IVY LAGO BARBOSA

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA GERAÇÃO DE ÁGUAS DE REÚSO EM UM CENTRO COMERCIAL

EQ/UFRJ
2009

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA GERAÇÃO DE ÁGUAS DE REÚSO EM UM CENTRO COMERCIAL

Ivy Lago Barbosa

Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos
Escola de Química
Dissertação de Mestrado

Juacyara Carbonelli Campos
D.Sc
Lidia Yokoyama
D.Sc

Rio de Janeiro
2009

AVALIAÇÃO DE PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS PARA GERAÇÃO DE ÁGUAS DE REÚSO EM UM CENTRO COMERCIAL.

Ivy Lago Barbosa

Tese submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências.

Aprovada por

_____

Profª. Drª. Juacyara Carbonelli Campos, EQ/UFRJ. Orientadora

_____

Profª. Drª. Lídia Yokoyama, EQ/UFRJ. Orientadora

_____

Prof. Dr. Odir Clécio da Cruz Roque, FIOCRUZ e UERJ.

_____

Prof. Dr. Ladimir José de Carvalho,
EQ/UFRJ

_____

Profª. Drª. Maria José de O. C. Guimarães, EQ/UFRJ

_____

Drª. Fabiana Valéria da Fonseca Araújo, EQ/UFRJ

RIO DE JANEIRO- RJ BRASIL

JUNHO/ 2009

Barbosa, Ivy Lago.

Avaliação de processos de separação por membranas para geração de águas de reúso em um centro comercial / Ivy Lago Barbosa – Rio de Janeiro, 2009.

xiv, 109, f.:il.

Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Programa em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos (TPQB) – EQ, 2009.

Orientadoras: Juacyara Carbonelli Campos e Lídia Yokoyama

1.Processo de Separação por Membranas. 2. Reúso de Àgua. 3. Tratamento Terciário de Efluente. I.Campos, Juacyara Carbonelli (Orient.). II. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Escola de Química.

Agradecimentos:

- Agradeço a Deus pela força para concluir mais essa etapa.
- Aos meus familiares: minha mãe pelo incentivo, apoio, compreensão e paciência; meu pai pela torcida positiva, minha avó Lourdinha pelo incentivo, aos meus tios pelo carinho de sempre.
- Às minhas orientadoras Lídia e Juacyara pela orientação e pela oportunidade de realizar esse trabalho.
- À aluna de iniciação científica Daniele Bordalo pelo auxílio e dedicação na realização deste trabalho.
- Ao André Pereira pelos primeiros ensinamentos das atividades do Laboratório
- À Carla, Ysrael e Talita, pela amizade e pelo apoio nos momentos aflitos: fosse ajudando com uma análise, fosse ajudando com palavras amigas.
- À Fernanda pela amizade e pela companhia na longa jornada de ensaios.
- À Fabiana pela amizade e pelo apoio.
- Taíssa, Layla, Letícia e Bárbara, pela colaboração.
- À Thaís pela gentileza de me ceder sua estagiária, em um momento de aperto.
- Ao Átila e Valmor por recolherem as amostras para mim com tanta prestabilidade.
- Á Professora Magali Christe por ceder o espaço do Laboratório de Tecnologia Ambiental-Escola de Química para as análises de carbono orgânico e de colimetria.
- À Professora Iracema Takase por ceder o Laboratório de Química Analítica do Instituto de Química da UFRJ para as análises de cálcio e magnésio.
- Ao Professor Marco Miguel pelo apoio, carinho, incentivo e por ceder espaço no Laboratório de Microbiologia do Laboratório de Instrumentação e Fotônica para a realização das análises microbiológicas.
- Ao Roberto Bentes pelo auxílio e pela prestabilidade de sempre.
- Aos técnicos da ETE do Centro Comercial: Valmor e Átila, pelo auxílio e atenção.
- À Mariana, Clarice e João pelo apoio “técnico”.
- Ao Jonathan pelo apoio, incentivo, carinho, compreensão e companhia.
- À Malu pela fiel companhia nos momentos de escrita.
- Ao convênio UFRJ/CENPES pela bolsa de mestrado.

RESUMO

Barbosa, Ivy Lago**. Avaliação de processos de separação por membranas para geração de águas de reúso em um centro comercial**. Orientadoras: Juacyara Carbonelli Campos e Lídia Yokoyama. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ; TPQB, 2009. Dissertação (Mestrado em Ciências).

Os processos de separação por membranas vêm ganhando uma maior importância no campo do tratamento de efluentes com o objetivo de se obter águas com qualidade de reúso. Este trabalho tem como objetivo geral a avaliação da aplicação de processos de separação por membranas no tratamento terciário do efluente de saída do processo de lodos ativados da ETE de um centro comercial da cidade do Rio de Janeiro, com o propósito de adequá-lo ao reúso. Para isso, foram avaliados os processos de microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa. As membranas de microfiltração e ultrafiltração eram de fibra oca (0,5 um e 50 kDa, respectivamente) e as de nanofiltração e osmose inversa eram planas (25-40 % retenção Na_2SO_4 e 99,5 % retenção Na_2SO_4, respectivamente). Foram avaliados em cada processo a qualidade do permeado obtido, o perfil do fluxo de permeado com o tempo e lavagem das membranas (com solução de hipoclorito de sódio). Os resultados indicaram que os permeados dos processos de micro e ultrafiltração podem ser reutilizados em descargas em vasos sanitários. Por outro lado, se o permeado da nanofiltração fosse submetido a uma cloração, para manter o cloro residual, ele poderia ser reutilizado em lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais paisagísticos, lavagem de carros e outros usos com contato direto com o usuário. A qualidade do permeado obtido no processo de osmose inversa é adequado para reúso em sistemas semi-abertos de resfriamento. As análises bacteriológicas promoveram uma redução aproximada de 100%, confirmando que os processos são eficazes na remoção de microrganismos.Foi observado em todos os ensaios, uma recuperação de 96% de permeado e um fator de concentração de 25 vezes. Os procedimentos de limpeza atingiram 66% a 81% de recuperação do fluxo.

ABSTRACT

Barbosa, Ivy Lago**. Membrane separation processes for reuse water generation in a shopping center.** Advisors: Juacyara Carbonelli Campos e Lídia Yokoyama. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ; TPQB, 2009. Dissertation (Master in Science).

The membrane separation processes are reaching importance in the wastewater treatment area for generating water in reuse quality. This work aims to study the membrane separation processes as a tertiary treatment of activated sludge process effluent in a shopping center in Rio de Janeiro. Microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis processes were evaluated. Microfiltration and ultrafiltration membranes were hollow fiber (0.5 a and 50 kDa, respectively) geometry and nanofiltration and reverse osmosis membrane were flat geometry (25-40% and 99,5% Na_2SO_4 retention, respectively). Additionally, the permeate quality, permeate flux profile and membrane cleaning process with sodium hypochlorite for each process were evaluated. The results showed that the microfiltration and ultrafiltration permeate can be reused in toilet. If nanofiltration permeate were chlorinated (for maintenance of residual chlorine in water), it could be reuse in floor washing, garden irrigation, maintenance of lakes and channels landscape, car washing and other uses that involve direct contact with the user. The reverse osmosis permeate is suitable for cooling system use. The bacteriological analysis showed a reduction of approximately 100%, that confirms the processes are effective in microorganisms removing. It was observed in all tests, a recovery of 96% of permeate and a concentration factor of 25times. The procedures for cleaning reached 66% to 81% recovery of flow.

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BSA	Albumina de Soro Bovino
COT	Carbono Orgânico Total
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMB	Eosina Azul de Metileno
ETE	Estação de Tratamento de Esgoto
LabTARE	Laboratório de Tratamento de Águas e Reúso de Efluentes
MBAS	Detergente Aniônicos
MBR	Biorreator a Membrana
MF	Microfiltração
NF	Nanofiltração
NMP	Número mais Provável
OI	Osmose Inversa
PES	Polietersulfona
pH	Potencial Hidrogeniônico
PSM	Processo de Separação com Membranas
PVDF	Fluoreto de Polivinilideno
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
UF	Ultrafiltração

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS 1

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4

2.1. Reúso de Águas 4

2.1.1. Classificação dos Tipos de Reúso 4

2.1.2. Institucionalização e Regulamentação do Reúso de Água 17

2.1.3. Grau de Tratamento Necessário para a Água de Reúso. 22

2.1.4. Critérios de Qualidade da Água 25

2.3. Processos de Separação por Membranas (PSM). 30

2.3.1. Descrição do Processo de Separação por Membranas 32

2.3.2. Mecanismos de Separação 37

2.3.3. Seletividade 38

2.3.4. Configurações dos Módulos com Membranas 39

2.3.5. Modos de Operação 43

2.3.6. Fenômenos que Interferem nos Processos de Separação por Membrana: Polarização por Concentração e *Fouling* 47

2.3.7. Minimização dos Efeitos de Polarização de Concentração e *Fouling* 50

2.3.8. Vantagens e Desvantagens dos Processos de Separação por Membrana 52

2.4. Qualidade do Permeado das Membranas: Uma opção para Reúso. 55

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL 58

3.1. Efluente Utilizado nos Ensaios 58

3.2. Processos com Membranas 58

3.2.1. Membranas Utilizadas 58

3.2.2. Sistema de Separação por Membranas em Batelada 59

3.2.2.1. Módulo Plano 59

3.2.2.2. Módulo Fibra Oca 61

3.3. Ensaios de Permeação 62

3.3.1. Ensaios determinação de permeabilidade hidráulica inicial: 62

3.3.2. Operação: 63

3.3.3. Ensaios para determinação de permeabilidade hidráulica pós-filtração: 63
3.3.4. Limpeza do sistema de membranas: 64
3.3.5. Ensaios para determinação de permeabilidade hidráulica pós-limpeza: 64
3.4. Metodologia Analítica.....64
3.4.1. Ensaios Microbiológicos.....66
3.4.1.1. Análises de *Escherichia coli* 66
3.4.1.2. Controle Microbiológico dos Experimentos.....68
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 70
4.1. Caracterização da Alimentação do Sistema de Membranas.....70
4.2. Operação dos Sistemas com Membranas 72
4.2.1. Caracterização Inicial das Membranas.....72
4.2.2. Controle Microbiológico da Operação.....74
4.2.3. Características Operacionais 75
4.2.3.1. Ensaios de Microfiltração.....75
4.2.3.2. Ensaios de Ultrafiltração 78
4.2.3.3. Ensaio de Nanofiltração.....80
4.2.3.4. Ensaio de Osmose Inversa.....82
4.2.4. Eficiência de Limpeza das Membranas 83
4.3. Avaliação da Qualidade dos Permeados 85
4.3.1. Avaliação da Qualidade do Permeado da Microfiltração.....85
4.3.2. Avaliação da Qualidade do Permeado da Ultrafiltração 88
4.3.3. Avaliação da Qualidade do Permeado da Nanofiltração 91
4.3.4. Avaliação da Qualidade do Permeado da Osmose Inversa 92
4.4. Avaliação dos Parâmetros Obtidos nos Permeados obtidos para fins de Reúso.....95
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... 99
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 101
7. ANEXOS..... 108

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Reúso indireto não planejado da água (Adaptado de Lavrador, 1987).....5
Figura 2.2: Reúso direto planejado da água (Adaptado de Lavrador, 1987).....6
Figura 2.3: Reúso industrial Macro externo. (Adaptado de Rodrigues, 2005)..10
Figura 2.4: Reúso industrial macro-interno: reúso em Cascata.(Adaptado de Rodrigues, 2005). 11
Figura 2.5: Reúso industrial macro-interno (reúso de efluentes tratatados (Adaptado de Rodrigues, 2005). 12
Figura 2.6: Fins a que se destinam as águam de reúso (Adaptado Braga, 2002).....17
Figura 2.7: (A)Diferentes níveis de tratamento aos quais o efluente pode ser submetido. (B) Associação de efluentes submetidos a diferentes níveis de tratamento aos possíveis fins de utilização. Adaptado de Graaf et al, (2005)...24
Figura 2.8: Esquema de definição do Processo de Separação por Membranas. (Adaptado METCALF & EDDY, 2003) 33
Figura 2.9: Comparação entre os PSM em relação à pressão utilizada, tamanho dos poros e partículas retidas. 35
Figura 2.10: Representação da seção transversal das diferentes morfologias de membranas sintéticas.Fonte:Habert et al, 2003 37
Figura 2.11: Representação esquemática dos principais mecanismos de remoção de constituintes presentes no afluente de sistemas de membranas: (a) remoção de partículas e moléculas grandes por peneiramento (exclusão por tamanho); (b) rejeição de íons pela camada de água adsorvida. (Adaptada de METCALF & EDDY,2003) 38
Figura 2.12: Módulo Placa e Quadro. Fonte:Habert et al. (2006).....40
Figura 2.13: Módulo Espiral. Fonte :Habert et al. (2006).....41
Figura 2.14: Módulos com membranas na forma Fibras Ocas e Capilares. Fonte:Habert et al. (2006). 42
Figura 2.15: Representação esquemática de sistemas de membranas pressurizados (a) e operados por sucção (b). Fonte: SCHNEIDER & TSUTIYA (2001). 43
Figura 2.16: Esquema que diferencia a filtração frontal da filtração tangencial.

Fonte: Habert et al. (2006). 44
Figura 2.17: Polarização de concentração; perfil de concentrações em estado estacionário na região próxima à membrana Fonte:Teixeira, 2001.....48
Figura 2.18: Comparação da variação do fluxo permeado ao longo do tempo para o processo de filtração convencional e para filtração tangencial. 50
Figura 2.19: Esquema do comportamento do fluxo permeado em um processo de MF com sem limpeza por fluxo invertido Fonte:Nobrega, (1998). 52
Figura 3.1: Sistema de separação por membranas utilizado.....60
Figura 3.2: Célula de permeação utilizada na NF e na OI:(A) Célula, (B) parte superior da célula e (C) parte inferior da célula. 61
Figura 3.3: Módulos de Fibra Oca que foram adaptados ao Sistema: Vista externa e interna.....62
Figura 3.4: (A) frascos estéreis utilizados, (B) o momento da coleta, (C) o frasco contendo 100 mL de amostra e substrato (antes da incubação), (D) cartela Quanti-Tray®/2000 de 97 cavidades (após incubação).....67
Figura 3.5: placas com meios EMB (cor avermelhada) e Agar nutrientes (transparente, levemente amarelo) abertas durante o ensaio de controle microbiológico. (A) Durante a coleta do permeado e (B) Durante a manipulação da célula de filtração.....69
Figura 4.1: (A) Placas abertas durante o período de coleta do permeado: (B)Agar Nutriente e (C)EMB; (D) Placas abertas durante o período de manipulação da célula de filtração: (E)Agar Nutriente e (F)EMB. 75
Figura 4.2: Variação do fluxo de permeado no decorrer do tempo dos ensaios de microfiltração. 77
Figura 4.3: Variação do fluxo de permeado no decorrer do tempo dos ensaios de ultrafiltração. 79
Figura 4.4: Variação do fluxo de permeado no decorrer do tempo do ensaio de nanofiltração. 81
Figura 4.5: Variação do fluxo de permeado no decorrer do tempo do ensaio de osmose inversa.....83
Figura 4.6: Permeado de um ensaio de microfiltração. 88
Figura 4.7: Aspectos visuais da Alimentação (AL) e dos permeados da Micro (MF), Ultra (UF), NanoFiltração (NF) e Osmose Inversa (OI).....95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Classes de água de reúso pela NBR-13.969 e padrões de qualidade 19
Tabela 2.2: Características químicas recomendadas para a água de reúso para fins agrícolas e florestais, de acordo com a proposta de resolução do CNRH. 20
Tabela 2.3: Características microbiológicas recomendadas para a água de reúso para fins agrícolas e florestais, de acordo com a proposta de resolução do CNRH. 21
Tabela 2.4: Padrão de Qualidade Recomendado para Geração de Vapor 27
Tabela 2.5: Requisitos de qualidade para água de uso industrial.....28
Tabela 2.6: Características necessárias da água de reúso para fornecimento para sistemas semi-abertos de resfriamento e usos não potáveis irrestritos....29
Tabela 2.7: Eventos que contribuíram para o desenvolvimento da ciência e tecnologia de membranas. 30
Tabela 2.8: Características gerais dos processos por membranas. 34
Tabela 3.1: Principais características das membranas utilizadas.....59
Tabela 3.2: Principais características dos módulos de fibra oca utilizados 61
Tabela 3.3: Condições de operação de cada filtração 63
Tabela 3.4: Metodologias aplicadas em cada análise.....65
Tabela 4.1: Média e faixa dos parâmetros físico-químicos microbiológicos do efluente utilizado na alimentação do sistema de membranas (N=3), padrões de lançamento vigentes e padrões sugeridos para reúso. 71
Tabela 4.2: Permeabilidade inicial média à água de cada membrana 73
Tabela 4.3: Fluxos: inicial e pós e limpeza dos ensaios de MF, UF, NF e OI...84
Tabela 4.4: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do efluente da ETE (Alimentação) e do Permeado de Microfiltração. 86
Tabela 4.5: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do efluente da ETE (Alimentação) e do Permeado de Ultrafiltração. 89
Tabela 4.6: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do efluente da ETE (Alimentação) e do Permeado de Nanofiltração. 92
Tabela 4.7: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do microfiltrado (Alimentação) e do Permeado de Osmose Inversa 93

Tabela 4.8: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do efluente da ETE (Alimentação) e do Permeado de Osmose Inversa 94
Tabela 4.9: Comparação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos analisados em cada um dos ensaios. 96

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A crescente escassez mundial de água é uma preocupação do novo milênio. Apesar de no Brasil se concentrar a maior parte das águas da bacia hidrográfica do Rio Amazonas (que é constituída pela mais extensa rede hidrográfica do globo terrestre), há um desequilíbrio hídrico resultante do crescimento exagerado das demandas localizadas e da degradação da qualidade das águas, gerando conflitos de uso e problemas de escassez de água. A deterioração do meio ambiente, bem como a situação do saneamento ambiental no Brasil, são aspectos que contribuem para a questão da contaminação e escassez, e como conseqüência muitos rios são bastante poluídos, inviabilizando o tratamento de suas águas para o abastecimento doméstico convencional.

Buscando melhorar a qualidade dos recursos hídricos e solucionar os problemas de escassez de água, há um grande interesse por tratamento de efluentes que atinjam padrões de qualidade compatíveis com o reúso. A partir do momento em que o efluente passe a ser reutilizado, as águas de maior qualidade poderão ser usadas para fins mais nobres, como o abastecimento doméstico.

Os sistemas de tratamento de esgotos sanitários, em geral, resultam em bom nível de redução de matéria orgânica. No entanto, somente, tratamentos avançados levam a uma significativa redução bacteriológica, e a remoção de contaminantes que permitem reúso para fins mais nobres. Entre as alternativas existentes para viabilizar o reúso, o desenvolvimento das técnicas de separação dos materiais por membranas vem ganhando grande destaque.

A tecnologia de membranas já é efetiva no tratamento de águas para abastecimento e contribui para resolver problemas de ordem sanitária ligados aos esgotos. O seu uso no tratamento avançado de águas residuárias, inicialmente destinava-se ao tratamento de efluentes industriais e de esgoto sanitário em situações em que eram disponíveis pequenas áreas de instalação,

bem como para ocasiões vinculadas a objetivos de reúso, ou mesmo em países que apresentam rígida legislação referente aos padrões de emissão. Todavia, devido à queda acentuada dos preços das membranas, esses sistemas têm se mostrado mais competitivos em relação às tecnologias convencionais de pós-tratamento de esgoto sanitário, sobretudo em paises desenvolvidos, os quais apresentam significativo número de empresas fabricantes de membranas.

As tecnologias mais usuais para o pós-tratamento de esgoto sanitário, tais como a coagulação seguida de floculação e decantação ou flotação, bem como diferentes tipos de “filtros’’, sistemas de lodos ativados e suas variantes e carvão ativado, não são capazes de obter desinfecção eficiente, quando comparadas aos sistemas de microfiltração. Processos oxidativos avançados – dentre eles a ozonização, apesar de atingirem excelente nível de desinfecção – necessitam de etapas preliminares para remoção dos sólidos suspensos presentes nos efluentes secundários, para que possa ser viável a implementação destas tecnologias, no tratamento avançado de esgoto. Outras alternativas, tais como, lagoas e sistemas de disposição no solo, em algumas situações, podem não ser viáveis pela necessidade de grandes áreas. Os PSM, por sua vez, são capazes de excelente remoção de sólidos suspensos e microrganismos. Somente no caso da microfiltração e necessário uma atenção especial na remoção de vírus, os quais podem ser inativados, posteriormente, com radiação ultravioleta em baixas doses médias aplicadas .

Neste trabalho, foi utilizada a tecnologia de membranas como pós-tratamento de efluentes sanitários tratados biologicamente em uma estação de lodos ativados de um centro comercial da cidade do Rio de Janeiro.

O presente trabalho apresenta os seguintes objetivos:

Objetivo Geral

Avaliar a utilização de Processos de Separação por Membranas (PSM) como alternativa para o tratamento terciário de esgotos sanitários para gerar água de reúso.

Objetivos Específicos

- Analisar as características operacionais dos PSM.
- Avaliar e comparar a eficiência dos PSM na remoção de contaminantes de esgotos sanitários
- Avaliar a eficiência de procedimento de limpeza utilizando NaClO.
- Avaliar a qualidade dos permeados obtidos.
- Sugerir possíveis formas de reúso para cada permeado.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Reúso de Águas

Em 1958, o Conselho Econômico e Social das Nações Unidas, estabeleceu uma política de gestão para áreas carentes de recursos hídricos, que suporta o conceito: “a não ser que exista grande disponibilidade, nenhuma água de boa qualidade deve ser utilizada para usos que toleram águas de qualidade inferior” (BREGA FILHO E MANCUSO, 2003).

As águas de qualidade inferior, tais como efluentes de processos industriais, esgotos (particularmente os de origem doméstica), águas de drenagem de pátios e agrícolas, e águas salobras, devem sempre que possível, ser consideradas como fontes alternativas para usos menos restritivos. O uso de tecnologias apropriadas para o desenvolvimento dessas fontes constitui-se hoje, em conjunção com a melhoria da eficiência do uso e o controle da demanda, na estratégia básica para a solução do problema da falta mundial de água.

De uma forma simplificada, pode-se entender o significado do reúso de água, pela frase utilizada por Mierzwa (2002): “é o uso de efluentes tratados para fins benéficos, tais como irrigação, uso industrial e fins urbanos não potável”.

2.1.1. Classificação dos Tipos de Reúso

O reúso pode ser classificado, conforme é realizado, ou seja, considerando se há ou não o descarte das águas nos corpos hídricos, antes do próximo uso. De acordo com a Organização Mundial da Saúde (WHO, 1973) o reúso da água pode ser:

- **Reúso indireto não planejado da água** (Figura 2.1): ocorre quando a água, utilizada em alguma atividade humana, é descarregada no meio

ambiente e novamente utilizada a jusante, em sua forma diluída, de maneira não intencional e não controlada. Caminhando até o ponto de captação para o novo usuário, a mesma está sujeita às ações naturais do ciclo hidrológico (diluição, autodepuração).

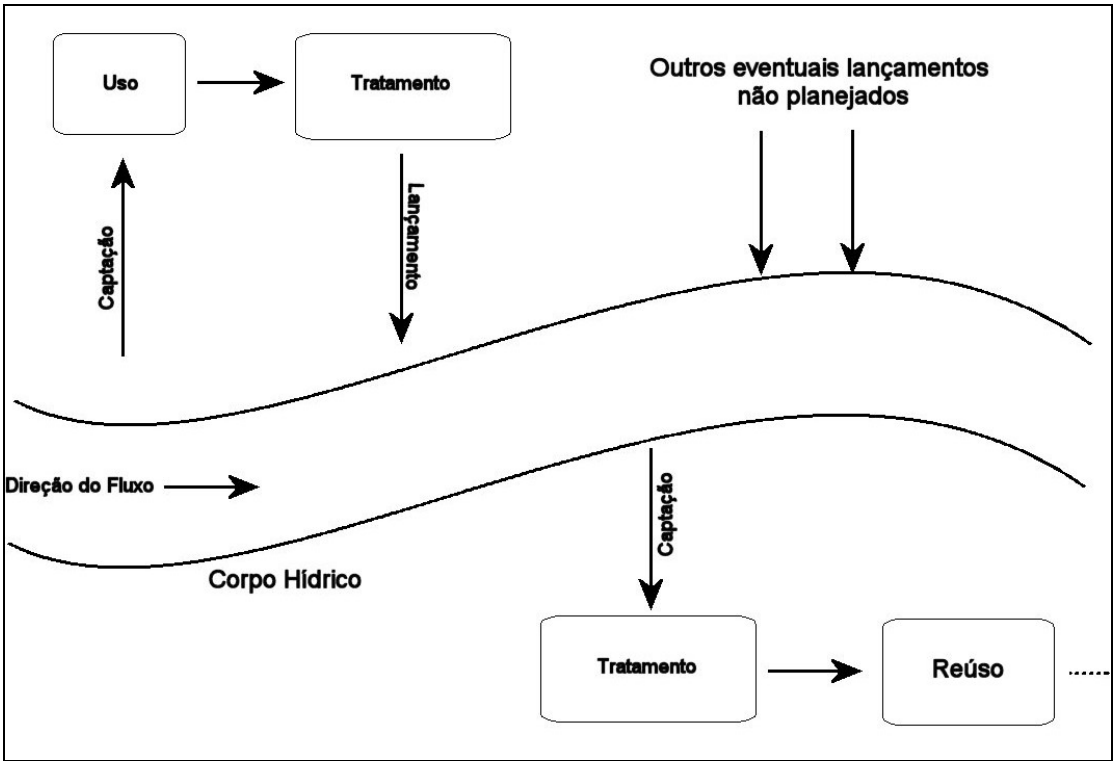


Figura 2.1: Reúso indireto não planejado da água (Adaptado de Lavrador, 1987)

- **Reúso indireto planejado da água:** ocorre quando os efluentes depois de tratados são descarregados de forma planejada nos corpos de águas superficiais ou subterrâneas, para serem utilizadas a jusante, de maneira controlada, no atendimento de algum uso benéfico. O reúso indireto planejado da água pressupõe que exista também um controle sobre as eventuais novas descargas de efluentes no caminho, garantindo assim que o efluente tratado estará sujeito apenas a misturas com outro efluentes que também atendam ao requisitos de qualidade do reuso objetivado.

- Reúso direto planejado das águas (Figura 2.2): ocorre quando os efluentes, depois de tratados, são encaminhados diretamente de seu ponto de descarga até o local do reúso, não sendo descarregados no meio ambiente. É o caso com maior ocorrência, destinando-se a uso em indústria ou irrigação.

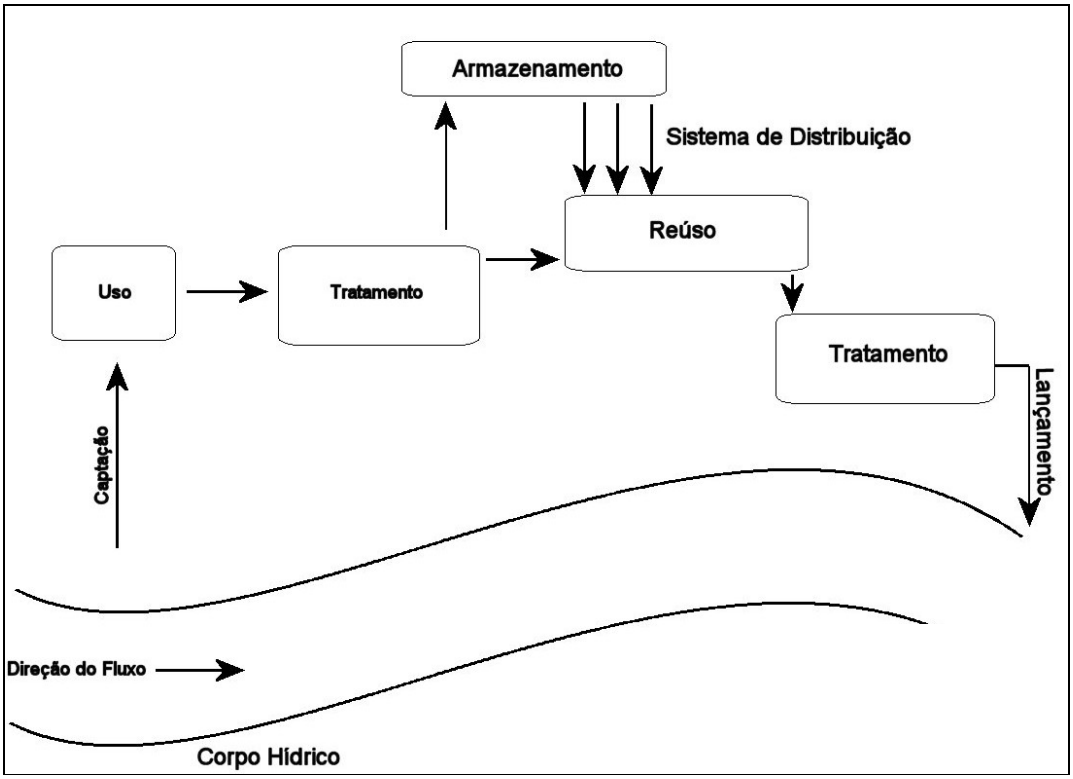


Figura 2.2: Reúso direto planejado da água (Adaptado de Lavrador, 1987)

- Reciclagem de água: é o reúso interno da água, antes de sua descarga em um sistema geral de tratamento ou outro local de disposição. Essas tendem, assim, como fonte suplementar de abastecimento do uso original. Este é um caso particular do reúso direto planejado

O reúso também pode ser classificado de acordo com o fim a que se destina. Hespanhol (1999) apresenta os seguintes:

- Usos Urbanos: são várias as possibilidades de reúso urbano. De acordo com as atividades em que se pode utilizar a água de reúso, exige-se um padrão diferenciado de qualidade, exigindo tipos e níveis de tratamento diferenciados.

