



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
ENG07053 - TRABALHO DE DIPLOMAÇÃO EM ENGENHARIA  
QUÍMICA



# Remoção de microrganismos patogênicos em sistema de separação com membrana de ultrafiltração

*Autor: Viviane Silva dos Santos*

Orientador: *Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Isabel Cristina Tessaro*

Co-orientador: Eng. Jacques Bidone

Porto Alegre, dezembro de 14

## Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Abreviaturas e Siglas	viii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 Tratamento convencional de água para abastecimento	2
2.1.1 Etapa de coagulação e floculação	3
2.1.2 Filtragem rápida e cloração	3
2.2 Uso de tecnologia de membranas no tratamento de água	4
2.2.1 Microfiltração e Ultrafiltração	4
2.2.2 Tratamento convencional seguido de Ultrafiltração	6
2.2.3 A influência do coagulante	7
3 Descrição do Tratamento de Água do DMAE	9
4 Materiais e Métodos	11
4.1 Membrana de Ultrafiltração	11
4.2 Água de alimentação	11
4.3 Análise de Protozoários	12
4.4 Sistemas Experimentais	12
4.4.1 Sistema piloto	12
4.4.1.1 Módulo	13
4.4.1.2 Modos de operação	14
4.4.2 Sistema de bancada	14
4.5 Metodologia Experimental	16
4.5.1 Sistema Piloto de Ultrafiltração com membranas submersas	16
4.5.1.1 Limpeza com Hipoclorito de sódio	16
4.5.1.2 Limpeza com Ácido Oxálico	16
4.5.1.3 Teste com inoculação de cistos de Giardia	16
4.5.1.4 Teste de vazamentos nas membranas e conexões	16
4.5.2 Sistema de bancada de Ultrafiltração	17
4.5.2.1 Compactação das membranas	17
4.5.2.2 Permeância Hidráulica	17
4.5.2.3 Testes com inoculação de cistos de Giardia	17
4.5.2.4 Percentual de Fouling	18
4.6 Metodologia Analítica	18
5 Resultados e Discussão	19
5.1 Sistema Piloto de Ultrafiltração	19
5.1.1 Limpezas Químicas	19
5.1.2 Teste com inoculação de protozoários	20

---

5.1.3	Teste de Vazamento	20
5.2	Sistema de Bancada de Ultrafiltração	21
5.2.1	Compactação da membrana	21
5.2.2	Permeância e percentual de Fouling	22
5.2.3	Testes com Protozoários	22
6	Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros	24
7	Referências	25

## **Agradecimentos**

Primeiramente gostaria de agradecer a minha família pelo apoio, paciência e carinho. Em especial a minha mãe, Vera, pela dedicação e amor. Aos meus irmãos Tiago e Gabriele, sem as nossas brigas a vida seria menos divertida.

Agradeço também aos amigos, em especial aos que ganhei durante a graduação. O caminho até aqui não ficou mais fácil, mas certamente mais feliz na companhia de pessoas tão incríveis e insanas.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química em especial a minha orientadora, professora Isabel, pela dedicação e otimismo no desenvolvimento deste trabalho e também ao meu co-orientador, Jacques, pela disposição e prontidão em dividir seus conhecimentos técnicos e da vida de engenheiro.

## Resumo

Atualmente a água para abastecimento municipal é tratada com o processo convencional composto basicamente por coagulação/floculação, sedimentação, filtração e cloração, mas com a qualidade muito baixa das águas captadas, esse processo tem se mostrado ineficiente na remoção de microrganismos patogênicos. O objetivo inicial do estudo era a avaliação do uso de um sistema piloto de UF como etapa final ao tratamento convencional. O sistema piloto de UF está instalado nas dependências do DMAE, Estação Moinhos de Vento em Porto Alegre, RS. Inicialmente foram realizados testes de permeância e limpezas químicas para verificar se o desempenho da unidade piloto estava de acordo com as especificações do fabricante. Devido ao grande número de vazamentos nas membranas da unidade e a falta de tempo hábil para saná-los os testes foram feitos em um sistema bancada de UF. A água alimentada no sistema de UF é tratada pelo DMAE e é captada logo após os filtros de areia, antes da etapa de cloração. Foram realizados testes com a inoculação de cistos de *Giardia*, como a água é coletada antes da desinfecção as bactérias já estavam em solução. A UF se mostrou eficiente na melhoria da qualidade da água tratada pelo DMAE com reduções de turbidez maior que 60%, remoção total de cistos de *Giardia*, redução de *Coliformes Totais* maior que 60% e redução de *Escherichia Coli* maior que 68%. Os resultados mostram que com a utilização do tratamento convencional seguido da UF se obtém uma água com qualidade mais elevada, mas devido à presença de bactérias no permeado a etapa de cloração após a UF não pode ser suprimida.

## Lista de Figuras

<b>Figura 2.1:</b> Perda de fluxo com o tempo devido a incrustações na membrana. (A) coagulação/floculação + UF; (B) coagulação/floculação + sedimentação + UF; (C) coagulação/floculação + sedimentação + filtração + UF, adaptado de Heng, <i>et al</i> , 2008....	7
<b>Figura 3.1:</b> Fluxograma simplificado do tratamento de água – DMAE .....	10
<b>Figura 4.1:</b> Detalhe das fibras ocas de pliétersulfona no módulo utilizado no sistema de bancada.....	11
<b>Figura 4.2:</b> Vista frontal do sistema piloto de UF instalado nas dependências do DMAE..	13
<b>Figura 4.3:</b> Imagem do tanque que contém os módulos de membranas de fibras.....	13
ocas de UF.....	13
<b>Figura 4.4:</b> Fluxograma simplificado do sistema bancada de UF. Operação em reciclo total. ....	14
<b>Figura 4.5:</b> Fotografia do sistema de bancada de UF.....	15
<b>Figura 5.1:</b> Fotografia do módulo de membranas antes da limpeza com ácido oxálico (1 ppm), condições de operação: pressão -0,1 bar, temperatura 25°C .....	19
e vazão de $1,7 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .....	19
<b>Figura 5.2:</b> Fotografia do módulo de membranas após a limpeza com ácido oxálico.....	19
<b>Figura 5.3:</b> Variação da taxa volumétrica com o tempo. Condições de operação: pressão -0,1 bar e de temperatura 25°C. ....	20
<b>Figura 5.4:</b> Fotografia das bolhas de ar devido a vazamentos nas membranas. ....	21
<b>Figura 5.5:</b> Compactação da membrana na temperatura de 30°C e pressão transmembrana de 3,5 bar. ....	21
<b>Figura 5.6:</b> Fluxo de permeado versus pressão transmembrana para a água filtrada do DMAE e para água destilada antes e após o processo com a água filtrada. Temperatura de 30°C e pressão transmembrana variando de 3,0 a 0,5 bar. ....	22

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 2.1:</b> Parâmetros de potabilidade da água para abastecimento humano – Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde .....	2
<b>Tabela 2.2:</b> Matriz de decisão para escolha de tecnologia para tratamento de água emergencial, adaptado de Loo, <i>et al.</i> , 2012. ....	5
<b>Tabela 4.1:</b> Características das membranas de Ultrafiltração (*Fibras da SP).....	11
<b>Tabela 5.1:</b> Redução percentual de alguns parâmetros de interesse no estudo: turbidez, carbono orgânico total, coliformes totais e <i>Escherichia Coli</i> .....	23
<b>Tabela 5.2:</b> Valores de pH, condutividade elétrica e TOC dos permeados e concentrados. ....	23

## Lista de Abreviaturas e Siglas

C1	Concentrado coletado no teste com água filtrada do filtro 1
C2	Concentrado coletado no teste com água dos 4 filtros
CPCV	Cloreto de Polivinila Clorado
DMA E	Departamento Municipal de Água e Esgoto
EBAB	Estação de Bombeamento de Água Bruta
ETA	Estação de Tratamento de Água
ICBS	Instituto de Ciências Básicas da Saúde
MF	Microfiltração
MMC	Massa Molar de Corte
P1	Permeado coletado no teste com água filtrada do filtro 1
P2	Permeado coletado no teste com água dos 4 filtros
PH	Permeância Hidráulica
PVC	Cloreto de Polivinila
SP	Sistema Piloto
TOC	Carbono Orgânico Total
UF	Ultrafiltração



## 1 Introdução

A água para consumo humano deve obedecer alguns critérios de qualidade; até a década de 60, o processo mais empregado para o tratamento de água no Brasil era a filtração lenta, mas com a acentuada diminuição na qualidade dos mananciais se fez necessária uma substituição tecnológica e, com isso, o tratamento convencional ganhou mais espaço e é praticado nos mesmos moldes até os dias de hoje.

O aumento da urbanização vem acompanhado de um grande aumento nas taxas de esgoto urbano não tratado; sendo que até 2011, somente 27% do esgoto da cidade de Porto Alegre era tratado. Esse efluente, com altas cargas orgânicas, e todo tipo de contaminação é entregue aos mananciais causando deterioração da qualidade da água desses corpos receptores.

A água distribuída para consumo humano na cidade de Porto Alegre é captada do Lago Guaíba e tratada nas estações de tratamento do Departamento Municipal de Água e Esgoto – DMAE. O Lago Guaíba, além de receber o esgoto da cidade de Porto Alegre, recebe também de outras cidades e o efluente de algumas indústrias. As estações de tratamento de água do DMAE utilizam uma tecnologia de tratamento com mais de 50 anos, a qual consiste basicamente das seguintes etapas: coagulação/floculação, sedimentação, filtração e cloração.

O objetivo das estações de tratamento é fornecer água de qualidade para a população; porém, estudos têm mostrado que o tratamento convencional de água não apresenta a mesma eficiência de quando os mananciais apresentavam melhor qualidade. Surtos de doenças transmitidas por via hídrica têm sido relatados mesmo quando a água em questão é tratada e desinfetada. Essas doenças estão ligadas à presença de bactérias, protozoários e vírus na água, mesmo quando esta atende aos critérios de qualidade para o consumo humano.

