um maior fluxo permeado.

O fluxo permeado é condicionado a porosidade da membrana. Nas membranas de microfiltração a porosidade superficial varia de 5 a 50%, enquanto que nas membranas de ultrafiltração a faixa de variação é menor, de 0,1 a 1%, isso porque as membranas de ultrafiltração são muito menos porosas (HABERT et al., 2006).

O percentual médio de redução de fluxo permeado para a microfiltração e a ultrafiltração utilizando amostras de efluentes após o tratamento terciário (flotador físico-químico – AFF) pode ser observado na Tabela 10.

Tabela 10 - Percentual médio de redução de fluxo permeado para a microfiltração e a ultrafiltração com amostras de efluentes após flotador físico-químico (AFF)

Tempo (min)	MF 128		UF 162	
	Fluxo (L h ⁻¹ m ⁻²)			
	Pressão 0,5 Bar	Pressão 0,75 Bar	Pressão 0,75 Bar	Pressão 1,0 Bar
0	67	113	65	67
60	40	61	31	39
90	37	-	29	35
% Redução 60 min	41	46	52	43
% Redução 90 min	45	-	55	48

Quando amostras de efluentes coletadas após o flotador físico-químico (AFF) foram microfiltradas até os 60 minutos de filtração, observa-se que um aumento na pressão operacional aumenta a redução do fluxo permeado, para a microfiltração, resultado diferente ao encontrado para a ultrafiltração.

De maneira geral, comparando-se a microfiltração com a ultrafiltração de amostras após tratamento secundário e após tratamento terciário, a redução do fluxo

é menor com amostras que já passaram por pós-tratamento, onde as concentrações de poluentes são menores, pois no flotador físico-químico ocorre a provável remoção de colóides e sólidos em suspensão.

4.3.1 Fluxo Permeado nos Tratamentos Utilizando Microfiltração

Na Figura 22 é apresentado o comportamento do fluxo permeado comparando os tratamentos nos quais foi utilizada a membrana de microfiltração em amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação e após o flotador físico-químico.

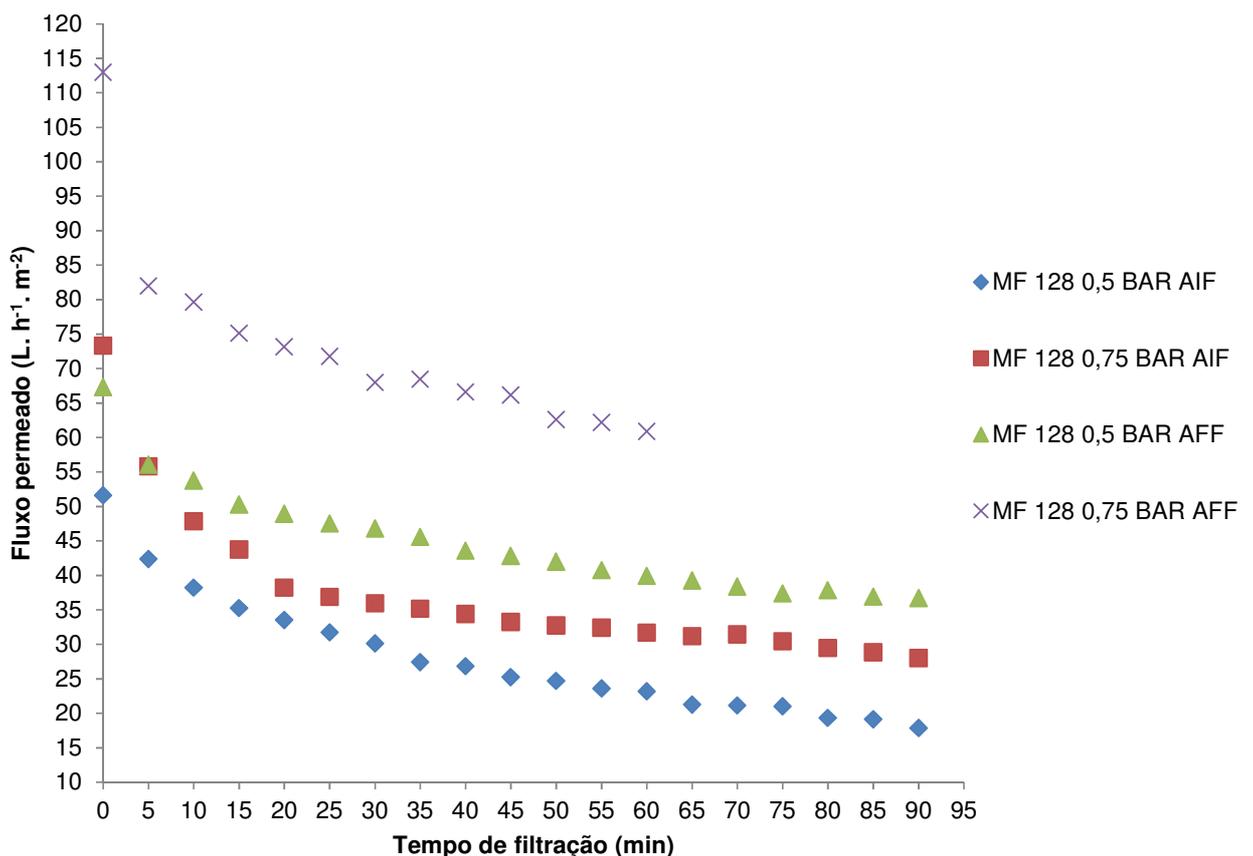


Figura 22 - Comportamento do fluxo permeado nos tratamentos utilizando microfiltração

O maior fluxo permeado até os 60 minutos de filtração foi aquele onde utilizou-se maior pressão de operação (0,75 bar) com amostra coletada após o flotador físico-químico (AFF). Ao passo que, o menor fluxo permeado foi detectado

quando utilizou-se efluente coletado após a lagoa de decantação (AIF) com menor pressão (0,5 bar).

A queda no fluxo permeado pode ser explicada, pelo fato de que os efluentes coletados após a lagoa de decantação possuem maior quantidade de sólidos e macromoléculas que causam uma maior incrustação.

Quando utiliza-se maior pressão (0,75 bar) para filtração de efluentes coletados após a lagoa de decantação, obtêm-se um maior fluxo permeado. Assim, os dados corroboram que, indiferente o ponto de coleta de efluentes, é preferível utilizar membranas de microfiltração com maior pressão operacional para otimização no fluxo permeado.

Habert et al., (2006) explicam que, o acréscimo da pressão produz um aumento de fluxo permeado, o que se verifica para pressões mais baixas. Contudo, o aumento de fluxo permeado ocasiona maior concentração dos componentes retidos próxima à superfície da membrana, o que proporciona a queda no fluxo permeado. De tal modo, a partir de certo valor de pressão, um aumento superior desta corresponde a um aumento paralelo na resistência ao fluxo do solvente, pela polarização da concentração. A decorrência é que o fluxo permeado permanece o mesmo com o acréscimo da pressão. Este valor de fluxo estável com a pressão denomina-se fluxo limite. Pela questão prática, indiferente o sistema de membrana, este deve ser operado em pressões inferiores a menor pressão que leve o fluxo permeado ao seu valor limite. O valor desta pressão está sujeito ao nível de polarização do sistema, ou seja, depende da concentração de soluto da alimentação, da capacidade seletiva da membrana para o soluto em questão e da hidrodinâmica de escoamento.

Além disso, é oportuno observar que, na microfiltração ocorre uma queda considerável no fluxo permeado no início da operação, conforme observado por outros autores.

Andrade et al., (2001) ao microfiltrar efluente sanitário tratado através do processo de lodos ativados, constataram que o fluxo do permeado, geralmente, no início do ensaio de filtração diminui ligeiramente até um certo valor, originado pela formação de uma camada nas proximidades da parede da membrana. Observaram ainda que, a redução do fluxo permeado pode continuar, devido as características da solução a ser filtrada, além da natureza química e física (tamanho dos poros, distribuição dos poros, etc) da membrana usada. A diminuição do fluxo permeado

com o passar do tempo de filtração também pode estar relacionada com a colmatação e compactação resultantes da pressão operacional aplicada às membranas, além de fenômenos de polarização por concentração e formação da camada de gel.

O início da estabilização do fluxo foi verificado, sobretudo, a partir dos 60 minutos de operação da unidade de microfiltração. Silva et al. (2011), ao microfiltrar efluente de abatedouro de bovinos com membrana com as mesmas características da utilizada neste estudo, atribui essa estabilização do fluxo ao efeito de arraste (regime turbulento) ocasionado pelo escoamento tangencial do efluente na superfície da membrana, que retira sucessivamente partículas que se aderem a membrana, retornando-as continuamente ao tanque de alimentação do módulo de filtração.

4.3.2 Fluxo Permeado nos Tratamentos Utilizando Ultrafiltração

Na Figura 23 é apresentado o comportamento do fluxo permeado comparando os tratamentos nos quais foi utilizada a membrana de ultrafiltração em amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação e após o flotador físico-químico.

Os resultados da ultrafiltração são análogos aos de microfiltração, ou seja, o maior fluxo permeado é obtido quando utiliza-se amostras de efluente coletadas após o flotador físico químico e com maior pressão aplicada.

Quando amostras coletadas após a lagoa de decantação são ultrafiltradas sob duas pressões (0,75 e 1,0 bar), verifica-se um fluxo inicial de permeado maior quando utiliza-se maior pressão, contudo, os valores de fluxo permeado praticamente se igualam após um período de filtração de 30 minutos, provavelmente devido a transferência de massa.

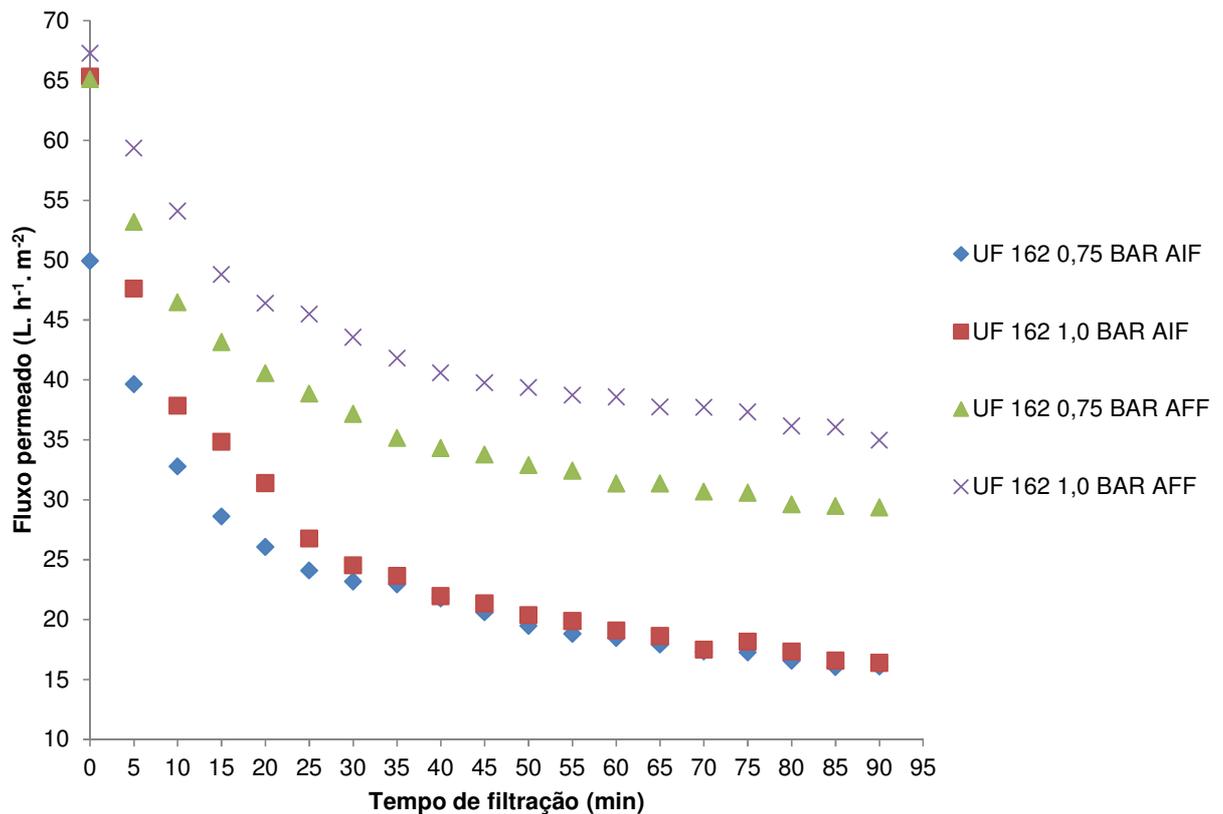


Figura 23 - Comportamento do fluxo permeado nos tratamentos utilizando ultrafiltração

4.4 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO NOS TRATAMENTOS TESTADOS

4.4.1 Eficiência de Remoção para a Microfiltração e Ultrafiltração com Amostras após Lagoa de Decantação

Os resultados de eficiência de remoção para os parâmetros turbidez, condutividade e salinidade para o flotor físico-químico, microfiltração e ultrafiltração utilizando amostras de efluentes após o tratamento secundário (lagoa de decantação - AIF) estão na Tabela 11.