No contexto urbano, os esgotos tratados podem ser utilizados para fins potáveis e não potáveis.

Os riscos relacionados ao reúso potável são bastante elevados, por causa da presença de organismos patogênicos e de compostos orgânicos sintéticos provenientes de estações de tratamento de esgotos e de pólos industriais. Isso torna os usos para fins potáveis, por vezes, inviáveis, em função do elevado custo dos tratamentos avançados exigidos para a garantia da proteção adequada à saúde.

Para os casos nos quais há a exigência desta prática, algumas recomendações devem ser seguidas como a utilização de sistemas de reúso indireto. Neste caso, a disposição dos esgotos tratados deve ser feita em um corpo hídrico (superficial ou subterrâneo), em que ficará por um tempo de retenção adequado, de onde será captado para encaminhamento à estação de tratamento de águas, e posteriormente distribuído. A premissa do funcionamento adequado deste é a de que os corpos hídricos tenham qualidade adequada para reduzir a carga poluidora a níveis aceitáveis.

Vale chamar a atenção para a relevância dos sistemas apropriados de tratamento, devendo-se possuir unidades suplementares, além daquelas necessárias apenas para o tratamento de efluentes que são lançados nos corpos hídricos, bem como a previsão da retenção dos efluentes tratados em aquíferos subterrâneos por períodos longos, antes da sua utilização.

O reúso urbano para fins não potáveis envolve riscos bem menores e deve ser, ainda conforme Hespanhol (1999), a primeira opção de reúso para a área urbana. Mesmo sendo mais seguro, este não dispensa uma série de cuidados, principalmente quando do uso, decorrer contato direto com a

população. Segundo o autor, o maior potencial de reúso são os que empregam esgotos tratados para:

- Irrigação de parque e jardins públicos, centros esportivos, campos de futebol, quadras de golfe, jardins de escolas e universidades, gramados, árvores e arbustos decorativos ao longo de avenidas e rodovias;
- Irrigação de áreas ajardinadas ao redor de edifícios públicos, residenciais e industriais;
- Reserva de proteção contra incêndio;
- Sistemas decorativos aquáticos tais como fontes e chafarizes, espelhos e quedas d'água;
- Descarga sanitária em banheiros públicos e em edifícios comerciais e industriais;
- Lavagem de trens e ônibus públicos.

Seis prefeituras da Região Metropolitana de São Paulo (São Paulo, Barueri, São Caetano do Sul, Carapicuíba, Diadema e Santo André) já utilizam os esgotos tratados pela SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo), na limpeza pública. Ao invés de utilizar água potável para lavar as ruas que abrigam feiras livres, caminhões pipa devidamente preparados seguem até as ETEs de Barueri, Parque Novo Mundo e São Miguel Paulista para se abastecerem da água de reuso. Atualmente, são consumidos para esta finalidade cerca de 34 milhões de litros de água todos os meses. Os custos da água de reúso são bastante reduzidos (R$ 0,44 m^3 de água) em comparação com os da água fornecida pela companhia para a finalidade acima citada, que podem variar de R$ 3,82 a R$10,18 por m^3 de água utilizada (SABESP, 2009).

Segundo Semura *et al.* (2008), a SABESP tem a intenção de ampliar a oferta de água de reúso para fins não potáveis na Região Metropolitana do Estado de São Paulo. Foram levantadas algumas alternativas para utilização de água de reúso para a Prefeitura de São Paulo, através de um levantamento

técnico, no horizonte de atuação e implantação dos primeiros projetos em dezembro/2008. Foram feitos levantamentos em três segmentos distintos: Frota de ônibus urbanos, parques e praças. Diante da distribuição muito dispersa e complexa dos locais de aplicação, adotou-se um raio de atendimento de 10 km de distância das Estações de Tratamento, levando em consideração as suas capacidades atuais de fornecimento de água de reúso. Chegou-se à conclusão que poderiam ser atendidos uma quantidade de 15 parques, 2.065 praças e 7.517 Ônibus, chegando a um consumo médio de 113.117 m^3/mês. Adotando-se as tarifas de água de reúso e de água potável, R$ 0,77/m^3 e R$ 9,69/m^3 respectivamente, foi observado que ocorrera uma economia de 92% nos custos além do volume de água potável, que atenderia uma população de 18.595 habitantes, equivalente ao município de Águas de Lindóia. Vale ressaltar que os preços citados não incluem o preço do transporte da água de reúso.

A ETE Penha da CEDAE (Companhia Estadual de Água e Esgotos), no Rio de Janeiro, está reutilizando água a partir de efluente secundário (filtros percoladores e lodos ativados) – em caminhões de desentupimento (água desinfetada), na lavagem de centrífugas e na diluição de polímeros, sendo estes últimos de uso interno na ETE (ABES 2005 apud FLORÊNCIO *et al* 2006).

-Usos Industriais (Figura 2.3): o reúso industrial pode ser realizado através do aproveitamento dos efluentes produzidos na própria indústria, com ou sem tratamento prévio, ou pela utilização dos esgotos tratados proveniente das estações de tratamento das companhias de saneamentos, que os distribui por uma rede paralela de alimentação (FIESP/CIESP, 2004). O primeiro é designado como reúso macro interno, e o segundo como macro externo.

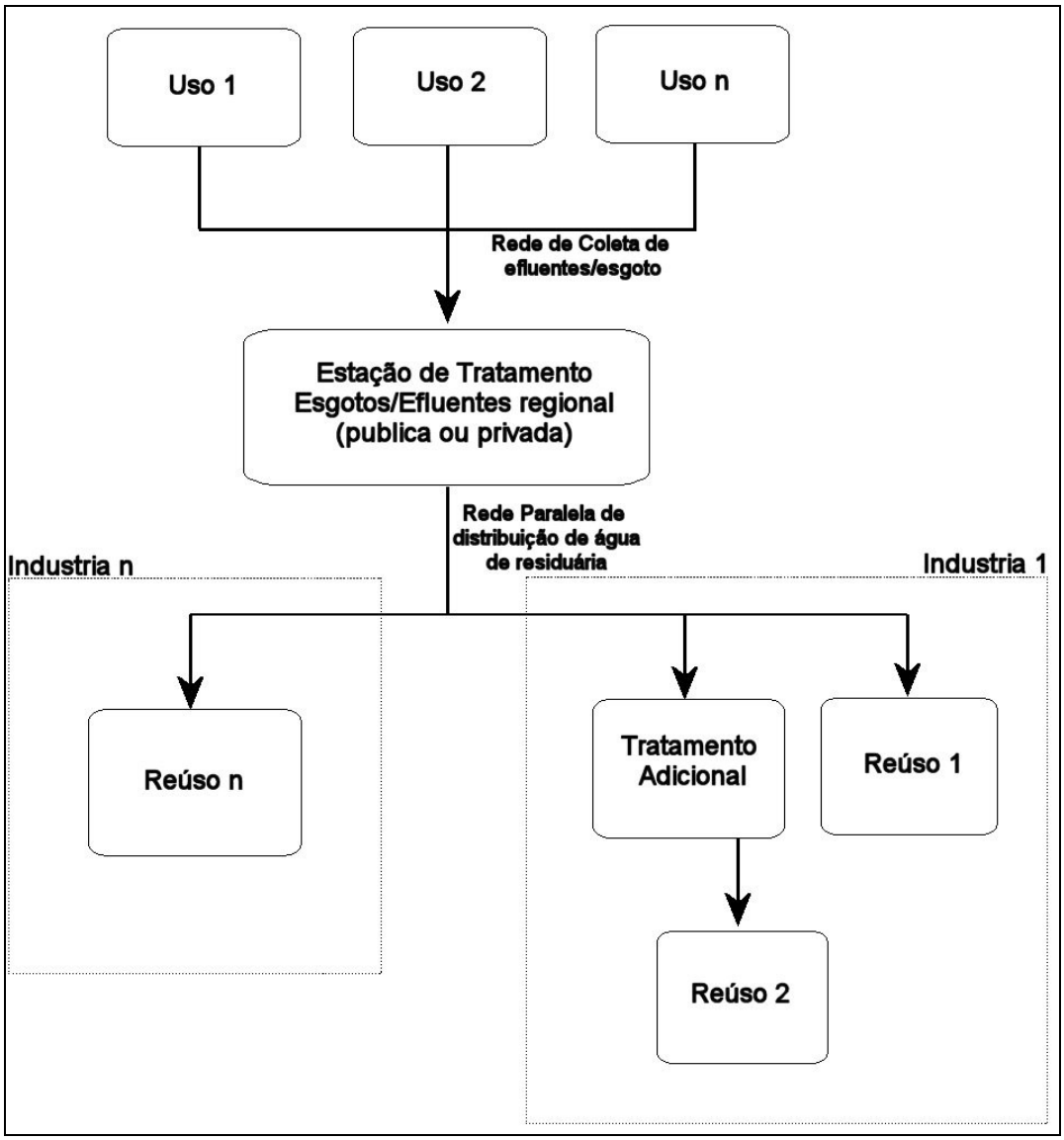


Figura 2.3: Reúso industrial Macro externo. (Adaptado de Rodrigues, 2005).

Na Região Metropolitana de São Paulo, por exemplo, já existem experiências relativas ao reúso macro-externo, cujo fornecedor é a SABESP. O primeiro usuário foi a Coats Correntes, que iniciou o aproveitamento dos esgotos tratados em 1997, e reutiliza aproximadamente 20 litros por segundo (50 milhões de litros por mês), sendo alimentada por uma rede construída especificamente para esta finalidade liberando, desta forma, a mesma quantidade de água de melhor qualidade, para outros usos. Os demais usuários, assim como algumas construtoras (OAS, VA Engenharia, Consdon e

Marquise) desde 2002, compram 172 mil litros de água por dia, totalizando 4,5 milhões de litros por mês. (SABESP, 2009).

O reúso macro interno pode ser implantado de duas formas distintas: através do reúso em cascata ou pelo que se designa de reúso de efluentes tratados (FIESP/CIESP, 2004).

O reúso em cascata acontece quando o efluente produzido em um processo industrial pode ser diretamente utilizado em outro processo subseqüente. Isto só é viável quando as características do efluente produzido no primeiro uso forem compatíveis com a qualidade requerida para o próximo. A Figura 2.4 ilustra o reúso em cascata.

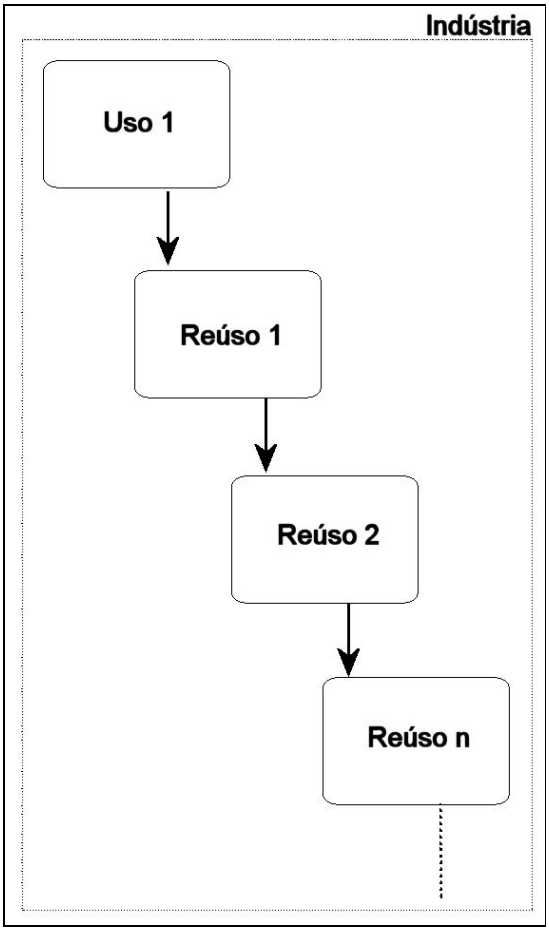


Figura 2.4: Reúso industrial macro-interno: reúso em Cascata.(Adaptado de Rodrigues, 2005).

No reúso de efluentes tratados, os efluentes gerados no processo industrial como um todo, proveniente de diversos usos, são enviados para a Estação de Tratamento de Efluentes, onde após tratamento atingem um determinado padrão de qualidade. O esquema da Figura 2.5 ilustra o reúso de efluentes tratados.

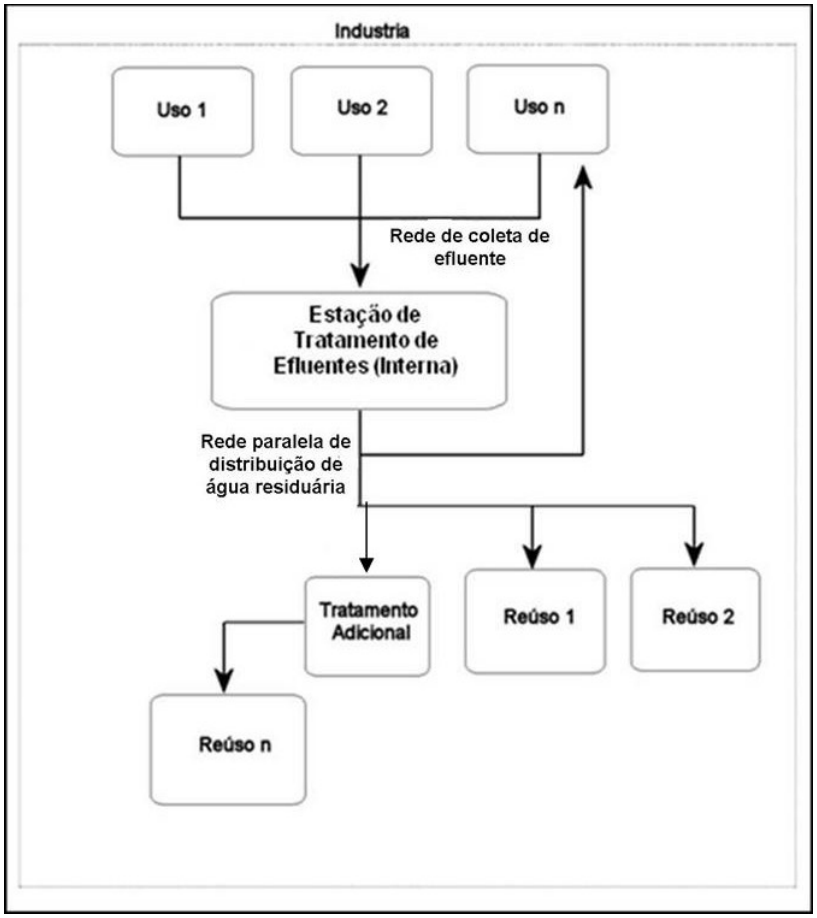


Figura 2.5: Reúso industrial macro-interno (reúso de efluentes tratados) (Adaptado de Rodrigues, 2005).

Segundo Mierzwa & Hespanhol (2005), um estudo efetuado na Região Metropolitana de São Paulo avaliou em aproximadamente R$ 1,80 por metro cúbico o preço de mercado de água de reúso, tratado como a água de *make up* (reposição) para torres de resfriamento, enquanto o custo unitário associado a

sistemas internos de tratamento varia entre R$ 0,80 a R$ 1,20 por metro cúbico.

Por outro lado, normalmente nas indústrias, há uma série de pontos de consumo de água, que exigem padrões de qualidade diferenciados. Novamente, o reúso só se efetivará quando as características do efluente tratado forem compatíveis com aquelas dos usos específicos. Há casos em que é necessária a instalação de um processo adicional para o tratamento dos efluentes, a fim de que eles atinjam o padrão requerido.

-Usos Agrícolas: Especial atenção deve ser atribuída a este tipo de reúso devido ás grandes vazões envolvidas. Segundo Hespanhol (2002), ás práticas agrícolas estão relacionadas o maior consumo de água doce, chegando até a 80% uso consuntivo em alguns países. Em situações de escassez de água, a produção agrícola pode ser comprometida, havendo necessidade latente da busca por fontes alternativas de águas e de melhores técnicas de irrigação que visem o aumento de sua eficiência.

Neste contexto, emerge a possibilidade do uso dos esgotos tratados para irrigação de algumas culturas, cuja produtividade têm sido comprovadamente aumentada, em função da carga de nutrientes que estes carregam consigo, podendo minimizar o uso de fertilizantes sintéticos. Estudos realizados por Monte e Sousa (1992); Vazquez-Montiel et al (1996); Mota *et al* (1997) e Sousa e Leite (2003), mostraram que a produtividade (t/ha) de culturas irrigadas com esgotos tratados foi superior (15 a 30%) àquela de culturas irrigadas com água de abastecimento e solo adubado com fertilizantes do tipo NPK, demonstrando a viabilidade do uso de esgoto na irrigação.

A maioria dos autores classifica o reúso agrícola de acordo com o tipo de cultura que será irrigada. Westerhoff apud Brega e Mancuso (2003) apresenta 2 grupos:

- **Grupo 1**: incluem as plantas não comestíveis pelos Homens, tais como silviculturas, pastagens, fibras e sementes.
- **Grupo 2**: onde são consideradas as plantas consumidas cruas ou cozidas.

Cada um deles requer padrões diferenciados de qualidade das águas utilizadas para irrigação.

De acordo com Hespanhol (2003a), durante as últimas décadas, o aproveitamento dos esgotos para a irrigação de culturas obteve um aumento significativo, em função de diversos fatores:

- A dificuldade em obter fontes alternativas de água;
- O elevado custo de fertilizantes (visto que os esgotos já contêm parte dos nutrientes necessários para diversas culturas, o que pode reduzir a necessidade da utilização de fertilizantes sintéticos);
- O crescimento do conhecimento sobre os riscos à saúde pública e a segurança sobre a minimização de impactos sobre o solo, se as precauções adequadas forem tomadas;
- Os custos elevados de tratamento para a descarga de efluentes nos corpos receptores (o reúso permite a redução destes lançamentos, como já descrito anteriormente);
- O aumento da aceitação da prática do reúso agrícola; e
- O reconhecimento pelos órgãos gestores de recursos hídricos do valor intrínseco da prática.

-Uso para aquicultura: os reservatórios destinados à produção de peixes e plantas aquáticas também podem ser abastecidos por esgotos tratados. Assim como na agricultura, há possibilidade do aumento da produtividade nestas atividades através do reúso (WESTERHOFF *apud* SETTI, 1995).

-Uso para recarga de aquífero: a exploração das águas dos lençóis subterrâneos para consumo realizada de forma equivocada, pode comprometer a quantidade de água disponível de uma certa região, prejudicar a qualidade do aquífero através da intrusão da cunha salina quando em cidades litorâneas; ou ainda tornar a ocupação do solo difícil naquela região, em função da ocorrência de recalques acentuados.

Os aquíferos são alimentados naturalmente de maneira contínua ou intermitente, através de áreas de recarga natural tais como lagos, rios, campos irrigados ou diretamente pela infiltração das águas da chuva. Contudo, quando a extração supera a taxa de realimentação natural, estes problemas podem ocorrer.

O emprego dos efluentes adequadamente tratados para a recarga dos aqüíferos é uma forma para se evitar ou abrandar esses efeitos. Segundo Light apud Hespanhol (2003b), a recarga artificial de aquífero geralmente é feita de duas formas: através da infiltração superficial utilizando bacias ou canais de infiltração ou, por poços de injeção.

Os poços de injeção, construídos somente para este fim, vão desde a superfície do solo diretamente até o aquífero. Esta tecnologia exige o tratamento avançado das águas que serão injetadas, para que estas não comprometam a qualidade do aquífero. Os custos, deste modo, são elevados, uma vez que ao tratamento exigido, somam-se os das obras necessárias para a instalação de poços.

Já a recarga feita através de instalações superficiais de infiltração (bacias e canais) permite que o tratamento das águas seja finalizado durante o movimento dos efluentes pelo solo e no próprio aquífero (HESPANHOL, 2003b). Este sistema é designado de Tratamento Solo Aqüífero (TSA), e só pode ser realizado quando as condições hidrogeológicas locais forem compatíveis.

Ainda segundo Hespanhol (2003b), os efluentes recuperados após o TSA, podem atingir níveis de qualidade exigidos para fins agrícolas, industriais, urbanos não potáveis e eventualmente até para abastecimento público.

Portanto, além de ser possível o crescimento da disponibilidade hídrica local através deste tipo de reúso, e a redução dos problemas citados, a recarga pode ser avaliada como uma alternativa para os sistemas de tratamento de efluentes.

Para o estabelecimento desta prática devem ser considerados os riscos e condições a ela associadas. Oaksford *apud* Hespanhol (2003b) ressalta que:

- A recuperação de parte das águas infiltradas pode não ocorrer;
- Em função das características locais do solo, as áreas necessárias para as bacias de infiltração podem ser muito grandes;
- As áreas necessárias para a operação destes sistemas são normalmente maiores que aquelas requeridas para as estações de tratamento convencionais;
- Há aumento do risco da contaminação do aqüífero;
- As demandas de emergências podem não ser atendidas, em função das velocidades baixas de escoamento dos efluentes no solo; e
- As “estruturas institucionais inadequadas e ausência de legislação específica podem ser insuficientes para proteger os direitos sobre a água e levar problemas de responsabilidade legal, particularmente nos aspectos concernentes à outorga e à cobrança pelo uso da água subterrânea.” (HESPANHOL, 2003b:57).

A Figura 2.6 apresenta um esquema (resumo) dos fins a que se podem destinar as águas de reúso.

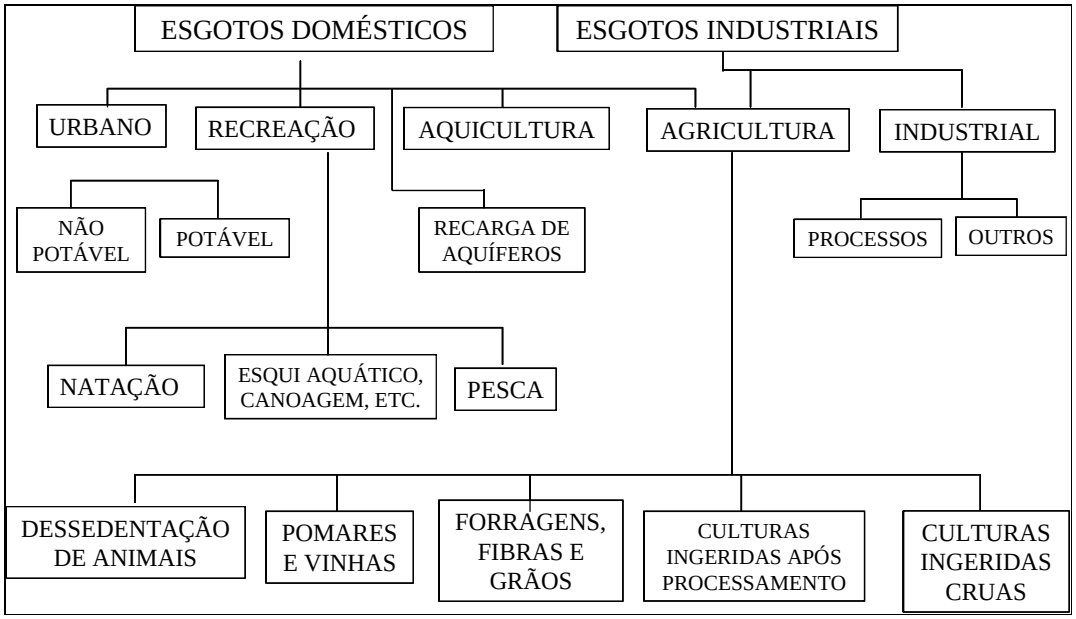


Figura 2.6: Fins a que se destinam as águam de reúso (Adaptado Braga, 2002)

2.1.2. Institucionalização e Regulamentação do Reúso de Água

Geralmente, as regulamentações e as diretrizes sobre o reúso, surgem da necessidade de adequar as práticas que já acontecem, ou ainda antecipando a sua ocorrência em um futuro próximo.

Os critérios estabelecidos para a prática do reúso são baseados principalmente na proteção à saúde pública e ao meio ambiente. Normalmente apresentam os tratamentos mínimos necessários, os padrões de qualidades exigidos para determinados usos, a eficiência exigida para o tratamento, a concepção dos sistemas de distribuição e o controle de uso de áreas. (CROOK, 1998)

A Constituição de 1988 estabelece que a água é um bem da União ou dos estados, ressaltando que o seu aproveitamento econômico e social deve buscar a redução de desigualdades.

A Lei 9.433 de 1997 cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e estabelece os seguintes instrumentos de gerenciamento:

- Outorga pelo direito de recursos hídricos;
- Cobrança pelo uso da água
- Enquadramento dos corpos d'água em classes de uso;
- Sistema de Informações sobre os recursos hídricos;
- Plano de Recursos Hídricos.

Um dos objetivos da cobrança pelo uso da água é incentivar o seu uso racional, que pode considerar medidas de redução do consumo por meio de melhorias no processo e pela prática de reúso. O usuário que reutiliza suas águas reduz as vazões de captação, e lançamento e consequentemente tem sua cobrança reduzida. Assim quanto maior for o reúso, menor será a utilização de água e menor será a cobrança.

Em setembro de 1997, surgiu a primeira regulamentação que tratou de reúso de água no Brasil: a norma técnica NBR-13.969. Nessa, o reúso é abordado como uma opção à destinação de esgotos de origem essencialmente doméstica ou com características similares. Também foram definidos quatro classes de água de reúso e seus respectivos padrões de qualidade, apresentados na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classes de água de reúso pela NBR-13.969 e padrões de qualidade

Água de Reúso	Aplicações	Padrões de Qualidade
Classe 1	Lavagem de carros e outros usos com contato direto com o usuário com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes	Turbidez < 5 uT Coliformes Termotolerantes < 200 NMP/100 mL Sólidos Dissolvidos Totais < 200 mg/L pH entre 6 e 8 Cloro residual entre 0,5 mg/L a 1,5 mg/L
Classe 2	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais paisagísticos, exceto chafarizes.	Turbidez < 5 uT Coliformes Termotolerantes < 500 NMP/100 mL Cloro residual superior a 0,5 mg/L
Classe 3	Descargas em vasos sanitários.	Turbidez < 10 uT Coliformes Termotolerantes < 500 NMP/100 mL
Classe 4*	Irrigação de pomares, cereais, forragens, pastagem para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.	Coliformes Termotolerantes < 5000 NMP/100 mL Oxigênio dissolvido > 2,0 mg/L

* As aplicações devem ser interrompidas pelo menos 10 dias antes da colheita.

Em 2005, o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), promulgou a Resolução 54, que estabelece modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água no Brasil. Nessa resolução, são definidas as cinco modalidades de reúso de água:

- Reúso para fins urbanos;
- Reúso para fins agrícolas e florestais;
- Reúso para fins ambientais;
- Reúso para fins industriais;
- Reúso na aqüicultura.

Deste modo, a regulamentação do reúso de água encontra-se em andamento no Brasil, até mesmo pelo reconhecimento (explicitado nos considerandos da Resolução CNRH N^0 54/2005) de que as práticas de reúso já são uma realidade no país. O CNRH já elaborou uma proposta de resolução que estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal. A Tabela 2.2 apresenta as características químicas e a Tabela 2.3 as características microbiológicas recomendadas para a água de reúso para fins agrícolas e florestais, de acordo com a proposta de resolução do CNRH.

Tabela2.2: Características químicas recomendadas para a água de reúso para fins agrícolas e florestais, de acordo com a proposta de resolução do CNRH.(Adaptado CNRH)

Substâncias	Concentração $mg.L^{-1}$*	Substâncias	Concentração $mg.L^{-1}$*
Alumínio	5,0	**Fluoreto**	1,0
Arsênio	0,1	**Lítio**	2,5
Berílio	0,1	**Manganês**	0,2
Boro	0,5	**Mercúrio**	0,002
Cádmio	0,01	**Molibdênio**	0,01
Chumbo	5,0	**Níquel**	0,2
Cloreto	100-350	**Selênio**	0,02
Cobalto	0,05	**Sódio**	70,0
Cobre	0,2	**Vanádio**	0,1
Cromo	0,1	**Zinco**	2
Ferro	5,0		

* Os valores recomendados nesta Tabela são passíveis de adequação em função do tipo de solo, cultura e métodos de irrigação.

Tabela2.3: Características microbiológicas recomendadas para a água de reúso para fins agrícolas e florestais, de acordo com a proposta de resolução do CNRH.(Adaptado CNRH)

Categoria	C_{Ter} /100mL (1)	Ovos Helmintos/L(2)	Observações
A(3)	$=1X10^3$	=1	$=1x10^4 C_{Ter}$ / 100mL no caso de irrigação localizada, por gotejamento, de cultivos que se desenvolvem distantes do nível do solo ou técnicas hidropônicas em que o contato com a parte comestível da planta seja minimizado.
B(4)	$= 1x10^3$	=1	$=1x10^5 C_{Ter}$ / 100mL no caso da existência de barreiras adicionais de proteção ao trabalhador (5) É facultado o uso de efluentes (primários e secundários) de técnicas de tratamento com reduzida capacidade de remoção de patógenos, desde que associado ao método de irrigação subsuperficial (6)

Notas:
(1) Coliformes termotolerantes (CTer); média geométrica durante o período de irrigação, alternativa epreferencialmente pode-se determinar *E.coli*.
(2) Nematóides intestinais humanos; média aritmética durante o período de irrigação.
(3) Irrigação, inclusive hidroponia, de qualquer cultura incluindo produtos alimentícios consumidos crus.
(4) Irrigação, inclusive hidroponia, de produtos alimentícios não consumidos crus, produtos não alimentícios, forrageiras, pastagens, árvores, cultivos usados em revegetação e recuperação de áreas degradadas.
(5) Barreiras adicionais de proteção encontradas em agricultura de elevado nível tecnológico, incluindo o emprego de irrigação localizada e equipamentos de proteção individual. Exclui-se desta nota a irrigação de pastagens e forrageiras destinadas à alimentação animal.
(6) Neste caso não se aplicam os limites estipulados de coliformes e ovos de helmintos, sendo a qualidade do efluente uma conseqüência das técnicas de tratamento empregadas.