Como o tratamento utilizado na ETAs não consegue fornecer água tratada livre de protozoários e bactérias patogênicas é necessário o estudo de aplicação de novas tecnologias. A ultrafiltração tem se mostrado eficiente na remoção de microrganismos patogênicos, pois é capaz de reter partículas da ordem de  $10^{-2}$   $\mu\text{m}$ .

Este estudo objetiva analisar o uso da técnica de ultrafiltração como etapa final ao tratamento convencional de água para abastecimento humano. Os objetivos específicos deste trabalho são:

- adequação e operação das unidades de UF – bancada e piloto;
- caracterização da permeância hidráulica das membranas;
- determinação do percentual de *fouling* das membranas;
- determinação da eficiência de retenção de microrganismos pelas membranas de UF.

## 2 Revisão Bibliográfica

Com as regulamentações dos padrões de qualidade da água tratada para consumo humano cada vez mais rigorosas, principalmente com relação a agentes patogênicos como *Giardia* e *Cryptosporidium*, o uso de ultrafiltração (UF) é uma alternativa ao processo de clarificação e filtração. As membranas utilizadas nestes processos não removem cor, matéria orgânica natural ou químicos orgânicos sintéticos. Para superar algumas dessas limitações a UF deve ser combinada com outras tecnologias convencionais como adsorção em carvão ativado e coagulação. As configurações de membranas submersas oferecem oportunidade de desenvolvimento de novos processos de tratamento combinado. Diferente do tratamento convencional as membranas apresentam respostas mais estáveis, mesmo com a variação da qualidade da água alimentada (Lebeau, *et al.*, 1998).

### 2.1 Tratamento convencional de água para abastecimento

O tratamento convencional de água para abastecimento é composto pela coagulação/floculação, sedimentação, filtração rápida e cloração. A remoção de microrganismos se dá ao longo de todo o processo, sendo a etapa de coagulação/floculação a que apresenta as maiores taxas de remoção de bactérias, cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium*. Para que a água tratada apresente uma concentração de microrganismos suficientemente baixa, todas as etapas do processo devem ser muito bem desenvolvidas, controladas e operadas, principalmente a etapa de coagulação/floculação e a etapa de filtração (Betancourt & Rose, 2004). O processo convencional de tratamento de água não tem sido completamente eficaz na remoção ou inativação de cistos e oocistos de protozoários, principalmente dos oocistos de *Cryptosporidium*, pois são de difícil remoção por coagulação/floculação e capazes de permear pelos filtros de areia (Hsu & Yeh, 2002).

Após o tratamento, a água para consumo humano deve apresentar os parâmetros de potabilidade determinados pela portaria nº 2914 do Ministério da Saúde, conforme apresentado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1:** Parâmetros de potabilidade da água para abastecimento humano – Portaria nº 2914 do Ministério da Saúde

Parâmetro	Limites	Unidades
Coliformes Totais	Ausência em 100 mL	-
Cloro Residual Livre	Mínimo 0,2	mg Cl <sub>2</sub> /L
Cloro Residual Combinado	Mínimo 2,0	mg Cl <sub>2</sub> /L
Turbidez	Máximo 5,0	NTU
pH	6,0 a 9,5	-
Cor Aparente	Máximo 15	mg Pt-Co/L
Fluoreto	Máximo 1,5	mg F/L

### 2.1.1 Etapa de coagulação e floculação

O tratamento convencional tem uma grande dependência das características da água bruta e se mostra sensível as alterações de parâmetros da mesma. Quando analisadas amostras de água bruta e água tratada de três estações de tratamento que fazem uso do processo convencional (Galícia, Espanha), se evidenciou uma variação das concentrações de cistos de *Giardia* e oocistos de *Cryptosporidium* ao longo do ano, apresentando maiores concentrações tanto no afluente quanto no efluente entre a primavera e o verão (Castro-Hermida, *et al.*, 2008). O processo de tratamento se mostra dependente dos parâmetros da água bruta como pH, alcalinidade, condutividade elétrica, turbidez, cor e temperatura, sendo que ao longo do ano ocorrem variações no processo de tratamento, o que dificulta a operação e a manutenção dos parâmetros dentro dos padrões.

Ao contrário do que se pode inferir num primeiro momento, o tratamento de água bruta que apresenta cor e turbidez em níveis baixos é mais dificultado do que o tratamento de água que apresenta níveis elevados destes parâmetros. Encontrar a dosagem adequada de coagulante e floculante para baixos níveis de cor e turbidez se torna mais difícil pela maior dispersão das partículas em suspensão, o que dificulta a coagulação e floculação afetando também a eficiência dos filtros, pois as partículas acabam não formando flocos, podendo permear mais facilmente o meio filtrante. Em estudo feito com variação da concentração de cistos e oocistos de protozoários em água bruta se evidenciou que quanto maiores eram as concentrações destes no afluente, maiores eram as taxas de remoção, menores eram as concentrações de cistos e oocistos de protozoários na água tratada, pois principalmente a coagulação/floculação é afetada pela quantidade de partículas em suspensão (Assavasilavasukul, *et al.*, 2008).

Sendo a etapa de coagulação e floculação a mais importante do processo, se torna necessário avaliar o desempenho do coagulante empregado. Em análise de três coagulantes sendo eles sulfato de alumínio, cloreto férrico e sulfato férrico e empregando a mesma variação, de 40 a 100 ppm, nas dosagens, em estudo utilizando inóculos de dois fornecedores diferentes. Para a remoção de cistos e oocistos quando as dosagens variaram entre 55 e 70 ppm de sulfato de alumínio se obtiveram os melhores resultados, em um dos fornecedores a remoção foi entre 98 e 99%, para o outro fornecedor a remoção foi entre 93 e 96% de cistos e oocistos de protozoários (Bustamant, *et al.*, 2001).

### 2.1.2 Filtragem rápida e cloração

A filtragem é a última etapa de contenção dos microrganismos, sendo bem dependente da coagulação, pois quanto melhor for a qualidade dos flocos formados maior vai ser a retenção nos filtros. O tipo de filtração mais empregada no tratamento convencional é a filtragem rápida em leito de areia. Essa filtragem consegue barrar cistos de *Giardia*, porém os oocistos de *Cryptosporidium* podem passar pelos filtros. Em estudo feito em três estações de tratamento, na qual duas delas utilizavam a filtragem rápida descendente e uma a filtragem rápida ascendente foram analisadas as concentrações de microrganismos nos efluentes dos filtros das três ETAs (Viçosa, Minas Gerais). Em todas as amostras de água filtrada foram detectadas contaminação. Foi então analisado o emprego de filtragem lenta, pois esta apresenta eficiência mais elevada, mas ainda assim foram encontrados oocistos na água filtrada (Heller, *et al.*, 2004).

A cloração tem como objetivo a desinfecção da água e é a última etapa do tratamento. A inativação por cloração tem alta eficiência para a eliminação de bactérias,

mas cistos de *Giardia* e principalmente oocistos de *Cryptosporidium* apresentam elevada resistência. Os oocistos de *Cryptosporidium* são capazes de persistir e se espalharem em sistemas de abastecimento de água clorada, pois eles são resistentes à inativação mesmo depois de exposição prolongada (18 horas) a desinfetante com alta concentração de cloro ativo (Carey, *et al.*, 2003).

## 2.2 Uso de tecnologia de membranas no tratamento de água

Com o aumento da urbanização se tem uma maior descarga de esgoto e efluentes industriais nos mananciais afetando a capacidade das estações de tratamento de água. O tratamento convencional começou a ser usado quando a água captada apresentava uma qualidade bem superior à água captada nos dias de hoje, torna-se necessário o uso de uma tecnologia de tratamento que acompanhe essa perda de qualidade da água bruta; neste contexto, o uso dos processos de separação com membranas têm se mostrado eficientes (Alonso, *et al.*, 2001). As membranas de UF aparecem como uma alternativa na etapa de desinfecção da água e devido ao tamanho dos poros, consegue promover altas taxas de remoção de coliformes fecais (99,94%) e coliformes totais (99,96%) (Dialynas & Diamadopoulos, 2007). Em outros estudos a remoção de coliformes totais chegou a ser completa (Arnal, *et al.*, 2009; Lebeau, *et al.*, 1998).

### 2.2.1 Microfiltração e Ultrafiltração

As membranas de MF têm poros que variam de 0,1 a 10  $\mu\text{m}$ , com isso apresentam uma permeância mais elevada, assim é possível ter fluxos satisfatórios com baixas pressões. As membranas de UF apresentam poros entre 0,002 e 0,1  $\mu\text{m}$ , mas com isso se tem uma menor permeância, precisando de pressões mais elevadas para se atingir o fluxo desejado. As bactérias têm tamanhos menores que os cistos de protozoários, porém a coagulação consegue formar flocos maiores com as bactérias; já os cistos com tamanho entre 4 e 15  $\mu\text{m}$  dificilmente são agregados em flocos maiores, passando mais facilmente pela sedimentação e filtração convencional. As membranas de MF são adequadas para serem aplicadas à clarificação e remoção microbiana, pois apresentam uma faixa de tamanho de poros que contém a faixa de tamanho dos cistos, já as membranas de UF são adequadas para a remoção microbiana e também a remoção de cistos, pois a faixa de tamanho de poros é bem menor que os cistos (Jacangelo, *et al.*, 1997). A MF além de ter uma remoção microbiana menor, apresenta também uma remoção menor de nutrientes (F e N) o que possibilita a proliferação de microrganismos na água mesmo após o tratamento. Os nutrientes F e N associam-se a compostos orgânicos macromoleculares e formam agregados de tamanhos suficientes para serem retidos pelas membranas de UF (Marela, *et al.*, 2009).