Para os três parâmetros analisados, tanto a microfiltração quanto a ultrafiltração foram mais eficientes na remoção, quando comparadas com o atual sistema de pós-tratamento da agroindústria (flotor físico-químico).

Tabela 11 - Eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos utilizando flotador físico-químico, microfiltração e ultrafiltração com amostras de efluentes após lagoa de decantação (AIF)

Tratamento (Tabela 3)	Percentual de remoção para os parâmetros (%)		
	Turbidez (UNT)	Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Salinidade PSU)
Flotador*	58,5	<1	1,5
1 – MF 128 0,5 bar	98	11	3
2 – MF 128 0,75 bar	98	14	3
3 – UF 162 0,75 bar	91	7	8
4 – UF 162 1,0 bar	93	8	9

* Dados obtidos pela comparação entre amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) e após flotador físico-químico (AFF)

A turbidez apresentou maior eficiência de remoção utilizando a microfiltração. Comparando-se os tratamentos utilizando microfiltração com os tratamentos empregando ultrafiltração, verifica-se que um acréscimo de pressão para a ultrafiltração, resulta em maior eficiência de remoção.

Para o parâmetro condutividade, a microfiltração foi mais eficiente que a ultrafiltração. Comparando-se os tratamentos testados, é notável que um acréscimo de pressão proporciona maior eficiência de remoção, tanto para a microfiltração, quanto para a ultrafiltração.

Com relação a salinidade, os tratamentos empregando ultrafiltração foram mais eficientes, devido ao fato da membrana de ultrafiltração conter poros de menor diâmetro que a membrana de microfiltração. Ao comparar-se a microfiltração com a ultrafiltração, constata-se que um aumento de pressão para a ultrafiltração, resulta em maior eficiência de remoção.

4.4.2 Eficiência de Remoção Complementar para a Microfiltração e Ultrafiltração com Amostras após Flotador Físico-químico

Os resultados de eficiência de remoção complementar para os parâmetros turbidez, condutividade e salinidade para o flotador físico-químico, microfiltração e ultrafiltração utilizando amostras de efluente após tratamento terciário (flotador físico-químico - AFF) estão na Tabela 12.

Tabela 12 - Eficiência de remoção dos parâmetros físico-químicos utilizando flotador físico-químico, microfiltração e ultrafiltração com amostras de efluentes após flotador físico-químico (AFF)

Tratamento (Tabela 3)	Percentual de remoção para os parâmetros (%)		
	Turbidez (UNT)	Condutividade ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Salinidade (PSU)
Flotador*	58,5	<1	1,5
5 – MF 128 0,5 bar	83	1	3
6 – MF 128 0,75 bar	99	<1	2
7 – UF 162 0,75 bar	99	2	<1
8 – UF 162 1,0 bar	99	1	2

* Dados obtidos pela comparação entre amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) e após flotador físico-químico (AFF)

Para os três parâmetros analisados, tanto a microfiltração quanto a ultrafiltração promoveram uma remoção complementar ao atual sistema de pós-tratamento da agroindústria (flotador físico-químico).

Para o parâmetro turbidez, a eficiência de remoção complementar foi de aproximadamente 99% utilizando a microfiltração com pressão de 0,75 bar. Quando foi utilizado a ultrafiltração, os resultados foram iguais aos de microfiltração, para as duas pressões de ultrafiltração testadas.

A condutividade apresentou eficiência de remoção complementar de 2% para a ultrafiltração com pressão de 0,75 bar.

Com relação ao parâmetro salinidade, a eficiência de remoção complementar foi de aproximadamente 3% para a microfiltração com pressão de 0,5 bar. Para a ultrafiltração, a eficiência de remoção complementar foi de aproximadamente 2% com pressão de 1,0 bar.

4.4.3 Eficiência de Remoção Comparando a Microfiltração com a Ultrafiltração

A turbidez está relacionada com a concentração de sólidos suspensos presentes nas amostras de efluente. Quando utilizou-se amostras de efluentes após tratamento secundário (lagoa de decantação - AIF), a microfiltração foi mais eficiente, comparada a ultrafiltração (Tabela 11).

Entretanto, quando a ultrafiltração foi empregada em amostras com menor concentração de sólidos suspensos (após flotador físico-químico – AFF), obteve-se uma eficiência de remoção média de aproximadamente 99% (Tabela 12), sendo superior ao tratamento empregando microfiltração com menor pressão. Isso pode ser explicado pelo fato das amostras de efluentes terem sido submetidas a um pós-tratamento, no caso flotador físico-químico, utilizando coagulante/floculante orgânico.

Neves (2014), ao avaliar e comparar o desempenho da microfiltração (membranas de polieterimida) e ultrafiltração (membranas de polietersulfona) no pós-tratamento de efluente de uma indústria de papel e celulose, obtiveram remoção de 99% para a turbidez, em ambos os tratamentos estudados.

Cabe destacar ainda, que alguns fenômenos podem contribuir para a incrustação e diminuição da eficiência de remoção, são eles: adsorção das moléculas de soluto na superfície da membrana, entupimento de poros por moléculas ou partículas em suspensão e depósito de material em suspensão sobre a superfície da membrana (SCNHEIDER e TSUTIYA, 2001; HABERT et al., 2006).

A microfiltração e a ultrafiltração apresentaram baixa eficiência de remoção para os parâmetros condutividade e salinidade, porque estes processos de separação por membranas são indicados para remoção, sobretudo, de sólidos suspensos e compostos de alto peso molecular (MIERZWA E HESPANHOL, 2005; BENÍTEZ et al., 2008; TELLES e COSTA, 2010).

A eficiência de microfiltração e da ultrafiltração está relacionada com a diferença de tamanho do poro da membrana e a partícula a ser removida (ECKENFELDER, 2000; SIVIERI, 2010).

Pelo fato das amostras de efluentes utilizadas conterem compostos de baixo peso molecular, para maiores eficiências de remoção da salinidade e condutividade, a nanofiltração e a osmose inversa devem ser empregadas. De acordo com Habert et al. (2006), no caso da ultrafiltração, a remoção é eficiente quando existe uma diferença de pelo menos 10 vezes no tamanho das espécies envolvidas.

Oliveira (2010), ao avaliar o desempenho do processo de ultrafiltração no tratamento de água para o abastecimento humano, alcançou rejeição de $2,2 \pm 1,3\%$ para a condutividade elétrica.

Ribeiro (2002), ressalta que a combinação de microfiltração ou ultrafiltração, para a remoção de turbidez, sólidos e bactérias, com a nanofiltração, para a

remoção de contaminantes orgânicos e inorgânicos traços, podem ser utilizadas no tratamento de águas para o reúso.

4.5 COMPORTAMENTO DOS PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS DURANTE A INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL

Preliminarmente os parâmetros físico-químicos: pH, turbidez, condutividade e salinidade foram monitorados durante a realização de cada ensaio de filtração por membranas, em intervalos de tempo de 30 minutos. Para todos os parâmetros físico-químicos caracterizados percebeu-se condições semelhantes para a filtração por membranas, indiferente do tratamento utilizado (tratamentos de 1 a 8, conforme Tabela 3), não levando-se em consideração os fatores de concentração. Os tratamentos utilizando microfiltração (MF 128) com pressão de 0,75 bar e ultrafiltração (UF 162) com pressão de 1,0 bar, com amostras de efluentes após o tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF), foram previamente selecionados, pois nestes os parâmetros apresentaram variação na concentração. Nestes ensaios houve um maior fluxo permeado.

Nas Tabelas 13 e 14 apresenta-se o comportamento dos parâmetros físico-químicos: pH, turbidez, condutividade e salinidade, em função do tempo de filtração, para os tratamentos empregando microfiltração (MF 128 0,75 bar, Tabela 13) e ultrafiltração (UF 162 1,0 bar, Tabela 14), com amostras de efluentes coletadas após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF).

Tabela 13 - Comportamento dos parâmetros físico-químicos em função do tempo de filtração, para a microfiltração com amostras de efluentes coletadas após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF)

Parâmetro	Unidade	Tempo de filtração (min)				
		Alimentação	0	30	60	90
pH	-	7,75	7,86	8,0	8,18	8,34
Turbidez	UNT	40	1	1	1	1
Condutividade	$\mu\text{S cm}^{-1}$	3738	3629	3789	3230	3885
Salinidade	PSU	1,98	1,92	2,01	1,69	2,06

Tabela 14 - Comportamento dos parâmetros físico-químicos em função do tempo de filtração, para a ultrafiltração com amostras de efluentes coletadas após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF)

Parâmetro	Unidade	Tempo de filtração (min)				
		Alimentação	0	30	60	90
pH	-	7,63	7,8	8,18	8,29	8,33
Turbidez	UNT	33	2	3	1	3
Condutividade	$\mu\text{S cm}^{-1}$	4180	3730	3915	3886	3846
Salinidade	PSU	2,23	1,97	2,07	2,05	2,03

De maneira geral, o comportamento dos parâmetros físico-químicos das amostras de efluentes microfiltradas e ultrafiltradas após o tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF), apresentaram pequena variação ao longo do tempo de filtração, fato típico dos processos de separação por membranas.

Para o parâmetro pH, os valores aumentaram do início ao fim dos ensaios de filtração com membranas, tanto para a microfiltração, quanto para a ultrafiltração.

De acordo com Oliveira et al. (2010), a variação do pH pode ocorrer devido a reação entre compostos ácidos presentes nas amostras de efluentes e o material que compõe a membrana.

Com relação ao parâmetro turbidez, para a microfiltração não houve variação na concentração. Com relação a ultrafiltração, a variação foi muito baixa durante a investigação experimental.

Os parâmetros salinidade e condutividade não apresentaram uniformidade durante o tempo de filtração, contudo, para a ultrafiltração verifica-se menor remoção no início, até os 30 minutos de filtração, seguido de um pequeno aumento na remoção até o final da filtração, para ambos os parâmetros. Para a microfiltração, a condutividade e a salinidade tendem a aumentar com o tempo de filtração até os 30 minutos, quando sofrem uma elevada eficiência de remoção, no período de 30 a 60 minutos, voltando a diminuir, de maneira acentuada, a eficiência de remoção dos 60 aos 90 minutos de filtração.

Costanzi et al. (2012), ao realizarem um estudo sobre o tratamento de águas residuárias municipais por sistema biológico de lodos ativados convencional seguido de tratamento com membranas de ultrafiltração, visando o reúso de água em sistemas industriais, monitoraram algumas variáveis físico-químicas ao longo da realização dos ensaios de ultrafiltração. Os autores também encontraram

comportamento irregular para alguns parâmetros, sobretudo, para o pH, turbidez e condutividade.