2.1.3. Grau de Tratamento Necessário para a Água de Reúso.

O processo de tratamento do esgoto pode adotar diferentes tecnologias para depuração do efluente, mas, de modo geral segue um fluxo que compreende as seguintes etapas (VON SPERLING, 2005):

- pré tratamento ou tratamento preliminar - remoção de grandes sólidos e areia para proteger as demais unidades de tratamento, os dispositivos de transporte (bombas e tubulações) e os corpos receptores. A remoção da areia previne, ainda, a ocorrência de abrasão nos equipamentos e tubulações e facilita o transporte dos líquidos. É feita com o uso de grades que impedem a passagem de trapos, papéis, pedaços de madeira, etc.; e com as caixas de areia para remover a areia contida no esgoto.

- primário - os esgotos ainda contém sólidos em suspensão não grosseiros cuja remoção pode ser feita em unidades de sedimentação, reduzindo a matéria orgânica contida no efluente. Os sólidos sedimentáveis e flutuantes são retirados através de mecanismos físicos, via decantadores. Os esgotos fluem vagarosamente pelos decantadores, permitindo que os sólidos em suspensão, de maior densidade, sedimentem gradualmente no fundo formando o lodo primário bruto. Os

materiais flutuantes como graxas e óleos, de menor densidade, são removidos na superfície. Como exemplo, temos os tanques de decantação primário e as fossas sépticas.

- secundário - processa, principalmente, a remoção de sólidos e de matéria orgânica não sedimentável e, eventualmente, nutrientes como nitrogênio e fósforo. Após a fase primária e secundária, a eliminação de DBO deve alcançar 90%. É a etapa de remoção biológica dos poluentes e sua eficiência permite produzir um efluente em conformidade com o padrão de lançamento previsto na legislação ambiental. Basicamente, são reproduzidos os fenômenos naturais de estabilização da matéria orgânica que ocorrem no corpo receptor, sendo que a diferença está na maior velocidade do processo, na necessidade de utilização de uma área menor e na evolução do tratamento em condições controladas. São exemplos, os processos de filtração biológica e suas variantes; processos de lodos ativados; lagoas de estabilização e variantes, tratamento anaeróbio e disposição sobre o solo.

- terciário - remoção de poluentes tóxicos ou não biodegradáveis ou eliminação adicional de poluentes não degradados na fase secundária.

Segundo a NBR 13969, o grau de tratamento para uso múltiplo de esgoto tratado é definido, regra geral, pelo uso mais restringente quanto à qualidade de esgoto tratado. No entanto, conforme o volume estimado para cada um dos usos podem-se prever graus progressivos de tratamento (por exemplo, se o volume destinado para uso com menor exigência for expressivo, não haveria necessidade de se submeter todo o volume de esgoto a ser reutilizado ao máximo grau de tratamento, mas apenas uma parte, reduzindo-se o custo de implantação e operação), desde que houvesse sistemas distintos de reservação e de distribuição. Nos casos simples de reuso menos exigente (por exemplo, descarga dos vasos sanitários) pode-se prever o uso da água de enxágüe das máquinas de lavar, apenas desinfetando, reservando aquelas

águas e recirculando ao vaso, em vez de enviá-las para o sistema de esgoto para posterior tratamento. A Figura 2.7 (A) mostra os diferentes níveis de tratamento aos quais o efluente pode ser submetido. A Figura 2.7 (B) apresenta a associação de efluentes submetidos a diferentes graus de tratamento aos possíveis fins de utilização.

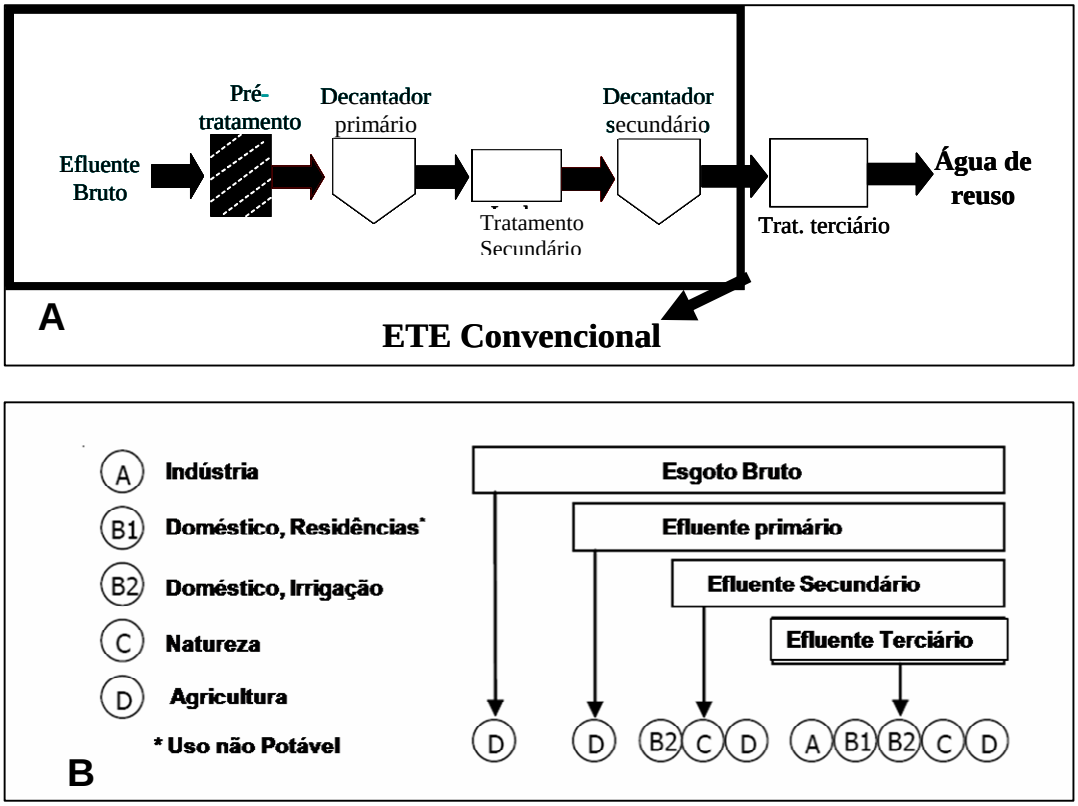


Figura 2.7: (A)Diferentes níveis de tratamento aos quais o efluente pode ser submetido. (B) Associação de efluentes submetidos a diferentes níveis de tratamento aos possíveis fins de utilização. Adaptado de Graaf et al, (2005).

A partir do ponto de vista tecnológico, atualmente é possível tratar o efluente para qualquer nível desejável. Porém, o grande problema é o custo do tratamento. De acordo com a necessidade de utilização da água, deve-se fazer uma análise de custo e benefício relacionando à qualidade da água desejada (SALGOT, 2008).

2.1.4. Critérios de Qualidade da Água

A qualidade da água é definida em função de características físicas, químicas, microbiológicas e radioativas. Segundo FIESP/CIESP (2004), dependendo da atividade na qual a água vai ser aplicada, o grau de qualidade exigido pode variar significativamente:

- **Consumo humano:** água potável, atendendo às características estabelecidas pela Portaria no 518 – Norma de qualidade da água para consumo humano, de 25/03/2004, do Ministério da Saúde (www.saude.gov.br);

- **Matéria prima:** Para esse tipo de fim, o grau de qualidade da água pode variar significativamente, podendo-se admitir a utilização de uma água com característica equivalente ou superior à da água utilizada para consumo humano, tendo-se como principal objetivo a proteção da saúde dos consumidores finais e/ou a garantia da qualidade final do produto.

- **Fluido auxiliar:** Da mesma forma que a água é utilizada como matéria-prima, o grau de qualidade da água para uso como um fluido auxiliar irá depender do processo à que esta se destina. Caso essa água entre em contato com o produto final, o grau de qualidade será mais ou menos restritivo, em função do tipo de produto que se deseja obter. Não havendo contato da água com o produto final, esta poderá apresentar um grau de qualidade menos restritivo que o da água para consumo humano, principalmente com relação à concentração residual de agentes desinfetantes.

- **Geração de energia:** dependendo do processo de transformação utilizado a água deverá apresentar graus muito diferentes de

qualidade. No aproveitamento da energia potencial ou cinética, a água é utilizada no seu estado natural, podendo-se utilizá-la na forma bruta, captada de um rio, lago, ou outro sistema de reservação, devendo-se impedir que materiais de grandes dimensões, detritos, danifiquem os dispositivos de geração de energia. Já para o aproveitamento da energia térmica, após aquecimento e vaporização da água por meio do fornecimento de energia térmica, a mesma deve apresentar um elevado grau de qualidade, para que não ocorram problemas nos equipamentos de geração de vapor ou no dispositivo de conversão de energia;

- **Fluido de aquecimento e/ou resfriamento:** Para a utilização da água na forma de vapor, o grau de qualidade deve ser bastante elevado, enquanto a utilização da água como fluido de resfriamento requer um grau de qualidade bem menos restritivo, devendo-se levar em consideração a proteção e a vida útil dos equipamentos com os quais esta água irá entrar em contato.

Diversas aplicações exigem que um grande número de parâmetros seja atingido, fazendo com que sejam minimizados os riscos ao processo, produto ou sistema em que esta água será utilizada. As Tabelas a seguir apresentam alguns dados sobre requisitos da água para diferentes aplicações. As Tabelas 2.4 e 2.5 apresentam critérios segundo o Manual de orientações para o setor industrial (FIESP/CIESP 2004). A Tabela 2.6 apresenta os critérios internos desenvolvido pela SABESP, baseados na experiência internacional (SEMURA *et al.*, 2005).

Tabela 2.4: Padrão de Qualidade Recomendado para Geração de Vapor

PARÂMETRO*	Caldeira de Baixa pressão (<10 Bar)	Caldeira de Média pressão (10 a 50 Bar)	Caldeira de Alta pressão (>50 Bar)
Cloretos	+	+	+
Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)	700	500	200
Dureza	350	1	0,07
Alcalinidade	350	100	40
pH	7-10	8,2-10	8,2-9
Demanda Química de Oxigênio (DQO)	5,0	5,0	1
Sólidos Suspensos Totais (SST)	10	5	0,5
Compostos Orgânicos **	1	1	0,5
Nitrogênio Amoniacal	0,1	0,1	0,1
Sílica	30	10	0,7
Alumínio	5	0,1	0,01
Cálcio	+	0,4	0,01
Magnésio	+	0,25	0,01
Bicarbonato	170	120	48
Sulfato	+	+	+
Cobre	0,5	0,05	0,05
Zinco	+	0,01	0,01
Substâncias extraídas do CCl_4	1	1	0,5
Sulfeto de Hidrogênio	+	+	+
Oxigênio dissolvido	2,5	0,07	0,007

*Limites recomendados em mg/L, exceto pata Turbidez e pH, que são expressos em NTU e unidades respectivamente.
+ Aceito como recebido, caso sejam atendidos outros valores limites
++ Substâncias ativas ao azul de metileno
Fonte: Crook, 1996, *apud* FIESP/CIESP 2004 (Adaptada)

Tabela 2.5: Requisitos de qualidade para água de uso industrial.

Parâmetros (mg/L, exceto quando especificado o valor)															
Industria e Processo	Cor (UH)	Alcalini-dade (CaCO3)	Clore-to	Dureza (CaCO3)	Ferro	Manga-nes	Nitrato	pH (unida-des)	Sulfa-to	SDT	Sólidos Suspen-sos	Sili-ca	Cál-cio	Mag-né-sio	Bicar-bonato
Textil															
Engomagem	5			25	0,3	0,05		6,5 - 10,0		100	5				
Lavagem	5			25	0,3	0,01		3,0 - 10,5		100	5				
Branqueamento	5			25	0,3	0,01		2,0 - 10,5		100	5				
Tingimento	5			25	0,3	0,01		3,5 - 10,0		100	5				
Papel e Celulose															
Processo Mecânico	30		1000		0,3	0,1									
Processo Químico															
Não branqueado	30		200	100	1	0,5					10	50	20	12	
Branqueado	10		200	100	0,1	0,05					10	50	20	12	
Produtos Químicos															
Cloro e Álcali	10	80		140	0,1	0,1		6,0 - 8,0			10		40	8	100
Carvão de alcatrão	5	50	30	180	0,1	0,1			200	400	5		50	14	60
Compostos Orgânicos	5	125	25	170	0,1	0,1			75	250	5		50	12	128
Compostos Inorgânicos	5	70	30	250	0,1	0,1			90	425	5		60	25	210
Plásticos e resinas	2	1	0	0	0,005	0,005	0		0	1	2	0	0	0	0,1
Borracha Sintética	2	2	0	0	0,005	0,005	0		0	2	2	0,1	0	0	0,5
Produtos Farmacêuticos	2	2	0	0	0,005	0,005	0		0	2	2	0	0	0	60
Sabão e detergentes	5	50	40	130	0,1	0,1			150	300	10		30	12	125
Tintas	5	100	30	150	0,1	0,1			125	270	10		37	15	250
Madeira e resinas	200	200	500	900	0,3	0,2	5		100	1000	30	50	100	50	210
Fertilizantes	10	175	50	250	0,2	0,2	5		150	300	10	25	40	20	120
Explosivos	8	100	30	150	0,1	0,1	2		150	200	5	20	20	10	
Petróleo			300	350	1					1000	10		75	30	
Ferro e Aço															
Laminação a quente								5-9							
Laminação a frio								5-9			10				
Diversas															
Frutas e vegetais enlatados	5	250	250	250	0,2	0,2	10	6,5-8,5	250	500	10	50	100		
Refrigerantes	10	85			0,3	0,05									
Curtimento de Couro	5		250	150	50			6,0-8,0					60		
Cimento		400	250		25	0,5	0	6,5-8,5	250	600	500	35			

UH-Unidade Hazen (mg PT-Co)

Fonte: Nemerow & Dasgupta, 1999 *apud* FIESP/CIESP 2004 (Adaptada).

Tabela 2.6: Características necessárias da água de reúso para fornecimento para sistemas semi-abertos de resfriamento e usos não potáveis irrestritos.

PARÃMETROS	VALOR MÁXIMO
Alcalinidade Total ($CaCO_3$) (mg/L)	100
Cloretos (mg/L)	100
DBO_5 (mg/L)	10
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	1
pH	6,0 – 9,0
Sílica Total (SiO_2) (mg/L)	50
Sólidos Dissolvidos Totais (mg/L)	500
Sólidos Suspensos Totais (mg/L)	5
Sulfatos (SO_4) (mg/L)	200
Turbidez (NTU)	2
Coliformes Fecais (NMP/ 100 mL)	0

Fonte: Semura *et al* 2005 (Adaptada)

Cabe destacar que os dados apresentados nas Tabelas anteriores são valores indicativos, pois muitos se referem às indústrias de outros países, mas que podem ser úteis para uma avaliação inicial.

Outra observação a ser feita é que o grau de qualidade da água requerido para um determinado uso hoje, pode ser muito diferente do grau de qualidade da água que tenha sido utilizada por muitos anos no passado ou que venha a ser utilizado no futuro, pois com o desenvolvimento tecnológico, problemas associados à escassez de recursos naturais e poluição, podem surgir restrições com relação ao uso da água com o grau de qualidade até então considerado adequado.

2.3. Processos de Separação por Membranas (PSM).

Os PSM veem se destacando como uma tecnologia viável para o tratamento de água e de efluentes, sendo capaz de dar origem a águas de excelente qualidade e dentro dos parâmetros adequados para reúso. Em função disso, essa técnica será empregada no presente estudo. A seguir serão abordados o estado de arte da técnica, bem como seus fundamentos.

Além dos processos tradicionais de separação como, destilação, filtração, absorção, troca iônica, centrifugação, extração por solvente e outros, aparece há algumas décadas, outra classe de processos que utiliza membranas como barreiras seletivas. A Tabela 2.7 apresenta um breve histórico sobre os principais eventos que contribuíram para o desenvolvimento da ciência e tecnologia de membranas.

Tabela 2.7: Eventos que contribuíram para o desenvolvimento da ciência e tecnologia de membranas . (Adaptada de Baker ,2004).

Ano	Autor	Usos
1748	Nollet	Utilizou o termo osmose para descrever o transporte de água
1823	Dutrochett	Explicação sobre osmose e diálise
1840	Mitchell	Permeação H_2 e CO_2
1866	Ghaham	Mecanismo solução-difusão (O_2,N_2,)
1877	Trauber e Pfeffer	Estudos quantitativos sobre osmose
1887	Van't Hoff	Comportamento da solução diluída
1906	Bechold	Técnica de preparo de membranas microporosas de nitrocelulose
1930	Sartorius	Utilização comercial de membranas microporosas
1944	Kolff	Desenvolvimento do primeiro hemodialisador
1960	Loeb & Sourirajan, Riley, etc	Desenvolvimento da base para tecnologia e ciência de membrana moderna

Os PSM podem ser considerados relativamente novos, visto que a tecnologia de membranas foi inicialmente comercializada na década de 60, com utilização de membranas de osmose inversa para dessalinização da água do mar (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001). Entretanto, do final dos anos 60, até o início do século 21, este mercado passou de cerca de US$ 2 milhões/ano para cerca de US$ 4 ,4 bilhões/ano (HABERT *et al*, 2006)

O grande salto nesta tecnologia aconteceu no início dos anos 80, quando foram implementados nos Estados Unidos os primeiros sistemas de grande porte confiáveis de microfiltração e ultrafiltração que viabilizaram a aplicação da tecnologia de membranas filtrantes para o tratamento de água e de esgoto. Segundo reportou Yoo *et al* (1995), o primeiro sistema de microfiltração estudado detalhadamente foi a unidade instalada em Saratoga (Estados Unidos) em 1994 para o tratamento de água para abastecimento, na época, considerado o maior sistema de microfiltração do mundo, com capacidade de 19.000 m^3/dia. Devido à baixa dos custos de operação, esta tecnologia tem se difundido rapidamente nos países industrializados (SCHNEIDER & TSUTIYA, 2001).

Ainda de acordo Schneider & Tsutiya (2001), os principais fatores que impulsionam a adoção das tecnologias de membrana pelas empresas de saneamento básico são:

- redução do custo de construção e operação, tornando a tecnologia de membranas competitiva em relação aos sistemas de tratamento convencionais;

- os limites de patógenos e de contaminantes químicos em águas para consumo humano e em efluentes de estações de tratamento de esgotos, estão sendo progressivamente reduzidos pelas autoridades pertinentes. A capacidade da tecnologia convencional para atingir as novas metas estabelecidas na legislação de países desenvolvidos está praticamente esgotada;

- o esgotamento dos mananciais de água potável próximos aos grandes centros urbanos do planeta exige que o setor de saneamento básico reconsidere suas filosofias de operação. Um dos aspectos importantes nessa análise é a descoberta de que grande parte dos usos da água em centros urbanos não requer água

potável, mas poderia muito bem ser atendido com água de reúso com qualidade variadas.

2.3.1. Descrição do Processo de Separação por Membranas

A membrana é uma barreira semipermeável e seletiva entre duas fases (MULDER, 1991). Nos PSM a vazão efluente é separada em duas linhas distintas, denominadas permeado e concentrado. Permeado é a parcela que passa através da membrana, enquanto o concentrado é a parcela que fica enriquecida com solutos, ou sólidos retidos pela membrana. Nestes processos, o solvente (água) é forçado a atravessar uma membrana semipermeável pela aplicação de uma força motriz, por exemplo, diferença de pressão hidrostática (ΔP). As tecnologias de membranas filtrantes apresentam diversas aplicações, entre elas: para o pós-tratamento de esgoto sanitário e de efluentes industriais, bem como no tratamento de água para abastecimento.

A filtração convencional é empregada para a retirada de material particulado e coloidal presente no meio líquido. Na filtração com membranas as partículas removidas, podem incluir também constituintes dissolvidos dependendo do tipo de membrana e da operação pertinente. A Figura 2.8 apresenta esquema de definição do processo por membranas.

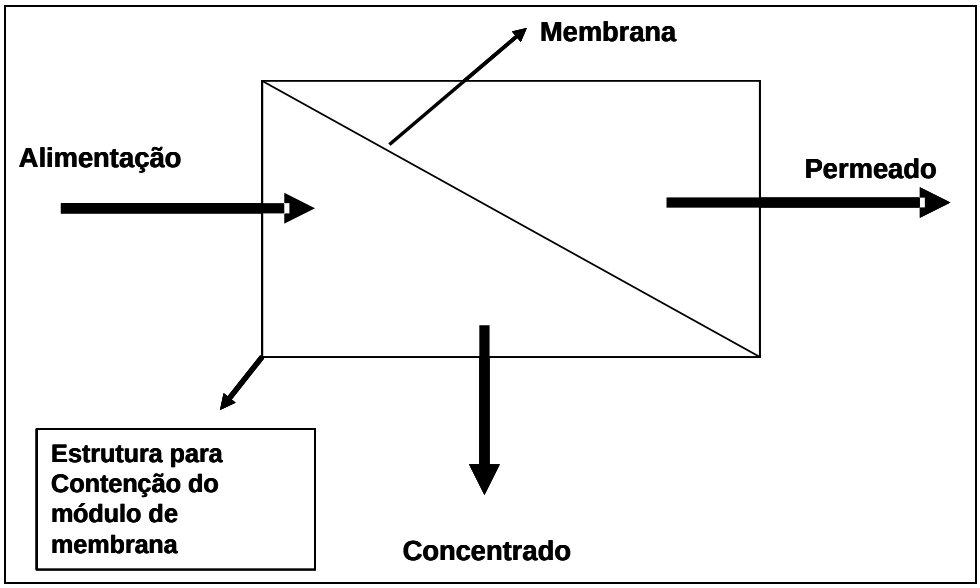


Figura 2.8: Esquema de definição do Processo de Separação por Membranas. (Adaptado METCALF & EDDY, 2003)

Em função da composição da solução problema a ser filtrada, se desenvolveram os processos com membranas de microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI). Nestes processos, a força motriz é o gradiente de pressão e estes podem ser considerados como uma extensão dos processos de filtração clássica. O que os diferencia é o tamanho do poro e a pressão necessária para operação. Na microfiltração, o sistema de filtração costuma ser operado sob diferença de pressão de operação de 0,2 a 2,0 bar. Os sistemas com membranas de UF são operados com pressão variando de 2,0 a 7,0 bar, os com membranas de NF com pressão entre 7,0 e 20,0 bar, enquanto que, para a osmose inversa, pressões da ordem de 20,0 a 80,0 bar são necessárias. Quanto ao tamanho dos poros, estes podem ser definidos como macroporos (> 50 nm), mesoporos (2 a 50 nm) e microporos (< 2 nm). As membranas de MF apresentam poros de 0,1 a 2,0 µm, enquanto a membrana de OI pode ser considerada densa, ou seja, não apresentando poros discretos (VIANA, 2004). A faixa típica dos tamanhos de poro usados nesses processos, bem como as características gerais dos processos por membranas encontram-se na Tabela 2.8.

Tabela 2.8: Características gerais dos processos por membranas. (Adaptado METCALF & EDDY, 2003)

Processo por Membranas	Força Motriz	Mecanismo típico de separação	Tipo de poros	Faixa Típica de Operação (µm)	Características do Permeado	Constituintes Típicos removidos
Microfiltração	Diferença de pressão hidrostática e vácuo	Peneiramento	Macroporos (>50nm)	0,08-2,0	Água + sólidos dissolvidos	SST, Turbidez, cistos e oocistos de protozoários, algumas bactérias e vírus.
Ultrafiltração	Diferença de pressão hidrostática	Peneiramento	Mesoporos (2-50nm)	0,005-0,2	Água + moléculas pequenas	Macromoléculas, colóides, algumas bactérias, alguns vírus e proteínas.
Nanofiltração	Diferença de pressão hidrostática	Peneiramento + difusão+ exclusão	Microporos (<2nm)	0,001-0,01	Água + moléculas pequenas,íons	Moléculas pequenas, dureza e vírus.
Osmose Inversa	Diferença de pressão hidrostática	Difusão + Exclusão	Densa (<2nm)	0,0001-0,001	Água + moléculas pequenas, íons	Muitas moléculas pequenas, cor, dureza, sulfatos, nitratos, sódio e outros íons.
Diálise	Diferença de concentração	Difusão	Mesoporos (2-50nm)	-	Água + moléculas pequenas	Macromoléculas, colóides, bactérias, alguns vírus e proteínas.
Eletrodiálise	Diferença de potencial elétrico	Troca iônica com membrana seletiva	Microporos (<2nm)	-	Água +íons	Sais ionizados

A figura 2.9 mostra de forma resumida uma comparação entre os PSM, levando em conta o tamanho dos poros, a pressão utilizada e as partículas retidas por cada um deles.

Segundo Strathmann (2001), as propriedades que determinam o desempenho ou a eficiência de uma membrana são alta seletividade e fluxo permeado: boa estabilidade mecânica, térmica e química sob as condições de operação; baixa tendência à formação de incrustações e boa compatibilidade com o ambiente de operação.

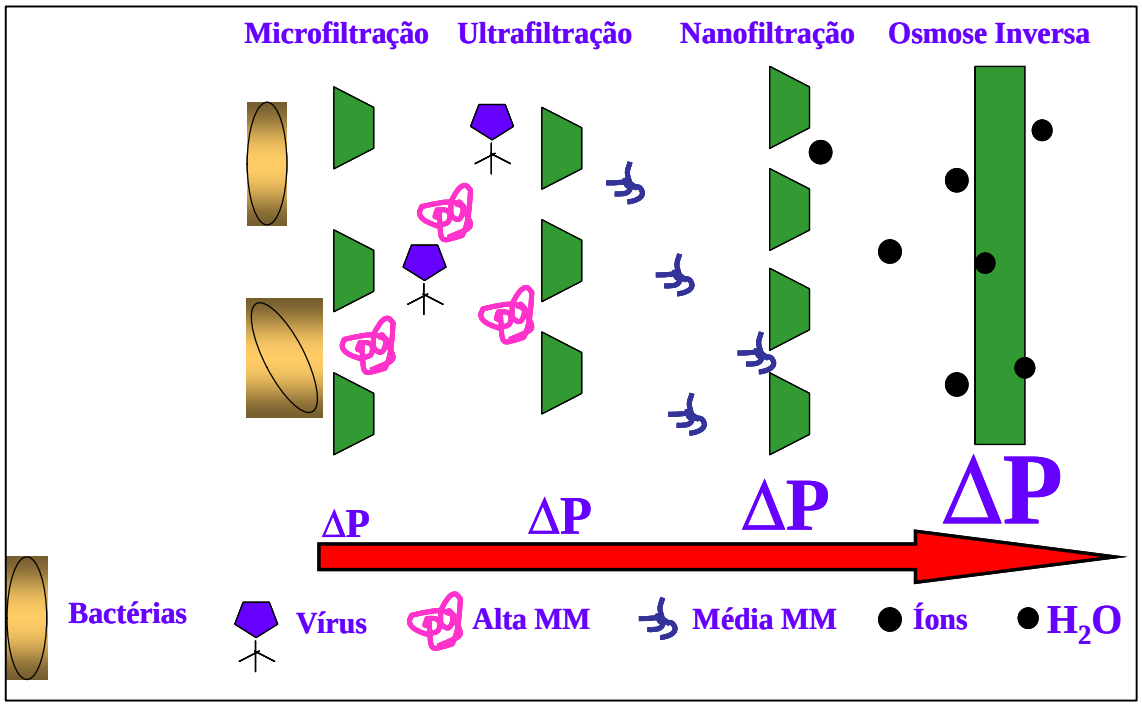


Figura 2.9: Comparação entre os PSM em relação à pressão utilizada, tamanho dos poros e partículas retidas.

Segundo Habert *et al*. (2006), quanto à porosidade, as membranas podem ser classificadas :

- **Densas –** praticamente sem poros; não possui poros na superfície em contato com a solução a ser processada; o transporte das moléculas envolve uma etapa de dissolução (sorção dos componentes na superfície da membrana), difusão através do material que constitui a membrana com posterior dessorção do componente.

- **Porosas –** seu transporte é fundamentalmente convectivo, ocorrendo através de seus poro.

Quanto à morfologia, as membranas podem ser classificadas como (Habert *et al*. (2006):

- **Homogêneas –** constituídas por um único material,

- **Compostas ou Heterogêneas –** constituídas por mais de um material,

- **Simétricas ou Isotrópicas –** apresentam as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura,

- **Assimétricas ou Anisotrópicas –** apresentam gradiente de porosidade na direção perpendicular à sua superfície.

A membrana é densa quando possui poucos poros na superfície em contato com a solução a ser processada. Tanto as membranas densas quanto as porosas podem ser isotrópicas ou anisotrópicas, ou seja, podem ou não apresentar as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura. As características da superfície da membrana que está em contato com a solução é que definem sua classificação A Figura 2.10 ilustra a seção transversal de diferentes morfologias de membranas.