A UF pode remover bactérias, vírus e protozoários da água. Membranas de diferentes materiais com massa molar de corte (MMC) dentro do intervalo de 10 a 100 kDa mostram bons resultados na remoção de bactérias de água com diferentes conteúdos microbiológicos sem diferença quanto ao material da membrana, pressão de trabalho ou as características da água de alimentação. O material da membrana tem maior influência na permeância e na resistência ao cloro (Arnal, *et al.*, 2004).

Em um levantamento feito para avaliar tecnologias para tratamento emergencial de água para abastecimento humano, foram levados em consideração vários aspectos como os custos, facilidade de implantação, facilidade de uso, o impacto ambiental, manutenção, desempenho, necessidade de energia e rendimento, conforme apresentado na Tabela 2.2.

**Tabela 2.2:** Matriz de decisão para escolha de tecnologia para tratamento de água emergencial, adaptado de Loo, *et al.*, 2012.

	Custos	Facilidade de implementação	Facilidade de utilização	Impacto ambiental	Manutenção	Performance	Potencial de aceitação	Energia Requerida	Requerimento de Supply Chain	Rendimento	Nominal	Ponderal
<i>Fator de ponderação</i>	1	3	3	1	2	2	3	3	1	3		
<i>Tecnologia</i>												
Filtro Bioareia	5	1	4	5	3	2	4	5	5	4	38	79
Ebulição	4	4	5	3	4	3	5	1	3	4	36	81
Purificador Chulli	5	1	5	3	4	3	4	4	4	4	37	80
Estação móvel de tratamento de água	3	3	1	2	1	4	3	1	2	5	25	56
Comprimidos NADCC	3	4	2	3	4	1	1	5	1	4	28	65
Desinfecção com UV (portátil)	2	5	5	5	4	1	2	3	2	4	33	76
PuR sachê	3	5	4	1	4	5	3	5	1	4	35	86
Desinfecção solar da água (SODIS)	5	5	3	4	4	1	2	5	4	2	35	74
Destilador solar	3	3	3	3	4	5	2	2	4	2	31	64
Aquecedor solar de água	3	3	3	5	5	1	2	5	4	2	33	69
Filtro de matriz estururada	2	5	5	5	4	2	4	3	2	3	35	81
Clarificador de fluxo ascendente	3	1	2	1	2	2	3	1	1	5	21	49
Filtro de cerâmica doméstico	5	1	3	5	4	2	4	5	4	2	35	71
MF portátil	2	5	5	5	4	4	4	3	2	2	36	82
UF portátil	3	5	5	5	4	4	4	5	2	4	41	95
UF modular	4	3	5	5	3	4	4	5	2	5	40	91
Bicicleta motorizada - NF	3	3	1	3	3	5	4	3	2	5	32	72
Sistema modular de OI - fotovoltaico	3	3	1	3	2	5	4	2	2	2	27	58
Sistema modular de OI - eólico	3	3	1	3	2	5	4	2	2	2	27	58
Sistema modular de MF móvel	3	3	1	3	2	5	4	1	2	5	29	64
Sistema modular de OI flutuante	3	3	1	3	2	5	4	1	2	5	29	64
RO modular - gerador	2	3	1	3	2	5	4	1	2	5	28	63
Filtro de bolso	1	5	5	4	5	5	1	5	1	1	33	77
SAMDES compacto	3	3	1	3	2	5	4	2	2	2	27	58

3

2

1

5

4

3

2

1

3

2

1

Mais importância
Mais favorável
Menor importância

Menor importância
Menos favorável

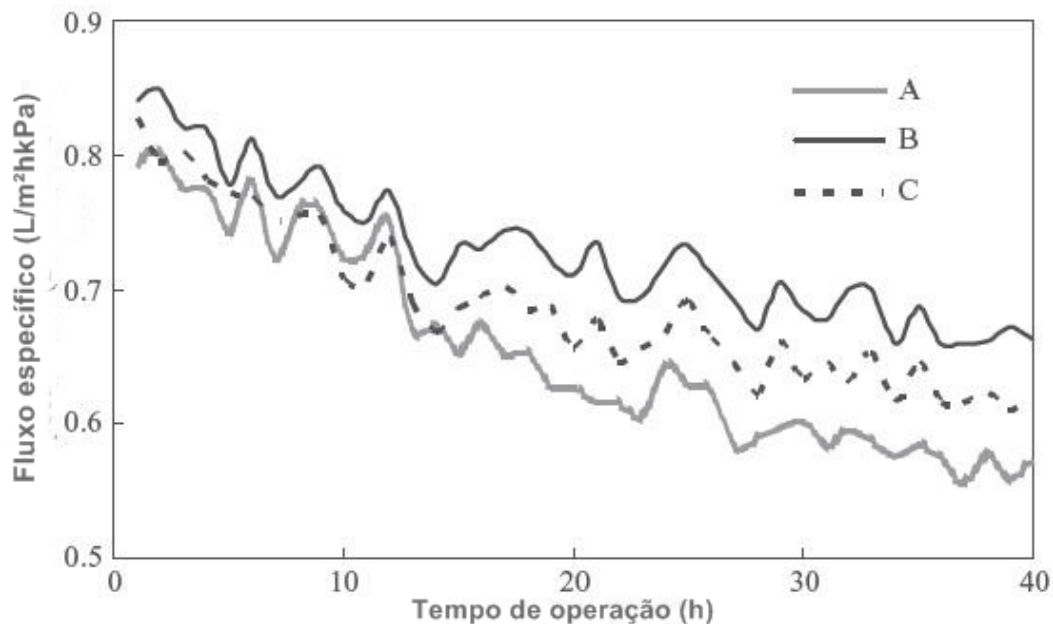
Para a classificação das tecnologias foram atribuídos pesos a cada critério com escala de 1 a 3, sendo 1 o fator menos relevante e o 3 o mais importante na escala de decisão. Com a definição da importância de cada item na decisão se estabeleceu uma escala de 1 a 5, sendo 1 o menos favorável e o 5 o mais favorável (Loo, et al., 2012).

A partir da matriz de decisão, observa-se que as tecnologias que envolvem o uso de membrana de UF têm as melhores classificações, apresentando maior facilidade de desenvolvimento e operação, baixa energia requerida e valores elevados de vazão de água tratada. A tecnologia de MF é classificada logo em seguida, uma vez que produz uma água de menor qualidade.

### 2.2.2 Tratamento convencional seguido de Ultrafiltração

As membranas de UF têm tamanhos de poros capazes de reter os cistos de *Giardia*, oocistos de *Cryptosporidium* e bactérias do grupo coliformes bem como diminuir significativamente cor e turbidez, porém, fazer o uso de UF no tratamento de água para consumo a partir de água coletada de rios sem um pré-tratamento se torna inviável. A grande quantidade de materiais suspensos na água causaria um entupimento muito rápido e uma queda de fluxo muito acentuada, sendo a consequência disso uma maior dificuldade de operação e baixos rendimentos. É necessário que a água alimentada no sistema de UF tenha uma qualidade mínima. Em alguns casos o tratamento convencional tem se mostrado ineficiente para remoção de microrganismos e a UF depende de um tratamento anterior podendo assim, ter grande vantagem o uso dos tratamentos em sequencia. Heng e colaboradores (2008) estudaram o efeito do tratamento convencional composto basicamente por coagulação/floculação, sedimentação, filtração e cloração, e analisaram quais etapas eram relevantes como pré-tratamento para UF. Foram realizados três pré-tratamentos para a água de alimentação da UF: coagulação/floculação + UF; coagulação/floculação + sedimentação + UF e coagulação/floculação + sedimentação + filtração + UF.

Com esse estudo dos pré-tratamentos para a água de alimentação da UF, os referidos autores obtiveram resultados interessantes, ao contrário do que se pensaria num primeiro momento em que filtrando a água, por ter o tratamento mais completo, se teriam os melhores resultados, menores incrustações, porém os melhores resultados foram obtidos quando a água bruta passou apenas pelas etapas de coagulação/floculação + sedimentação, como pode ser observado na Figura 2.1, onde estão apresentados os fluxos de permeado para o processo de UF em função do tempo para os diferentes sistemas de pré-tratamento testados.



**Figura 2.1:** Perda de fluxo com o tempo devido a incrustações na membrana. (A) coagulação/floculação + UF; (B) coagulação/floculação + sedimentação + UF; (C) coagulação/floculação + sedimentação + filtração + UF, adaptado de Heng, *et al.*, 2008.

Os resultados mostraram que no pré-tratamento apenas com a coagulação/floculação ocorreu a formação considerável de uma camada sobre as membranas que diminui o fluxo de permeado. Já com a coagulação/floculação seguida de sedimentação obtiveram os melhores resultados de fluxo, pois se tem a formação de uma menor camada sobre a membrana que auxilia na proteção contra a incrustação das partículas muito finas. O resultado mais inesperado é obtido quando a água passa pela coagulação/floculação + sedimentação + filtração; ao contrário do que se espera, uma melhora no fluxo quando comparada aos outros testes, tem se um fluxo menor do que quando o tratamento é feito até a sedimentação. Os autores consideram que o menor fluxo obtido quando a água é filtrada se deve à remoção das partículas maiores e à presença das partículas muito finas em suspensão, as quais, sem as partículas maiores para fazer uma camada que proteja a membrana da incrustação, acabam se aderindo na superfície da membrana, causando um entupimento irreversível (Heng, *et al.*, 2008). Com isso, percebe-se que o uso combinado do tratamento convencional e a UF é possível chegar a valores de parâmetros de qualidade muito satisfatórios.