Bezerra e Matsumoto (2011), ao avaliarem o desempenho de um biorreator com membranas de ultrafiltração para o tratamento de água residuárias industriais, visando à remoção de matéria orgânica carbonácea e nitrogenada, encontraram um perfil de eficiência para a demanda química de oxigênio, nitrogênio total kjeldahl e nitrogênio total, que oscilou durante o período em que foi monitorado o biorreator com membranas.

Com relação as Tabelas 13 e 14 é possível identificar ainda dois aspectos importantes, o primeiro é uma maior eficiência de remoção dos parâmetros no instante zero, logo após a limpeza das membranas. O segundo ponto observado é o comportamento posterior dos parâmetros físico-químicos durante o período de filtração, apontando para uma tendência de obstrução ao longo da microfiltração e ultrafiltração.

4.6 EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO NOS TRATAMENTOS TESTADOS A PARTIR DOS FATORES DE CONCENTRAÇÃO

As coletas de amostras de permeado dos ensaios de filtração foram feitas nos fatores de concentração 1,0; 1,25; 1,50 e 1,75, tendo como alimentação amostras de efluentes coletadas após o tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF).

Quatro tratamentos foram testados na filtração por membranas, sendo dois para microfiltração (MF 128 0,5 bar e 0,75 bar – tratamentos 1 e 2 da Tabela 3) e dois para a ultrafiltração (UF 162 0,75 bar e 1,0 bar – tratamentos 3 e 4 da Tabela 3). Em cada tratamento foram feitas coletas de amostras de permeado nos fatores de concentração já descritos, conforme Figuras 24 e 25.

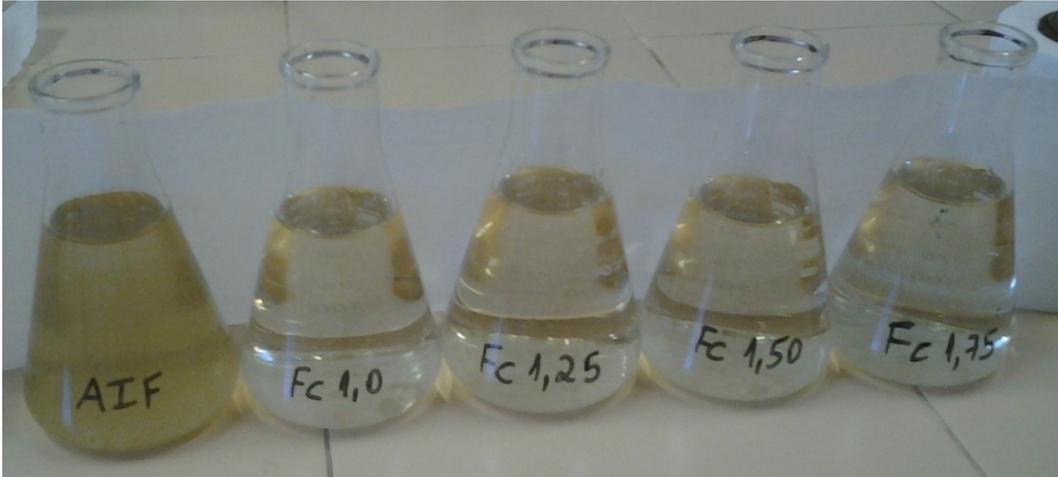


Figura 24 - Aspecto visual das amostras de efluentes microfiltradas



Figura 25 - Aspecto visual das amostras de efluentes ultrafiltradas

As características físico-químicas e as eficiências médias das amostras microfiltradas e ultrafiltradas, a partir dos fatores de concentração, para cada tratamento testado (Tabela 3), estão nas Tabelas 15 a 18.

Tabela 15 - Características físico-químicas e eficiência média das amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) microfiltradas com 0,5 bar de pressão – tratamento 1

Parâmetro	Unidade	Alimentação	Fatores de concentração				Eficiência (%)
			Fc 1,0	Fc 1,25	Fc 1,50	Fc 1,75	
pH	-	7,67	7,89	8,13	8,33	8,43	-
Turbidez	UNT	43	2	1	1	1	97
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	1602	1225	1496	1353	1679	10
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	1323	1097	1326	1222	1557	2
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	279	128	170	131	122	51
Condutividade	μS cm ⁻¹	3774	2750	3367	3384	3362	15
Salinidade	PSU	1,92	1,42	1,76	1,77	1,75	13
DQO	mg L ⁻¹	186	48	60	72	29	72
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	2,66	2,54	1,91	1,47	2,14	24

Tabela 16 - Características físico-químicas e eficiência média das amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) microfiltradas com 0,75 bar de pressão – tratamento 2

Parâmetro	Unidade	Alimentação	Fatores de concentração				Eficiência (%)
			Fc 1,0	Fc 1,25	Fc 1,50	Fc 1,75	
pH	-	7,67	7,75	8,07	8,20	8,29	-
Turbidez	UNT	43	2	1	1	1	97
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	1602	1047	1375	1322	1182	23
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	1323	979	1220	1287	1040	14
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	279	68	155	35	142	64
Condutividade	μS cm ⁻¹	3774	2626	3354	3311	3304	17
Salinidade	PSU	1,92	1,35	1,75	1,72	1,72	15
DQO	mg L ⁻¹	186	33	25	76	135	64
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	2,66	2,66	2,35	2,18	1,23	21

Comparando os dois tratamentos utilizando microfiltração com 0,5 e 0,75 bar de pressão, constata-se que um aumento na pressão operacional resulta em maior eficiência de remoção para os parâmetros sólidos totais, sólidos totais fixos e voláteis, condutividade e salinidade. Com relação a turbidez, essa não apresentou

variação na eficiência de remoção. Para os parâmetros DQO e nitrogênio amoniacal, o acréscimo de pressão resultou em uma pequena diminuição na eficiência de remoção, o que pode estar relacionado com os fenômenos de entupimento da membrana de microfiltração.

Tabela 17 - Características físico-químicas e eficiência média das amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) ultrafiltradas com 0,75 bar de pressão – tratamento 3

Parâmetro	Unidade	Alimentação	Fatores de concentração				Eficiência (%)
			Fc 1,0	Fc 1,25	Fc 1,50	Fc 1,75	
pH	-	7,67	7,88	8,24	8,24	8,38	-
Turbidez	UNT	43	4	4	9	6	87
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	1602	939	1628	1383	1502	15
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	1323	736	1273	1230	1351	13
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	279	203	355	153	151	23
Condutividade	μS cm ⁻¹	3774	2885	3410	3395	3392	13
Salinidade	PSU	1,92	1,49	1,78	1,77	1,76	11
DQO	mg L ⁻¹	186	32	42	49	48	77
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	2,66	1,17	0,56	0,76	0,77	69

Tabela 18 - Características físico-químicas e eficiência média das amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) ultrafiltradas com 1,0 bar de pressão – tratamento 4

Parâmetro	Unidade	Alimentação	Fatores de concentração				Eficiência (%)
			Fc 1,0	Fc 1,25	Fc 1,50	Fc 1,75	
pH	-	7,67	7,68	7,98	8,05	8,15	-
Turbidez	UNT	43	4	3	2	1	94
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	1602	1236	1519	1489	1459	11
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	1323	1102	1377	1353	1328	2
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	279	134	142	136	131	51
Condutividade	μS cm ⁻¹	3774	2769	3355	3347	3327	15
Salinidade	PSU	1,92	1,43	1,75	1,74	1,73	13
DQO	mg L ⁻¹	186	25	25	39	25	85
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	2,66	1,12	1,02	1,18	1,54	54

Comparando os dois tratamentos utilizando ultrafiltração com 0,75 e 1,0 bar de pressão, verifica-se que um aumento na pressão operacional resulta em maior eficiência de remoção para os parâmetros turbidez, sólidos totais voláteis, condutividade, salinidade e DQO. Para os parâmetros sólidos totais, sólidos totais fixos e nitrogênio amoniacal, o acréscimo de pressão resultou em diminuição na eficiência de remoção, o que pode estar relacionado com os fenômenos de entupimento da membrana de ultrafiltração.

Comparando a microfiltração com a ultrafiltração, constata-se que a microfiltração foi mais eficiente para a remoção dos parâmetros: turbidez, sólidos totais voláteis e condutividade, enquanto que a ultrafiltração foi mais eficiente para a remoção da demanda química de oxigênio e nitrogênio amoniacal.

Andrade et al. (2014), esclarecem que a remoção de compostos de baixa massa molar através de membranas poliméricas de microfiltração pode ser explicada pela formação do biofilme e/ou membrana dinâmica, sobre a superfície da membrana. Essas barreiras são mais densas e mais suscetíveis à adsorção que seu suporte, sendo, dessa forma, responsáveis pela retenção de compostos de baixa massa molar que poderiam passar pelos poros da membrana polimérica.

Na Tabela 19, são apresentadas as eficiências de remoção do flotor físico químico (atual sistema de pós-tratamento utilizado pela empresa), da microfiltração e da ultrafiltração.

Ao comparar as eficiências de remoção para os três sistemas de tratamento terciário (flotor físico-químico, microfiltração e ultrafiltração), averigua-se que a microfiltração e a ultrafiltração são mais eficientes na remoção de todos os parâmetros monitorados, exceto sólidos totais fixos (tratamentos 1 e 4) e nitrogênio amoniacal (neste caso, única e exclusivamente, para a microfiltração).

Tabela 19 - Eficiências de remoção do flotador físico-químico, da microfiltração e da ultrafiltração

Parâmetro	Flotador físico-químico*	Eficiência (%)			
		Microfiltração		Ultrafiltração	
		Trat. 1 0,5 bar	Trat. 2 0,75 bar	Trat. 3 0,75 bar	Trat. 4 1,0 bar
pH	-	-	-	-	-
Turbidez	58	97	97	87	94
Sólidos Totais	4	10	23	15	11
Sólidos Totais Fixos	3	2	14	13	2
Sólidos Totais Voláteis	7	51	64	23	51
Condutividade	3	15	17	13	15
Salinidade	2	13	15	11	13
DQO	54	72	64	77	85
Nitrogênio Amoniacal	41	24	21	69	54

* Dados obtidos pela comparação entre amostras de efluentes coletadas (para apenas um lote) após lagoa de decantação (AIF) e após flotador físico-químico (AFF)

4.6.1 Comportamento dos Parâmetros Físico-químicos Durante a Investigação Experimental a Partir dos Fatores de Concentração

Nas Figuras 26 a 33 apresenta-se o comportamento de todos os parâmetros físico-químicos monitorados, em função dos fatores de concentração, para os tratamentos empregando microfiltração e ultrafiltração (tratamentos 1 a 4 da Tabela 3), com amostras de efluentes coletadas após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF), em diferentes fatores de concentração.