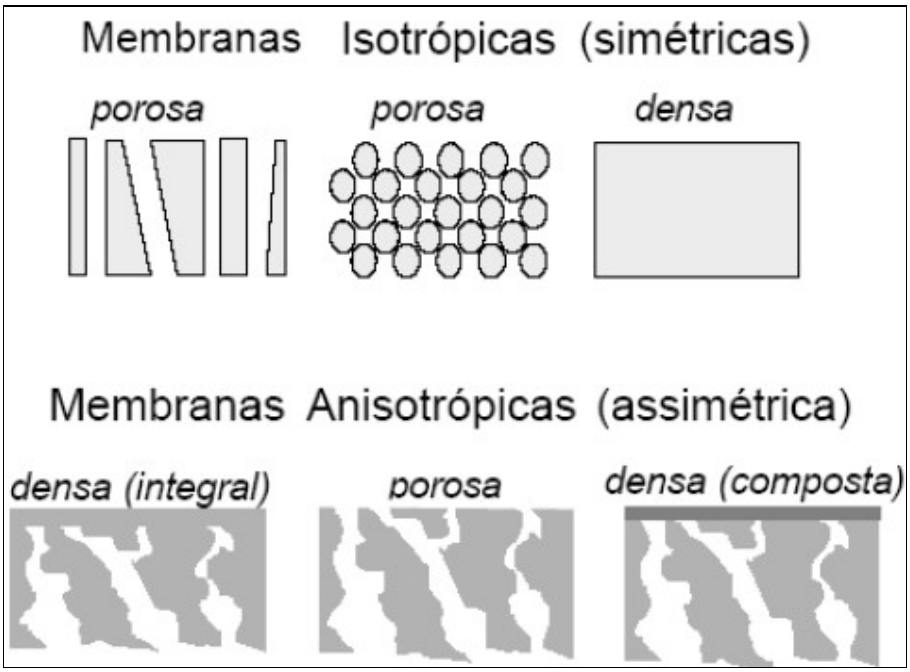


Figura 2.10: Representação da seção transversal das diferentes morfologias de membranas sintéticas.Fonte:Habert et al, 2003

2.3.2. Mecanismos de Separação

A separação de partículas em membranas de microfiltração e ultrafiltração é realizada principalmente pela simples ação de peneiramento (filtração em superfície), apresentada em esquema na Figura 2.11. Na osmose inversa e nanofiltração, partículas pequenas são rejeitadas por camada de água adsorvida na superfície da membrana (membrana densa - Figura 2.9b). Os íons são transportados por difusão através dos poros formados por macromoléculas que constituem a membrana. Em geral, a nanofiltração é usada para rejeição de constituintes menores que 0,001 µm. As membranas de osmose inversa, todavia, rejeitam partículas em torno de 0,0001 µm. O mecanismo de peneiramento é importante em membranas de nanofiltração, nas maiores aberturas de poros (METCALF & EDDY, 2003).

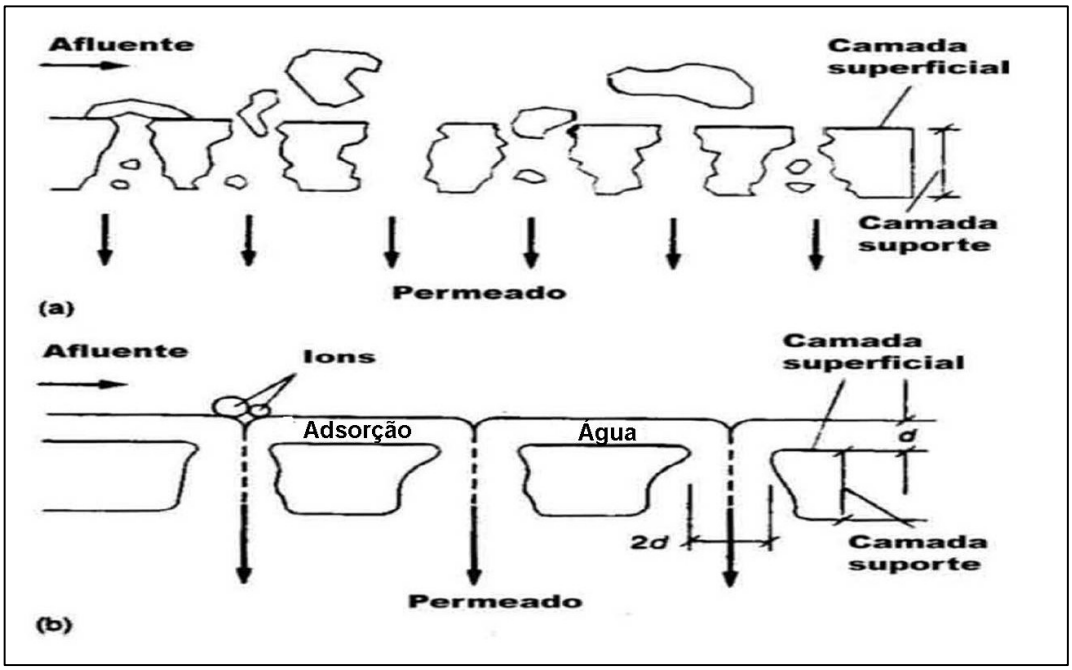


Figura 2.11: Representação esquemática dos principais mecanismos de remoção de constituintes presentes no afluente de sistemas de membranas: (a) remoção de partículas e moléculas grandes por peneiramento (exclusão por tamanho); (b) rejeição de íons pela camada de água adsorvida. (Adaptada de METCALF & EDDY,2003)

2.3.3. Seletividade

A seletividade pode ser expressa pela retenção (*R*) ou pelo fator de separação (a). Geralmente, a seletividade é representada pela retenção para misturas líquidas aquosas em que o soluto é retido parcialmente ou completamente pela membrana. O fator de separação é usualmente utilizado para misturas gasosas e de líquidos orgânicos, onde o soluto passa preferencialmente pela membrana. A retenção é dada pela Equação 2.1

$$R = \frac{(Ca - Cp)}{Ca} = 1 - \frac{Cp}{Ca} \qquad (2.1)$$

Onde: Ca é a concentração de soluto na alimentação

Cp é a concentração de soluto no permeado.

2.3.4. Configurações dos Módulos com Membranas

Na terminologia de membranas, o módulo é definido como o elemento básico de um sistema de membrana que congrega todas as estruturas necessárias para viabilizar a operação da membrana como unidade de separação: as membranas, as estruturas de suporte de pressão, do vácuo ou da corrente elétrica, bem como os canais de alimentação e remoção do permeado e concentrado. Segundo Schneider & Tsutiya (2001), os módulos são projetados com os seguintes objetivos:

- limitar o acúmulo de material retido nas membranas pela otimização do fluido a ser tratado;

- maximizar a superfície das membranas por volume de módulo;

- evitar a contaminação do permeado com constituintes do concentrado

Ainda segundo esses autores, o projeto desses módulos deve atender a requisitos, tais como: simplicidade de manuseio, facilidade de limpeza e apresentar baixo volume morto.

Dependendo do processo de separação a que se destinam as membranas podem ser preparadas em configurações diversas como:

- Planas consistem de placas planas de membranas empilhadas alternadamente em placas planas porosas.

- Fibras ocas e capilares:cartuchos com centenas dessas fibras que possuem pequeno diâmetro (variam de >0,5 a 1,4 mm) e são feitas de material polimérico.

- Tubulares: construídas por tubos de material polimérico ou cerâmico arranjado em feixes dentro de módulos com diâmetro variando de 0,5 a 1 cm.

A seguir serão abordadas apenas as configurações planas e fibras ocas, as quais foram utilizadas na presente pesquisa.

Segundo Habert *et al*. (2006), vários módulos têm sido projetados para condicionar as membranas na forma plana, geralmente, estes devem ser projetados de forma a contemplar uma melhor eficiência do escoamento da solução de alimentação. A utilização de espaçadores para aumentar fluxos secundários e melhorar a transferência de massa tem sido freqüente. As concepções de módulos mais empregadas têm sido as de Placa-e-Quadro (Figura 2.12) e a Espiral (Figura 2.13).

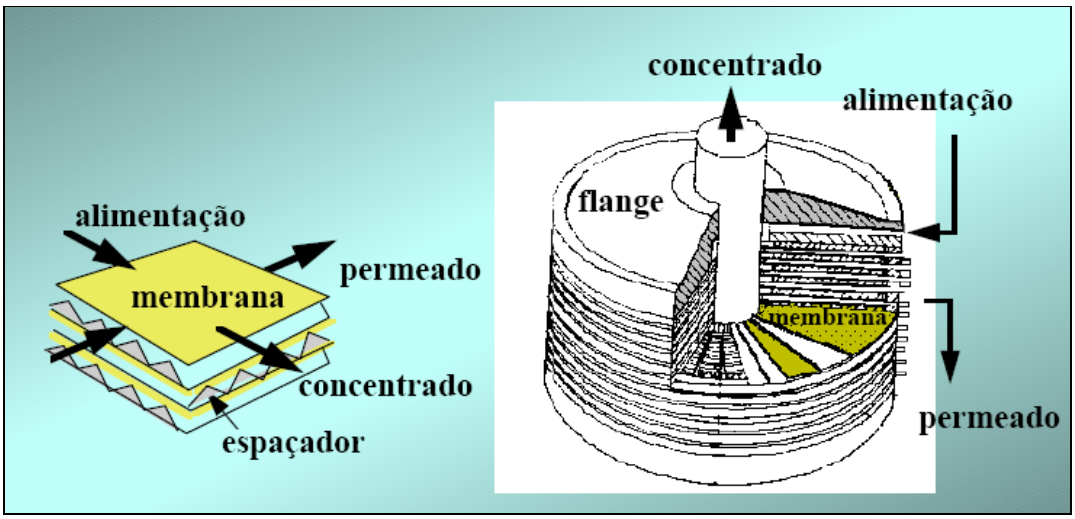


Figura 2.12: Módulo Placa e Quadro. Fonte:Habert et al. (2006).

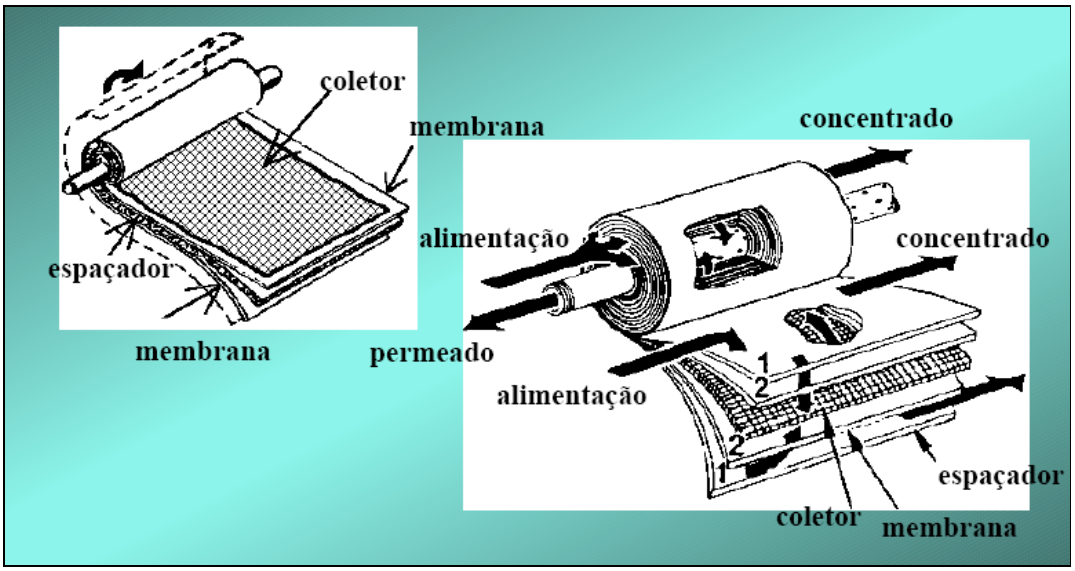


Figura 2.13: Módulo Espiral. Fonte :Habert et al. (2006).

A divisão entre fibras e capilares é baseada no diâmetro, ou seja, considera-se fibra quando o diâmetro externo for inferior a 0,5 mm, e capilar quando diâmetro externo se situar na faixa de 0,5 a 3,0 mm. Como mencionado, a principal vantagem desta geometria é o fato de serem auto-suportadas, o que reduz significativamente o custo de produção do módulo. A relação área/volume é elevada e depende do diâmetro da fibra ou capilar, tipicamente, membranas capilares possuem relação área/volume entre 800 a 1.200 m^2/m^3, enquanto para fibras-ocas esta relação situa-se em torno de 10.000 m^2/m^3. Membranas capilares têm sido utilizadas nos processos de Ultrafiltração e Pervaporação, enquanto fibras-ocas são mais empregadas nos processos de Diálise (incluindo a hemodiálise), Osmose Inversa e Permeação de Gases. As condições de escoamento também são fortemente afetadas pelo diâmetro das membranas, ou seja, quanto menor for este diâmetro, pior é o controle sobre a transferência de massa na solução que escoa por dentro da fibra ou capilar (HABERT *et al*.,2006). A Figura 2.14 a seguir, mostra esquematicamente módulos contendo fibras-ocas e capilares

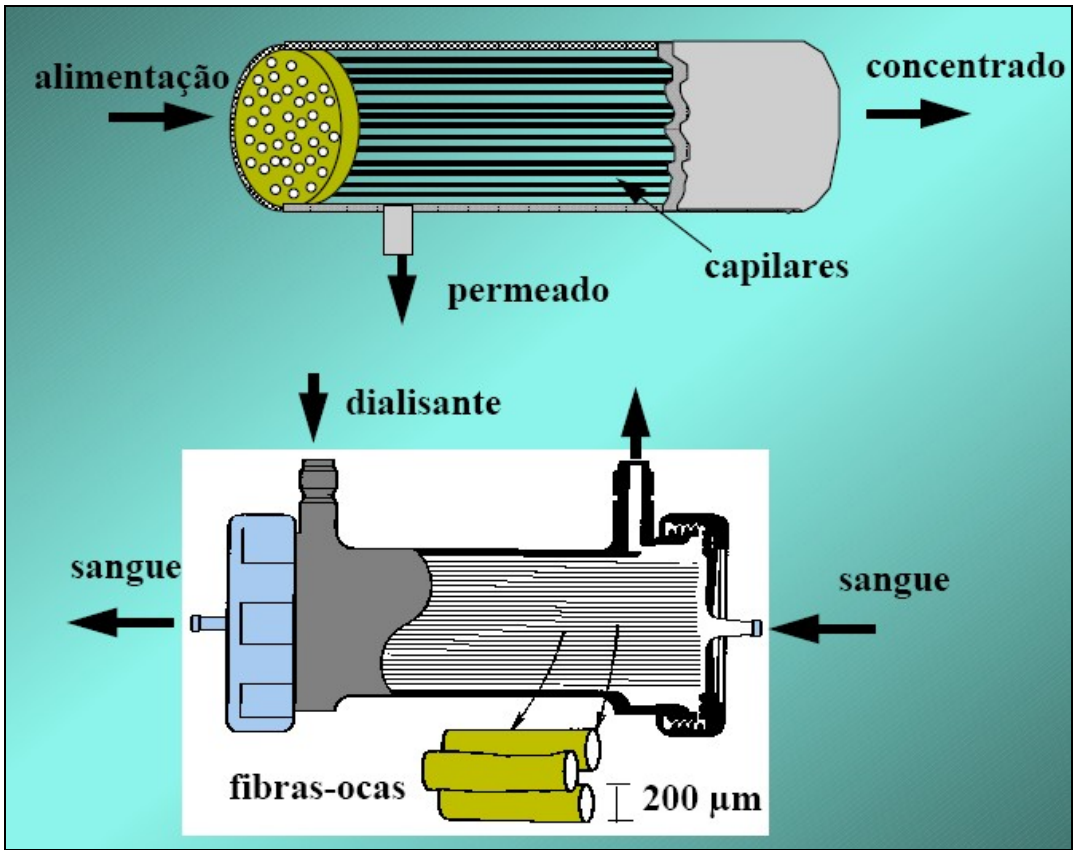


Figura 2.14: Módulos com membranas na forma Fibras Ocas e Capilares. Fonte:Habert et al. (2006).

Membranas na forma de fibras ocas têm recebido grande atenção durante os últimos anos devido às vantagens oferecidas por esta geometria. Uma de suas principais vantagens é o fato de que a relação entre a área de permeação (área da superfície da membrana) e o volume do módulo é muito superior à das demais geometrias. Uma relação elevada entre a área de permeação e o volume do módulo representa uma melhor utilização do espaço e uma redução no custo de equipamento(HABERT *et al*.,2006).

Ainda segundo Habert *et al*. (2006),Uma outra vantagem que as fibras ocas oferecem é serem auto-suportadas, o que reduz o custo de produção do módulo de permeação. Por outro lado, a possibilidade de entupimento do orifício interno das fibras (quando a alimentação é por dentro das fibras e contém material em suspensão) e a espessura da parede das fibras

relativamente grande (para evitar colapso em gradientes de pressão elevados), são as principais desvantagens desta geometria.

2.3.5. Modos de Operação

Na operação de sistemas de membranas, é usada bomba para pressurizar o afluente, direcionando-o ao canal de alimentação do módulo. É usada uma válvula no canal do concentrado com intuito de regular a pressão no canal de alimentação. É disponibilizado canal para coleta do permeado que usualmente é recolhido à pressão atmosférica. Para remoção dos sólidos que se acumulam na superfície das membranas são implementadas diferentes tecnologias de acordo com o tipo de módulo e limpeza requerida. Essa concepção de operação é usualmente aplicada para membranas tubulares associadas externamente a reatores biológicos (reatores biológicos de membrana com recirculação externa) e encontra-se contemplada na Figura 2.15 (a) (SCHNEIDER & TSUTIYA ,2001).

Ainda segundo Schneider & Tsutiya (2001), em sistemas de filtração por sucção, uma bomba centrífuga cria pressão negativa no canal de permeado e a filtração é impulsionada pelo diferencial de pressão do líquido no canal de alimentação e a pressão negativa no interior do canal de permeado. Esta concepção é usualmente aplicada para reatores biológicos com membrana submersa que utilizam módulos com placas de membrana e de fibras ocas. A representação esquemática dessa concepção está apresentada na Figura 2.15 (b).

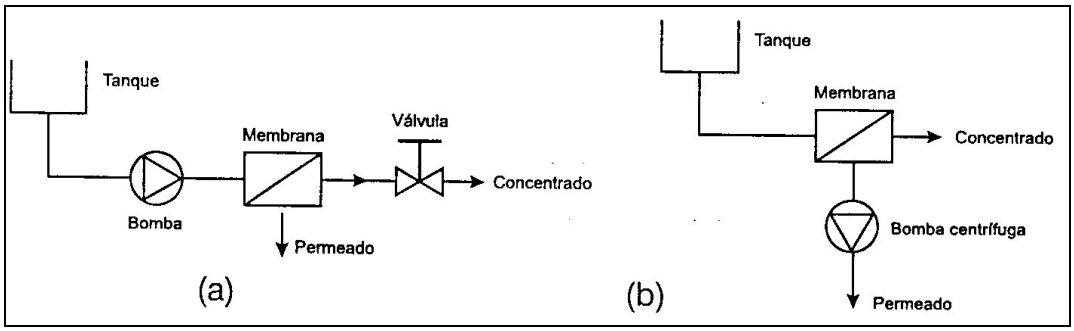


Figura 2.15: Representação esquemática de sistemas de membranas pressurizados (a) e operados por sucção (b). Fonte: SCHNEIDER & TSUTIYA (2001).

Os processos com membranas podem ser operados da forma clássica, denominada filtração convencional (em inglês adota-se o termo “dead end filtration”) ou em fluxo cruzado (em inglês adota-se o termo “cross flow filtration”), sendo esta operação denominada filtração tangencial. De acordo com Malack & Anderson (1996), a formação da “torta” é limitada ou quase completamente suprimida devido ao efeito de arraste gerado pela velocidade tangencial quando o sistema de filtração é operado em escoamento tangencial. Este fato confere vantagem em comparação aos sistemas de filtração convencional, cuja incrustação ocorre em curto período de tempo, devido ao acúmulo da torta retida. A figura 2.16 ilustra a formação da camada torta quando utilizada a filtração frontal e quando utilizada a filtração tangencial.

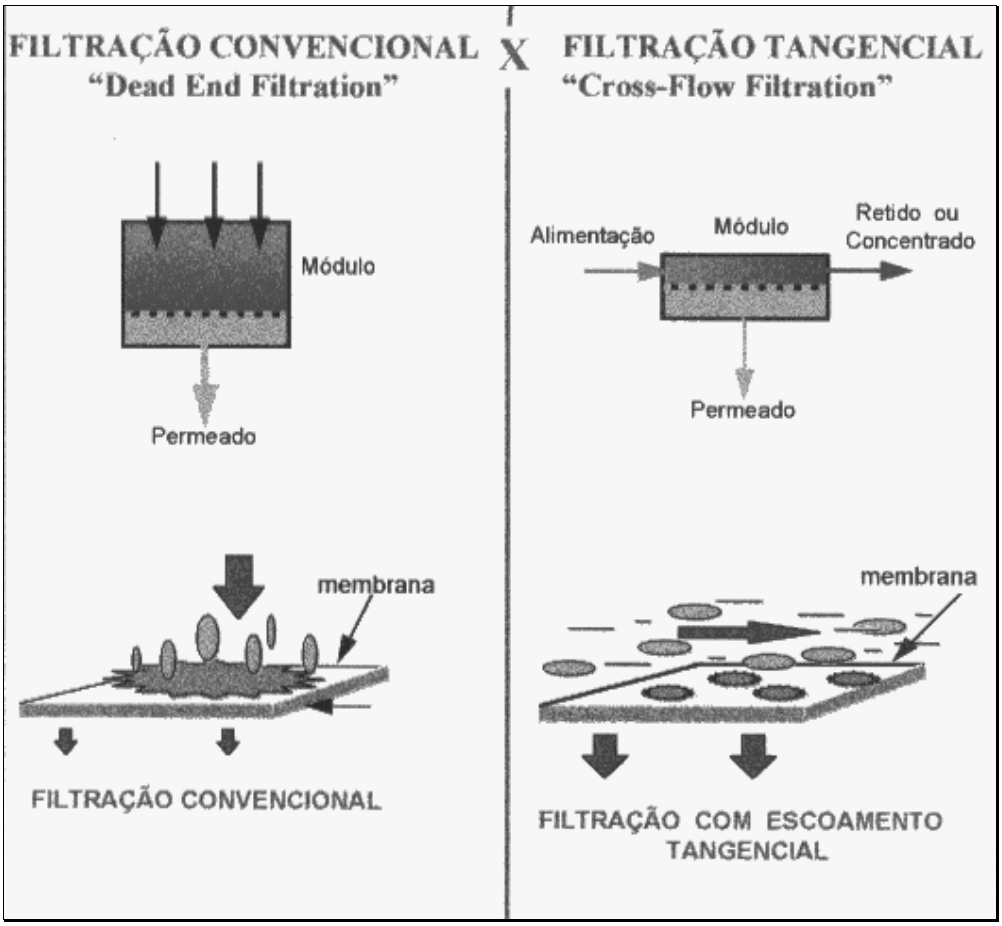


Figura 2.16: Esquema que diferencia a filtração frontal da filtração tangencial.
Fonte: Habert et al. (2006).

De acordo com Lapolli (1998), o desempenho da filtração tangencial é primariamente função dos parâmetros operacionais. As condições de operação são muito importantes, tanto para minimização da incrustação, quanto pelo aspecto econômico, uma vez que o consumo de energia aumenta concomitantemente com o aumento de pressão, velocidade tangencial e freqüência de retrolavagem. Essas são consideradas as principais variáveis operacionais em sistemas de filtração tangencial.

Em geral, o fluxo do permeado se eleva com o aumento da velocidade tangencial e da freqüência de retrolavagem, devido ao efeito de controle da formação da “torta” na superfície da membrana. Maiores pressões de operação costumam aumentar a vazão produzida de permeado, no entanto, é sempre importante a investigação dessa variável operacional para o tipo de efluente que se deseja tratar, pois o aumento de pressão pode ocasionar maior compactação da “torta” levando a diminuição da permeabilidade da membrana.

As equações de 2.2 a 2.5 abaixo foram reportadas por Schneider & Tsutiya (2001).

Cada elemento de membrana é caracterizado por uma pressão de filtração ou também denominada de pressão de transmembrana (P_f), por uma perda de carga (ΔP) e um rendimento (Y). A pressão de filtração (Equação 3) é definida como a média aritmética da soma das pressões afluente (P_a) e pressão de saída do concentrado (P_C) menos a pressão de saída do permeado (P_P):

$$P_f = \frac{(P_a + P_c)}{2 - P_p} \qquad (2.2)$$

A perda de carga no elemento de membrana (ΔP) é equivalente à diferença de pressão afluente e de saída do concentrado (P_C):

$$\Delta P = P_a - P_c \qquad (2.3)$$

A vazão total de permeado (Q_p) é o produto do fluxo do permeado (J_p) e área da membrana (A):

$$Q = J_p * A \tag{2.4}$$

O rendimento do módulo ou elemento de membrana (Y) é o quociente entre o fluxo do permeado (J_p) dividido pelo fluxo de alimentação:

$$Y(\%) = 100 * \frac{J_p}{J_A} \tag{2.5}$$

Os rendimentos obtidos em módulos de ultrafiltração e microfiltração operados em escoamento tangencial variam de 0,5 a 5%. Arranjos modulares de microfiltração (em paralelo ou em série) alcançam rendimentos elevados (acima de 90%).

O fator de concentração da alimentação ($F_{c\ alim}$) é o quociente entre o volume da alimentação dividido pelo volume do concentrado:

$$(F_{C\,alim}) = {V_{alimentação}}/{V_{concentrado}} \tag{2.6}$$

A recuperação do fluxo do permeado (R_F) é o quociente entre o volume do permeado dividido pelo volume da alimentação:

$$(R_F) = \frac{V_{Permeado}}{V_{alimentação}} x100\% \tag{2.7}$$

2.3.6. Fenômenos que Interferem nos Processos de Separação por Membrana: Polarização por Concentração e *Fouling*

A redução do fluxo permeado das membranas é causada principalmente por dois fenômenos: a polarização de concentração e a incrustação propriamente dita, que pode ser o resultado da formação de camada gel (também chamada camada torta), além de outros solutos adsorvidos à superfície das membranas.

Na filtração convencional, a solução ou suspensão problema é pressionada contra a membrana e, considerando-se que a membrana é seletiva ou parcialmente seletiva aos compostos, haverá a retenção de substâncias sobre sua superfície, formando-se uma camada polarizada. Com isso, aumenta-se a concentração na interface membrana/solução e, dependendo das substâncias que compõem esta camada próxima à superfície da membrana, se inicia um movimento retro-difusivo em direção ao seio da solução, estabelecendo-se rapidamente um perfil de concentração dos compostos na região próxima à interface membrana/solução. Este fenômeno é conhecido como polarização de concentração e é inerente a processos seletivos.

O termo polarização de concentração se refere a este gradiente de concentração de materiais rejeitados que se estabelece sobre a superfície da membrana, dando origem a uma camada limite determinada pela espessura desta região polarizada, logo acima da superfície da membrana. No caso da filtração convencional, mesmo havendo o retorno das substâncias ao seio da solução, a tendência é o aumento constante da concentração de compostos próximo à membrana, sendo o regime de operação transiente, pois o fluxo não estabiliza (LAPOLLI,1998).

Quando a solução problema apresenta material em suspensão pode haver a formação de uma torta que se deposita sobre a membrana. Esta torta costuma aumentar a seletividade da membrana, porém diminui sua permeabilidade (SCHNEIDER & TSUTTIYA, 2001).

Na filtração em fluxo cruzado, a solução escoa paralelamente à superfície da membrana, sendo o permeado retirado transversalmente à mesma. O gradiente de concentração se estabelece rapidamente. Por este motivo o sistema pode ser operado em condições de regime estabelecido (Figura 2.17). A espessura da camada polarizada ou da torta que se deposita sobre a membrana é determinada pela concentração e composição da solução problema e pelas condições hidrodinâmicas de operação do sistema (JÖNSSON & JÖNSSON, 1995).

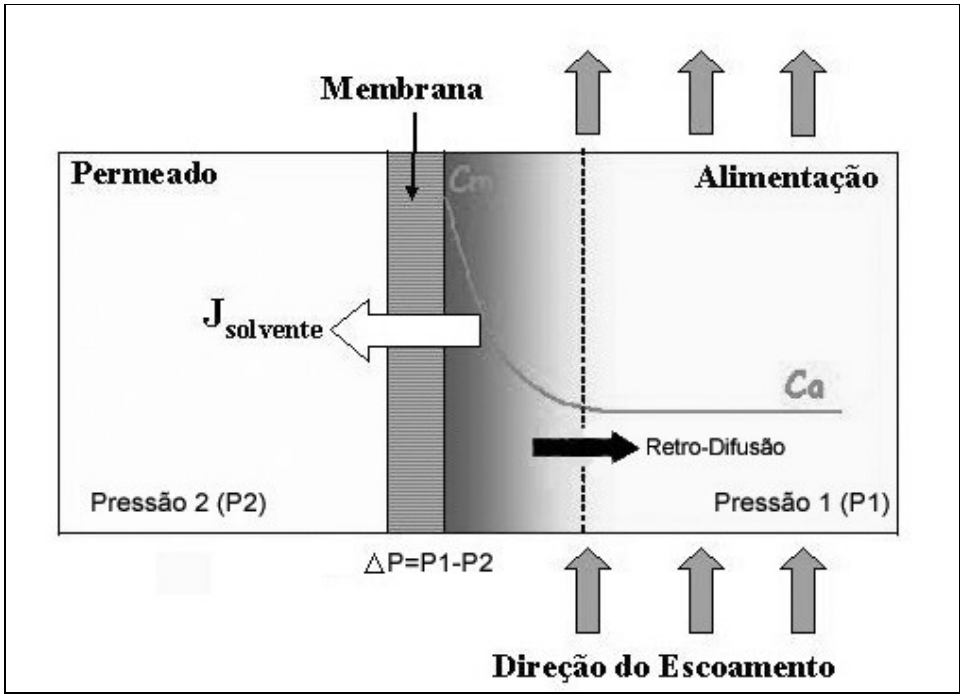


Figura 2.17: Polarização de concentração; perfil de concentrações em estado estacionário na região próxima à membrana Fonte:Teixeira, 2001

Porém, na prática muitas vezes se observa, mesmo na filtração tangencial, um decréscimo contínuo do fluxo permeado com o tempo, sendo esta queda atribuída ao “fouling”. Segundo Nobrega (1997), o “fouling” pode ser entendido como o conjunto de fenômenos capazes de provocar uma queda no desempenho da membrana com o tempo, quando se trabalha com uma solução ou suspensão e suas conseqüências são total ou parcialmente irreversíveis.

Ainda segundo Nobrega (1997), os principais fenômenos que contribuem para o “fouling” são:

- Bloqueio dos poros da membrana;

- Adsorção de partículas na superfície da membrana e/ou no interior de seus poros devido a interações entre os solutos presentes na solução a ser tratada e o material da membrana;

- Formação de camada gel. Altas concentrações de soluto na superfície da membrana podem causar sua precipitação, formando uma camada gel.