### 2.2.3 A influência do coagulante

Um dos parâmetros mais importante nos sistemas de tratamento com membranas é a incrustação, que causa uma queda de fluxo de permeado e, com isso, uma queda de produtividade. O uso do coagulante adequado diminui o entupimento das membranas e facilita a remoção da contaminação depositada sobre a membrana. Sendo o pré-tratamento indispensável para a utilização da técnica de UF, avaliar os efeitos dos diferentes tipos de coagulantes é necessário. Quando avaliados os coagulantes  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{FeSO}_4$  e  $\text{PACl}$ , o cloreto férrico apresenta menores taxas de incrustações na membrana, com o sistema operando estável por até seis meses sem a necessidade de uma limpeza química (Xianglia, *et al.*, 2007). Mesmo o cloreto férrico apresentando bons resultados no

tratamento de água, o sulfato de alumínio é mais largamente empregado, sendo este utilizado no tratamento de água para abastecimento de Porto Alegre. Em outro estudo comparando os coagulantes  $\text{FeCl}_3$ ,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  e  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ , foram obtidos resultados melhores para o sulfato de alumínio, com o  $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$  além de uma melhor remoção de matéria orgânica e incrustações menos severas. Quando usado sulfato de alumínio em comparação com os outros coagulantes, a camada formada sobre a membrana tem maior facilidade de remoção com uma menor necessidade de limpeza química mesmo quando comparado com o  $\text{FeCl}_3$  (Konieczny, *et al.*, 2009). Quando utilizado quitosana como uma alternativa de coagulante natural é observada uma menor tendência à incrustação do que quando utilizado sulfato de alumínio, porém, quando o coagulante utilizado é o sulfato de alumínio se obtém um fluxo médio de permeado mais estável (Bergamasco, *et al.*, 2010).

Sendo assim, a aplicação o tratamento convencional seguido de ultrafiltração em condições ótimas de operação serve como uma barreira higiênica, onde quase 100% de coliformes fecais e coliformes totais são removidos. A eficiência do processo híbrido, tratamento convencional de água seguido de ultrafiltração, está altamente correlacionada com natureza do coagulante empregado.



### 3 Descrição do Tratamento de Água do DMAE

A água bruta captada do Lago Guaíba é bombeada pelas estações de bombeamento de água bruta (EBABs) para as estações de tratamento de água (ETAs) onde passa pelo processo convencional de tratamento, brevemente descrito a seguir.

*Pré-tratamento:* a água passa por um gradeamento para a retirada de sólidos mais grosseiros e recebe a adição de agentes oxidantes e carvão ativado para diminuir a quantidade de matéria orgânica e reduzir o gosto e odor provenientes de florações (algas).

*Coagulação/floculação:* nessa etapa é feita a adição de sulfato de alumínio que proporciona o agrupamento das partículas sólidas em suspensão, como sujeira e microrganismos, formando flocos de maior massa.

*Sedimentação:* com os flocos aumentando a massa eles podem ser decantados na etapa de sedimentação, onde as partículas em flocos se depositam no fundo dos tanques de sedimentação. A água clarificada segue para a etapa de filtração.

*Filtração:* após a sedimentação ainda há flocos que não atingiram peso suficiente para serem removidos por sedimentação então, a água clarificada segue para os filtros de areia onde é feita a filtragem rápida para a remoção desses flocos menores.

*Desinfecção:* como nas etapas de coagulação/floculação, sedimentação e filtração não se obtêm a remoção completa de microrganismos é necessária uma etapa de desinfecção. Como a desinfecção da água é feita com produtos que têm cloro ativo, essa etapa é muitas vezes chamada de cloração, sendo que o cloro atua principalmente na inativação de bactérias. Há uma précloração, feita logo antes dos filtros de areia, para preservar os filtros de contaminações.

*Alcalinização:* durante as etapas do tratamento a adição de produtos químicos altera o pH da água, sendo necessária a adição de alcalinizantes para que a água volte ao pH natural, próximo de 7.

*Fluoretação:* a fluoretação não está ligada à qualidade da água tratada em si, mas sim para agregar à água outra característica, pois o flúor ajuda na prevenção de cáries dentárias.

*Distribuição:* finalizado o tratamento a água tratada é armazenada e distribuída pelas redes de distribuições e estações de bombeamento de água.

Na Figura 3.1 está apresentado um fluxograma simplificado do tratamento aplicado nas ETAs.

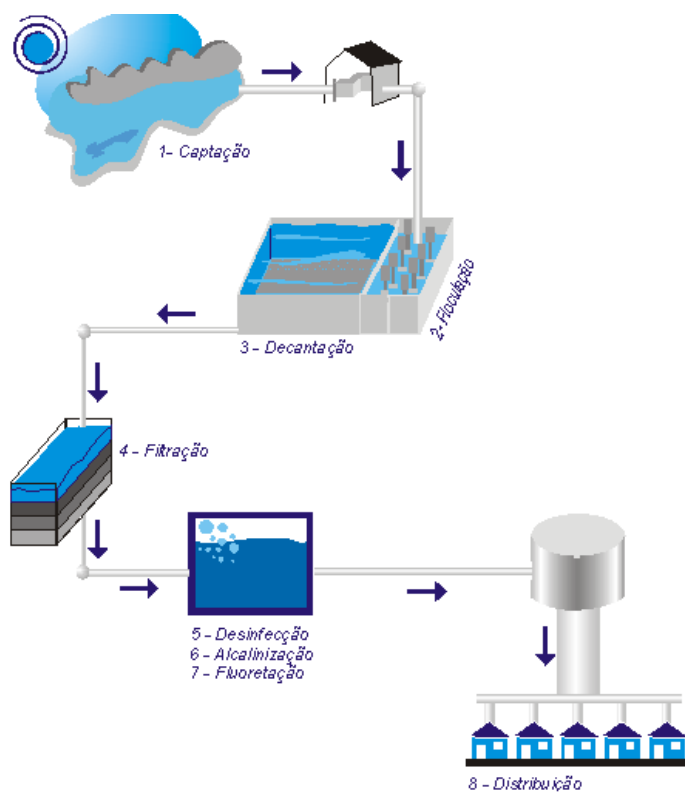


Figura 3.1: Fluxograma simplificado do tratamento de água – DMAE

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Membrana de Ultrafiltração

Para o estudo em bancada e na planta piloto foram utilizadas membranas de fibra oca de poliétersulfona adquiridas da PAM – Membranas Seletivas Ltda. As características das membranas dadas pelo fornecedor estão apresentadas na Tabela 4.1 e a Figura 4.1 mostra em detalhe o módulo utilizado no sistema de bancada.

**Tabela 4.1:** Características das membranas de Ultrafiltração (\*Fibras da SP).

Tipo de Membrana	Ultrafiltração (UF)
Material de composição da membrana	Poliétersulfona
Formato da membrana	Fibra oca
Camada seletiva	Externa
Massa Molar de Corte	50 kDa
Diâmetro externo da fibra (mm)	0,65 – 0,70 / 0,7-0,8*
Faixa de PH	4 – 8 / 4 – 10*
Rejeição (%)	99,98 / 95*



**Figura 4.1:** Detalhe das fibras ocas de poliétersulfona no módulo utilizado no sistema de bancada.

### 4.2 Água de alimentação

Na alimentação dos sistemas piloto e de bancada, foi utilizada a água tratada pelo Departamento Municipal de Água e Esgoto de Porto Alegre – DMAE, unidade Moinhos de Vento. A coleta foi feita na saída dos filtros de areia, antes da etapa de cloração, portanto as bactérias estão presentes em grande quantidade. No sistema piloto, a alimentação era feita por controladores de nível, os quais acionando a bomba quando o nível está baixo. O sistema piloto é alimentado somente com o filtrado do filtro número 1. Para os testes no sistema de bancada foram feitas duas coletas de água filtrada: a primeira foi coletada do filtro de areia número 1 e a segunda coleta foi feita nas saídas das linhas de amostragem, onde se obteve uma mistura do filtrado dos quatro filtros de areia.

### 4.3 Análise de Protozoários

Para os testes de retenção de cistos de protozoários foram utilizadas suspensões contendo cistos de *Giardia* fornecidos pelo Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia do Instituto de Ciências Básicas da Saúde – ICBS-UFRGS.

Para o teste no sistema piloto a suspensão continha 1000 cistos em média para contaminar cada 100 litros de água. Para os testes no sistema de bancada a suspensão continha 1000 cistos em média para contaminar 20 litros de água.

### 4.4 Sistemas Experimentais

#### 4.4.1 Sistema piloto

O sistema piloto de ultrafiltração é composto de um conjunto de quatro módulos do tipo fibras ocas submersos, cada um com três feixes de membranas. A alimentação no tanque de alimentação com capacidade de 500 litros é feita por uma bomba diafragma que é acionada pelo sensor de nível. A unidade tem controle de nível baixo, para evitar que as membranas fiquem expostas e, desta forma, diminua a eficiência do sistema, e um controle de nível alto para evitar o transbordo. Há também um dreno próximo à borda do tanque para evitar o transbordo em caso de nível muito alto.

O permeado é succionado por uma bomba diafragma e enviado para o tanque de permeado, com capacidade de 100 litros que tem controle de nível baixo, para evitar que a bomba opere no modo de retrolavagem quando o tanque estiver em nível baixo. Para evitar que o tanque transborde o nível alto é regulado por uma válvula boia que, em nível, alto faz com que o permeado seja desviado para um dreno. Quando é feita a inversão de posição da válvula (on/off) de três vias, a bomba diafragma passa a bombear o permeado do tanque de permeado para os feixes de membranas no sentido contrário ao da filtração, fazendo assim, a retrolavagem. A operação de filtração intercalada com a retrolavagem é temporizada. Os módulos de membranas submersas recebem aeração na base do sistema, feita a partir de um soprador.