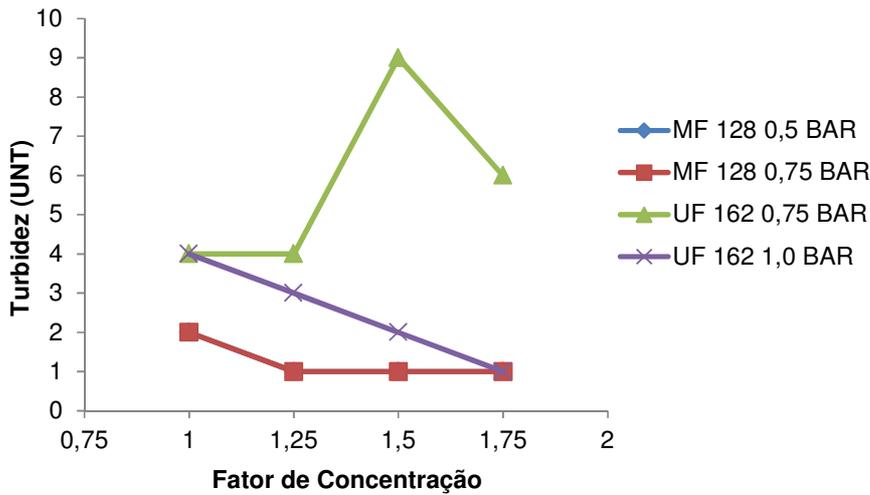


Figura 26 - Comportamento da turbidez
 Obs: Os valores de turbidez nos tratamentos empregando microfiltração são iguais

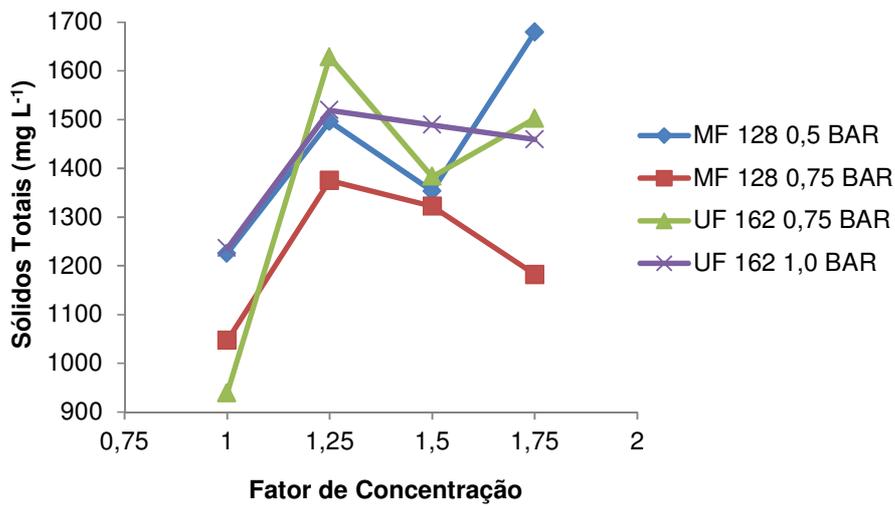


Figura 27 - Comportamento dos sólidos totais

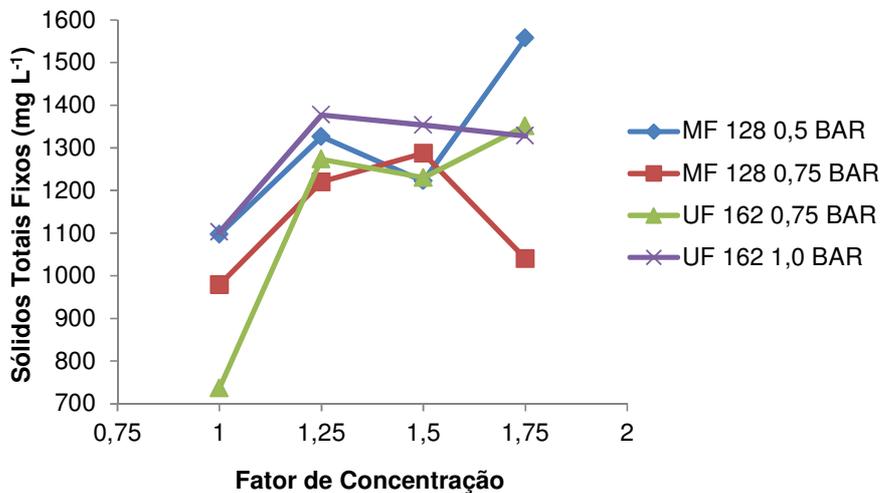


Figura 28 - Comportamento dos sólidos totais fixos

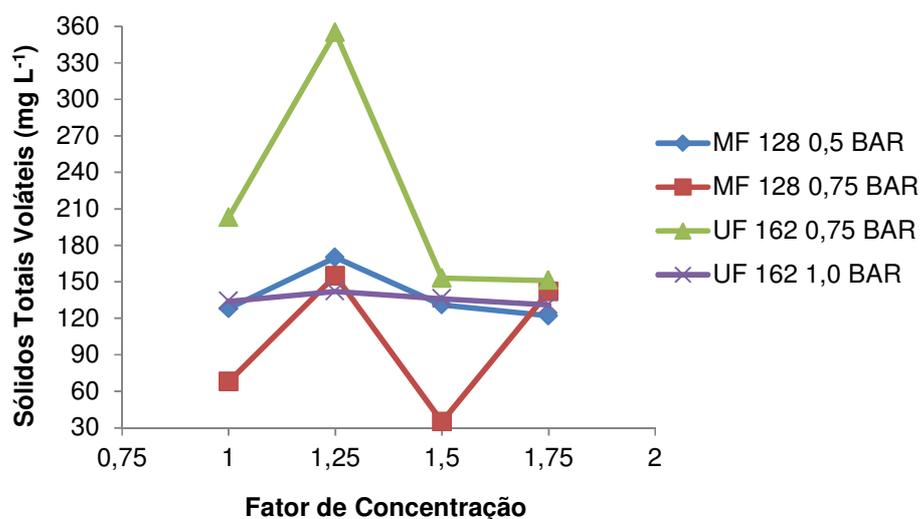


Figura 29 - Comportamento dos sólidos totais voláteis

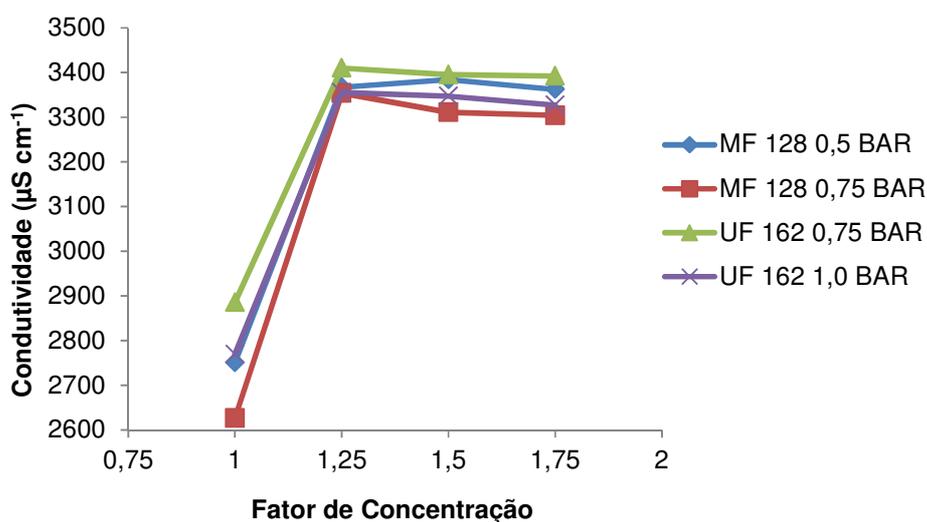


Figura 30 - Comportamento da condutividade

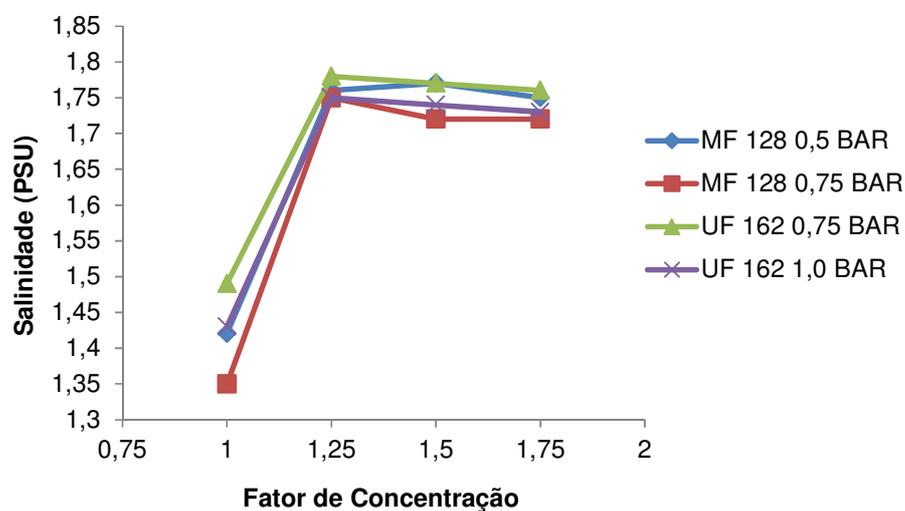


Figura 31 - Comportamento da salinidade

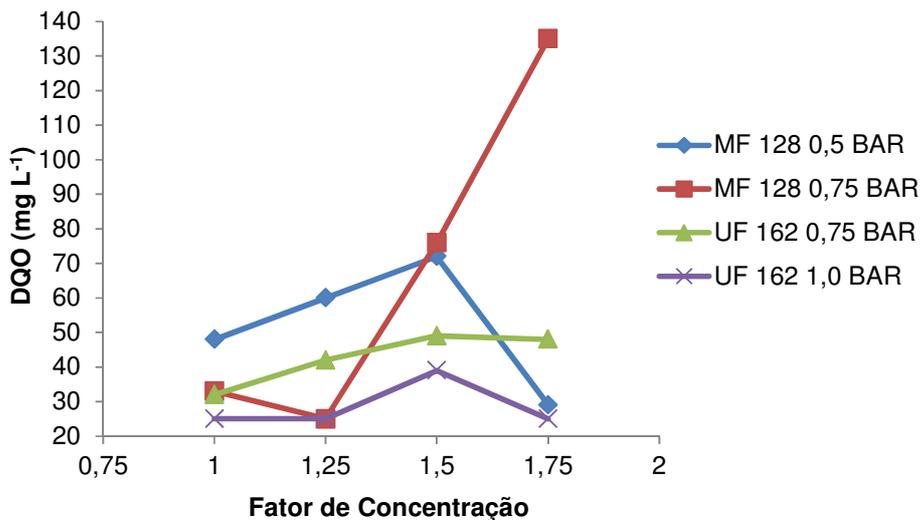


Figura 32 - Comportamento da DQO

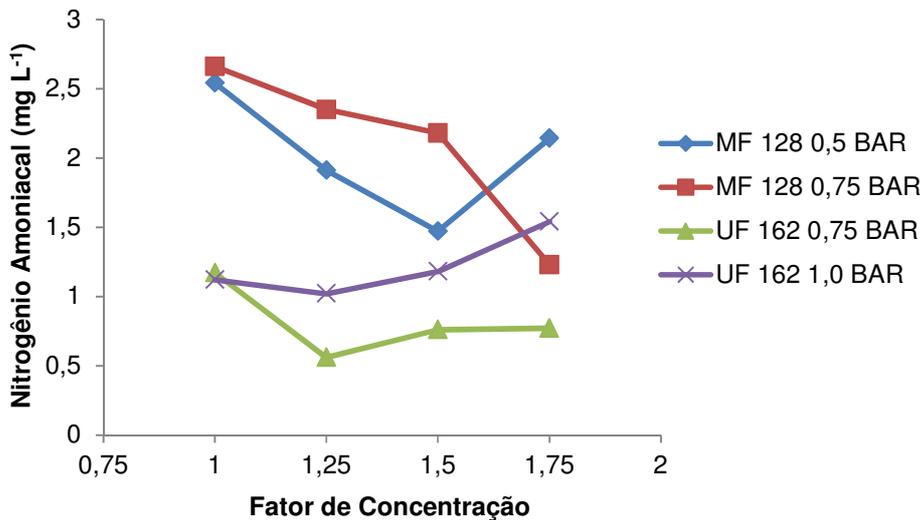


Figura 33 - Comportamento do nitrogênio amoniacal

Todos os parâmetros analisados, a partir dos fatores de concentração, não tiveram um comportamento uniforme durante a investigação experimental.

Segundo Schneider e Tsutiya (2001), diversos fatores, a maior parte pouco compreendida, controlam a rejeição de solutos pelas membranas, como o tamanho do soluto (molécula ou íon), a morfologia dos materiais retidos pela membrana, o tamanho dos poros, as propriedades químicas da solução de alimentação, além de fatores hidrodinâmicos, que determinam a tensão de arraste, o grau de compactação e as forças de cisalhamento na superfícies da membrana, a rugosidade e características químicas da superfície da membrana, a carga elétrica de solutos e da

membrana. A importância de cada fator está relacionada ao tipo de membrana utilizada, a operação do módulo e a natureza do soluto rejeitado.