Na Figura 2.18 é demonstrada a influência da polarização de concentração e do “fouling” na redução do fluxo permeado ao longo do tempo na filtração convencional e na filtração tangencial

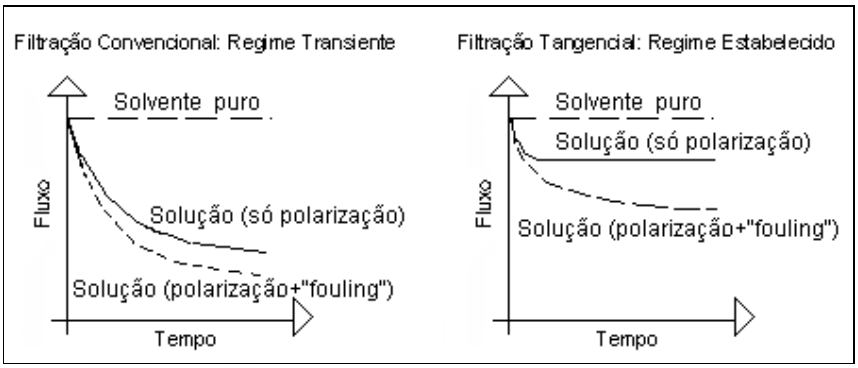


Figura 2.18: Comparação da variação do fluxo permeado ao longo do tempo para o processo de filtração convencional e para filtração tangencial.

A operação do sistema em condições ótimas favorece a diminuição dos efeitos da polarização de concentração e do "fouling", minimizando a queda do fluxo permeado ao longo do tempo. À medida que se aumenta a velocidade tangencial no módulo de membranas, na filtração tangencial, diminuem a espessura da camada polarizada e a concentração na interface com a membrana. Outros fatores que influenciam são a concentração da solução de alimentação e a pressão. O aumento da pressão pode causar também um aumento da espessura da camada que se deposita sobre a membrana, a compactação da membrana e maior adsorção de substâncias nos poros da mesma. Assim, o efeito que a pressão teria sobre o valor do fluxo permeado é parcialmente ou mesmo totalmente compensado por um aumento da espessura da camada polarizada ou da torta. Desta forma, o fluxo deixa de aumentar linearmente com a pressão, podendo até diminuir com o aumento da mesma (TARDIEU *et al*., 1998).

2.3.7. Minimização dos Efeitos de Polarização de Concentração e *Fouling*.

O controle da formação da zona de polarização e da camada de gel pode ser feito através do aumento da velocidade tangencial, provocando maior turbulência. A agitação e a mistura da solução, próximo à superfície da

membrana, arrasta parte significativa dos sólidos aumentando a taxa de permeação. Além deste método, a aplicação de baixas pressões e a escolha do material constituinte da membrana são outros fatores bastante efetivos, que reduzem a adsorção de solutos (JÖNSSON E JÖNSSON, 1995).

Os principais métodos utilizados para a redução do *fouling* são:

- Pré – tratamento da solução de alimentação, como por exemplo: tratamento térmico, ajuste de pH, adição de agentes complexantes (EDTA), cloração, adsorção com carvão ativado, clarificação química, uso de pré – filtração;

- Alterações nas propriedades da membrana, buscando-se: distribuições de poros mais estreitas; materiais hidrofílicos, devido a maior adsorção de proteínas em materiais hidrofóbicos, ou membranas carregadas para soluções coloidais;

- Modificações no módulo ou nas condições de processo: o emprego de técnicas que propiciam a redução da polarização de concentração, acarreta também a redução do *fouling;*

- Limpeza do sistema: a freqüência na qual o sistema deve ser limpo pode ser estimada na otimização do processo. Três métodos de limpeza podem ser utilizadas: limpeza hidráulica somente pode ser aplicada na MF e na UF e utiliza o sistema de fluxo invertido, alternando pressurização e despressurização e a direção do fluxo em uma dada freqüência, conforme apresentado esquematicamente na Figura 2.19. A limpeza mecânica somente pode ser aplicada em membranas tubulares, com a utilização de bolas de esponjas. A limpeza química é o método mais empregado para redução do fouling, sendo os agentes mais empregados: ácidos, bases, oxidantes, detergentes, complexantes e desinfetantes.

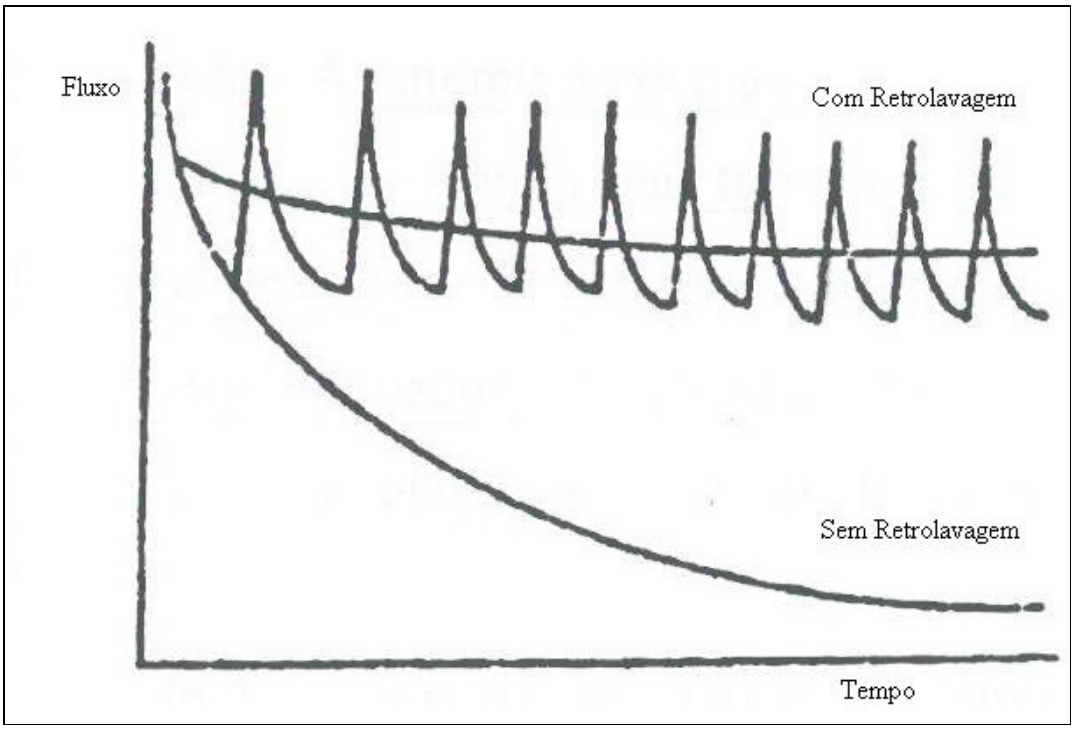


Figura 2.19: Esquema do comportamento do fluxo permeado em um processo de MF com sem limpeza por fluxo invertido Fonte:Nobrega, (1998).

A diferença entre os fenômenos de polarização por concentração e "fouling" é a dependência destes com o tempo. Polarização por concentração é dependente de parâmetros operacionais, tais como pressão, temperatura, concentração da alimentação e velocidade tangencial, mas não é função do tempo. "Fouling" é parcialmente dependente destes parâmetros, principalmente da concentração da alimentação, mas é também dependente do tempo do processo (KULKARNI *et al*., 1992).

2.3.8. Vantagens e Desvantagens dos Processos de Separação por Membrana

Os PSM atingiram o *status* de processos comerciais devido a uma série de vantagens inerentes a esta tecnologia. Algumas dessas vantagens, segundo Habert *et al*. (2006) são comentadas a seguir:

- **Economia de Energia** - Os PSM, em sua grande maioria, promovem a separação sem que ocorra mudança de fase. Neste sentido são processos energeticamente favoráveis. Esta é uma das razões pela qual seu desenvolvimento coincide com a crise energética dos anos 70, devido ao grande aumento do preço do petróleo.

- **Seletividade -** A seletividade é outra característica importante dos PSM. Em algumas aplicações estes processos se apresentam como a única alternativa técnica de separação. No entanto, como já mencionado anteriormente, na maioria dos casos, processos combinados, envolvendo processos clássicos e processos com membranas, cada qual atuando onde é mais eficiente, tem se mostrado como a opção mais econômica e vantajosa de separação.

- **Separação de Compostos Termolábeis** - Como, via de regra, os PSM são operados à temperatura ambiente, podendo ser aplicados no fracionamento de misturas envolvendo substancias termossensíveis. Por este motivo eles tem sido amplamente empregados na indústria farmacêutica e de alimentos e, mais recentemente, como uma alternativa na purificação de produtos ou recuperação de células em biotecnologia.

- **Simplicidade de Operação e Escalonamento** - Ao contrário da maioria dos processos de separação, os PSM apresentam, ainda, a vantagem de serem extremamente simples do ponto de vista operacional e em termos de escalonamento ("scale up"). Os sistemas são modulares e os dados para o dimensionamento de uma planta podem ser obtidos a partir de equipamentos pilotos operando com módulos de membrana de mesma dimensão daqueles utilizados industrialmente. Além disso, o operação dos equipamentos com
membranas é simples e não intensiva em mão de obra.

Além das inerentes vantagens destes processos, o aumento da rigidez imposta pelas regulamentações ambientais nas últimas décadas também contribuiu decisivamente para o crescente emprego da tecnologia de separação por membranas. O aspecto econômico foi outro fator adicional, uma vez que a utilização de membranas possibilita redução dos desperdícios e aumento nas oportunidades de recuperação e reciclagem de substâncias (ATKINSON, 2002).

As desvantagens dos PSM segundo Viana 2005:

- **Custo elevado**: É uma tecnologia com custo elevado. Porém, os custos associados à aplicação desta tecnologia vêm sendo consideravelmente reduzidos, uma vez que as membranas estão sendo produzidas em maior escala, mais empresas estão entrando no mercado e, se bem operadas, as membranas vêm apresentando maior vida útil e fluxo permeado mais estável e elevado. Por exemplo, membranas de microfiltração, com tamanho de poro médio de 0,4 µm, produzidas pela empresa Kubota, tiveram seu custo reduzido de US$ 400 (1992) para US$ 100 (2000) por metro quadrado de área superficial de membrana

- **A necessidade de troca periódica dos módulos**. Porém, com as pesquisas na área de desenvolvimento de membranas, a freqüência de substituição dos módulos vem diminuindo. Por exemplo, a vida útil de projeto das membranas fabricadas pela empresa Kubota já aumentou de 3 para 8 anos.

2.4. Qualidade do Permeado das Membranas: Uma opção para Reúso.

Segundo Lobos *et al*. (2007), existem duas correntes tecnológicas no tratamento de efluentes para reúso, a primeira delas preconiza o uso de filtração com membranas e a outra defende o processo de clarificação físico química.

Tradicionalmente, a produção de água para reúso a partir de efluentes, envolve a seguinte combinação de operações unitárias: coagulação, decantação, filtração e desinfecção com cloro ou UV. Segundo Gagliardo *et al* (2001), esse processo pode ser consideravelmente simplificado com a utilização de membranas de microfiltração e ultrafiltração, com a obtenção de um produto de melhor qualidade do que sistemas convencionais de produção de água para reúso.

As técnicas de tratamento de água através da tecnologia de membranas acopladas a outros processos são empregadas com sucesso desde testes em bancada até em grandes escalas em nível industrial. Estes processos têm como finalidade lograr uma melhoria significativa no efluente pré-tratado por um sistema de tratamento secundário.

Beal e Monteggia (2003) descrevem em escala piloto, o tratamento anaeróbio de efluente de curtume de acabamento auxiliado com membranas de micro e ultrafiltração. As eficiências médias relativas de a remoção de DQO variaram de 68% a 82%. Verificou-se que o processo de tratamento apresentou uma eficiência acima do esperado para diversos parâmetros, possibilitando a utilização do efluente tratado em alguns banhos no processo de curtimento e outras finalidades como limpeza de pisos e pátios.

A NF é amplamente utilizada para o tratamento de efluentes têxteis. Qin *et al.* (2007), reportaram a remoção de 99,1% de corantes e a recuperação de 70% do efluente de uma indústria de corante usando processo com

membranas de nanofiltração em bancada. A qualidade da água obtida, atende as exigências dos processos de tingimento, podendo ser utilizada no processo. Já SahinKaya *et al*. (2008), utilizaram MF seguida de NF para tratar efluentes têxteis após tratamento por lodos ativados. Os autores observaram uma remoção de 65% na condutividade e entre 80- 100% na DQO, concluindo que com a qualidade do permeado obtido, este poderia ser reutilizado.

A microfiltração é muito utilizada como uma etapa de pré-tratamento para a unidade de Osmose Inversa. No Reino Unido, a concessionária responsável pelo abastecimento de água e sistema de esgoto no Leste do país,a AWG, fez um acordo com a central elétrica TXT , com o intuito de produzir água de qualidade a partir de tratamentos avançados para abastecer a Central Elétrica. O efluente secundário tratado na ETE de Flag Flen foi tratado primeiramente em um módulo de microfiltração que apresentou uma recuperação e posteriormente em um sistema de Osmose inversa. A água de excelente qualidade obtida era consumida na própria central. Também houve redução de 90% nos custos na regeneração de troca iônica devido ao aumento no ciclo operacional na unidade de desmineralização (JUDD & JEFFERSON, 2003).

Na Austrália, a Eraring Power Station, desde 1995 trata o efluente secundário que vem de uma ETE municipal em um sistema de microfiltração e posteriormente de osmose inversa. A água obtida é ultrapura e é utilizada para vários fins, exceto para o banho e para o consumo humano. O projeto ajudou a Eraring Power Station a reduzir custos operacionais, principlamente os custos com a resina de troca iônica, utilizada no início do tratamento (Reith, & Birkenhead 1998).

A maioria das aplicações que utilizam osmose inversa são relativas a tratamentos, cujos efluentes desrespeitem as normas e que são reutilizados na irrigação. Outro exemplo de aplicação é o caso de uma usina hidroelétrica na Flórida que utiliza efluente de esgoto doméstico tratado através de osmose inversa para limpeza e resfriamento (WETHERN e KATZARAS, 1995).

A remoção de metais pesados como cobre e cádmio das águas residuárias, com membranas de osmose inversa, foi estudada por Hani Abu Qdais e Hassan Moussa (2003), onde os resultados mostraram uma redução de 98 e 99% respectivamente de cobre e cádmio para concentrações de 500ppm reduzindo concentração de íons a 3 ppm (99,4 % de remoção).

O primeiro passo para a definição de um processo terciário de tratamento de efluente visando ao reúso, é conhecer as características qualitativas almejadas pelo usuário para o fim específico. Uma vez estabelecidos esses padrões, e conhecendo-se as características qualitativas do efluente tratado da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), é possível definir o processo de tratamento mais adequado.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1. Efluente Utilizado nos Ensaios

Nos ensaios de micro, ultra e nanofiltração, utilizou-se o efluente sanitário tratado em uma ETE de lodos ativados de um Centro Comercial situado na cidade do Rio de Janeiro (efluente bruto→ ETE lodos ativados→ efluente tratado→microfiltração ou ultrafiltração ou nanofiltração).

As amostras do efluente foram tratadas pelos PSM e analisadas após a sua coleta.

No ensaio de osmose inversa, foi utilizado como alimentação do sistema, o permeado de uma microfiltração feita a partir do efluente tratado do centro comercial (efluente bruto→ ETE lodos ativados→ efluente tratado→microfiltração → osmose inversa).

Para um melhor entendimento dos parâmetros analisados no efluente e nos permeados.

3.2. Processos com Membranas

3.2.1. Membranas Utilizadas

As membranas testadas e suas características principais estão ilustradas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Principais características das membranas utilizadas.

Membrana		Configuração	Característica	Fabricante
MF	Poli(imida)	Fibra oca	0,5µm Diâmetro de poro	PAM Membranas Seletivas Ltda.
UF	Polisulfona	Fibra oca	50kDa cut-off	PAM Membranas Seletivas Ltda.
NF	Polietersulfona	Plana	25-40% retenção Na_2SO_4	MICRODYN-NADIR
OI	Poliamida	Plana	99,5 % retenção Na_2SO_4	FILMTEC

3.2.2. Sistema de Separação por Membranas em Batelada

A Figura 3.1 mostra o sistema de separação por membranas utilizado nos ensaios de permeação. Este consistia de um tanque de alimentação com a capacidade de 5 L,retificador de corrente, rotâmetro, manômetro, termômetro, indicador de vazão e bomba de engrenagem,

A bomba de engrenagem desse sistema é a PROCON (500 Lh^{-1}, 17 bar). Durante a operação, observou-se uma elevação de temperatura de aproximadamente 15^0C e chegando a 20 ^{0}C no efluente que estava sendo filtrado. Segundo Vidal (2001), que também constatou em seus experimentos grande aumento de temperatura do esgoto em uma unidade piloto de MF, o aumento de temperatura foi atribuído a geração de calor devido ao atrito e trabalho de bombeamento. Visando à minimização desses problemas, na presente pesquisa foi adaptado um sistema de resfriamento com a imersão de uma serpentina de inox no tanque de alimentação.

3.2.2.1. Módulo Plano

Para as filtrações utilizando as membranas planas (NF e OI), foi adaptado ao sistema uma célula de permeação de aço inoxidável 316 que possuía uma área útil de membrana de 0,00777m^2.

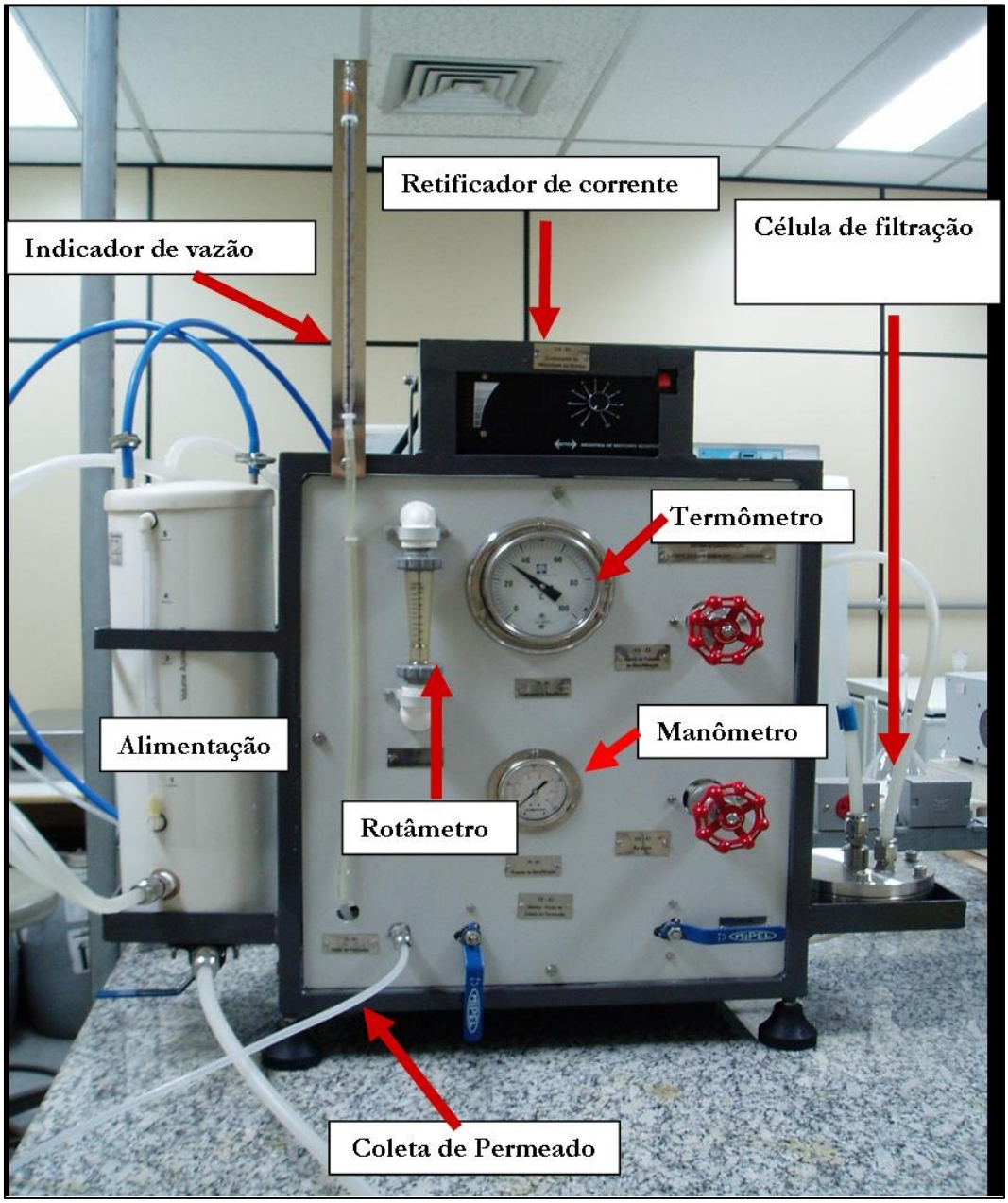


Figura 3.1: Sistema de separação por membranas utilizado.

A alimentação era efetuada por um orifício ligado a uma canaleta no interior do módulo e escoava transversalmente à superfície da membrana. Para uma melhor distribuição do efluente sobre a membrana, colocou-se uma tela de nylon do tamanho do suporte poroso. No outro extremo da célula, uma canaleta

semelhante coletava o efluente conduzindo-o ao orifício de saída como ilustra a Figura 3.2.

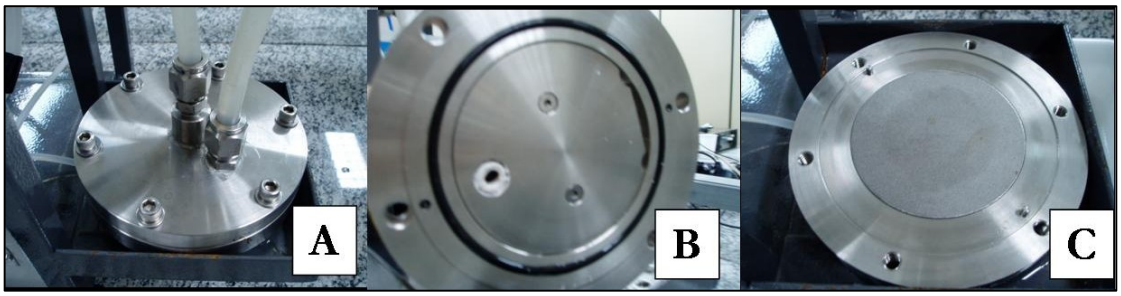


Figura 3.2: Célula de permeação utilizada na NF e na OI:(A) Célula, (B) parte superior da célula e (C) parte inferior da célula.

3.2.2.2. Módulo Fibra Oca

Para a MF e a UF, foram adaptados no sistema, módulos de fibra oca, cujas características se encontram na Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Principais características dos módulos de fibra oca utilizados

Características dos módulos	**Microfiltração**	**Ultrafiltração**
Área de permeação (m^2)	0,09	0,09
Comprimento útil do módulo(m)	0,28	0,28
Diâmetro externo das fibras (m)	0,001	0,00082
Diâmetro interno do tubo (m)	0,022	0,022
Diâmetro hidráulico (m)	0,0197	0,0201
Densidade de empacotamento (m^2m^{-3})	800	800
Número de fibras	97	118
Número de Módulos	1	1

A bomba de engrenagem utilizada nesse sistema foi a Floget ($5Lmin^{-1}$, 10 Bar). Como não houve considerável aumento de temperatura durante a operação, não foi necessária o uso do sistema de resfriamento. A alimentação era efetuada por um orifício ligado ao módulo de fibras ocas, e escoava pela

carcaça do elemento. O concentrado saía por um orifício no outro extremo do módulo e voltava para o tanque de alimentação. Já o permeado escoava pelo interior das fibras, e era conduzido ao orifício de saída que se localizava transversalmente à saída do concentrado. A Figura 3.3 mostra os módulos utilizados nos ensaios.

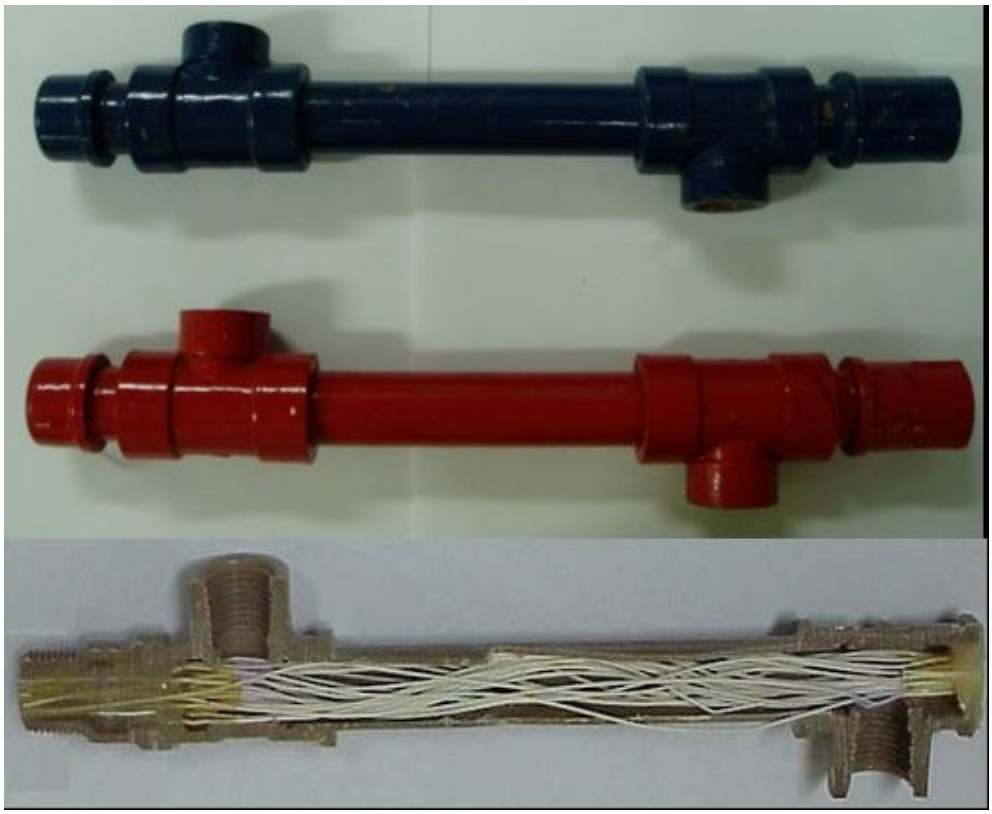


Figura 3.3: Módulos de Fibra Oca que foram adaptados ao Sistema: Vista externa e interna.

3.3. Ensaios de Permeação

Os ensaios foram divididos em cinco etapas:

3.3.1. Ensaios para determinação de permeabilidade hidráulica inicial:

Foram colocados no sistema 4 litros de água destilada, deionizada, autoclavada. e microfiltrada. Variou-se a pressão do sistema

em 3 valores distintos e mediu-se o fluxo permeado para cada valor de pressão. O coeficiente angular da reta é a permeabilidade hidráulica da membrana, conforme Anexo I.

3.3.2. Operação:

Durante a primeira meia hora, as correntes de concentrado e de permeado retornaram ao tanque de alimentação. No restante do tempo, o concentrado retornou ao tanque de alimentação e o permeado foi coletado. Ao final de cada teste, alíquotas de permeado foram retiradas para análises dos parâmetros físico, químicos e microbiológicos. Durante o período de operação foi medida a evolução do fluxo do permeado. As condições de operação de cada filtração estão resumidas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3: Condições de operação de cada filtração

Membrana	**Volume alimentação(L)**	**Pressão de Operação (Bar)**	**Vazão da alimentação (Lh^{-1})**
MF (0,5µm)	5	0,5	60
UF (50 kDa)	5	2	60
NF(25-40%)	2,5	5	60
OI (99,5%)	3	8	60

3.3.3. Ensaios para determinação de permeabilidade hidráulica pós-filtração:

Após a filtração, eram adicionados 4 litros de água destilada, deionizada e autoclavada no vaso de alimentação e a permeabilidade hidráulica era medida de forma semelhante à etapa do item 3.3.1.

3.3.4. Limpeza do sistema de membranas:

Ao final de cada filtração, era adicionado ao vaso de alimentação 5 L de uma solução de NaClO a uma concentração de 500 mg/L , para a limpeza das membranas. Essa solução permanecia durante o período de 2 horas recirculando em todo o sistema. Após a retirada da solução de NaClO, passava-se água exaustivamente pelo sistema, com intuito de eliminar resíduos da solução.

3.3.5. Ensaios para determinação de permeabilidade hidráulica pós-limpeza:

Para determinar a eficiência do procedimento de limpeza, após a limpeza, a permeabilidade hidráulica de cada membrana foi determinada da mesma forma que na etapa do item 3.3.1.

3.4. Metodologia Analítica

Para a caracterização das amostras coletadas, diversos métodos analíticos foram utilizados. As análises foram realizadas no Laboratório de Tratamento de Água e Reúso de Efluentes da Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro (LabTARE/ EQ/ UFRJ).Vale ressaltar que estas foram realizadas em triplicata. A Tabela 3.4 apresenta a metodologia aplicada em nas análises físico químicas.

Tabela 3.4: Metodologias aplicadas em cada análise.