O sistema piloto de ultrafiltração é semiautomático, com relé lógico para a programação do tempo de filtragem e o tempo de retrolavagem, variador da velocidade da bomba, com intertravamentos e malhas de controle. O fluxo de projeto é de  $10 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ , sendo a área total de membrana de  $6 \text{ m}^2$  e a vazão total de projeto de  $60 \text{ L h}^{-1}$ . A unidade é montada em CPVC Sch80. Na Figura 4.2 está apresentada a vista frontal do Sistema Piloto de Ultrafiltração instalado nas dependências do DMAE, mais precisamente no local onde se encontram os filtros de areia por gravidade.



**Figura 4.2:** Vista frontal do sistema piloto de UF instalado nas dependências do DMAE.

#### 4.4.1.1 Módulo

O módulo de membranas de UF em estrutura de PVC Sch80 com quatro quadros, sendo que cada quadro tem três feixes de membranas. O módulo é imerso diretamente no tanque de alimentação, como mostra a Figura 4.3. Como a camada seletiva das membranas é na superfície externa, o permeado é succionado pela ação do vácuo aplicado; sendo recolhido no interior das fibras.



**Figura 4.3:** Imagem do tanque que contém os módulos de membranas de fibras ocas de UF.

#### 4.4.1.2 Modos de operação

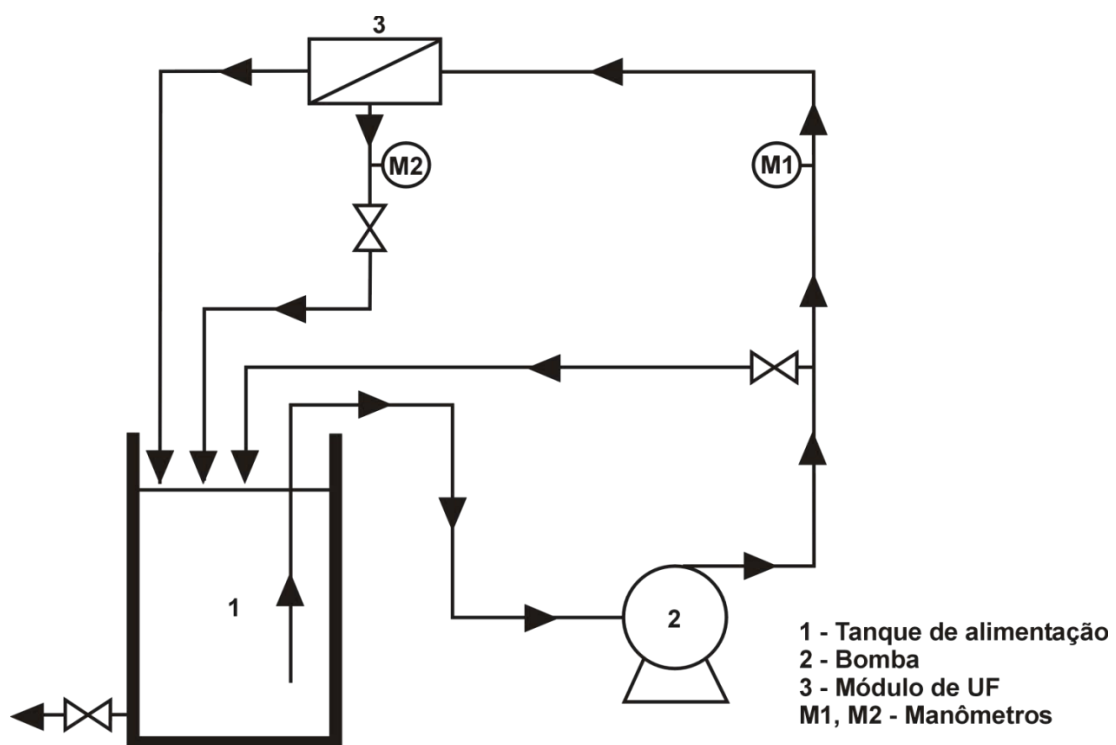
O sistema piloto pode operar tanto de forma automática como na forma manual dispondo de uma chave seletora, para alternar entre os modos. No modo de operação automático o operador estabelece os tempos de filtração e de retrolavagem, nesse modo o sistema opera por tempo indeterminados com ciclos de filtração e retrolavagem, sendo que os tempos podem ser redefinidos a qualquer momento pelo operador. No modo de operação manual, para que a unidade passe de filtração para retro lavagem, é necessário que o operador mude a chave seletora da posição “filtração” para a posição “limpeza”.

Os controles de vazões e pressão durante a filtração são feitos através da manipulação da “vazão filtração”. Na limpeza, os controles de vazão e pressão são feitos através da manipulação da “vazão limpeza”.

A aeração ocorre sempre que o sistema é ligado, ficando a cargo do operador apenas definir a vazão.

#### 4.4.2 Sistema de bancada

A construção do módulo e a instalação do sistema foram realizados no Laboratório de Separação por Membranas – LASEM, no Departamento de Engenharia Química – DEQUI, na Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. O fluxograma do sistema é mostrado na Figura 4.4.

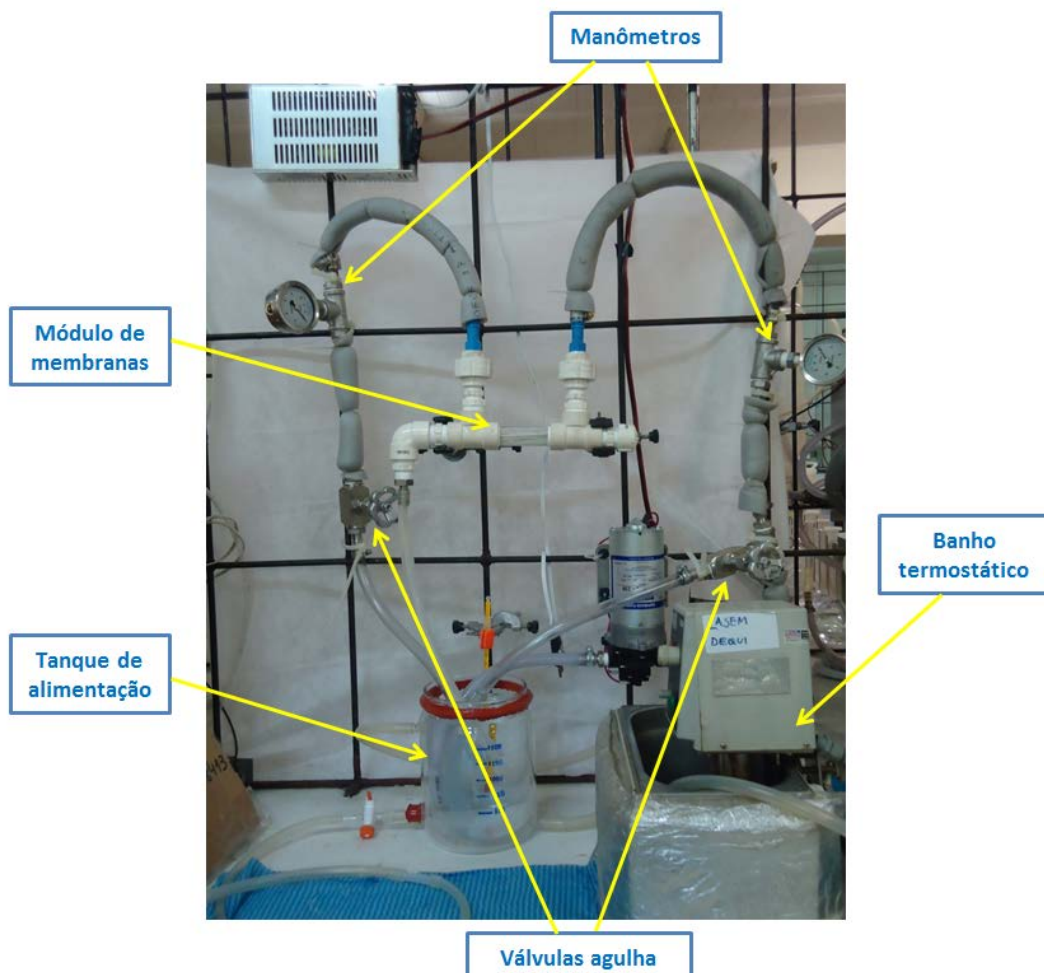


**Figura 4.4:** Fluxograma simplificado do sistema bancada de UF. Operação em reciclo total.

Os componentes do sistema são:

- tanque de alimentação de 2 L;
- bomba diafragma;
- válvulas agulha de ½ polegada (à jusante à bomba, à montante ao módulo);
- módulo de Ultrafiltração;
- manômetros (na entrada e saída do módulo);
- banho termostático;
- mangueiras para as conexões na unidade.

O tanque de alimentação é encamisado para controle de temperatura. Os controles da unidade são totalmente manuais. O módulo possui 87 membranas de fibra oca, com uma área de permeação de 387 cm<sup>2</sup>. As membranas que constituem o módulo de bancada são as mesmas membranas que constituem o módulo piloto. Na figura 4.5 está apresentada uma fotografia do sistema de bancada.



**Figura 4.5:** Fotografia do sistema de bancada de UF.

## 4.5 Metodologia Experimental

### 4.5.1 Sistema Piloto de Ultrafiltração com membranas submersas

A empresa que fornece o sistema fez testes na unidade antes do envio da mesma, sendo necessário que as membranas ficassem em contato com um líquido de conservação. Após o primeiro uso da membrana, é indispensável que ela fique em contato com algum líquido de conservação para evitar que os poros sejam colapsados, como também para evitar o desenvolvimento microbiano. Porém, como as membranas ficaram conservadas por muito tempo sem a troca desta solução, ocorreu a proliferação de microrganismos e a oxidação do ferro presente em partes da estrutura. Com isso foram necessárias duas limpezas, uma para a remoção do biofilme formado e outra para a remoção da camada de óxido de ferro depositada sobre as membranas.