De maneira geral, comparando-se os quatro tratamentos empregados, no fator de concentração 1,75 (quando o fluxo encontrava-se praticamente estabilizado) verifica-se que um aumento na pressão operacional resulta em maior eficiência de remoção dos parâmetros monitorados, exceto para os parâmetros sólidos totais voláteis, DQO e nitrogênio amoniacal.

4.6.2 Índice de Qualidade do Permeado – IQP

Para selecionar o tratamento mais eficiente para a microfiltração e também para ultrafiltração, integrando os parâmetros fluxo permeado, turbidez, sólidos totais, sólidos totais fixos, sólidos totais voláteis, condutividade, salinidade, demanda química de oxigênio e nitrogênio amoniacal, foi utilizado um índice de qualidade do permeado, como proposto na metodologia.

Na Tabela 20, está ilustrado o índice de qualidade para cada tratamento utilizando amostras de efluentes coletadas após a lagoa de decantação (AIF), em função do fator de concentração.

Analisando-se a Tabela 20, verifica-se que aumentando a pressão de filtração obtém-se um permeado de melhor qualidade, tanto para a microfiltração quanto para a ultrafiltração, em todos os fatores de concentração, como pode ser verificado na Figura 34.

Tabela 20 - Índice de qualidade do permeado - IQP

Tratamento	Fator de Concentração	Índice - IQP	Índice Médio
1 – MF 128 0,5 bar	1,0	313	383
	1,25	440	
	1,50	394	
	1,75	385	
2 – MF 128 0,75 bar	1,0	583	608,25
	1,25	703	
	1,50	550	
	1,75	597	
3 – UF 162 0,75 bar	1,0	426	340,5
	1,25	231	
	1,50	404	
	1,75	301	
4 – UF 162 1,0 bar	1,0	475	565,75
	1,25	649	
	1,50	489	
	1,75	650	

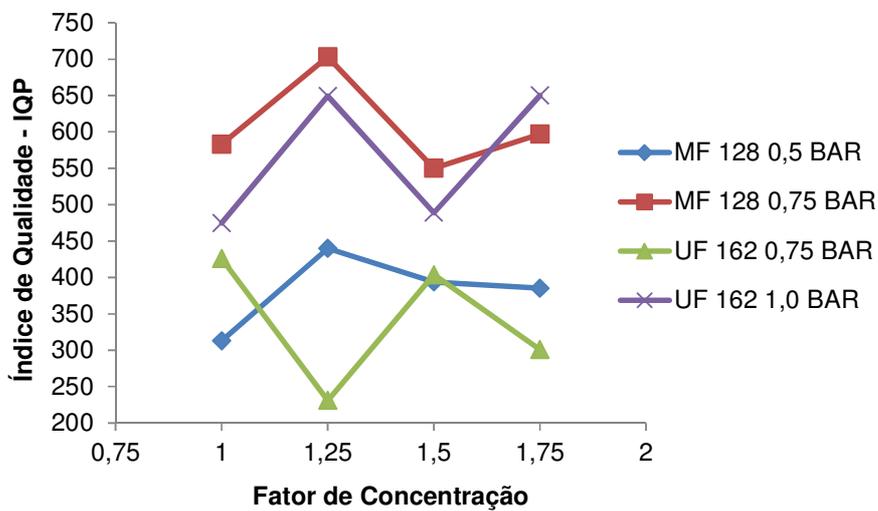


Figura 34 - Índice de qualidade do permeado (IQP) dos diferentes tratamentos testados a partir dos fatores de concentração

A partir da Figura 34, observa-se que, de maneira geral, os tratamentos utilizando microfiltração com pressão de 0,75 bar e ultrafiltração com 1,0 bar de pressão foram os mais eficientes. Além disso, no fator de concentração 1,25, empregando maiores pressões, foram encontradas as melhores condições

experimentais, dentro das faixas de pressões utilizadas e para os parâmetros monitorados.

Conforme Figura 35, o fluxo permeado apresentou um decaimento típico dos processos de microfiltração e ultrafiltração, caracterizando-se por uma queda nos primeiros minutos de filtração, seguido de um período onde ocorre declínio gradual, com uma tendência ao equilíbrio no final da filtração.

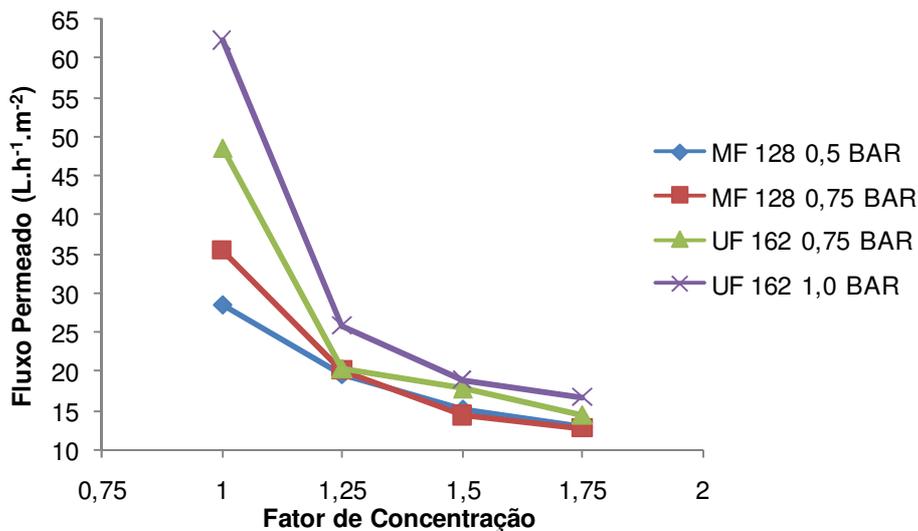


Figura 35- Comportamento do fluxo permeado

Analisando a Figura 35, verifica-se que o fluxo permeado da microfiltração foi menor que o fluxo permeado da ultrafiltração, isso pode ser explicado, pelo fato da membrana de microfiltração ter uma perda do fluxo original de aproximadamente 30%, a partir do cálculo do coeficiente de colmatação, após o processo de limpeza física, química e enxágue.

De acordo com Habert et al. (2006), mesmo com limpezas físico-químicas periódicas, não é possível recuperar completamente o fluxo permeado obtido no início do ensaio de filtração, indicando que ocorre uma pequena queda do fluxo permeado com o tempo, típica dos processos de separação por membranas, e que a técnica utilizada na limpeza não foi capaz de eliminar por completamente possíveis alterações na membrana, provocadas por incrustação (*fouling*).

Rader (2003) explica que, o *fouling* é resultante da deposição, adsorção e/ou acúmulo de partículas coloidais suspensas sobre a superfície ou ainda no interior dos poros da membrana, aliado ainda as interações químicas entre solutos e a

membrana. O fenômeno de *fouling* é de natureza irreversível e dependente do tempo, podendo ainda, modificar as características de retenção da membrana.

4.7 RESULTADOS PARA O TRATAMENTO EMPREGANDO A MICROFILTRAÇÃO SEGUIDA DE ULTRAFILTRAÇÃO

Para a realização deste ensaio (tratamento 9 da Tabela 3), foi selecionado o melhor tratamento para a microfiltração e ultrafiltração, com base no índice de qualidade do permeado (IQP) adotado. Foram utilizados 10 litros de efluentes coletados após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF) para o ensaio de microfiltração, e 5 litros do permeado composto final da microfiltração para alimentação da ultrafiltração.

Foram coletadas amostras de permeado nos fatores de concentração 1,0; 1,25; 1,50 e 1,75 para a microfiltração e para a ultrafiltração.

Nas Figuras 36 e 37 está retratado o comportamento do fluxo permeado nos ensaios de microfiltração e ultrafiltração.

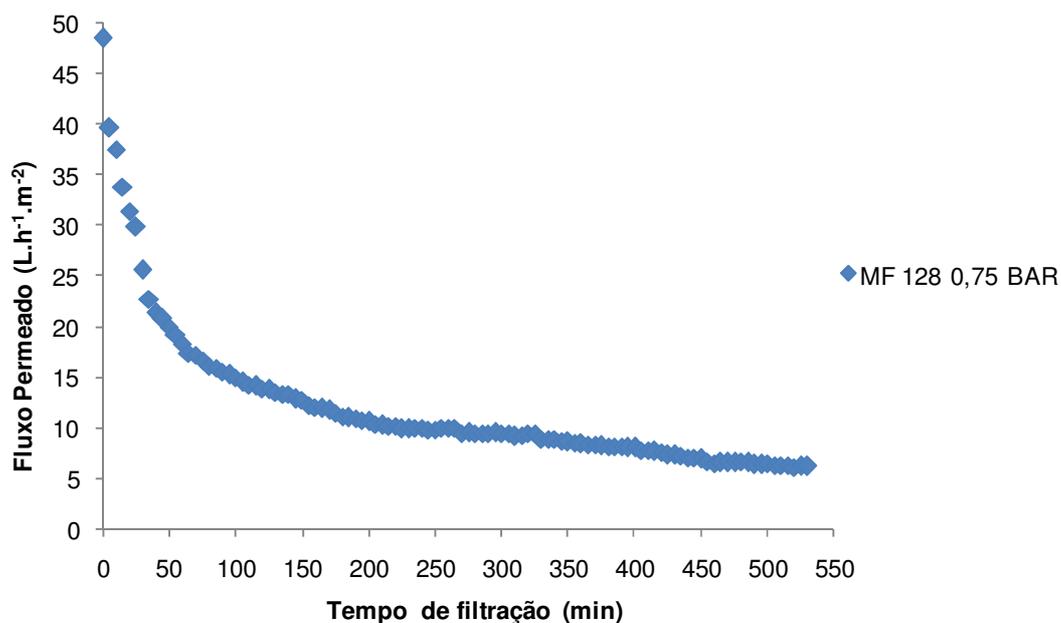


Figura 36 - Comportamento do fluxo permeado da microfiltração

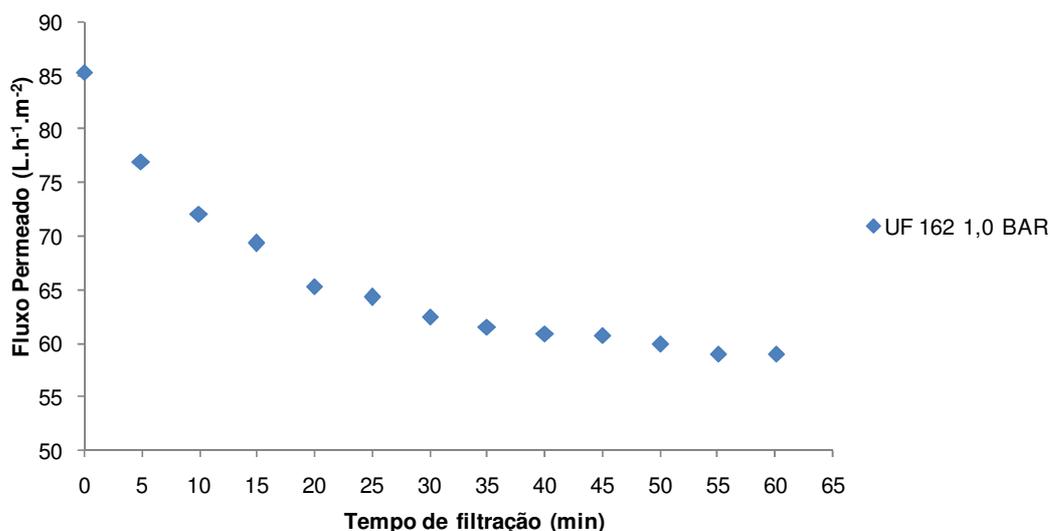


Figura 37 - Comportamento do fluxo permeado da ultrafiltração

Para a microfiltração, o fluxo permeado apresentou uma redução de aproximadamente 87% durante 530 minutos de filtração. Com relação a ultrafiltração, a redução foi de aproximadamente 31% durante 60 minutos de filtração.

As características físico-químicas e as eficiências de remoção das amostras microfiltradas e ultrafiltradas (tendo como alimentação, amostra de efluente microfiltrada), a partir dos fatores de concentração, estão nas Tabelas 21 e 22.