Parâmetro	Tipo de método	Metodologia APHA (*)	Equipamentos
pH	Potenciométrico	4500-H^+ B	Quimis - Modelo Q-400M
Sílica	Espectrofométrico	4500	HACH - Modelo Dr 2088
N-NH_3	Potenciométrico	4500-NH_3 D	Orion – Modelo 4 Star
DQO	Colorimétrico	5220 D	HACH - Modelo Dr 2088
Alcalinidade Carbonácea	Titulométrico	2320 B	-
Detergentes Aniônicos (MBAS)	Espectrofométrico	5540C	HACH - Modelo Dr 2088
DBO_5	OD Potenciométrico	5210 B	Thermo Orion - Modelo 3 Star DO Benchtop
Cloreto	Titulométrico	4500-Cl^- B	-
Fósforo Reativo Dissolvido	Espectrofométrico	4500-P E	HACH - Modelo Dr 2088
SST	Gravimétrico	2540 D	-
SDT	Gravimétrico	2540 C	-
Magnésio (1)	Absorção Atômica	3111 B	Perkin Elmer-Modelo 3300
Cálcio (1)	Absorção Atômica	3111 B	Perkin Elmer-Modelo 3300
Carbono Orgânico Total (2)	Combustão Catalítica	5310 B	COT Shimadzu - Modelo TOC - V CPH/CPN
Turbidez	Nefelométrico	2130	Policontrol - Modelo AP 2000
Condutividade	Potenciométrico	2510 B	Quimis - Modelo Q 405 M

(1) Análise realizada no Laboratório de Química Analítica do Instituto de Química da UFRJ.
(2) Análise realizada no Laboratório de Tecnologia Ambiental EQ/UFRJ.

3.4.1. Ensaios Microbiológicos

3.4.1.1. Análises de *Escherichia coli*

A *Escherichia coli* (*E. coli*) é uma bactéria do grupo coliforme e atualmente é considerada o indicador mais específico de contaminação fecal e de eventual presença de microrganismos patogênicos.

Para quantificação de *E.coli* foi utilizado o método COLILERT®, onde um substrato enzimático vendido comercialmente para analise de coliformes totais e *E. coli* em água. Em frasco estéril coletou-se um volume de 100 mL de amostra, de forma mais asséptica possível, nas proximidades de um bico de Bunsen. Todo o processo de análise foi realizado em uma capela de fluxo laminar previamente esterilizada com radiação UV. No frasco contendo 100 mL de amostra foi adicionado uma ampola do substrato, homogenizou-se a solução, e em seguida esta foi despejada na cartela Quanti-Tray®/2000 (esta contém 97 cavidades e possibilita a contagem de 1 a 2419 número mais provável (NMP)/ 100 mL de amostra). A cartela foi então lacrada e incubada por 24 horas a 35°C ± 1. . Após as 24 horas, os resultados foram lidos. As cavidades incolores indicam a ausência de *E. coli* e coliformes totais. As cavidades amarelas indicam a presença de coliformes totais. As cavidades amarelas que quando iluminadas por lâmpada ultravioleta por ventura apresentarem-se fluorescente, são as cavidades indicativas de *E. coli.* Contando o número de cavidades amarelas e fluorescentes e utilizando a Tabela de Número mais provável (NMP), tem-se o NMP/100 mL de *E. coli* da amostra. Este método é aprovado pelo *Standard Methods 21st* (APHA,2005). A análise foi realizada no Laboratório de Tecnologia Ambiental/ EQ/ UFRJ e no laboratório de microbiologia do Laboratório de Instrumentação e Fotônica (LIF) / COPPE/ UFRJ.

Pelo fato do equipamento de filtração não possibilitar que a coleta e a própria manipulação do sistema não acontecesse em um ambiente estéril, antes de se iniciar cada filtração, era filtrada no sistema uma amostra de 4 litros

de água destilada, deionizada e estéril. O permeado desta filtração funcionava como um branco da análise.

Na Figura 3.4 (A) observa-se os frascos estéreis utilizados para a coleta do ensaio, em (B) o momento da coleta, em (C) o frasco contendo 100 mL de amostra e substrato (antes da incubação) e em (D) uma cartela Quanti-Tray®/2000 de 97 cavidades (após incubação).

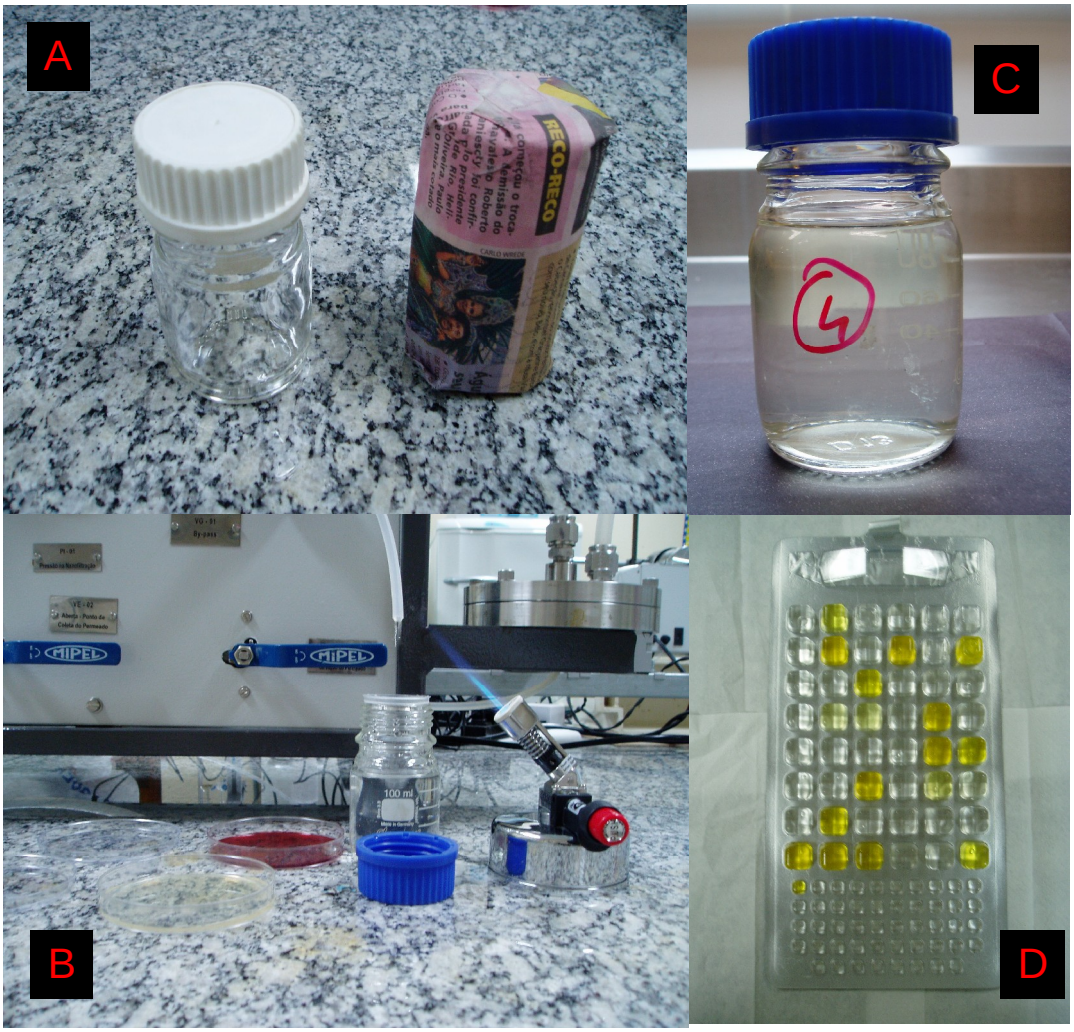


Figura 3.4: (A) frascos estéreis utilizados, (B) o momento da coleta, (C) o frasco contendo 100 mL de amostra e substrato (antes da incubação), (D) cartela Quanti-Tray®/2000 de 97 cavidades (após incubação).

3.4.1.2. Controle Microbiológico dos Experimentos

Pelo fato da célula de filtração (utilizada na NF e OI) não possibilitar que a manipulação do sistema acontecesse em um ambiente estéril, fez-se necessário um controle microbiológico da operação, para certificar-se se os microorganismos presentes no ambiente laboratorial, interfeririam na análise de *E .coli*, podendo assim ter como conseqüência resultado falso positivo.

Para se fazer o controle microbiológico dos experimentos deixou-se abertas placas de Petri contendo o meio de cultura ágar eosina azul de metileno (EMB,MERCK) -seletivo para bactérias Gram negativas- e o meio ágar nutriente (MERCK), durante o período de manipulação da célula de filtração e durante o período de coleta do permeado. Após esses período, as placas foram incubadas por 24 horas a uma temperatura de 35°C ± 1. Depois do período de incubação, analisou-se o aparecimento de colônias de microorganismos em cada uma das placas.

O Agar nutriente não é um meio seletivo, demonstrando apenas a existência de microorganismos no meio ambiente. Como o objetivo de identificar quais classes de microrganismos seriam esses, testes posteiores foram feitos utilizando o meio EMB. Como a *E .coli,* é uma bactéria gram negativa, se fosse observado o crescimento de alguma colônia no meio EMB, isso seria um resultado presuntivo que no ambiente laboratorial poderia haver *E .coli,* o que poderia ocasionar interferência nas análises microbiológicas.

A Figura 3.5 mostra as placas abertas Petri contendo o meio de cultura EMB (de cor avermelhada) e o meio Agar Nutriente (transparente, levemente amarelo) durante o controle microbiológico.

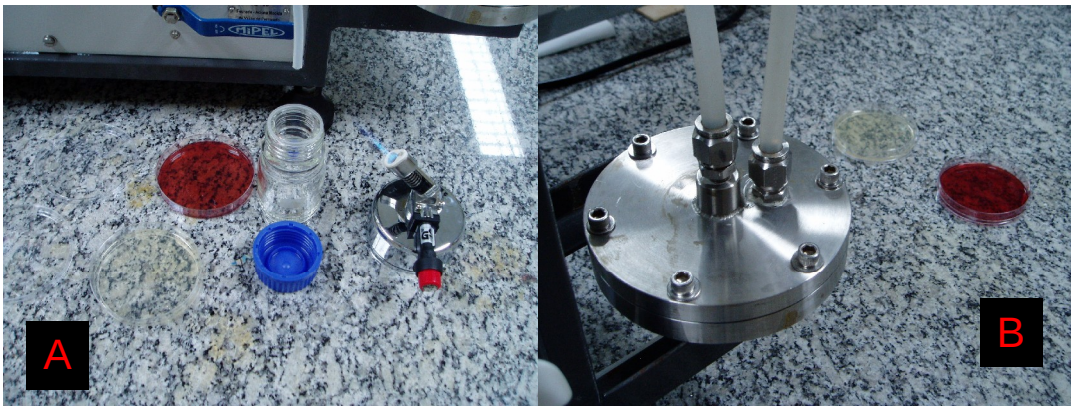


Figura 3.5: placas com meios EMB (cor avermelhada) e Agar nutrientes (transparente, levemente amarelo) abertas durante o ensaio de controle microbiológico. (A) Durante a coleta do permeado e (B) Durante a manipulação da célula de filtração.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os principais resultados obtidos neste trabalho, incluindo a caracterização do efluente oriundo de um Centro Comercial da cidade do Rio de Janeiro, as características operacionais dos sistemas de filtração e a caracterização dos permeados obtidos. Ao final será feita uma avaliação das características dos permeados obtidos em cada filtração para fins de reúso.

4.1. Caracterização da Alimentação do Sistema de Membranas

Como já mencionado no item 3.1, as amostras do efluente de saída (lodos ativados) da ETE do centro comercial foram tratadas pelos PSMs e analisadas o mais rapidamente possível após a sua coleta. Foram analisados nas amostras coletadas em diferentes dias, parâmetros físico-químicos e microbiológicos. A Tabela 4.1 apresenta a caracterização do efluente utilizado como alimentação do sistema de membranas, assim como os padrões de lançamento vigentes, já que se tratando de um efluente secundário, este deveria se enquadrar nos padrões citados.

Quando comparados com padrões não muito exigentes para reúso (fornecimento para sistemas semi-abertos de resfriamento e usos não potáveis irrestritos), observa-se que apenas os parâmetros pH e sílica, encontram-se dentro das sugestões de Semura *et al.* (2005). Isso mostra a necessidade de um tratamento terciário para que o reúso se torne uma alternativa possível.

Tabela 4.1: Média e faixa dos parâmetros físico-químicos microbiológicos do efluente utilizado na alimentação do sistema de membranas (N=3), padrões de lançamento vigentes e padrões sugeridos para reúso.

Parâmetros	Média	Faixa	CONAMA 357/05 e 397/08	NT 202/86 e DZ215/2007 FEEMA/RJ	Sugestão para Reúso(1)
pH	6,9	6,77 - 7,22	5-9	5-9	6,0 – 9,0
Turbidez (NTU)	56,5	30,5 - 69,8			2
Alcalinidade (mg $CaCO_3$/L)	269,9	264 - 275			100
Nitrogênio amoniacal (mgN/L)	61,4	48,8 - 83,9			1
Fósforo dissolvido (mg/L)	3,5	1,4 - 8,6			
Cloreto (mg/L)	120,0	96,8 -132			100
DQO (mg/L O_2)	93,9	68 -145			
DBO (mg/L O_2)	21,3	17 - 30		40 a 180 (2)	10
SDT (mg/L)	526,7	410 - 760			500
SST (mg/L)	53,0	45 – 66		40 a 180 (2)	5
***E. coli* (NMP/100mL)**	> 24196	> 24196			0
MBAS (mg/L)	1,0	1			
Cálcio (mg/L)	9,2	5,9 - 11,31			
Magnésio (mg/L)	4,1	3,9 – 4,5			
COT (mg/L)	15,1	13,7 – 17,4			
Sílica (mg/L)	6,6	6,1 – 6,8			50
Condutividade µS/cm	832	844-820			

(1) reúso para fornecimento para sistemas semi-abertos de resfriamento e usos não potáveis irrestritos (Semura *et al* 2005)
(2) O valor depende da concentração de carga orgânica

Confrontando-se os valores dos parâmetros do efluente com os padrões de lançamento estipulados pelos órgãos ambientais (FEEMA e CONAMA), verifica-se que a maioria dos parâmetros encontra-se dentro das especificações, com exceção dos sólidos suspensos totais (SST). O valor observado no efluente tratado dos SST (53mg/L) juntamente com a turbidez (56 NTU) estão elevados em comparação com os efluentes sanitários tratados por uma estação municipal de lodos ativados como o caracterizado por Nguyen *et al.* (2009), que se observa os valores de 2.3 (NTU) e 11 mg/L

respectivamente. Esses dois valores elevados demonstram um possível problema no decantador secundário, pois neste deveria ocorrer eficientemente a sedimentação dos sólidos (biomassa), permitindo que o efluente final saísse clarificado.

Outro parâmetro que apresenta uma concentração elevada é o nitrogênio amoniacal. A concentração observada no efluente tratado da ETE (61,4 mg/L), é maior do que o previsível em efluentes tratados biologicamente pelo processo de lodos ativados (>15 mg/L), segundo Florêncio *et al.* (2006). Este elevado valor sugere alguma limitação na unidade para a remoção desse nutriente.

4.2. Operação dos Sistemas com Membranas

4.2.1. Caracterização Inicial das Membranas

Anteriormente a cada ensaio de permeação com o efluente, ensaios com água pura foram feitos com cada uma das quatro membranas selecionadas a fim de se determinar a permeabilidade hidráulica das membranas utilizadas. A permeabilidade hidráulica é uma propriedade intrínseca às mesmas e foi determinada variando-se a pressão do sistema em três valores distintos e medindo-se o fluxo permeado para cada valor de pressão. O coeficiente angular da reta é valor da permeabilidade hidráulica de cada membrana (ver Anexo I).

A Tabela 4.2 mostra as permeabilidades hidráulicas iniciais em $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$para cada membrana a 25°C.

Tabela 4.2: Permeabilidade inicial média à água de cada membrana

Membranas	Permeabilidade Inicial ($Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$)
MF (0,5µm)	223,9
UF (50 kDa)	77,9
NF (25-40%)	15,5
OI (99,5%)	8,2

O valor da permeabilidade inicial da membrana de MF foi de 223,9 $Lm^{-2}h^{1}bar^{1}$. Howe *et al.* (2007) em seus experimentos, observaram o valor da permeabilidade igual a 313 $Lm^{-2}h^{-1}bar$ em membranas MF (fibra oca, PVDF, 0,1 µm). O fabricante da membrana do presente estudo informou que em testes em laboratório, foi observada uma permeabilidade igual 150 $Lm\text{-}^{2}h^{-1}bar^{-1}$. Comparando os dados do fabricante e da literatura com o observado na Tabela 4.2, pode-se concluir que o valor encontrado é um valor intermediário, portanto se encontra dentro do esperado.

O valor da permeabilidade hidráulica inicial da membrana de UF, foi de 77,9 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$. O valor informado pelo fabricante foi de 80 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$, o que demonstra que semelhança entre eles. Benitez *et al*. (2009) medindo a permeabilidade hidráulica em uma membrana (20kDa, PES, GE Osmonics), observaram o valor de 64,8 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$.Howe *et al* (2007), mediram a permeabilidade de uma membrana de fibra oca de *cut off* de 100 kDa e o valor encontrado foi de 306 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$. Como o *cut off* da membrana utilizada no presente estudo é menor, do que as utilizadas por estes autores, isso demonstra que a permeabilidade encontrada está dentro do esperado.

O valor da permeabilidade hidráulica inicial da membrana de NF foi de 15,5 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$. Bes-Piá *et al* (2009) utilizando membranas espirais de NF, cuja retenção de sais era de 97% (TFC® SR®2), verificaram que a permeabilidade da membrana era de 18, 1 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$ valor este próximo ao encontrado no presente estudo.

O valor da permeabilidade hidráulica inicial da membrana de OI foi de 8,2 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$ e corrobora com os valores descritos por Habert *et al.* (2006), que afirmaram que a ordem de grandeza da permeabilidade à água para membranas de OI está em torno de 10 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$.

4.2.2. Controle Microbiológico da Operação

Conforme foi descrito no item 3.4.15.2, duas placas de Petri contendo o meio de cultura EMB (seletivo para bactérias Gram negativas) e o meio Agar Nutriente, permaneceram abertas durante o período de manipulação da célula de filtração e duas permaneceram abertas durante o período de coleta do permeado. Estas placas foram incubadas por 24 horas a 35°C ± 1.

Após o período de incubação, foi observado crescimento de colônias no meio Agar nutriente tanto na placa que permaneceu aberta durante o período de manipulação como na placa que ficou aberta apenas no período de coleta do permeado. Já nas placas contendo o meio EMB, nas duas situações, não houve crescimento de colônias bacterianas. Estes resultados indicam que embora houvesse presença de microrganismos no ambiente no qual foi realizado o experimento, os microrganismos em questão, não eram bactérias Gram negativas, portanto pode-se inferir que não há ocorrência de contaminação por *E. coli* pelo meio ambiente do laboratório. Desta forma, foi certificado que as análises microbiológicas não corriam o risco de apresentarem resultados falsos positivos. Os resultados para ambas as situações descritas podem ser observados na Figura 4.1

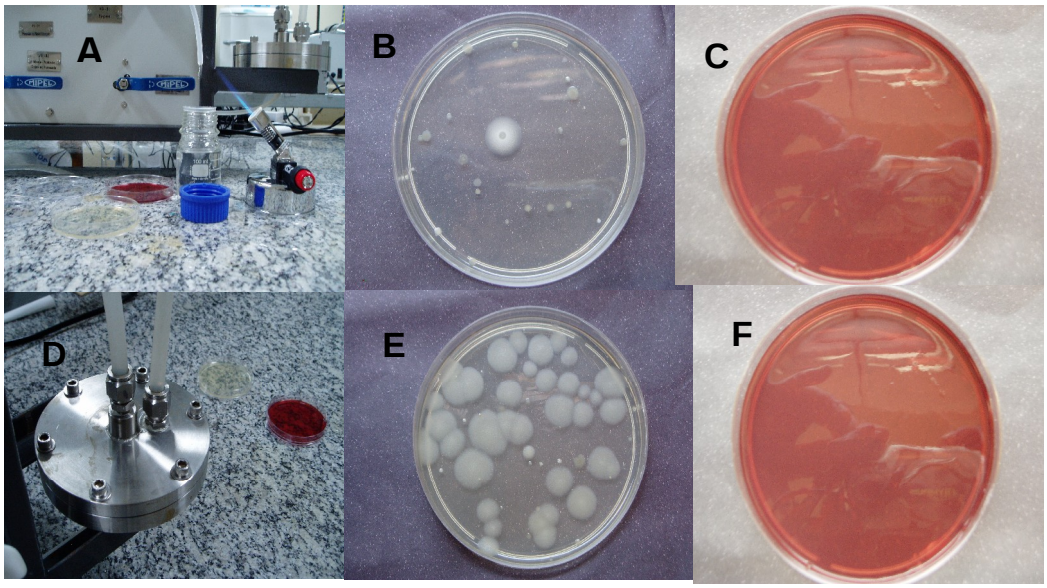


Figura 4.1: (A) Placas abertas durante o período de coleta do permeado: (B)Agar Nutriente e (C)EMB; (D) Placas abertas durante o período de manipulação da célula de filtração: (E)Agar Nutriente e (F)EMB.

Na Figura 4B, observa-se um crescimento de colônias bem inferior ao da Figura 4E. Isso se deve ao fato da coleta do permeado ter sido feita próxima ao bico de Bunsen.

4.2.3. Características Operacionais

4.2.3.1. Ensaios de Microfiltração

Nos ensaios de MF, foram utilizados módulos de membranas do tipo fibra oca, com diâmetro de poro de 0,5µm. Os testes com o efluente foram realizados mantendo-se constante as condições operacionais: Pressão de 0,5 bar, temperatura 25°C e vazão da alimentação 60 Lh^{-1}. Tanto neste ensaio da MF como nos seguintes, as condições (baixa pressão e uma alta vazão) foram selecionadas com intenção de minimizar o efeito do fouling na membrana.

O sistema de MF foi operado com 5 litros de efluente, em circuito fechado, obtendo-se cerca de 4,8 litros de permeado e 0,2 litros de

concentrado. O primeiro ensaio realizado, chamado de “experimento 1”, teve a duração de 1 hora e 10 minutos. Foi medido o fluxo inicial de permeado de 57,5 $Lm^{-2}h^{-1}$ e ao final do experimento atingiu um valor de 37,5 $Lm^{-2}h^{-1}$, indicando uma queda de cerca 35% .

Já no “experimento 2” que durou 1 hora e 20 minutos, o fluxo de permeado inicial foi de 54,2 $Lm^{-2}h^{-1}$ e o final foi de 33 $Lm^{-2}h^{-1}$, mostrando uma queda de 39%.

O valor dos fluxos de permeado iniciais observados nos ensaios 1 e2 não estão de acordo com os dados tradicionalmente encontrados na literatura. Nguyen *et al.* (2009) utilizaram o sistema de Amicon 8050 e membranas de microfiltração com poros de 0,22 µm (plana, PVDF, Millipore), uma pressão de 0,7 bar, para tratar um efluente secundário de uma estação de lodos ativados. Os autores observaram que um fluxo de permeado inicial de 2500 $Lm^{-2}h^{-1}$ e no final de 40 $Lm^{-2}h^{-1}$. O valor final do fluxo do permeado foi muito semelhante ao do experimento 1 (37,5 $Lm^{-2}h^{-1}$). Porém, o sistema utilizado pelo autor apresentava filtração frontal (*dead end*), a qual é mais susceptível ao *fouling*, o que justifica a elevada queda de fluxo de 98,4%. Como já foi dito anteriormente, os sistemas de filtração tangencial conferem vantagem em comparação aos sistemas de filtração frontal, já que naqueles a formação da “torta” é limitada, devido ao efeito de arraste gerado pela velocidade tangencial e nestes, a incrustação ocorre em curto período de tempo, devido ao acúmulo da torta retida (MALACK & ANDERSON, 1996).

Assim como no presente estudo, Howe *et al* (2007), observaram fluxos de permeado finais semelhantes, mesmo com as membranas apresentando valores de permeabilidade discrepantes. No trabalho dos autores foi realizado um estudo comparativo com água em membranas de MF – uma de fibra oca com poro de 0,1µm e uma plana de poro de 0,22 µm. Embora as duas tivessem permeabilidades iniciais bem diferentes: 313 $Lm^{-2}h^{-1}bar$ e 3070 $Lm^{-2}h^{-1}bar$, respectivamente, a alta permeabilidade da membrana plana causou um rápido *fouling* e no fim do ensaio de filtração, o fluxo final da membrana de fibra oca era de 196 $Lm^{-2}h^{-1}$ e da membrana plana era de 200 $Lm^{-2}h^{-1}$. Pode-se

perceber que o fluxo final do permeado, era praticamente idêntico no fim dos dois ensaios, e o efeito forte do *fouling* na membrana plana foi o responsável pelo decaimento do fluxo. Segundo os autores, o ponto importante é o valor do fluxo a longo prazo, durante todo o processo de filtração, pois um *fouling* inicial muito elevado em uma membrana de permeabilidade elevada não descarta a possibilidade do uso desta membrana quando se analisa uma operação em longo prazo.

Observando o comportamento do fluxo de permeado durante os ensaios 1 e 2 apresentados na Figura 4.2, verifica-se que os mesmos se mostraram bastante semelhantes.

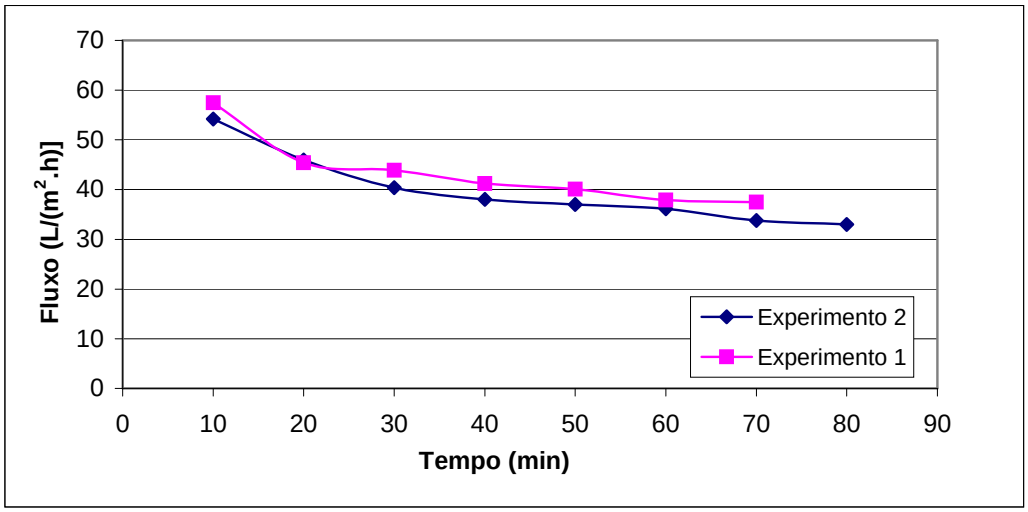


Figura 4.2: Variação do fluxo de permeado no decorrer do tempo dos ensaios de microfiltração.

As curvas de fluxo de permeado mostradas na Figura 4.2 demonstraram uma rápida redução de fluxo no início da operação, período entre 20 a 30 minutos, e posteriormente uma tendência a estabilização corroborando com os dados de Pelegrin (2004), que também utilizou esgoto sanitário biotratado em seus ensaios de microfiltração tangencial, usando uma membrana tubular de poros de 0,2μm. Segundo Hong *et al* (2002) apud Vidal (2006), o decréscimo inicial é atribuído ao "entupimento" dos poros da membrana e início da formação da torta em sua superfície. Ainda, de acordo com esses autores, a

diminuição posterior dos valores de fluxo é atribuída ao aumento da espessura da torta ao longo da operação.

4.2.3.2. Ensaios de Ultrafiltração

Nos ensaios de ultrafiltração, foram utilizados módulos de membranas do tipo fibra oca, com 50kDa de cut-off. Nos testes foram processados 5 litros de efluente, mantendo-se constante as condições operacionais: pressão de 2 Bar, temperatura 25°C e vazão da alimentação 60 Lh^{-1}.

O primeiro ensaio de UF foi chamado de experimento 3 e teve a duração de 1 hora e 30 minutos, obtendo-se cerca de 4,8 litros de permeado e 0,2 litros de concentrado. Iniciou-se apresentando um fluxo de 50,4 $Lm^{-2}h^{-1}$ que no final chegou a 27,2 $Lm^{-2}h^{-1}$ indicando uma queda de cerca 46%.

O segundo ensaio de UF, foi chamado de experimento 4 e durou 1 hora e 40 minutos, com um fluxo inicial de 49,8 $Lm^{-2}h^{-1}$ e no final de 24,3 $Lm^{-2}h^{-1}$ mostrando uma queda 49%. Os resultados demonstram uma variação de fluxo bastante semelhante nos dois ensaios. A Figura 4.3 mostra o comportamento do fluxo de permeado durante os ensaios 3 e 4.

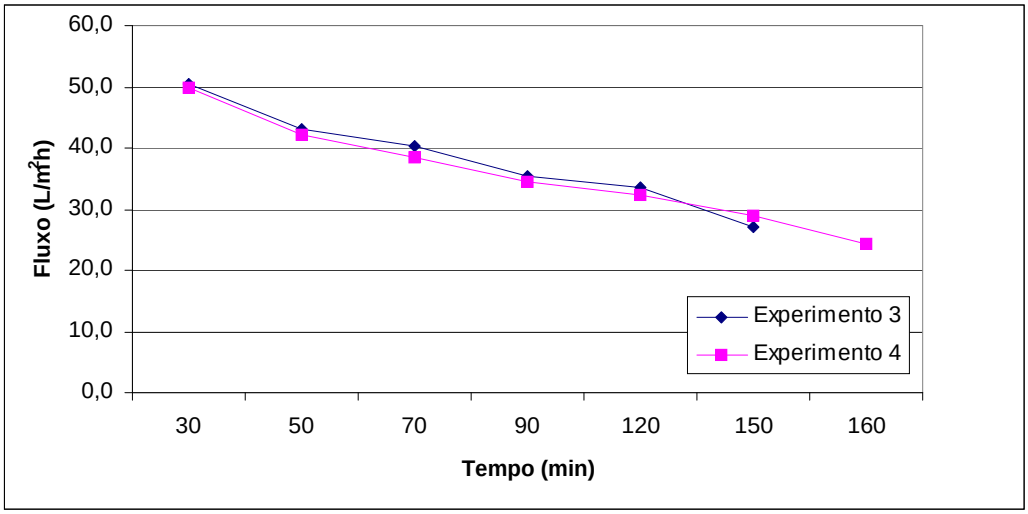


Figura 4.3: Variação do fluxo de permeado no decorrer do tempo dos ensaios de ultrafiltração.