#### 4.5.1.1 Limpeza com Hipoclorito de sódio

Durante o tempo em que a unidade ficou fora de operação, mas com produto para preservar as características da membrana, ocorreu o surgimento de biofilme. Conforme a orientação do fabricante foi efetuada a limpeza com hipoclorito de sódio, recirculando uma solução de 500 PPM de hipoclorito de sódio, durante uma hora. Após o tempo de limpeza o tanque foi esvaziado e então realizados diversos enxagues, pois o contato com o cloro por muito tempo pode comprometer a estrutura das membranas.

#### 4.5.1.2 Limpeza com Ácido Oxálico

O produto usado para preservar as membranas reagiu com o ferro presente em algumas partes da unidade ocorrendo a deposição de óxido de ferro sobre a superfície das membranas. Para a remoção dessa camada de óxido de ferro foi efetuada uma limpeza com ácido oxálico. A limpeza foi feita recirculando uma solução de 1 ppm de ácido oxálico durante uma hora; após o tempo de limpeza o tanque foi então esvaziado e diversos enxagues foram realizados.

#### 4.5.1.3 Teste com inoculação de cistos de *Giardia*

Para avaliar a retenção de microrganismos pela membrana de ultrafiltração foi adicionada ao tanque de alimentação uma suspensão contendo cistos de *Giardia*, a inoculação é feita para garantir a presença destes no sistema. Para a análise de cistos de *Giardia* foram coletadas duas amostras de 5 litros de permeado e duas amostras de 5 litros de concentrado. Para a análise de *Coliformes totais* e *Escherichia Coli* foram coletadas duas amostras de permeado e duas amostras de concentrado de 200 mL cada uma.

#### 4.5.1.4 Teste de vazamentos nas membranas e conexões

Para avaliar a presença de vazamentos tanto nas membranas como nas conexões, a entrada de ar para aeração foi conectada na saída de permeado. Com todas as membranas submersas, foi soprado ar no interior das membranas, no sentido contrário ao da filtração. No primeiro momento se injetou ar em todos os quatro quadros de membranas do módulo e, em seguida, foram isolados um a um os quadros e novamente injetado ar em cada quadro de membranas.



## 4.5.2 Sistema de bancada de Ultrafiltração

### 4.5.2.1 Compactação das membranas

Em sistemas de separação por membrana porosas onde se tem como força motriz a pressão, ocorre o adensamento da microestrutura da membrana e, como consequência, se tem uma menor porosidade e a diminuição do fluxo de permeado. Assim, é necessário realizar a compactação para diferenciar a queda de fluxo devida ao adensamento daquela devida ao *fouling*.

Para a compactação da membrana se usou água destilada, pressão transmembrana de 3,5 bar na temperatura de 30°C. Foram feitas medidas de fluxo de permeado a cada 10 minutos recolhendo alíquotas de 250 mL e cronometrando-se o tempo até que não houvesse mais mudança no valor do fluxo.

### 4.5.2.2 Permeância Hidráulica

A permeância expressa o fluxo de permeado que passa através da membrana em uma determinada pressão transmembrana. Quando o fluido utilizado é água é chamada de Permeância Hidráulica (PH). A PH é utilizada na avaliação do desempenho do sistema de membranas e também para determinar a necessidade e a eficiência do protocolo de limpeza utilizado.

Para a determinação da permeância hidráulica se utilizou água destilada e a temperatura foi mantida em 30°C. Foram recolhidas alíquotas de 250 mL de filtrado e cronometrados os tempos nas pressões transmembranas de: 3,0; 2,5; 2,0; 1,5; 1,0 e 0,5 bar.

### 4.5.2.3 Testes com inoculação de cistos de *Giardia*

Para o primeiro teste foram coletados 20 litros de água do filtro 1 no DMAE Moinhos de Vento, este filtro é o mesmo que faz a alimentação da unidade piloto de ultrafiltração. Como o sistema original de bancada possui um tanque de alimentação de 2 L e para as análises de cistos é necessário um grande volume de amostra, 10 litros de concentrado e 10 L de permeado, o tanque de alimentação foi substituído por uma bombona de 20 L. Ao tanque de alimentação foi adicionada a água coletada no DMAE com um volume de 20 litros e um volume de 1,5 mL de uma suspensão contendo cistos de *Giardia*. Para as análises de cistos foram coletadas duas amostras de permeado de 5 litros e duas amostras de concentrado, uma de 5 litros e outra de 2,5 litros. Para as análises de *Coliformes* totais e *Escherichia Coli* foram coletadas duas amostras de 50 mL de permeado e duas amostras de 50 mL de concentrado. O teste foi realizado mantendo a pressão transmembrana constante em 3,0 bar e a temperatura ambiente.

Para o segundo teste foram coletados 25 litros de água filtrada, porém dessa vez a água filtrada é proveniente de 4 filtros de areia, também coletada antes da etapa de cloração. O tanque de alimentação também foi substituído por uma bombona de 20 litros que foi alimentada com volume de água filtrada um pouco maior que 20 litros para suprir o volume morto do sistema e garantir os volumes adequados para as amostras. Ao tanque de alimentação também foi adicionado um volume de 1,5 mL de uma suspensão de cistos de *Giardia*. Para as análises de cistos foram coletadas duas amostras de 5 L de permeado e duas amostras de 5 L de concentrado, e para as análises de *Coliformes totais*

e *Escherichia Coli* foram coletadas duas amostras de 50 mL de permeado e duas amostras de 50 mL de concentrado.

#### 4.5.2.4 Percentual de Fouling

O percentual de *fouling* indica a queda de fluxo de permeado para uma determinada água de alimentação. Para determinar o percentual de *fouling*, após os dois testes com protozoários, foi adicionado ao tanque de alimentação de 2 litros, apenas a água filtrada coletada no DMAE, mantendo-se a temperatura em 30°C. Foram recolhidas alíquotas e 250 mL e cronometrados os tempos nas pressões transmembrana de: 3,0; 2,5; 2,0; 1,5; 1,0 e 0,5 bar.

Para a determinação do percentual de *fouling* é necessário usar as curvas de PH antes e depois dos testes, conforme a equação:

$$\%fouling = (1 - Pf/Pi) \times 100$$

onde a  $P_i$  é a permeância hidráulica antes dos testes e  $P_f$  é a permeância hidráulica depois dos testes.

#### 4.6 Metodologia Analítica

Para a caracterização das amostras de concentrado e de permeado foram feitas análises de turbidez com turbidímetro Policontrol AP2000, pH com pHmetro Digimed DM-22, condutividade elétrica com condutivímetro Digimed DM-31 e carbono orgânico total com analisador Shimadzu TOC-V CSH – combustão catalítica a 680°C e detector infravermelho não dispersivo.

Amostras foram enviadas para o Departamento de Microbiologia, Imunologia e Parasitologia do Instituto de Ciências Básicas da Saúde – ICBS-UFRGS, onde foram feitos os testes para detectar a presença de cistos de *Giardia* e presença de *Coliformes Totais* e *Escherichia Coli*

- Para a análise de cistos de *Giardia* foram feitos ensaios para detecção por imunofluorescência direta: mistura de anticorpos monoclonais unidos a FITC (isotiocinato de fluoresceína). Os quais indicam a presença e não distinguem espécies ou a infectividade (método 1623 EPA, 2005) e teste confirmatório, utilizando o corante (DAPI) para visualização dos núcleos (método 1623 EPA, 2005).
- Para a análise de *Coliformes Totais* e *Escherichia Coli* a metodologia utilizada foi a semeadura de 100 ml de amostra em ágar Les Endo (em duplicata), incubação das placas a 35°C e contagem das colônias após 24 horas.

## 5 Resultados e Discussão

De acordo com a literatura, o tratamento por UF melhora a qualidade da água para abastecimento humano. Nos testes feitos neste estudo foram obtidos resultados que estão de acordo com a literatura para a remoção de microrganismos patogênicos. Os resultados obtidos são detalhados a seguir.

### 5.1 Sistema Piloto de Ultrafiltração

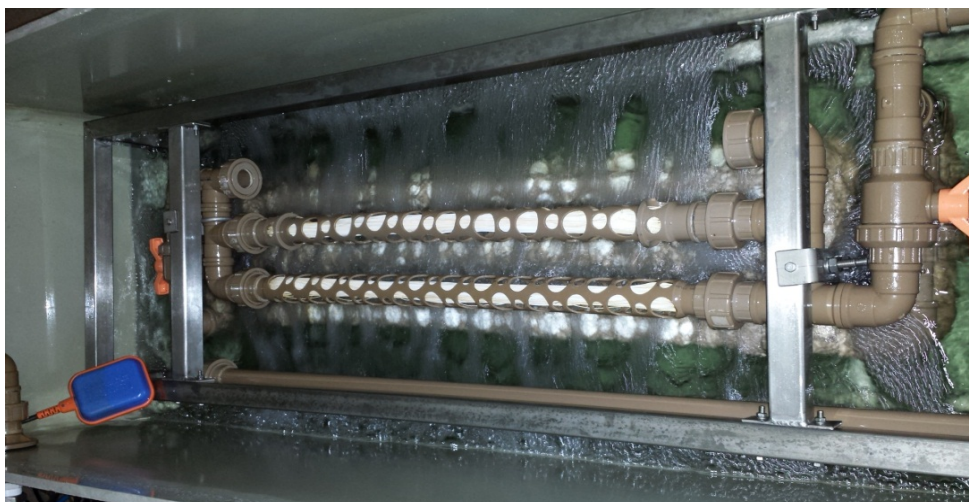
#### 5.1.1 Limpezas Químicas

A limpeza feita com hipoclorito de sódio com solução de 500 ppm durante uma hora, foi bem eficiente. Visivelmente ocorreu a completa eliminação do biofilme.