Tabela 21 - Características físico-químicas e eficiência de remoção das amostras de efluentes microfiltradas, a partir dos fatores de concentração

Parâmetro	Unidade	Alimentação	Fatores de concentração				Eficiência (%)
			Fc 1,0	Fc 1,25	Fc 1,50	Fc 1,75	
pH	-	7,66	7,95	8,08	8,19	8,28	-
Turbidez	UNT	32	3	2	3	1	91
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	1698	1293	1572	1557	1594	8
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	1378	1049	1334	1336	1384	7
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	320	244	238	221	210	10
Condutividade	μS cm ⁻¹	3666	2968	3533	3543	3519	7
Salinidade	PSU	1,93	1,55	1,86	1,86	1,85	5
DQO	mg L ⁻¹	188	87	91	215	179	40
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	2,14	2,72	1,91	1,53	1,61	9

Tabela 22 - Características físico-químicas e eficiência média de remoção das amostras de efluentes ultrafiltradas (tendo como alimentação, amostra de efluente microfiltrada), a partir dos fatores de concentração

Parâmetro	Unidade	Alimentação	Fatores de concentração				Eficiência (%)
			Fc 1,0	Fc 1,25	Fc 1,50	Fc 1,75	
pH	-	8,14	8,21	8,25	8,26	8,27	-
Turbidez	UNT	3	1	1	1	1	67
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	1567	1428	1516	1595	1575	2
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	1278	1120	1292	1331	1312	1
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	289	308	224	264	263	8
Condutividade	μS cm ⁻¹	3390	2797	3258	3204	3248	8
Salinidade	PSU	1,83	1,44	1,70	1,67	1,69	11
DQO	mg L ⁻¹	112	76	59	65	51	44
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	1,94	1,89	1,52	0,81	1,11	31

De maneira geral, os resultados para microfiltração foram próximos aos obtidos quando da realização de outros ensaios, sob as mesmas condições experimentais. Essa pequena variação deve-se ao fato dos ensaios serem realizados com diferentes lotes de amostras de efluentes, coletados no mesmo ponto (após tratamento secundário), porém em datas diferentes.

Com relação a ultrafiltração, compreende-se que amostras de efluentes previamente microfiltradas, quando ultrafiltradas, resultam em uma eficiência de remoção complementar. Para alguns parâmetros, a eficiência de remoção complementar foi significativa, a saber: turbidez (67%), DQO (44%) e nitrogênio amoniacal (31%).

A eficiência de remoção final da microfiltração seguida de ultrafiltração foi de aproximadamente 97% para a turbidez, 17% para os sólidos totais voláteis, 67% para a DQO e 38% para o nitrogênio amoniacal.

As maiores eficiências de remoção alcançadas para os parâmetros físico-químicos monitorados, mediante o funcionamento do flotador físico-químico, tratamentos utilizando microfiltração, ultrafiltração, e microfiltração seguida de ultrafiltração, com amostras de efluentes coletadas após lagoa de decantação (AIF) estão na Tabela 23.

Tabela 23 - Eficiências de remoção máximas alcançadas para os parâmetros físico-químicos monitorados, mediante o funcionamento do flotador físico-químico, tratamentos utilizando microfiltração, ultrafiltração, e microfiltração seguida de ultrafiltração

Parâmetro	Unidade	Flotador físico-químico	Eficiência (%)		
			Microfiltração	Ultrafiltração	Microfiltração + Ultrafiltração
Turbidez	UNT	70	98	94	97
Sólidos Totais	mg L ⁻¹	9	23	15	10
Sólidos Totais Fixos	mg L ⁻¹	9	14	13	8
Sólidos Totais Voláteis	mg L ⁻¹	29	64	51	17
Condutividade	μS cm ⁻¹	3	17	15	15
Salinidade	PSU	2	15	13	16
DQO	mg L ⁻¹	59	64	85	67
Nitrogênio Amoniacal	mg L ⁻¹	46	24	69	38

Comparando-se as eficiências máximas encontradas para o funcionamento do flotador físico-químico com as eficiências máximas encontradas para os processos de separação por membranas, constata-se que a microfiltração é mais eficiente na remoção destes parâmetros físico-químicos (exceto o nitrogênio amoniacal, onde a ultrafiltração foi mais eficiente). Além disso, em linhas gerais, os processos de separação por membranas, resultaram em um efluente final de melhor qualidade, quando comparados ao flotador físico-químico. Quanto ao ensaio de microfiltração seguida de ultrafiltração, a eficiência de remoção do parâmetro salinidade, foi a melhor encontrada, em relação aos demais tratamentos empregados.

4.7.1 Resultados Microbiológicos

Além da caracterização físico-química das amostras de efluentes microfiltradas e ultrafiltradas, foram feitas análises microbiológicas de coliformes

termotolerantes e termorresistentes. Para estas análises microbiológicas foram coletadas amostras de efluentes após tratamento secundário (lagoa de decantação - AIF), após tratamento terciário (flotador físico-químico – AFF). Para a microfiltração e ultrafiltração foram coletadas amostras de permeado nos fatores de concentração 1,0 e 1,75, e uma amostra utilizada como alimentação da ultrafiltração, totalizando 7 amostras coletadas. Na Tabela 24 estão os resultados das análises microbiológicas de coliformes termotolerantes e termorresistentes e a eficiência de remoção.

Tabela 24 - Resultados das análises microbiológicas de coliformes termotolerantes e termorresistentes e a eficiência de remoção

Parâmetro	Amostra	Resultado (NMP mL ⁻¹)	Eficiência (%)
Coliformes Termotolerantes	AIF	460	-
	AFF	240	47,83
	MF 128 0,75 bar FC 1,0	0,23	99,95
	MF 128 0,75 bar FC 1,75	2,40	99,48
	Alimentação da ultrafiltração resultante da microfiltração	4,3	99,07
	UF 162 1,0 bar FC 1,0	0,21	95,12
	UF 162 1,0 bar FC 1,75	0,15	96,51
	Coliformes Termorresistentes	AIF	75
AFF		93	24
MF 128 0,75 bar FC 1,0		0,23	99,69
MF 128 0,75 bar FC 1,75		0,43	99,43
Alimentação da ultrafiltração resultante da microfiltração		2,4	96,8
UF 162 1,0 bar FC 1,0		0,11	95,42
UF 162 1,0 bar FC 1,75		0,15	93,75

NMP mL⁻¹ = número mais provável por mililitro

Obs: Os resultados destas análises são restritos as amostras coletadas.

Os resultados apontam que tanto a microfiltração quanto a ultrafiltração são mais eficientes quando comparadas ao flotador físico-químico. Pode-se verificar também, eficiências de remoção superior a 95%, chegando até a 99,95%, para o parâmetro coliformes termotolerantes. Com relação ao parâmetro coliformes

termorresistentes, as eficiências de remoção foram superior a 93%, alcançando 99,69%.

Dialynas e Diamadopoulos (2008) ao avaliarem a utilização de membranas de fibra oca de ultrafiltração no tratamento de águas residuárias municipais conseguiram taxas de remoção de coliformes fecais de 99,94% e coliformes totais 99,96%.

Em outros estudos sobre a remoção de coliformes totais utilizando os processos de separação por membranas, a eficiência chegou a ser completa (LEBEAU, et al., 1998; ARNAL et al., 2009).

4.8 AVALIAÇÃO DA POSSIBILIDADE DE REÚSO DE EFLUENTES

Analisando quantitativamente os parâmetros físico-químicos e microbiológicos dos efluentes tratados por microfiltração, ultrafiltração, e microfiltração seguido de ultrafiltração, estes se mostraram muito satisfatórios em comparação ao atual sistema de pós-tratamento utilizado pela agroindústria (flotador físico-químico).

Devido a carência de parâmetros físico-químicos e microbiológicos mínimos exigidos para o reúso de efluentes a nível nacional (apenas a NBR 13969/1997 e Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH), foi realizada uma pesquisa bibliográfica para avaliação preliminar, a partir de indústrias que utilizam a prática de reúso em outros países (Tabela 1). Os valores encontrados na literatura, não devem ser considerados definitivos, mas diretrizes médias orientadoras para a prática do reúso.

Os potenciais locais de utilização da água de reúso para o abatedouro e frigorífico de suínos, em estudo são: torres de resfriamento, lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos, proteção contra incêndio e descarga sanitária.

A partir dos valores orientadores médios para o reúso de efluentes tratados, encontrados na pesquisa bibliográfica e médias dos fatores de concentração dos tratamentos mais eficientes para a microfiltração (MF 128 0,75 bar – tratamento 2 da Tabela 3), ultrafiltração (UF 162 1,0 bar – tratamento 4 da Tabela 3), microfiltração

seguida de ultrafiltração (tratamento 9 da Tabela 3), e flotor físico-químico, foi compilado a Tabela 25.

Tabela 25 - Requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos necessários para o reúso de efluentes e médias encontradas para o flotor físico-químico, microfiltração, ultrafiltração e microfiltração seguida de ultrafiltração

Parâmetro	Valor		Flotor			
	orientador médio*	Unidade	físico-químico	MF	UF	MF + UF
pH	6 – 9	-	7,54	8,08	7,96	8,25
Turbidez	≤ 2	UNT	16	1,25	2,5	1
DQO	≤ 75	mg L ⁻¹	86,6	67,25	28,5	62,75
Sólidos Totais	≤ 530	mg L ⁻¹	1683,4	1231,5	1425,75	1528,5
Condutividade	800 – 1200	µS cm ⁻¹	3724	3148,75	3199,5	3126,75
Nitrogênio Amoniacal	≤ 20	mg L ⁻¹	1,43	2,105	1,215	1,33
Coliformes Termotolerantes	≤ 2,2	NMP 100 mL ⁻¹	nr**	nr**	nr**	0,18**
Coliformes Termorresistentes	Ausente	NMP 100 mL ⁻¹	nr**	nr**	nr**	0,13**

* Fonte: US EPA, 2004; US EPA, 2004, valores para o Estado do Texas; Metcalfy e Eddy, 2003; Valor máximo recomendado para água potável, de acordo com a Portaria do Ministério da Saúde no 2914 de 12/12/2011; Hammer e Hammer, 2007; Asano e Levine, 1998; Pinjing et al., 2001; Metcalfy e Eddy, 1991; Mancuso e Santos, 2003; Mierzwa, 2002; Eble e Feathers, 1992; Macedo, 2001; Crook e Surampalli, 1996; Lenntech, 2015; NBR 13969/1997; US EPA, 2004, valores para a cidade de San Francisco; PIO et al., 2005; Oenning Junior e Pawlowsky, (2007); **nr = não realizado; NMP.mL⁻¹ = número mais provável por mililitro

As amostras tratadas apresentam alguns parâmetros que restringem o uso em torres de resfriamento, lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos, proteção contra incêndio e descarga sanitária, devido as características físico-químicas e microbiológicas.

Com base nos dados obtidos a partir das amostras coletadas no flotor físico-químico, apenas os parâmetros pH e nitrogênio amoniacal encontram-se adequados ao reúso de efluentes.

Com relação a microfiltração, esta resultou em efluentes com características apropriadas para o reúso, com relação aos parâmetros pH, turbidez (menor que 2 NTU), DQO (menor que 75 mg L⁻¹) e nitrogênio amoniacal.

A partir da ultrafiltração, os parâmetros pH, DQO e nitrogênio amoniacal atenderam as especificações recomendadas para o reúso de efluentes condicionados aos diferentes usos propostos.

Com relação a condição experimental onde realizou-se a microfiltração seguida de ultrafiltração, de todos os parâmetros monitorados, apenas a concentração de sólidos totais (superior a 530 mg L^{-1}), condutividade e coliformes termorresistentes não atenderam aos usos pretendidos para o reúso de efluentes tratados, embora a remoção de coliformes termotolerantes e termorresistentes ser de quase 100%, podendo ser total com a cloração.

Outro limitante para o reúso é a concentração de sólidos totais, além da condutividade elétrica, que permaneceram acima dos padrões de qualidade estabelecidos, por serem sais, de pequeno peso molecular e não ficarem retidos na membrana.