Brião & Tavares (2007), que utilizaram uma membrana tubular de cut-off 30-80 kDa (HFM 180-Koch Membrane Systems) e uma membrana em espiral de cut-off 5-8 kDa (HFM 131- Koch Membrane Systems), para tratarem um efluente da indústria de laticínios, e encontraram uma queda de fluxo de 57% e 53%, respectivamente. Essa queda foi maior do que a do presente trabalho, possivelmente devido à composição do efluente e à pressão (2.94 bar) utilizados pelos autores. Como já foi descrito anteriormente, o aumento da pressão pode causar um aumento da espessura da camada que se deposita sobre a membrana, a compactação da membrana e maior adsorção de substâncias nos poros da mesma, ocasionando uma queda do fluxo de permeado.

Através da Figura 4.3, pode-se observar uma queda do fluxo do permeado no decorrer do tempo de operação. Porém, não foi observada uma estabilização do valor do mesmo. Isso provavelmente aconteceu devido o volume de efluente utilizado no ensaio ser insuficiente para atingir a estabilização. Brião & Tavares (2007), ao utilizarem a membrana em espiral de cut-off 5-8 kDa , para tratar o efluente da indústria de laticínios, também não obtiveram uma redução de fluxo inicial brusca, porém foi observado uma estabilização do fluxo do permeado aproximadamente após 30 minutos de operação. Provavelmente essa diferença pode estar associada a diferença da

composição do efluente, e da pressão utilizada (2.94 bar) e pelo fato dos poros da membrana utilizada pelos autores serem bem menores do que os do presente estudo (50 kDa), pois esses três fatores resultam na deposição da camada da torta, e consequentemente, poderia ocasionar a estabilização do fluxo.

Choi *et al.* (2005), compararam o comportamento do fluxo do permeado no decorrer do tempo de operação de dois biorreatores a membranas (MBR), um de MF plana, 0,3μm (Osmonics) e um de UF plana, 30KDa (Osmonics), em ensaios utilizando um efluente sintético semelhante a um efluente de processamento da indústria de papel. Neste estudo os autores demonstraram uma queda abrupta nos primeiros 30 minutos de operação, usando uma membrana de MF, enquanto que com a membrana de UF, apresentou quedas brandas.

Apesar da membrana de MF do presente estudo, apresentar características de permeabilidade semelhantes à de uma membrana de UF, o processo de MF apresentou um fluxo de permeado maior. Este fato pode ser devido à menor pressão aplicada (condição operacional branda).

4.2.3.3. Ensaio de Nanofiltração

No ensaio de nanofiltração foi utilizada uma membrana plana, com 25-40% de retenção de Na_2SO_4. O teste com o efluente foi realizado mantendo-se constante as seguintes condições operacionais: Pressão de 5 Bar, temperatura 25^oC e vazão da alimentação 60 Lh^{-1}.

Foram processados 2,5 litros de efluente e obtidos 2,3 litros de permeado e 0,2 litros de concentrado, durante 13 horas e 45 minutos de processamento.

A curva de nanofiltração mostrou uma queda do fluxo ao longo do tempo seguida de um período de estabilização, caracterizando um *fouling* de longo período, sendo esse valor de 20,8 $Lm^{-2}h^{-1}$ após 6 horas de nanofiltração. A Figura 4.4 mostra o comportamento do fluxo de permeado no decorrer do tempo durante o ensaio.

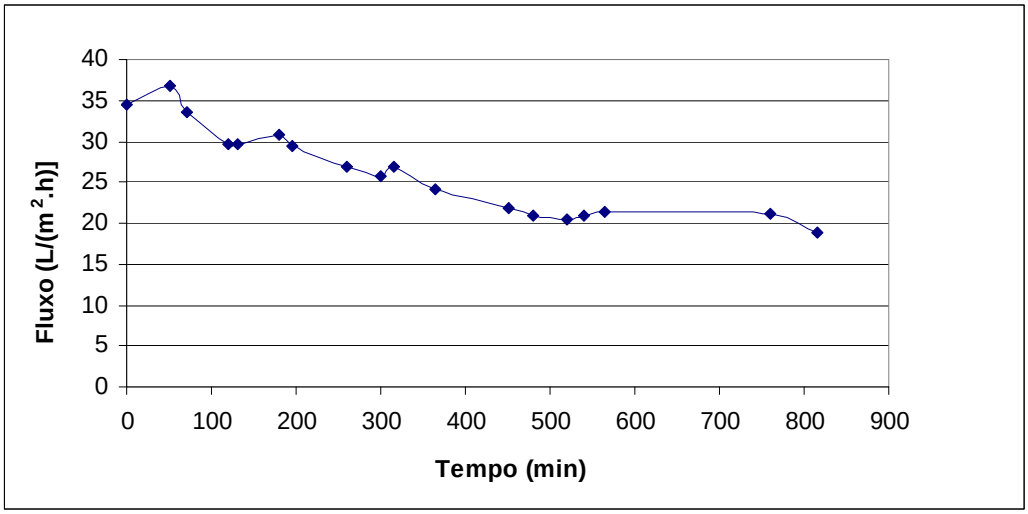


Figura 4.4: Variação do fluxo de permeado no decorrer do tempo do ensaio de nanofiltração.

O teste de permeabilidade hidráulica logo após o ensaio de permeação apresentou uma permeabilidade era de 10,45 $Lm^{-2}h^{-1}bar^{-1}$, O fluxo inicial que era de 34,5 $Lm^{-2}h^{-1}$, caiu para 18,8 $Lm^{-2}h^{-1}$ no final do ensaio, o que demonstrou uma queda de 46 %. Estes dados demonstram que o efeito do *fouling* nas membranas foi responsável por uma queda de 32% da permeabilidade e de 45% do fluxo de permeado em relação ao início de ensaio.

Já Fersi *et al.* (2005), utilizando membrana plana de NF (Filmtech NF 270 - de poro de ˜ 2nm) para tratar efluentes têxteis após passarem por tratamentos secundários, observaram um decréscimo de 83,5%, quando operados a uma temperatura de 30°C e a uma pressão de 10 bar, depois de um período de 5 horas de filtração. Segundo os autores, essa queda do fluxo do permeado, é uma consequência do efeito de polarização por concentração, pela absorção e /ou bloqueio dos poros causados por uma alta concentração

de DQO e sal. A diferença entre os dados comparados, se deve possivelmente às diferenças nas características químicas do efluente utilizado pelos autores, pois os parâmetros condutividade, Cl^-, $Ca+^2$, $Mg+^2$, SDT apresentaram uma concentração dez vezes maior do que a do efluente do presente estudo. Outro fator que possivelmente está relacionado com a diferença dos resultados, é o fato da pressão utilizada no ensaio dos autores(10 bar) ser o dobro da utilizada no ensaio de NF (5bar). É sabido que quanto maior à pressão de operação, maior será a queda do fluxo.

.

4.2.3.4. Ensaio de Osmose Inversa

As membranas de OI são muito sensíveis às partículas que contribuem para o *fouling*, como colóides, compostos inorgânicos e a biomassa (*biofouling*). Com o intuito de se obter uma operação mais eficiente, no ensaio de OI utilizou-se como alimentação, o permeado do sistema de MF.

No ensaio de osmose inversa foi utilizada uma membrana plana, com 99,5% de retenção de Na_2SO_4. O teste com o efluente foi realizado mantendo-se constante as seguintes condições operacionais: Pressão de 8 bar, temperatura 25°C e vazão da alimentação 60 Lh^{-1}.

Foram processados de 3 litros do efluente microfiltrado e foram obtidos 2,8 litros de permeado e 0,2 litros de concentrado, após 17 horas e 50 minutos.

O fluxo inicial era 19,8 $Lm^{-2}h^{-1}$ e caiu para 19,0 $Lm^{-2}h^{-1}$ no final do ensaio, o que demonstrou uma queda de apenas 4,05 %. Isso se deve ao fato da alimentação ter sido o permeado microfiltrado, pois o fato de apresentar menos partículas faz com que seja minimizado o fouling e com isso, reduz fortemente a variação do fluxo. Gozálvez-Zafrilla *et al.*(2008) utilizando a NF em tratamento de efluente de indústria têxtil, observou um aumento de 50% no fluxo do permeado quando se utilizava a UF como pré-tratamento da NF. Segundo Dawes *et al*. (1999) *apud* Durham *et al*. (2001) a redução do potencial

do fouling como as observadas nos processos com pré-tratamento por MF e/ou UF demonstraram uma redução de custo de mais 60% na planta de OI.

A Figura 4.5 mostra o comportamento do fluxo de permeado no decorrer do tempo durante o ensaio, sendo observado pouco decaimento durante o ensaio de OI.

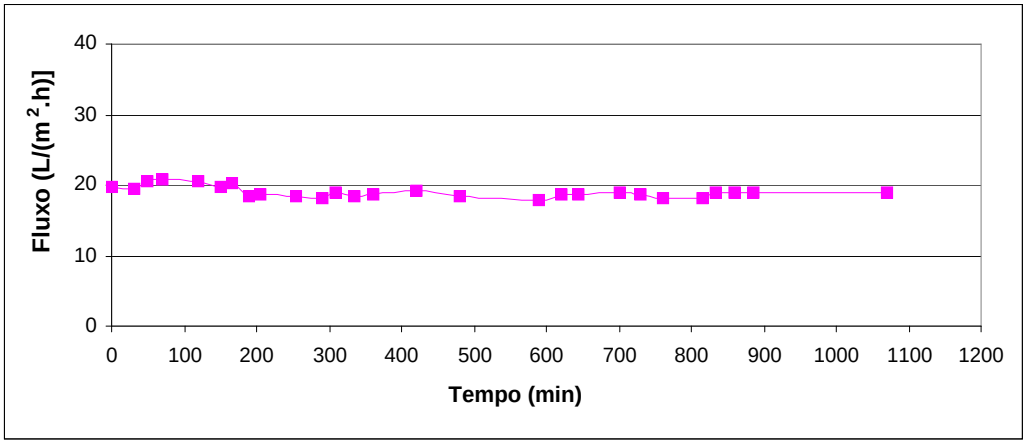


Figura 4.5: Variação do fluxo de permeado no decorrer do tempo do ensaio de osmose inversa.

4.2.4. Eficiência de Limpeza das Membranas

O procedimento de limpeza das membranas consistiu na recirculação no sistema, de uma solução de NaClO 500mg/L, durante 2h, a uma temperatura de 25°C e vazão de 60 L/h, nas respectivas pressões usadas nos ensaios em cada tipo de membrana. A Tabela 4.3 mostra os valores do fluxo do permeado dos testes de permeabilidade hidráulica e da recuperação, após o procedimento de limpeza.

Tabela 4.3: Fluxos: inicial, pós limpeza e pós uso e limpeza dos ensaios de MF, UF, NF e OI.

Membranas	Fluxo Inicial de Água ($Lm^{-2}h^{-1}$)	Fluxo de Água ($Lm^{-2}h^{-1}$) Pòs Limpeza	Fluxo de Água ($Lm^{-2}h^{-1}$) Pós uso e Limpeza
MF (0,5µm)	140,0	96,0	69%
UF (50 kDa)	147,7	97,8	66%
NF (25-40%)	33,8	27,1	81%
OI (99,5%)	22,3	17,9	81%

Após o procedimento de limpeza do sistema houve uma recuperação do fluxo de 69%, 66%, 81% e 81% para as membranas de MF, UF, NF e OI respectivamente.

Field *et al* (2008) testaram procedimentos de limpeza em membrana plana (0,22 µm), após sofrer *fouling* em uma operação de filtração de uma solução protéica de 50 mg/ L contendo Albumina de Soro Bovino (BSA) e Ovoalbumina. Operando na pressão de 0,1 bar, utilizaram para a limpeza da membrana uma solução de hipoclorito de sódio 4% (massa), e obtiveram uma recuperação de 70% do fluxo inicial. Comparando-se os dados do presente estudo com o dos autores, percebe-se a eficiência do processo de limpeza foram semelhantes. Entretanto, neste trabalho, outras concentrações da solução de NaClO não foram testadas.

Já Zhu & Nystrom (1998), utilizaram soluções de BSA (0,8 g/L) para avaliar a queda do fluxo do permeado em decorrência do *fouling* e a percentagem de recuperação deste, após a limpeza com 6 diferentes agentes químicos, em membranas de UF ,cut-off 50KDa (GR51). O fluxo inicial era de 96 $Lm^{-2}h^{-1}$ e caiu para 56,8 $Lm^{-2}h^{-1}$, apresentando uma queda de 41%. Após o procedimento de limpeza com NaOCl (0,5%v/v),o fluxo subiu para 79,2 $Lm^{-2}h^{-1}$, mostrando que a eficiência do processo de limpeza recuperou 82,5% do fluxo do permeado em relação ao fluxo inicial. Essas diferenças entre os dois experimentos, provavelmente aconteceram devido à diferença na composição da alimentação de ambos os sistemas. O BSA não penetra nos poros das membranas, causando apenas *fouling* superficial, o que acaba facilitando o

procedimento de limpeza e justificando sua maior eficiência em relação ao efluente do presente estudo que apresenta uma maior diversidade em sua composição química, inclusive de moléculas e íons que penetram nos poros da membrana, fazendo com que haja uma maior queda em decorrência do *fouling* e uma eficiência menor em relação ao processo de limpeza.

Field *et al* (2008) sugeriram duas hipóteses para os seus procedimentos de limpeza não terem atingido 95% a 100% de recuperação do fluxo. Uma seria a baixa concentração do agente de limpeza (500 mg/L de NaClO) e a outra seria devido a temperatura de operação que foi de 25 ^{0}C, pois o aumento da temperatura aumenta a cinética do processo de limpeza, pois segundo Kuzmenko *et al.* (2005), os agentes oxidantes fortes como o NaClO, agem hidrolisando o *fouling*.

Para Madaeni e Mansourpanah (2004), além da temperatura e da baixa concentração dos agentes de limpeza, o tempo do procedimento de limpeza, também influi na eficiência do processo. Normalmente, um maior tempo de limpeza, tem como conseqüência uma melhor eficiência. Contudo, devido a capacidade limitada de dissolução da camada torta, este aumento da eficiência se reduz gradualmente. Fato semelhante ocorre com a concentração dos agentes utilizados. Depois de se atingir a concentração ótima, a porosidade da camada torta pode diminuir, o que resultará em uma menor eficiência.

4.3. Avaliação da Qualidade dos Permeados

4.3.1. Avaliação da Qualidade do Permeado da Microfiltração

Os resultados dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos analisados, bem como o percentual de remoção de cada variável, estão apresentados na Tabela 4.4:

Tabela 4.4: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do efluente da ETE (Alimentação) e do Permeado de Microfiltração.

Parâmetros	Alimentação	Permeado	Remoção (%)
pH	6,9	7,4	
Turbidez (NTU)	69,0	0,9	98,7
Alcalinidade (mg $CaCO_3$/L)	275	253	8
Nitrogênio amoniacal (mgN/L)	49	52	0
Fósforo dissolvido (mg/L)	1,4	0,4	67,1
Cloreto (mg/L)	132	107	19
DQO (mg/L O_2)	145	53	63
DBO (mg/L O_2)	30	12	60
SDT (mg/L)	760	270	64
SST (mg/L)	45	24	47
***E. coli* (NMP/100mL)**	> 24196	0	100
MBAS (mg/L)	1,0	0,7	30
Calcio (mg/L)	11,3	9,4	16,9
Magnésio (mg/L)	3,9	1,5	61,5
COT (mg/L)	17,4	12,2	29,8
Sílica (mg/L)	6,8	6,4	6,1
Condutividade µS/cm 25^{0}C	832	754	10

O bom desempenho da membrana de MF na remoção de turbidez, sólidos suspensos, DBO, DQO, COT, MBAS, está associado à capacidade de rejeição de sólidos em suspensão e parte do material coloidal presentes no afluente a unidade de microfiltração.

Já o pH, a alcalinidade, o cloreto, o cálcio, a sílica e a condutividade não apresentaram mudanças significativas, pois todos esse parâmetros estão relacionados à passagem de íons pela membrana, pois os poros da membranas de MF (0,5 µm), são bem maiores do que o raio atômico desses íons.

Pode ser observado que o nitrogênio amoniacal apresentou um ligeiro aumento na sua concentração (~5,7%), que está dentro do erro da análise, o que demonstra que este também permaneceu constante.

No entanto, mesmo apresentando partículas menores do que os poros da membrana observam-se eficiência na remoção de SDT, cálcio, magnésio e fósforo dissolvido. Vidal (2006), que submeteu um efluente sanitário biotratado ao processo de microfiltração utilizando uma membrana de poro de 0,2 µm, relatou uma significativa remoção de fósforo dissolvido que indica que a maior parte de fósforo presente no efluente no tanque de aeração (das estação de lodos ativados), está na forma particulada, provavelmente assimilado na biomassa. Outros parâmetros observados pelo autor que corroboram com os resultados do presente estudo foram o pH, a turbidez e a DQO. Já a condutividade, apresentou uma remoção maior do que no presente estudo, enquanto que nas análises de *E.coli,* apresentou uma redução menor.

Em um trabalho empregando um biorreator a membrana (MBR), o qual possuía uma membrana de MF tubular (X-Flow) e de poros de 0,03µm, Rocha *et al* (2008), utilizaram o efluente bruto do mesmo centro comercial do presente estudo como alimentação do MBR. O permeado obtido pelos autores apresentou qualidade semelhante com o do presente estudo nos seguintes parâmetros: DQO, DBO, MBAS, Turbidez, Condutividade, SDT, Sílica e *E.coli*. Já as características da alimentação se apresentaram levemente diferentes pelo fato de os estudos terem sido desenvolvidos em períodos diferentes. Entretanto, pode-se considerar a similaridade nas suas características pela proveniência do mesmo centro comercial.

A Figura 4.3 apresenta o aspecto visual do permeado de um ensaio de microfiltração.

Figura 4.6: Permeado de um ensaio de microfiltração.

Embora o parâmetro cor não tenha sido analisado, pela Figura 4.6 pode-se observar que o permeado possuía cor em um tom amarelado, entretanto não apresentava odor. A cor se justifica devido à presença do material orgânico residual dissolvido que não foi retido pela membrana.

4.3.2. Avaliação da Qualidade do Permeado da Ultrafiltração

Os resultados dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos analisados, bem como o percentual de remoção de cada um, estão apresentados na Tabela 4.5:

Tabela 4.5: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do efluente da ETE (Alimentação) e do Permeado de Ultrafiltração.

Parâmetros	Alimentação	Permeado	Remoção (%)
pH	6,8	7,4	
Turbidez (NTU)	69,8	0,3	99,6
Alcalinidade (mg $CaCO_3$/L)	264	258	1,9
Nitrogênio amoniacal (mgN/L)	51	55	0,0
Fósforo dissolvido (mg/L)	8,6	1,2	86
Cloreto (mg/L)	131	104	20
DQO (mg/L O_2)	68	35	49
DBO (mg/L O_2)	17	4	74
SDT (mg/L)	410	240	41
SST (mg/L)	66	6	90
***E. coli* (NMP/100mL)**	> 24196	0	100
MBAS (mg/L)	1,0	0,5	53
Calcio (mg/L)	10,3	9,8	4,8
Magnésio (mg/L)	3,8	2,2	42,1
COT (mg/L)	14,2	13,5	4,8
Sílica (mg/L)	6,8	6,4	5,4
Condutividade µS/cm a 25^0C	832,0	740,0	11

O bom desempenho da membrana de UF na remoção de turbidez, SST, DBO, DQO, COT, MBAS, está ligado à grande capacidade de rejeição de sólidos em suspensão e do material coloidal presente no afluente a unidade de UF.

Brião & Tavares (2007), utilizaram uma membrana tubular de cut-off 30-80 kDa (HFM 180-Koch Membrane Systems) para tratarem um efluente da Indústria de laticínios e conseguiram uma remoção de turbidez de 99,98%, atingindo no final 0,5 NTU; de DQO de 74%, atingindo uma concentração de 894, mg/L. O resultado do parâmetro turbidez está muito próximo ao do presente estudo e embora a porcentagem de remoção de DQO dos autores tenha sido maior, do que a do presente trabalho, vale ressaltar que a concentração da DQO da alimentação era baixa (68,7 mg/L), em comparação com a do estudo citado (2095 mg/L), que faz com que a porcentagem de remoção se mostre alta.

O pH, alcalinidade, nitrogênio amoniacal, cloreto, cálcio, sílica e condutividade não apresentaram mudanças significativas. Este fato já era esperado, já que esses parâmetros estão relacionados ao fato dos íons serem permeáveis pela membrana de UF.

Assim como no ensaio de MF, pôde ser observado que houve um ligeiro aumento na sua concentração do nitrogênio amoniacal, que está dentro do erro da análise, o que demonstra que este também permaneceu constante, pelo mesmo motivo dos outros íons.

Mesmo apresentando partículas menores do que os poros da membrana foram observados eficiência na remoção de SDT, magnésio e fósforo dissolvido, que provavelmente se deu em consequência da formação da camada torta, que possibilita um aumento na capacidade de retenção das partículas. Bylund (1995) apud Brião & Tavares (2007), referindo-se a um efluente da indústria de laticínios tratado por UF, ressalta que embora o cálcio e o fósforo dissolvidos possuam dimensões inferiores aos poros das membranas de UF, esses compostos encontram-se ligados ao complexo formado entre as micelas de caseína e de gordura na forma de fosfato de cálcio. Quando a caseína é rejeitada no processo, é provável que o cálcio e fosfato que se integram a esse complexo, também sejam rejeitados. Uma melhor caracterização do efluente poderia elucidar a natureza dos compostos químicos presentes nele, o que possivelmente justificaria a remoção de magnésio, fósforo e dos SDT.

Todos os parâmetros apresentaram-se bem semelhantes aos analisados nos ensaios de microfiltração, exceto o SST, que apresentou uma remoção de 46,67% no ensaio de microfiltração e de 90,91% no presente ensaio. Tal fato pode ser justificado, pelo fato da membrana de UF apresentar poros menores e com isso conseguir reter, partículas de sólidos suspensos de menor tamanho que as membranas de MF. Fersi *et al.* (2005), utilizando membranas tubulares de MF (T170-TA–5 µm) e UF (T170-TZ– 0,02 µm) para tratar efluentes têxteis após passarem por tratamentos secundários, observaram um aumento de 30% na retenção de SST, quando comparada a membrana de UF em relação à

Membrana de MF. Pode-se perceber que no presente trabalho, foi observada uma maior retenção de SST em comparação com a do trabalho dos autores. Essa diferença pode ser atribuída a diferença da natureza química dos efluentes e das membranas utilizadas.

As características do permeado do ensaio de UF se mostraram bem semelhantes às do permeado da MF. Levando em conta este fato e somando-o ao fato de que os fluxos dos ensaios de MF foram maiores que o da UF, optou-se pela MF como pré-tratamento para a OI.

4.3.3. Avaliação da Qualidade do Permeado da Nanofiltração

Os resultados dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos analisados, bem como o percentual de remoção de cada um, estão apresentados na Tabela 4.6.

Quase todos os parâmetros analisados apresentaram reduções expressivas, dentre os quais se destacam a turbidez, os SDT, os SST, *E. coli*, cálcio e magnésio, cujas taxas de redução foram 99,9%, 92,6%, 91,7%, 100%, 86,9%, e 84,1%, respectivamente. Foi observada uma redução de nitrogênio amoniacal de 53%, a qual não foram verificados com membranas de MF e de UF.Os parâmetros que não apresentaram reduções expressivas foram o cloreto, sílica e condutividade. O pH não apresentou grande variação, demonstrando que a nanofiltração deu origem a um permeado de excelente qualidade. Quanto ao parâmetro cor, esta estava virtualmente ausente e o permeado não apresentou odor.

Tabela 4.6: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do efluente da ETE (Alimentação) e do Permeado de Nanofiltração.

Parâmetros	Alimentação	Permeado	Remoção (%)
pH	6,85	7,2	
Turbidez (NTU)	30,6	0,02	99,9
Alcalinidade (mg $CaCO_3$/L)	270	132	51
Nitrogênio amoniacal (mgN/L)	84	40	53
Fósforo dissolvido (mg/L)	0,6	0,3	42
Cloreto (mg/L)	97	62	36
DQO (mg/LO_2)	69	30	56
DBO (mg/LO_2)	17	4	76
SDT (mg/L)	410	30	93
SST (mg/L)	48	4	92
***E. coli* (NMP/100mL)**	> 24196	0	100
MBAS (mg/L)	1	0,4	60,
Calcio (mg/L)	3,8	0,5	87
Magnésio (mg/L)	0,4	0,07	84
COT (mg/L)	14	4	71
Sílica (mg/L)	6,2	4,5	26
Condutividade µS/cm a 25^{0}C	832,0	551,0	34

Assim como no presente estudo, Fersi *et al.* (2005), que utilizou uma membrana plana de NF (Filmtech NF 270 - de poro de ˜ 2nm) para tratar efluentes têxteis após passarem por tratamentos secundários, também observaram excelentes reduções nos parâmetros analisados dentre eles se destacaram os SDT e a turbidez, cujas taxas de redução ficaram acima de 90%.

4.3.4. Avaliação da Qualidade do Permeado da Osmose Inversa

Os resultados dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos analisados, bem como o percentual de remoção de cada um, estão apresentados na Tabela 4.7:

Tabela 4.7: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do microfiltrado (Alimentação) e do Permeado de Osmose Inversa

Parâmetros	Alimentação (Permeado MF)	Permeado (OI)	Remoção (%)
pH	7,6	6,6	
Turbidez (NTU)	1,7	0,02	98,8
Alcalinidade (mg CaCO3/L)	253	26	90
Nitrogênio amoniacal (mgN/L)	52	7	85
Fósforo dissolvido (mg/L)	0,5	0,01	98
Cloreto (mg/L)	107	4	97
DQO (mg/L O_2)	53	25	53
DBO (mg/L O_2)	12	9	25
SDT (mg/L)	270	28	90
SST (mg/L)	24	4	83
E. coli (NMP/100mL)	0	0	0
MBAS (mg/L)	0,7	0,1	83
Calcio (mg/L)	9,4	0,3	96
Magnésio (mg/L)	1,5	0,04	97
COT (mg/L)	12	4	69
Sílica (mg/L)	6,4	0	100
Condutividade µS/cm a 25^{0}C	724	498	31

Todos os parâmetros analisados apresentaram elevados valores de redução, dentre os quais se destacam o cloreto (97%) e a sílica (100%) que não haviam apresentado grande variação no ensaio de NF. Vale ressaltar que no permeado originado da OI, foi observado uma menor concentração em todos os parâmetros quando comparados com o permeado originado da NF, caracterizando assim um permeado de melhor qualidade. Isto já era esperado pelo fato dos poros da membrana de OI serem menores do que as de NF.

Levando-se em consideração a sequência de tratamento do efluente biotratado: Efluente secundário → microfiltração → osmose inversa, a Tabela 4.8 mostra os resultados dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos analisados do efluente secundário da ETE e do permeado da osmose inversa, bem como o percentual de remoção total de cada parâmetro. Fazendo assim uma comparação da remoção total de todo o processo.

Tabela 4.8: Parâmetros físicos, químicos e microbiológicos do efluente da ETE (Alimentação) e do Permeado de Osmose Inversa

Parâmetros	Alimentação (saída ETE)	Permeado (MF+OI)	Remoção total (%)
pH	6,9	6,6	
Turbidez (NTU)	69	0,02	99,9
Alcalinidade (mg $CaCO_3$/L)	275	26	90,4
Nitrogênio amoniacal (mgN/L)	49	7	85
Fósforo dissolvido (mg/L)	1,4	0,01	99
Cloreto (mg/L)	132	4	97
DQO (mg/L O_2)	145	25	83
DBO (mg/L O_2)	30	9	70
SDT (mg/L)	760	28	96
SST (mg/L)	45	4	91
***E. coli* (NMP/100mL)**	> 24196	0	100
MBAS (mg/L)	1	0,1	88
Calcio (mg/L)	11,3	0,3	97
Magnésio (mg/L)	3,9	0,04	99
COT (mg/L)	17	4	77
Sílica (mg/L)	7	0	100
Condutividade µS/cm a 25^0C	832	498	40

Todos os parâmetros analisados apresentaram reduções expressivas, demonstrando que a combinação MF + OI deu origem a um permeado com excelentes taxas de redução.

Lee *et al.* (2006) utilizaram MF (plana, 0,01 µm, poliacrilonitrila, Toray CP20-1010) + OI (espiral, poliamida, Osmonic Co. AG 2540) para tratar efluente secundário de uma indústria de metais que possuía elevada condutividade, resultante da presença elevada de vários íons. Operando o sistema de OI a uma pressão de 9,81 bar, os autores observaram remoções das concentrações dos íons cálcio e cloreto próximos a 100%, corroborando com as concentrações obtidas no ensaio do presente estudo que foram de 97% para ambos os parâmetros.

A Figura 4.7 apresenta visualmente uma comparação das amostras coletadas do efluente secundário e dos permeados dos ensaios de micro, ultra, nanofiltração e de osmose inversa.