A limpeza para a remoção do óxido de ferro que estava depositado sobre as membranas feita com ácido oxálico na concentração de 1 ppm durante uma hora, também mostrou, visivelmente, uma remoção completa da deposição. Nas Figuras 5.1 e 5.2, são apresentadas as imagens do módulo antes e após as limpezas.



**Figura 5.1:** Fotografia do módulo de membranas antes da limpeza com ácido oxálico (1 ppm), condições de operação: pressão -0,1 bar, temperatura 25°C e vazão de  $1,7 \times 10^5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ .



**Figura 5.2:** Fotografia do módulo de membranas após a limpeza com ácido oxálico.

### 5.1.2 Teste com inoculação de protozoários

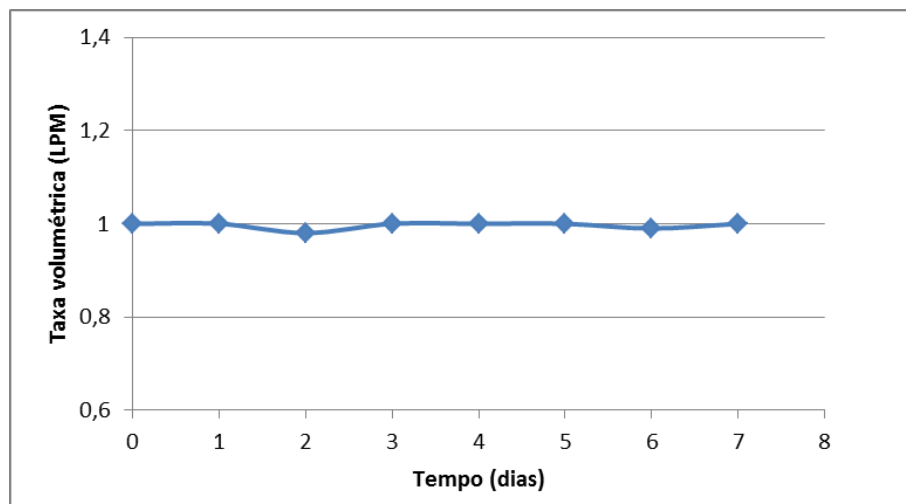
Para a realização dos testes, foi adicionado à água uma suspensão contendo cistos de *Giardia*. O teste deveria ter sido feito com 1000 cistos para cada 100 litros de água, mas houve um problema no preparo da suspensão e o teste foi realizado com 1000 cistos para 500 litros de água.

Com isso, não foram encontrados cistos tanto na amostra de permeado quanto na amostra de concentrado. Provavelmente pela baixa concentração em relação ao grande volume do tanque, sendo coletado nenhum cisto nas amostras.

Como os cistos têm tamanhos que são retidos pela membrana de UF, o teste com os protozoários já seria um teste de vazamento, pois o esperado seria detectar cistos no concentrado, e na ausência de vazamento não seriam detectados cistos no permeado.

### 5.1.3 Teste de Vazamento

Durante o período em que se aguardava os resultados das análises de protozoários o sistema piloto ficou em operação automática, com tempo de filtração de 20 minutos e retrolavagem de 1,5 minutos. A Figura 5.3 mostra a variação da taxa volumétrica com o tempo.



**Figura 5.3:** Variação da taxa volumétrica com o tempo. Condições de operação: pressão -0,1 bar e de temperatura 25°C.

Como as análises de protozoários foram inconclusivas e durante o período no qual o sistema ficou operando não se observou variação da pressão transmembrana nem da taxa volumétrica, conforme mostra a Figura 5.3, suspeitou-se de que poderia estar ocorrendo algum vazamento. Em processo com membranas que utilizam o gradiente de pressão como força motriz, geralmente ocorre um decréscimo na taxa volumétrica, ou é necessário o aumento da pressão para mantê-la. Como o comportamento da taxa volumétrica encontrado foi considerado constante, isso seria um indicativo de que poderia estar ocorrendo problema de vazamento no sistema.

Para verificar a ocorrência de vazamentos, fez-se um teste conectando-se a entrada de ar para a aeração na saída de permeado, injetando ar no sentido contrário ao da filtração. Esse teste mostra visualmente se estão ocorrendo vazamentos nas conexões e membranas.

Durante a realização do teste, foi constatado que não havia problemas nas conexões, mas que em pelo menos três quadros havia um feixe de membranas com vazamento. A Figura 5.4 mostra uma fotografia onde é possível visualizar o vazamento de ar nas membranas.



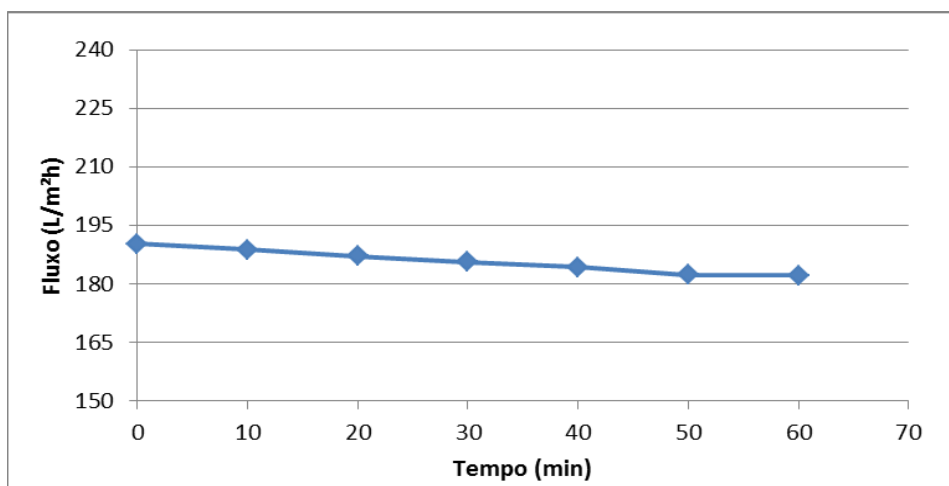
**Figura 5.4:** Fotografia das bolhas de ar devido a vazamentos nas membranas.

Nesta etapa do trabalho entrou-se em contato com o fabricante das membranas para substituição dos módulos danificados, sendo que até o momento o problema não foi resolvido.

## 5.2 Sistema de Bancada de Ultrafiltração

### 5.2.1 Compactação da membrana

Conforme apresentado na Figura 5.5, observa-se a compactação da membrana na temperatura de 30°C ocorre rapidamente e com pouca variação entre o fluxo inicial e final.

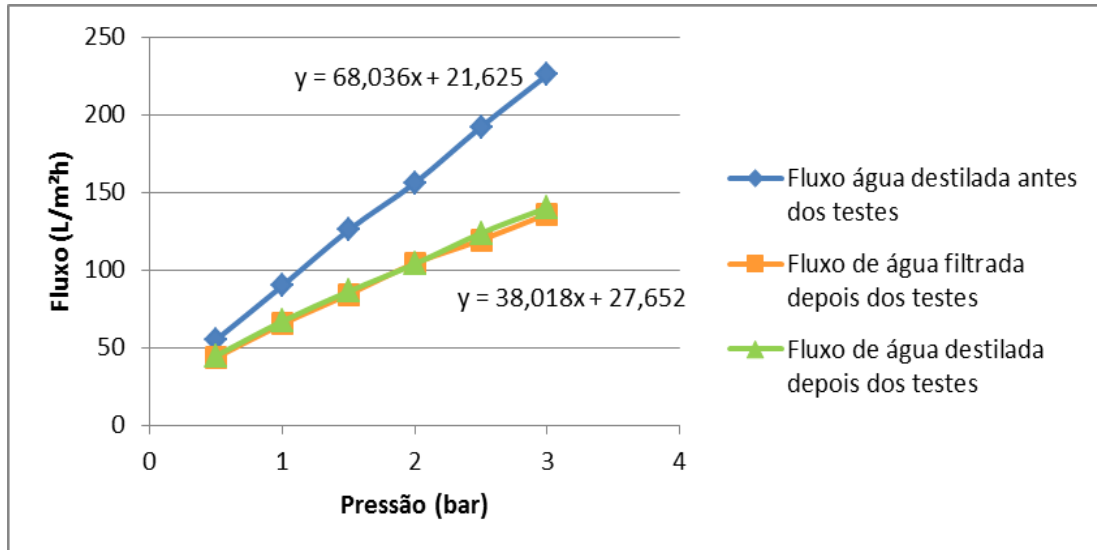


**Figura 5.5:** Compactação da membrana na temperatura de 30°C e pressão transmembrana de 3,5 bar.

O teste foi realizado na pressão transmembrana de 3,5 bar, resultando num valor de fluxo final de 182,2 Lm<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>. A diminuição do fluxo de permeado na membrana relativo ao adensamento da microestrutura foi de 4,11%.

### 5.2.2 Permeância e percentual de Fouling

Para a determinação do percentual de *fouling*, primeiro foi determinada a PH do sistema, na temperatura de 30°C, variando a pressão transmembrana entre 3,0 e 0,5 bar, usando como solução de alimentação água destilada. Após a realização dos testes com água filtrada coletada no DMAE na saída dos filtros, determinou-se a permeância novamente com água destilada, nas mesmas condições, para a determinação da PH final. Na Figura 5.6 estão as curvas de PH e de permeância da água filtrada.



**Figura 5.6:** Fluxo de permeado versus pressão transmembrana para a água filtrada do DMAE e para água destilada antes e após o processo com a água filtrada. Temperatura de 30°C e pressão transmembrana variando de 3,0 a 0,5 bar.