Noschang (2011), ao realizar um estudo de gerenciamento hídrico, com avaliação do consumo de água e geração de efluentes no processo produtivo de um frigorífico de bovinos, utilizando o reúso de efluentes tratados, visando à minimização do consumo de água, redução ou eliminação do lançamento de efluentes buscando a sustentabilidade da empresa, também não encontrou padrão adequado para o reúso. Contudo, orienta para o acondicionamento desses efluentes, a partir de tratamento químico primário e secundário, com o objetivo de melhorar a qualidade do efluente final.

Cabe ressaltar ainda, que considerando as Tabelas 1 e 23 deste estudo, há indicativos da possibilidade de reúso dos efluentes tratados, havendo a necessidade de outros estudos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos objetivos propostos, na metodologia aplicada e nos resultados obtidos neste estudo sobre a utilização dos processos de separação por membranas como tratamento avançado de efluentes agroindustriais de abatedouro e frigorífico de suínos, visando o reúso, pode-se concluir que:

- a) O reúso de efluentes tratados é uma importante alternativa devido à crescente escassez dos recursos hídricos, sobretudo para a agroindústria deste estudo.
- b) O atual sistema de pós-tratamento (flotador físico-químico) utilizado pela agroindústria promove eficiências de remoção nas faixas oscilantes de 3% a 29%, 44% a 70%, 40% a 46% e 50% a 58,5%, aproximadamente, para os parâmetros sólidos totais voláteis, turbidez, nitrogênio amoniacal e DQO, respectivamente.
- c) Os processos de separação por membranas apresentaram, de uma maneira geral, uma sensível melhora na qualidade do efluente final quando comparados com o processo de pós-tratamento empregando flotador físico-químico.
- d) A microfiltração apresentou as seguintes faixas de eficiência de remoção, aproximadas: sólidos totais voláteis (51% - 64%), turbidez (83% - 99%), nitrogênio amoniacal (21% - 24%) e DQO (64% - 72%).
- e) A ultrafiltração apresentou as seguintes faixas de eficiência de remoção, aproximadas: sólidos totais voláteis (23% - 51%), turbidez (87% - 99%), nitrogênio amoniacal (54% - 69%) e DQO (77% - 85%).
- f) A realização do ensaio de microfiltração seguido de ultrafiltração nas melhores condições experimentais investigadas obteve resultados satisfatórios na remoção de aproximadamente 97% para a turbidez, 17% para os sólidos totais voláteis, 67% para a DQO, 38% para o nitrogênio amoniacal, 96% a 99,95% para os coliformes termotolerantes e 93 a 99,69% para os coliformes termorresistentes.
- g) Embora os efluentes tenham proporcionado distintos valores de fluxo permeado, foram obtidas curvas de desempenho bastante semelhantes, caracterizando-se por uma queda do fluxo permeado nos primeiros minutos

de filtração, seguido de um período onde ocorre declínio gradual, com uma tendência ao equilíbrio ao final da filtração.

- h) Amostras de efluentes coletadas após tratamento terciário (flotador físico-químico – AFF) apresentaram maior fluxo permeado e comportamento mais homogêneo, comparadas com amostras coletadas após tratamento secundário (lagoa de decantação – AIF), provavelmente devido esse efluente apresentar maior concentração de sólidos.
- i) Com relação ao comportamento quanto à resistência mecânica provocada pelos diferenciais de pressão aplicados às membranas de microfiltração e ultrafiltração, utilizando água destilada, estas praticamente não tiveram redução de fluxo, com ausência da influência dos fatores: polarização da concentração, incrustação e entupimento de poros. Além disso, foram pouco sensíveis à histerese e/ou compactação, devido à reversibilidade das condições iniciais de fluxo, quando da pressurização e despressurização. Contudo, quando foram utilizadas amostras de efluentes para avaliar o comportamento quanto à resistência mecânica, as membranas sofreram entupimento, demonstrado pela redução do fluxo permeado.
- j) O fluxo de água destilada aumenta linearmente com o aumento da pressão aplicada a membrana para ambas as membranas avaliadas, 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, para ambas as membranas avaliadas, o fluxo de água destilada foi superior ao permeado das amostras de efluentes.
- k) De acordo com os requisitos físico-químicos e microbiológicos mínimos exigidos para o reúso de efluentes tratados, a microfiltração e a ultrafiltração atenderam alguns dos parâmetros monitorados, alcançando a qualidade exigida para o reúso em torres de resfriamento, lavagem de pisos, irrigação de áreas verdes, lavagem de veículos, proteção contra incêndio e descarga sanitária.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Caracterizar os efluentes gerados na fonte e avaliar todo o processo produtivo da agroindústria a fim de propor recomendações para o reúso em cascata.
- b) Avaliar a possibilidade de utilização da água de reúso para lavagem das pocilgas e também dos suínos na fase anterior a insensibilização.
- c) Estudar a viabilidade econômica para construção e operação do tratamento terciário utilizando os processos de separação por membranas.
- d) Investigar outras condições experimentais operacionais, como a influência da velocidade tangencial no fluxo de permeado, e outras variáveis da microfiltração e ultrafiltração a partir de membranas poliméricas de fibra oca.
- e) Avaliar a influência de fatores como a polarização da concentração, incrustação e entupimento de poros das membranas utilizadas, bem como a relação destes com o comportamento de parâmetros físico-químicos monitorados durante a filtração.
- f) Analisar o tempo de vida útil das membranas, além da periodicidade de lavagem das mesmas.
- g) Estudar o desempenho do processo com membranas tubulares e espirais, e de outra natureza, como cerâmicas e metálicas.
- h) Combinar o tratamento físico-químico com a microfiltração e ultrafiltração.
- i) Investigar outros processos de separação por membranas, como a nanofiltração e a osmose inversa, para serem utilizados no tratamento terciário das águas residuárias de abatedouro e frigorífico de suínos, visando o reúso destes efluentes.
- j) Estudar novas tecnologias disponíveis no mercado para o tratamento avançado de efluentes, com vistas a realizar o polimento final das águas residuárias, promovendo a remoção suplementar de contaminantes não removidos nas etapas anteriores.

REFERÊNCIAS

ABIPECS - **Associação Brasileira da Indústria Produtora e Exportadora de Carne Suína**. Disponível em: < http://www.abipecs.org.br/uploads/relatorios/mercado-externo/exportacoes/anuais/jan-dez-2014_jan-dez-2013.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2015.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro: **Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores**. Procedimento. NBR 9898. Rio de Janeiro: 1987.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, Rio de Janeiro: **Tanques sépticos – Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**. NBR 13969. Rio de Janeiro: 1997.

ACERO, J. L; BENITEZ, F. J; LEAL, A. I; REAL, F. J; TEVA, F. **Membrane filtration Technologies applied to municipal secondary effluents for potential reuse**. Journal of Hazardous Materials, nº 177, p. 390-398, 2010. Disponível em: <<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/20047792>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

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**. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2001. Disponível em: <<http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/aresidua/brasil/ii-151.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2014.

ANDRADE, L. H; MENDES, F. D. S; CERQUEIRA, N. ESPÍNDOLA, J. C. A; AMARAL, M. C. S. **Distribuição de massa molar em um biorreator com membrana para tratamento de efluentes de laticínio**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, 2014. Vol. 19, nº 13, p. 325-334. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v19n3/1413-4152-esa-19-03-00325.pdf>>. Acesso em 13 fev. 2015.

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

ARÉVALO, J; RUIZ, L. M; PARADA-ALBARACÍN, J. A; GONZÁLEZ-PÉREZ, D. M; PÉREZ, J; MORENO, B; GÓMEZ, M. A. **Wastewater reuse after treatment by**

MBR. Microfiltration or ultrafiltration? Desalination, Vol. 299. pp. 22-27. 2012. Disponível em: <<http://www.prairieswine.com/pdf/34622.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

ARNAL, J. M; GARCIA-FAYOS, B; VERDU, G; LORA, J. **Ultrafiltration as an alternative membrane technology to obtain safe drinking water from surface water: 10 years of experience on the scope of the AQUAPOT project.** Desalination. Vol. 248. p. 34-41, 2009. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916409005645>>. Acesso em 05 mar. 2015.

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, 1998, 56 p.

BAKER, R. W. **Membrane technology and applications.** McGraw-Hill. Second Editions, John Wiley & Sons, Ltd: California, 2004. Disponível em: <<http://download.e-bookshelf.de/download/0000/5676/44/L-G-0000567644-0002356890.pdf>>. Acesso em: 27 ago. 2014.

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, nº 162, p. 1438-1445. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389408009163>>. Acesso em: 25 mar. 2014.

BEZERRA, L. F; MATSUMOTO, T. **Avaliação da remoção da matéria orgânica carbonácea e nitrogenada de águas residuárias em biorreator de membranas.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. [online]. 2011, vol.16, n.3, pp. 253-260. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v16n3/v16n3a08.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2013.

BRAILE, P. M; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de Tratamento e Águas Residuárias Industriais.** São Paulo: CETESB, 1993.

BRASIL. Instrução Normativa nº 62 de 26 de agosto de 2003. **Oficializar os métodos analíticos oficiais para análises microbiológicas para controle de produtos de origem animal e água.** Brasília, 2003. Brasília, 2003. Disponível em: <<http://www.hidrolabor.com.br/IN62.pdf>>. Acesso em: 28 nov. 2014.

BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. **Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos**

Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989.. Brasília, 1997. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm>. Acesso em: 21 nov. 2014.

BRASIL. Portaria nº 2914, de 12 de dezembro de 2011. **Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade.** Brasília, 2011. Disponível em: <http://bvsms.saude.gov.br/bvs/saudelegis/gm/2011/prt2914_12_12_2011.html>. Acesso em: 28 mai. 2014.

BRASIL. Resolução nº 54, de 28 de novembro de 2005. **Estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências.** Brasília, 2005. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/legislacao/resolucoes/cnrh/54_2005_criterios_gerais_uso_agua.pdf>. Acesso em: 06 mar. 2014.

BRIÃO, V. B; TAVARES, C. R. G. **Ultrafiltração como processo de tratamento para o reúso de efluentes de laticínios.** Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol 12. Nº 12, p. 134-138, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v12n2/a04v12n2.pdf>>. Acesso em 05 ago. 2013.

CASSANI, S; ROUHANY, M; KNØCHEL, S. **A discussion paper on challenges and limitations to water reuse and hygiene in the food industry.** Denmark, 2005. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043135404006013>>. Acesso em 04 set. 2013.

COSTANZI, R. N; HESPANHOL, I; MIERZWA, J. C. **Tratamento de efluente doméstico de lodos ativados por membrana de ultrafiltração.** XXXIII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Salvador, 2012. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/BR04323_COSTANZI.pdf>. Acesso em: 30 jan. 2015.

CROOK, J; SURAMPALLI, R. Y. **Water reclamation and reuse criteria in the U.S.** Water Science and Technology, Vol. 33, Nº10-11, 1996.

DACANAL, M; BEAL, L. L. **Filtro anaeróbio associado à membrana de microfiltração tratando lixiviado de aterro sanitário.** Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2010, vol.15, n.1, pp. 11-18. ISSN 1413-4152. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v15n1/v15n1a02.pdf>>. Acesso em: 05 ago 2013.

DIALYNAS, E; DIAMADOPOULOS, E. **Integration of immersed membrane ultrafiltration with coagulation and activated carbon adsorption for advanced treatment of municipal wastewater**. Desalination, nº 230. p. 113-127, 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001191640800307>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

DIAS, T. MBR: **Nova tecnologia para tratamento de efluentes**. Revista e Portal Meio Filtrante. Edição no 36. Jan/Fev 2009. Disponível em: <http://www.meiofiltrante.com.br/materias_ver.asp?action=detalhe&id=444&revista=n36>. Acesso em 20 ago. 2014.

DIAS, T. **Membranas: meio filtrante de tecnologia avançada**. Revista e Portal Meio Filtrante. Volume 5. Edição número 23. Nov/dez 2006. Disponível em: <<http://www.meiofiltrante.com.br/materias.asp?action=detalhe&id=265>>. Acesso em 02 set 2013.