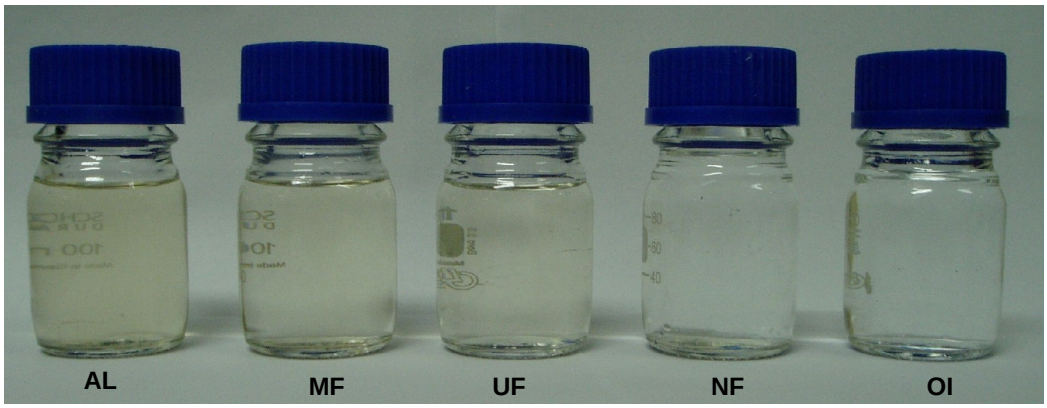


Figura 4.7: Aspectos visuais da Alimentação (AL) e dos permeados da Micro (MF), Ultra (UF), NanoFiltração (NF) e Osmose Inversa (OI)

Na Figura 4.7, pode-se observar que os permeados da micro e ultrafiltração ainda apresentavam uma cor amarelada, enquanto que os permeados da nanofiltração e da osmose inversa eram transparentes.

4.4. Avaliação dos Parâmetros Obtidos nos Permeados obtidos para fins de Reúso

A Tabela 4.9 apresenta uma comparação dos parâmetros analisados em cada tipo de ensaio.

Tabela 4.9: Comparação dos parâmetros físicos, químicos e microbiológicos analisados em cada um dos ensaios.

Parâmetros	MF	UF	NF	MF+OI	Sugestões para Reúso
pH	7,4	7,4	7,2	6,6	6-8 (1) 6-9 (5)
Turbidez (NTU)	0,9	0,3	0,02	0,02	> 5NTU (1) (2) >10NTU(3) 2 (5)
Alcalinidade (mg $CaCO_3$/L)	253	258,8	132,0	26,4	100 (5)
Nitrogênio amoniacal (mgN/L)	52,0	55,9	39,7	7,5	1 (5)
Fósforo dissolvido (mg/L)	0,4	1,2	0,3	0,01	
Cloreto (mg/L)	107,0	104,1	62,1	3,7	100 (5)
DQO (mg/LO_2)	53,6	35,1	30,2	25,0	
DBO (mg/L O_2)	12,0	4,3	4,1	9,0	10 (5)
SDT (mg/L)	270,0	240,0	30,0	28,0	> 200 (1) 500 (5)
SST (mg/L)	24,0	6,0	4,0	4,0	5 (5)
***E. coli* (NMP/100mL)**	0,0	0,0	0,0	0,0	> 200 (1) >500 (2) (3) (4) 0 (5)
MBAS (mg/L)	0,7	0,5	0,4	0,1	
Cálcio (mg/L)	9,4	9,8	0,5	0,3	
Magnésio (mg/L)	1,5	2,2	0,07	0,04	
COT (mg/L)	12,2	13,5	3,9	3,9	
Sílica (mg/L)	6,4	6,4	4,5	0,0	50 (5)
Condutividade µS/cm a 25^0C	754,0	740,0	551,0	498,0	

(1) Classe 1 NBR-13.969 (lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais paisagísticos, exceto chafarizes).
(2) Classe 2 NBR-13.969 (lavagem de carros e outros usos com contato direto com o usuário com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes)
(3) Classe 3 NBR-13.969 (descarga em vasos sanitários)
(4) Classe 4 NBR-13.969 (Irrigação de pomares, cereais, forragens, pastagem para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual).
(5) Padrões sugeridos para reúso em sistemas de resfriamento e usos não potáveis irrestritos por Semura *et al* (2005)

De acordo com a Tabela 2.1, baseada na norma técnica NBR-13.969 que definiu quatro classes de água de reúso e seus respectivos padrões de qualidade para reúso urbano, o permeado de microfiltração se enquadra nas exigências da classe 2 (cujas aplicações são lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais paisagísticos, exceto chafarizes) e da classe 3 (cuja aplicação é descarga em vasos sanitários). O permeado da ultrafiltração apresenta características muito semelhantes ao de microfiltração, se enquadrando nas mesmas classes. Para se enquadrarem na classe 2, os permeados deverão passar por um processo de cloração, para garantir a não contaminação por microorganismos patogênicos, assim como é feito em estações de tratamento de água. Com a cloração, deseja-se que a concentração de cloro residual atinja a faixa de 0,5 mg/L a 1,5 mg/L.

Embora os permeados dos processos de MF e UF não tenham apresentado uma ótima qualidade, eles se mostraram bastante eficientes como pré-tratamento para a OI.

De acordo com a mesma Tabela, o permeado de nanofiltração e OI além de se enquadrarem nas classes 2 e 3, também se enquadram na classe 1, cujas aplicações são lavagem de carros e outros usos com contato direto com o usuário. Esses permeados também necessitam passar pelo processo de cloração para atenderem às exigências das classes 2 e 3.

Dos parâmetros analisados, o parâmetro responsável pelo permeado da Osmose Inversa não se enquadrar nos padrões de reúso da Tabela 2.4 é o nitrogênio amoniacal. O efluente secundário (alimentação) possuía uma concentração muito elevada deste poluente (61,4 mg/L). Em um trabalho empregando um biorreator a membrana (MBR), o qual possuía uma membrana de MF tubular (X-Flow) e de poros de 0,03μm, Rocha *et al* (2008), utilizaram o efluente bruto do mesmo centro comercial do presente estudo como alimentação do MBR. Neste estudo, a concentração média inicial do nitrogênio amoniacal do esgoto bruto era de 34 mg/L e a concentração do permeado foi de 5mg/L. Isso sugere que, se a saída do tratamento secundário tivesse uma

menor concentração de nitrogênio amoniacal, provavelmente, os permeados também a teriam. Sendo assim o permeado da OI, poderia ser utilizado em usos não potáveis irrestritos e para fornecimento para sistemas semi-abertos de resfriamento de acordo com os padrões sugeridos para reúso por Semura *et al* (2005) e utilizados pela SABESP.

Para todos os ensaios, as análises bacteriológicas promoveram uma redução aproximada de 100% confirmando que os processos são eficazes na desinfecção.

Vale ressaltar que além dos permeados terem alcançado os padrões para algumas finalidades de reúso, em todos os ensaios foram obtidos apenas 0,2 litros de concentrado, demonstrando uma baixa taxa de redução de volume e uma ótima recuperação de permeado (96%), o que somado aos demais resultados demonstram serem os PSM uma ótima alternativa para se obter água de reúso.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O presente estudo avaliou a utilização de Processos de Separação por Membrana como alternativa para o tratamento terciário efluente de centro comercial para gerar água de reúso. A partir dos resultados obtidos, podem-se enumerar as seguintes conclusões:

- Embora a membrana de MF utilizada tenha mostrado uma permeabilidade e fluxos iniciais bem menores do que o esperado, apresentou no final dos ensaios de permeação valores de fluxo de permeado condizente com a literatura;
- Os permeados dos ensaios de MF e UF se enquadram nas exigências da classe 2 (cujas aplicações são lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais paisagísticos, exceto chafarizes) e da classe 3 (cuja aplicação é descarga em vasos sanitários) baseados na norma técnica NBR-13.969. Para se enquadrarem na classe 2, os permeados deverão passar por um processo de desinfecção;
- As características do permeado do ensaio de UF se mostraram bem semelhantes às do permeado da MF. Levando este fato em consideração e somando-o ao fato de que os fluxos dos ensaios de MF foram maiores que o da UF, optou-se pela MF como pré-tratamento para a OI.
- Nos ensaios de NF e OI todos os parâmetros analisados apresentaram reduções expressivas. Vale ressaltar que as eficiências de remoção de contaminantes pelo processo de osmose inversa foram maiores que a da nanofiltração, o que possivelmente os enquadraria na classe 3, após desinfecção.
- Dos parâmetros analisados, o responsável do permeado da Osmose Inversa não se enquadrar nos critérios de usos não potáveis irrestritos e para fornecimento para sistemas semi-abertos de sistemas de resfriamento é o nitrogênio amoniacal. Possivelmente, se o tratamento secundário (ETE do centro comercial) fosse mais eficiente para remover

nitrogênio amoniacal, o permeado poderia se enquadrar dentro dos padrões estabelecidos para reuso.

- Para todos os ensaios, os procedimentos de limpeza atingiram 66% 81% de recuperação do fluxo. Esse valor não foi maior provavelmente devido ao o tempo gasto no procedimento de limpeza e à concentração e tipo de agente de limpeza (NaOCl) utilizado.
- Para todos os ensaios, as análises bacteriológicas promoveram uma redução aproximada de 100%, confirmando que os processos são eficazes na remoção de microrganismos.
- Foi observado em todos os ensaios, uma recuperação de 96% de permeado e um fator de concentração de 25 para a alimentação.

Com vistas à continuidade deste trabalho, são feitas as seguintes sugestões:

- Investigar diferentes técnicas de limpeza das membranas visando um aumento na eficiência do processo.
- Utilizar maiores volumes de efluente para que parâmetros operacionais possam ser melhor avaliados.
- Avaliar destinação do concentrado gerado

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13969 “Tanques sépticos Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação”. 1997. 60 p.
2. AISSE, M.M. 2000. Sistemas Econômicos de Tratamentos de Esgotos Sanitários. ABES, Rio de Janeiro.
3. APHA - AMERICAN PUBLIC HEATH ASSOCIATION. Standart methods for the examination of water and wastewater. 21st ed. Washington: American Public Health Association, 2005.
4. AL-AMOUDI, A.; WILLIAMS, P.; MANDALE, S. & LOVITT, R.W. 2007. Cleaning results of new and fouled nanofiltration membrane characterized by zeta potential and permeability. Separation and Purification Technology, 54: 234–240.
5. BAKER, R.W. 2004. Membrane Technology and Applications, 2 ed, New York, John Willey & Sons Inc.
6. BEAL, L.L. E MONTEGGIA, L.O. 2003. Tratamento anaeróbio de efluente de curtume de acabamento auxiliado com membranas. 21° Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental, 8, Nº 1 e Nº 2, 95-100.
7. BES-PIÁ, A.; A. IBORRA-CLAR, C. GARCÍA-FIGUERUELO, S. BARREDO-DAMAS, M.I. ALCAINA-MIRANDA, J.A. MENDOZA-ROCA, M.I. IBORRA-CLA. 2009. Comparison of three NF membranes for the reuse of secondary textile effluents. Desalination, 241: 1-7.
8. BRASIL (LEGISLAÇÃO): Lei nº 9.433 de 08 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. Diário oficial da União, Brasília, 18 de março de 2005.

9. BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. Proposta de resolução que estabelece procedimentos para disciplinar a prática de reúso direto não potável de água na modalidade agrícola e florestal
10. BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. 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.
11. BREGA FILHO, D. E MANCUSO, P. 2003. Conceito de reúso de água. *In*: Mancuso, P.; Santos, H. dos (org). Reúso de água. Barueri, SP: Manole (USP).
12. BRIÃO, V.B. E TAVARES, C.R.G. 2007. Ultrafiltração como processo de tratamento para o reúso de efluentes de laticínios. Eng. sanit. ambient., 12 (2): 134-138.
13. CHOI, H., ZHANG, K, DIONYSIOU, D. D.; OERTHER, B. D.; SORIAL, G.A.. 2005. Effect of permeate flux and tangential flow on membrane fouling for wastewater treatment. Separation and Purification Technology, 45: 68–78.
14. CROOK, J. 1998. Water reclamation and reuse criteria. *In*: Asano, T. Water quality management library – Volume 10 / Wastewater reclamation and reuse. Pennsylvania, USA: Technomic Publication.
15. DURHAM, B.; BOURBIGOT, M. M. & PANKRATZ. T. 2001. Membranes as pretreatment to desalination in wastewater reuse: operating experience in the municipal and industrial sectors. Desalination, 138: 83-90.
16. FERSI, C.; GZARA, L. E DHAHBI, M. 2005. Treatment of textile effluents by membrane Technologies. Desalination, 185: 399–409.
17. FIELD R.; HUGHES, D.; CUI, Z & TIRLAPUR, U. 2008. Some observations on the chemical cleaning of fouled membranes. Desalination, 227: 132–138.
18. FIESP/CIESP. Conservação e Reúso de Água – *Manual de orientações para o setor industrial*. São Paulo: FIESP/CIESP, 2004. v.1.

19. FLORÊNCIO, L.; BASTOS, R.K.X. E AISSE, M.M. 2006. Projeto PROSAB: Tratamento e utilização de esgotos sanitários. Rio de Janeiro: ABES 2006, 427.
20. GAGLIARDO, P.; AHAM, S.; MERLO, R. E TRUSSEL, R. 2001. Evaluation of three PreTreatement: Comparison of UF vs. Conventional Treatment., AWWA membrane technology ConF. Proc.,San Antonio, 20.
21. GOZÁLVEZ-ZAFRILLA, J.M.; SANZ-ESCRIBANO, D.; LORA-GARCÍA, J.; LEÓN, M.C.H. 2008. Nanofiltration of secondary effluent for wastewater reuse in the textile industry. Desalination, 222: 272–279.
22. GRAAF, J.H.J.M.; KONING, J.; RAVAZZINI, A.M. E MISKA, V. 2005. Treatment matrix for reuse of upgraded wastewater. Water Sci. Technol.: WaterSupply, 5: 87-94.
23. HABERT, A.C.; BORGES, C.P. E NÓBREGA, R. 2006. Processos de separação com membranas, Escola piloto em engenharia química, COPPE, UFRJ, Rio de janeiro - RJ.
24. HESPANHOL, I. 1999. Água e Saneamento Básico. *In*: Rebouças, A.C.; Braga, B.; Tundisi, J.G. Águas Doces do Brasil – Capital Ecológico, Uso e Conservação, 1 ed, São Paulo, Escritura Editora.
25. HESPANHOL, I. 2002. Potencial de Reúso de água no Basil - Agricultura, Municípios,Indústrias, Recarga de aqüíferos. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 7(4): 75-95.
26. HESPANHOL, I. 2003a. Saúde pública e reúso agrícola de esgotos e biossólidos. *In*: Mancuso, P.C.S.; Santos, H.F. Reúso de Água, 1.ed. Barueri, Manole.
27. HESPANHOL, I. 2003b. Potencial de reúso de água no Brasil. *In*: MANCUSO, Pedro Caetano Sanches; SANTOS, Hilton Felício dos. Reúso de Água. 1.ed. Barueri: Manole.
28. HOWE, K.J.; ASHISH MARWAH, KUANG-PING CHIU, SAMER S. ADHAM. Effect of membrane configuration on bench-scale MF and UF fouling experiments. WAT E R RE S E A R C H 41 (2007) 3842 – 3849
29. JIAN-JUN QIN, MAUNG HTUN OO, KIRAN A. KEKRE 2007. Nanofiltration for recovering wastewater from a specific dyeing facility. Separation and Purification Technology, 56: 199–203.

30. JONSSON, C., JONSSON, A. S., 1995, “Influence of the membrane material on the adsorptive fouling of ultrafiltration membranes”, *Journal of Membrane Science*, v. 108, pp. 79-87.
31. JUDD, S. E JEFFERSON, B. 2003. Membrane for Industrial Wastewater Recovery and re-Use, Ed. Elsevier.
32. JULIANO, L.N. 2004. Preparação e caracterização de membranas para clarificação de suco de frutas. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina.
33. KUZMENKO, D.; ARKHANGELSKY E.; BELFER S.; FREGER V. & GITIS, V.2005. Chemical cleaning of UF membranes fouled by BSA. Desalination, 179: 323–333.
34. LAVRADOR, J. 1987. Contribuição para o Entendimento do Reúso Planejado de Água e Algumas Considerações sobre suas Possibilidades no Brasil. São Paulo, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
35. LEE J. W.; KWON, T. O. E MOON, I.S. 2006. Performance of polyamide reverse osmosis membranes for steel wastewater reuse. Desalination 189: 309–322.
36. LOBOS, J.; WISNIEWSKI, C.; HERAN, M. E GRASMICK, A. 2007. Membrane bioreactor performances: effluent quality of continuous and sequencing systems for water reuse. Desalination, 204: 39–45.
37. MADAENI, S.S. & MANSOURPANAH Y. 2004. Chemical cleaning of reverse osmosis membranes fouled by whey. Desalination, 161:13-24.
38. METCALF E EDDY. 2003. Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse, 4.ed., McGraw-Hill, 1819.
39. MIERZWA, J. 2002. O uso racional e o reuso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria: Estudo de caso da Kodak Brasileira.367p. Tese (doutorado em engenharia) - Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária, Escola Politécnica. Universidade de São Paulo.
40. MIERZWA, J.C. E HESPANHOL, I. 2005. Água na Indústria uso racional e reúso, Ed. Oficina de Textos.

41. MONTE, M.H.F E SOUSA, M.S. 1992. Effect on crop of irrigation with facultative pond effluent. Water Science and Technology, Oxford, 26 (7/8): 1603-1613.
42. MOTA, S; BEZERRA, F.C. E TOMÉ, L.M. 1997. Avaliação do desempenho de culturas irrigadas com esgotos tratados. *In*: 19ª. Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 14- 19 set. Foz do Iguaçu, Rio de Janeiro, ABES, CD-Rom, 20-25.
43. MULDER, M. 1991. Basic principles of membrane technology, Kluwer Academic Publisher, The Netherlands.
44. NGUYEN, T.; FAN, L.; F.A. RODDICK, J.L. HARRIS A. 2009. Comparative study of microfiltration and ultrafiltration of activated sludge-lagoon effluent Desalination, 236: 208–215.
45. NOBREGA, R. *et al*., Apostila do Curso de Processos de Separação com Membranas. Rio de Janeiro: COPPE – Escola Piloto em Engenharia Química, UFRJ, 1997.
46. PELEGRIN, D.C. 2004. Microfiltração Tangencial de Efluente Sanitário após Tratamento Biológico. Tese (mestrado) - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 115p.
47. PROVENZI, G. 2005. Biorreator à membrana submersa para tratamento biológico de efluentes: estudos hidrodinâmicos e físico-q cos no controle da colmatação. 154f. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC.
48. QDAIS, H.A. E MOUSSA, H. 2004. Removal of heavy metals from wastewater by membrane processes: a comparative study. Desalination, 164:105-110.
49. REITH, C. E BIRKENHEAD, B. 1998. Membranes enabling the affordable and cost effective reuse of wastewater as an alternative water source. Desalination, 117: 203-210.

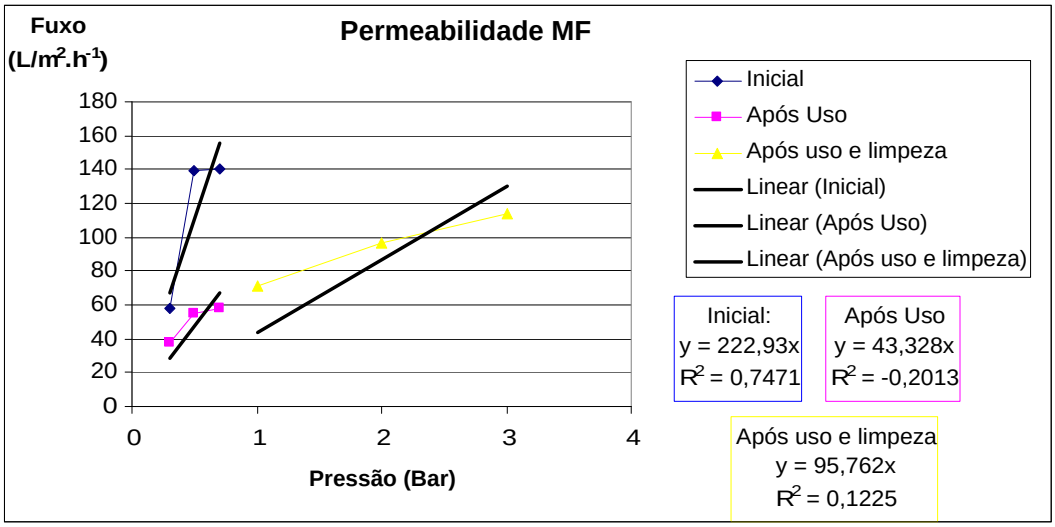
50. ROCHA, C.M.;YOKOYAMA, L.; MONTALVÃO, A. F. F.; TEIXEIRA, L. A. C.; ARAÚJO, F. V. F. E CAMPOS, J. C. 2008. Utilização de biorreator com membrana em tratamento de efluente gerado em centro comercial do Rio de Janeiro. Anais do IV Workshop sobre Gestão e Reúso de Água na Indústria 20 a 22 de novembro de 2008 Florianópolis, Santa Catarina, Brasil.

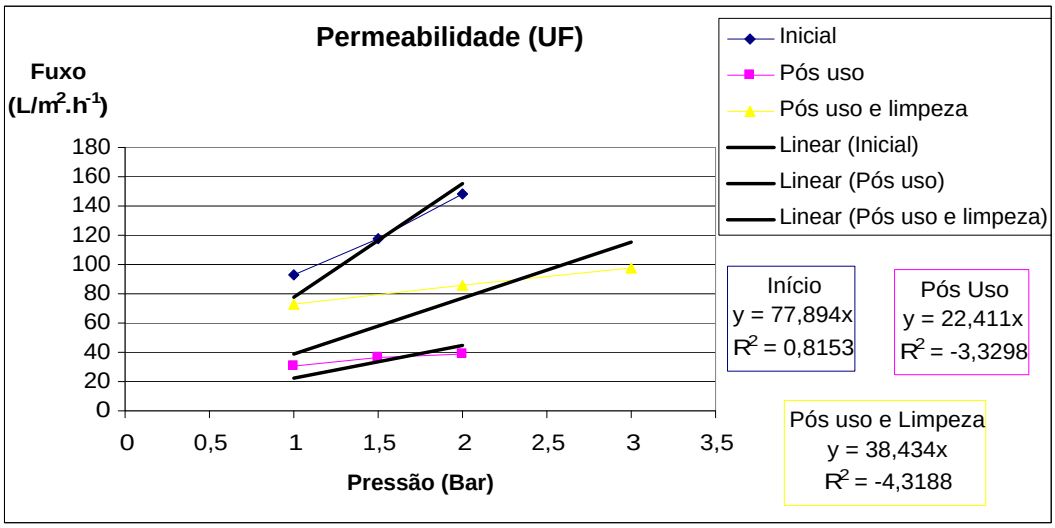
51. SABESP – www.sabesp.com.br – 15.03.2009- http://www.sabesp.com.br/CalandraWeb/CalandraRedirect/?temp=4&proj=sabesp&pub=T&db=&docid=61BDC5AC4F810910832571B1006C2D35
52. SALGOT, M. 2008. Water reclamation, recycling and reuse: implementation issues. Desalination, 218: 190–197.
53. SCHNEIDER, R.P.; TSUTTIYA, M.T. 2001. Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reuso, 1ed, São Paulo: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 234p.
54. SEMURA, K.A.; GONÇALVES, M.C. E RICCITELLI, M. 2005. Estudo para implantação de reuso e proposição de parâmetros de qualidade para usos urbanos não potáveis a partir das ETES da RMSP. Anais do 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Campo Grande-MS, Brasil.
55. SEMURA, K.A.; GONÇALVES, M.C.; SEMURA, S.S. E ALVES, W.J.S. 2008. Reúso – Uma solução inteligente, sustentável e efetivamente viável. Anais do IV Workshop sobre Gestão e Reúso de Água na Indústria. Florianópolis - SC, Brasil.
56. SETTI, M.C.B.C. 1995. Reúso de Água: Condições de Contorno. São Paulo, Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
57. SOUSA, J.T. E LEITE, V.D. 2003. Tratamento e Utilização de Esgotos Domésticos na Agricultura. Campina Grande: Ed. EDUEP, 135p.
58. STRATHMANN, A. 2001. Membrane Separation Processes: Current Relevance and Future Opportunities, AIChE Journal, 47 (5):1077-1087.

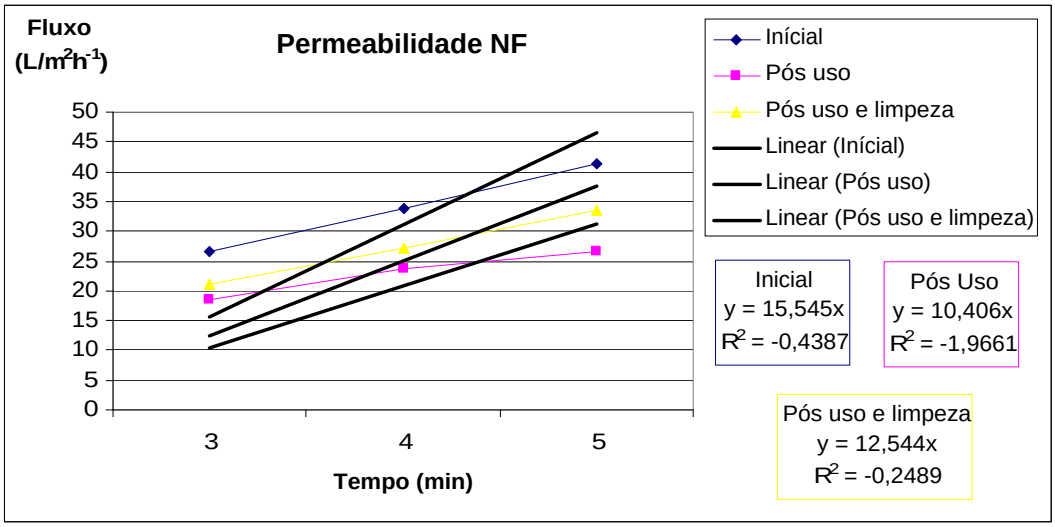
59. T. NGUYEN, L. FAN, F.A. RODDICK, J.L. HARRIS. 2009. A comparative study of microfiltration and ultrafiltration of activated sludge-lagoon effluent. Desalination, 236: 208–215.
60. VASQUEZ-MONTIEL, O.; HORAN, N.J. E MARA, D.D. 1996. Management of wastewater for reuse in irrigation. Water Science and Technology, Oxford, 33 (10-11): 355- 362.
61. VIANA, P.Z. 2004. Biorreator com Membrana Aplicado ao Tratamento de Esgotos Domésticos: Avaliação do Desempenho de Módulos de Membranas com Circulação Externa. 2004. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro - COPPE/ UFRJ, Rio de Janeiro.
62. VIDAL, C.M.S. 2006. 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. São Carlos, 193 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
63. VON SPERLING, M. 2005. Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos (Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias); vol. 1. Belo Horizonte: DESA-UFMG, 452p.
64. WETHERN, M. E KATZARAS, W. 1995. Reverse osmosis treatment of municipal sewage effluent for industrial reuse. Desalination, 102: 293-299.
65. WHO-WORLD HEALTH ORGANIZATION. 1973. Reuse of effluents: methods of wastewater treatment and health safeguards. Technical report series, Genebra, 517.
66. ZHU, H. & NYSTRON, M. 1998. Cleaning results characterized by flux, streaming potential and FTIR measurements. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects,138: 309–321.

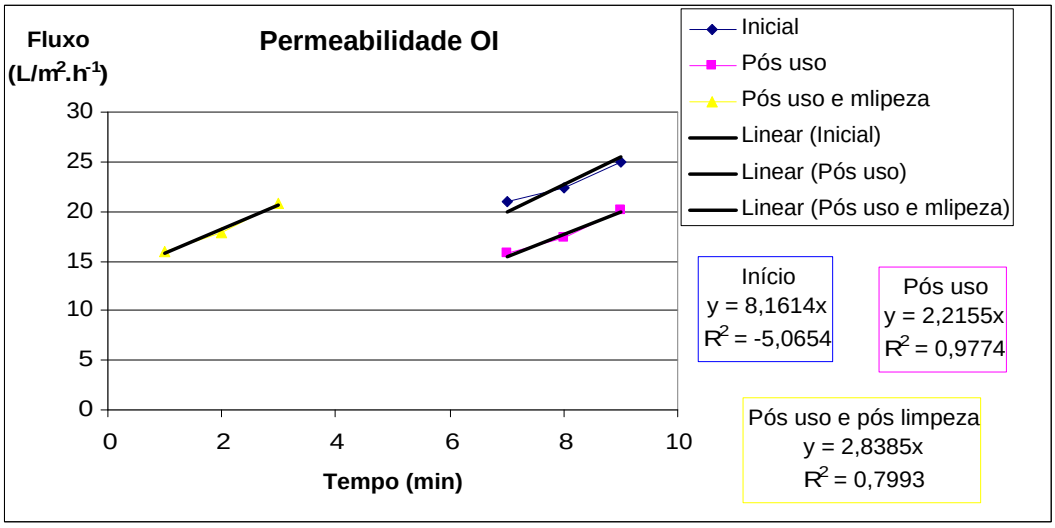
7. ANEXO I

A seguir serão apresentados os gráficos que foram utilizados nos cálculos da permeabilidade hidráulica de cada membrana.






Fluxo
(L/m2h-1)
Permeabilidade NF
50
45
40
35
30
25
20
15
10
5
0
3
4
5
Tempo (min)
Inícial
Pós uso
Pós uso e limpeza
Linear (Inícial)
Linear (Pós uso)
Linear (Pós uso e limpeza)
Inicial
y = 15,545x
R2 = -0,4387
Pós Uso
y = 10,406x
R2 = -1,9661
Pós uso e limpeza
y = 12,544x
R2 = -0,2489


Fluxo
(L/m2.h-1)
Permeabilidade OI
30
25
20
15
10
5
0
0
2
4
6
8
10
Tempo (min)
Inicial
Pós uso
Pós uso e mlipeza
Linear (Inicial)
Linear (Pós uso)
Linear (Pós uso e mlipeza)
Início
y = 8,1614x
R2 = -5,0654
Pós uso
y = 2,2155x
R2 = 0,9774
Pós uso e pós limpeza
y = 2,8385x
R2 = 0,7993

This document was created with Win2PDF available at http://www.win2pdf.com.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.