Pela análise dos dados da Figura 5.6 observa-se que o fluxo aumenta linearmente com a pressão para todos os experimentos, contudo é menor para a água filtrada do DMAE. O percentual de *fouling* calculado foi de 44%, que pode ser considerado alto em se tratando de água filtrada.

Como na coleta feita com filtrado dos 4 filtros a turbidez foi elevada (> 1 NTU), isso indica um possível mau funcionamento de um ou mais filtros portanto; o percentual de *fouling* pode ser menor em condições normais de operação dos filtros. Mesmo com um percentual de *fouling* alto, durante todo o experimento se trabalhou longe do fluxo crítico, tendo uma relação linear entre o fluxo e a pressão transmembrana.

### 5.2.3 Testes com Protozoários

No sistema de bancada de UF foram realizados dois testes com a adição de uma suspensão contendo protozoários.

Nestes testes, as análises de protozoários mostraram resultados positivos para cistos de *Giardia* nos concentrados e resultados negativos para os permeados, indicando que a membrana de UF foi capaz de retê-los.

Na Tabela 5.1 estão apresentados os valores em percentual de redução de alguns parâmetros, onde P1 é o permeado do teste com água do filtro 1 e P2 é o permeado do teste feito com a mistura da água filtrada por quatro filtros.

**Tabela 5.1:** Redução percentual de alguns parâmetros de interesse no estudo: turbidez, carbono orgânico total, coliformes totais e *Escherichia Coli*.

Redução (%)		
Parâmetro	P1	P2
Turbidez	60,0	83,0
TOC	11,7	7,7
Coliformes Totais	61,3	78,4
<i>Escherichia Coli</i>	69,2	85,0

**Tabela 5.2:** Valores de pH, condutividade elétrica e TOC dos permeados e concentrados.

Parâmetro	Amostra			
	P1	C1	P2	C2
pH	7,04	6,74	6,66	6,52
Condutividade elétrica ( $\mu\text{S}/\text{m}^2$ )	71,20	76,60	85,20	87,20
TOC (mg/L)	3,10	3,51	3,49	3,78

O pH, a condutividade elétrica e o carbono orgânico total apresentaram resultados semelhantes entre o concentrado e o permeado, conforme mostra a Tabela 5.2, onde P1 e P2 são os permeados, e C1 e C2 são os concentrados do primeiro e segundo teste, realizados no sistema bancada de UF. Como a condutividade elétrica está relacionada aos íons em solução, ou sais dissolvidos, é esperado que não ocorra uma grande variação entre os valores encontrados para o concentrado e o permeado, tendo em vista que a ultrafiltração não é o processo indicado para a remoção de sais em solução; para essa função, são utilizados os processos de osmose inversa ou eletrodialise.

Ainda observa-se que os valores de TOC para o permeado e para o concentrado foram semelhantes. Como a água alimentada na UF já passou por uma etapa de filtração, pode-se dizer a matéria orgânica de maior massa molar já foi removida previamente, indicando que a matéria orgânica presente na água é permeável à membrana de UF, com isso os valores de TOC para o permeado e para o concentrado são semelhantes.

## 6 Conclusões e Sugestões de Trabalhos Futuros

Neste estudo foi avaliada a utilização de um sistema de ultrafiltração como etapa final ao tratamento convencional de água para consumo humano, para isso foi utilizada a água tratada pelo DMAE. Inicialmente o objetivo era avaliar somente o sistema piloto de UF instalado nas dependências do DMAE, mas devido a problemas de vazamento e a demora na realização da troca do módulo, foram realizados testes em uma unidade de bancada. Os resultados mostram que com a utilização do tratamento convencional seguido da UF, se obtém uma água com qualidade mais elevada.

A redução de *Coliformes Totais* e *Escherichia Coli* ficou entre 60 e 85%, respectivamente, valores um pouco abaixo dos relatados na literatura. Como as bactérias têm tamanhos que variam de 0,1  $\mu\text{m}$  a 1  $\mu\text{m}$  e as membranas de UF têm poros na faixa de 0,001 a 0,1  $\mu\text{m}$ , algumas bactérias podem permear a membrana. O resultado para a remoção de cistos de *Giardia* foi de 100%, como o esperado devido ao tamanho dos cistos. Os cistos e oocistos de protozoários são resistentes à desinfecção por cloro, porém as bactérias são de fácil inativação por cloração sendo assim, mesmo com uma eficiência de 100% na remoção de protozoários a etapa de desinfecção por cloro não pode ser suprimida.

O percentual de *fouling* (44,2%) para a água filtrada foi alto e está relacionado à qualidade da água alimentada no sistema de UF. Mesmo com um percentual de *fouling* alto, durante todo o experimento se trabalhou longe do fluxo crítico, tendo uma relação linear entre o fluxo e a pressão transmembrana. Ainda constatou-se que uma verificação do funcionamento dos filtros deve ser realizada, pois quando se associa UF ao tratamento de água todas as etapas que precedem o processo de UF devem ser eficientes para evitar problemas de incrustação nas membranas.

Com a troca do módulo de membranas, novos testes no sistema piloto deverão ser realizados, para viabilizar uma melhor avaliação do *fouling* e da relação entre o tempo de filtragem e o tempo de retrolavagem, pois o *fouling* é uma das principais limitações do uso de sistemas de membranas.

Como uma tentativa de melhorar o desempenho do processo, acredita-se que a utilização de membranas com uma massa molar de corte menor (30kDa) pode ser uma alternativa para uma redução mais eficiente das bactérias e da matéria orgânica.



## 7 Referências

- Alonso, E., Santos, A., Solis, G., & Riesco, P. (28 de May de 2001). On the feasibility of urban wastewater tertiary treatment by membranes: a comparative assessment. *Desalination*.
- Arnal, J., Garcia-Fayos, B., Verdu, G., & Lora, J. (2009). Ultrafiltration as an alternative membrane technology to obtain safe drinking water from surface water: 10 years of experience on the scope of the AQUAPOT project. *Desalination*.
- Arnal, J., Sancho, M., Verdú, G., Lora, J., Marin, J., & Chiller, J. (2004). Selection of the most suitable ultrafiltration membrane for water disinfection in developing countries. *Desalination*.
- Assavasilavasukul, P., Lau, B. L., Harrington, G. W., Hoffman, R. M., & Borchardt, M. A. (2008). Effect of pathogen concentrations on removal of Cryptosporidium and Giardia by conventional drinking water treatment. *Water Research*.
- Bergamasco, R., Moraes, L. C., Vieira, M. F., Klen, M. R., & Vieira, A. M. (28 de October de 2010). Performance of a coagulation-ultrafiltration hybrid process for water supply treatment. *Chemical Engineering Journal*.
- Bergamasco, R., Moraes, L. C., Vieira, M. F., Klen, M. R., & Vieira, A. M. (28 de October de 2010). Performance of a coagulation-ultrafiltration hybrid process for water supply treatment.
- Betancourt, W. Q., & Rose, J. B. (2004). Drinking water treatment processes for removal of Cryptosporidium and Giardia. *Veterinary Parasitology*.
- Bustamant, H. A., Shanker, S. R., Pashley, R. M., & Karman, M. E. (2001). Interaction Between Cryptosporidium Oocysts and Water Treatment Coagulants. *Pergamon*.
- Carey, C., H., L., & Trevors, J. (22 de October de 2003). Biology, persistence and detection of Cryptosporidium parvum and Cryptosporidium hominis oocyst. *Water Research*.
- Castro-Hermida, J. A., García-Presedo, I., Almeida, A., González-Warleta, M., Da Costa, J. M., & Mezo, M. (2008). Contribution of treated wastewater to the contamination of recreational river areas with Cryptosporidium spp. and Giardia duodenalis. *Water Research*.
- Dialynas, E., & Diamadopoulos, E. (2007). Integration of immersed membrane ultrafiltration with coagulation and activated carbon adsorption for advanced treatment of municipal wastewater. *Desalination*.
- Heller, L., Bastos, R. K., Vieira, M. B., Bevilacqua, P. D., & Brito, L. L. (2004). Cryptosporidium Oocysts and Giardia Cysts: Environmental Circulation and Health Risks. *Epidemiologia e Serviços de Saúde*, 13(2).

Heng, L., Weijia, G., & Guibai, L. (2008). Performance evaluation of water treatment ultrafiltration pilot plants treating algae-rich reservoir water. *Desalination*.

Hsu, B.-M., & Yeh, H.-H. (24 de September de 2002). Removal of Giardia and Cryptosporidium in drinking water treatment: a pilot-scale study. *Water Research*.

Jacangelo, J. G., Trussell, R. R., & Montgomery, W. (1997). Role of membrane technology in drinking water treatment in the United States. *Desalination*.

Konieczny, K., Sakol, D., Plonka, J., Rajca, M., & Bodzek, M. (2009). Coagulation-ultrafiltration system for river water treatment. *Desalination*.

Lebeau, T., Lelièvre, C., Buisson, H., Clèret, D., Van de Venter, L. W., & Côté, P. (1998). Immersed membrane filtration for the production of drinking water: combination with PAC for NOM and SOCs removal. *Desalination*.

Loo, S.-L., Fane, A. G., Krantz, W. B., & Lim, T.-T. (13 de March de 2012). Emergency water supply: A review of potential technologies and selection criteria. *Water Research*.

Marela, P. v., Zwijnenburg, A., Kemperman, A., Wessling, M., Temmink, H., & Meer, W. v. (2009). Influence of membrane properties on fouling in submerged membrane bioreactors. *Journal of Membrane Science*.

Xianglia, Q., Zhenjiaa, Z., Nongcuna, W., Weeb, V., Lowb, M., Lohb, C., et al. (2007). Coagulation pretreatment for a large-scale ultrafiltration process treating water from the Taihu River. *Desalination*.