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

ECKENFELDER, W. W. **Water pollution control**. Ed. Mc Graw Hill. Third Edition. 2000, 584 p.

ENVIROWISE, U. K. **Environmental good practice guide: Reducing water and effluent costs in red meat abattoirs**. GG234. 2000. Disponível em: <<http://infohouse.p2ric.org/ref/23/22904.pdf>>. Acesso em: 30 dez 2014.

EPA – Environmental Protection Agency. **Guidelines for Water Reuse**. EPA/625/R-04/108, Washington, DC, September, 2004. Disponível em: <<http://nepis.epa.gov/Adobe/PDF/30006MKD.pdf>>. Acesso em: 02 abr 2014.

FIESP – Federação das Indústrias do Estado de São Paulo. **Manual de conservação e reúso de água na indústria**. Rio de Janeiro, 2006. 32p. Disponível em: <<http://www.firjan.org.br/lumis/portal/file/fileDownload.jsp?fileId=4028808120E98EC70121222C66745337>>. Acesso em 03 set. 2013.

FRACACIO, N. **Uso da água em atividades industriais**. São Paulo, 2009. Disponível em: <http://prope.unesp.br/xxi_cic/27_36876131866.pdf>. Acesso em 05 set. 2013.

FUGÈRE, R; MAMERI, N; GALLOT, J. E; COMEAU, Y. **Treatment of pig farm effluents by ultrafiltration**. Journal of Membrane Science, Vol 225. pp. 225-231.

2005. Disponível em: <<http://www.prairieswine.com/pdf/34622.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2015.

GIORDANO, G. **Avaliação ambiental de um balneário e estudo de alternativa para controle da poluição utilizando o processo eletrolítico para o tratamento de esgotos**. 1999. 137 p. Dissertação de Mestrado (Ciência Ambiental). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 1999.

GOMES, E. R. S. **Concentração de suco de acerola (malpighia spp.) por ultrafiltração e osmose reversa**. 2006. 163 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2006.

HABERT, A. C; BORGES, C.P; NOBREGA, C. **Processos de separação por membranas**. Série Escola Piloto em Engenharia Química. COPPE/UFRJ. Épapers, 2006, 180 p.

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

KRIEGER, E. I. F. **Avaliação do consumo de água, racionalização do uso e reúso do efluente líquido de um frigorífico de suínos na busca da sustentabilidade socioambiental da empresa**. 2007. 130 p. Tese (Doutorado em Ecologia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12050/000618507.pdf?..>. Acesso em: 15 jul. 2014.

KRIEGER, E. I. F; RODRIGUEZ, M. T. R. **Balanço hídrico em um matadouro de suínos e avaliação do uso da água em pocilgas de espera**. 2007. Disponível em: <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/uruguay30/BR10559_Krieger.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2015.

LAUTENSCHLAGER, S. R; FERREIRA FILHO, S. S; PEREIRA, O. **Modelação matemática e otimização operacional de processos de membrana de ultrafiltração**. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2009, vol.14, n.2, pp. 215-222. ISSN 1413-4152. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v14n2/a09v14n2.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2013.

LEBEAU, T; LELIÈVRE, C; BUISSON, H; CLÉRET, D; VENTER, L. W. V; COTÉ, P. **Immersed membrane filtration for the production of drinking water: combination with PAC for NOM and SOCs removal**. Desalination, Vol 117. p. 219-231, 1998. Disponível em:

<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0011916498001015>>. Acesso em: 05 mar. 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 30 jan 2015.

LOBO, L. P. **Análise comparativa dos processos de separação em membranas e clarificação físico-química para reúso de água na indústria.** 2004. 108 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<http://www.peamb.eng.uerj.br/trabalhosconclusao/2004/lucianapaulalobo2004.pdf>>. Acesso em: 29 jan 2015.

LUIZ, D. B. **Combinação de tratamentos químicos para a potabilização das águas descartadas de frigoríficos.** 2010. 185 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010. Disponível em: <<http://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/93618/285734.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 06 jan 2015.

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

MANCUSO, P.C; SANTOS, H.F. **Reúso de Água.** Editora Manole Ltda, 576 p., 2003.

METCALF; EDDY. **Wastewater engineering treatment and reuse.** Mc Graw-Hill: Higher 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.

MIERZWA, J. C. **O uso racional e o reúso como ferramenta para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria – estudo de caso da Kodak Brasileira.** 2002. Tese (Engenharia Hidráulica e Sanitária), Escola Politécnica da Universidade de 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>. Acesso em 27 ago. 2013.

MIERZWA, J. C; HESPANHOL, I. **Água na Indústria: uso racional e reúso**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2005. 143 p.

MORORÓ, R. R. **Estudo de novo permeador para biorreatores com membranas (BRM) visando ao controle de incrustações**. 2013. 164 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <http://objdig.ufrj.br/60/teses/coppe_m/RobsonRodriguesMororo.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2015.

MOTA, S. **Reúso de águas: A experiência da Universidade Federal do Ceará**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, 2000. 276 p.

MULDER, M. **Basic principle of membrane technology**. Kluwer Academic Publishers, 1991.

NASCIMENTO, J. F. **Avaliação de membranas de osmose inversa no tratamento de águas de purga de torres de refrigeração de indústria petrolífera com finalidade de reúso**. 2004. 117 p. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Química). Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2004. Disponível em: <<http://www.uff.br/posquim/frmprincipal/producoes/dissertacoes/jailtonascimento/jailtonascimento.pdf>>. Acesso em 03 set. 2013.

NOSCHANG, M. C. S. **Gestão e reúso da água em agroindústria**. 2011. 107 p. Dissertação (Mestrado em Qualidade Ambiental) Universidade Feevale: Rio Grande do Sul, 2011. Disponível em: <<http://ged.feevale.br/bibvirtual/Dissertacao/DissertacaoMarilizNoschang.pdf>>. Acesso em 23 ago. 2013.

OENNING JUNIOR, A. PAWLOWSKY, U. **Avaliação de tecnologias avançadas para reúso de água em indústria metal-mecânica**. Eng. Sanit. Ambient. [online]. 2007, vol.12, n.3, pp. 305-316. ISSN 1413-4152. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/esa/v12n3/a08v12n3.pdf>>. Acesso em 05 ago 2013.

OLIVEIRA, R. C; BARROS, S. T. D; GIMENES, M. L; ALVIM, F. A. G; WINTER, C. **Comparação entre centrifugação e microfiltração na clarificação do suco tropical de maracujá**. Revista Acta Scientiarum. Vol 32, n 3, p. 271-278. 2010. Disponível em: <<http://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciTechnol/article/viewFile/5379/5379>>. Acesso em: 05 mar. 2015.

OLIVEIRA, T. F. **Tratamento de água para abastecimento público por sistema de separação por membrana de ultrafiltração: estudo de caso na ETA Alto da Boa Vista (São Paulo, SP)**. 2010. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010. Disponível em: <www.teses.usp.br/teses/.../Dissertacao_Thiago_Forteza_de_Oliveira.pdf>. Acesso em 02 mar. 2015.

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

PETRUS, J.C.C. **Preparação, modificação e caracterização de membranas assimétricas para a clarificação de sucos de frutas**. 1997. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, FEA/UNICAMP, Campinas, 1997.

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. et al. **Conservação e reúso de água em edificações**. São Paulo: Prol Editora Gráfica, 2005.152 p.

PIVELI, R. P. Avanço tecnológicos no tratamento de esgoto sanitário. Whorkshop. **Avaliação de impactos e desenvolvimento de tecnologias de tratamento**. Setembro, 2007. Disponível em: <https://www.ipen.br/conteudo/upload/200710101736470.ipen_Roque_Passos.pdf>. Acesso em: 04 set 2013.

PRATO, A. M. **Clarificação da polpa de acerola utilizando processos de separação com membranas visando a recuperação da fração péctica**. 2007. 152 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2007.

RADER, A. S. **Estudo teórico-experimental do processo de microfiltração de partículas de sílica em suspensão aquosa**. 2003. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3581/000390125.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 13 fev. 2015.

RIBEIRO, M. L. **Remoção de compostos orgânicos de águas por ultra e nanofiltração em membranas poliméricas**. 2002. 125 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002. Disponível em:

<<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/1825/000358838.pdf?sequence=1>>. Acesso em 02 mar. 2015.

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. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90523/241347.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 08 de out. 2014.

SCARASSATI, D; CARVALHO, R. F; DELGADO, V. I; CONEGLIAN, C. M. R; BRITO, N. N; TONSO, S; SOBRINHO, G. D; PELEGRINI, R. **Tratamento de efluentes de matadouros e frigoríficos**. In III Fórum de Estudos Contábeis, [online], Claretianas, 2003. Disponível em: <<http://www.ctec.ufal.br/professor/elca/TRATAMENTO%20DE%20EFLUENTES%20DE%20MATADOUROS%20E%20FRIGOR%C3%8DFICOS.pdf>>. Acesso em: 25 set 2014.

SCHNEIDER, R. P; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso**. 1ª Ed. São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001. 234 p.

SCHULZ, D. G; KOPKE, U. **The quality index: A holistic approach to describe quality of food**. In: Proceedings of the Int. Conf. on Agricultural Production and Nutrition. Boston, Massachusetts, Usa; March 19-21, 1997. Disponível em: <http://orgprints.org/2519/1/SCHULZ_KOEPKE_1997a_e.pdf>. Acesso em: 01 nov 2014.

SEAB PR – SECRETARIA DE ESTADO DA AGRICULTURA E DO ABASTECIMENTO DO PARANÁ. **Suinocultura – Análise da conjuntura agropecuária**. Paraná, 2013. Disponível em: <http://www.agricultura.pr.gov.br/arquivos/File/deral/Prognosticos/SuinoCultura_2012_2013.pdf>. Acesso em 20 ago. 2014.

SILVA FILHO, A. **Tratamento terciário de efluente de uma indústria de refrigerantes visando ao reúso – um estudo de caso**. 2009. 112p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://tpqb.eq.ufrj.br/download/tratamento-de-efluente-de-refrigerante.pdf>>. Acesso em 10 jul. 2013.

SILVA, H. L. B. **Uso de membranas micro porosas no tratamento de efluentes de um frigorífico de abate de aves**. 2005. 81p. Dissertação (Mestrado em

Engenharia de Alimentos). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/101881/223540.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 01 abr. 2014.

SILVA, T. O; ROCHA, A. W. S; TERAN, F. J. C. **Microfiltração como processo de tratamento avançado para efluente industrial de abatedouro de bovinos**. Engenharia Ambiental. Vol 8, nº 4, p. 23-30. Espírito Santo, 2011. Disponível em: <http://journaldatabase.info/articles/microfiltration_as_advanced_treatment.html>. Acesso em 22 set. 2014.

SIVIERI, K. **Filtração por membrana**. São Paulo, 2010. Disponível em: <<http://www.tiabrasil.com.br/literatura.php>>. Acesso em 04 set 2013.

SPERLING, M. V. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos - Princípios de Tratamento Biológico de águas Residuárias**. Vol. 1 Belo Horizonte: DESA-UFMG. 1996.

TAMBOSI, J. L. **Remoção de fármacos e avaliação de seus produtos de degradação através de tecnologias avançadas de tratamento**. 2008. 141 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/90956/262420.pdf?sequence=1>>. Acesso em 10 jul 2013.

TELLES, D. D; COSTA, R. H. P. G. **Reúso da água: conceitos, teorias e práticas**. Editora Edgard Blucher Ltda. 2ª ed. São Paulo: Edgard Blucher, 2010. 408 p.

TRINDADE, R. S. **Caracterização de membranas poliméricas aplicadas ao processo de microfiltração**. 2010. 74 p. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/25808/000751631.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 27 mar. 2014.

VIDAL, C. M. S. **Avaliação da microfiltração tangencial como alternativa de tratamento avançado de efluente gerado em sistema de tratamento de esgoto sanitário constituído de reator UASB (upflow anaerobic sludge blanket) seguido de tanque de aeração**. 2006. 193 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil – Hidráulica e Saneamento) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.