



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



Avaliação da Ultrafiltração como etapa de polimento no tratamento de efluente hospitalar

Autora: Paula Aldrovandi

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Isabel Cristina Tessaro

Co-orientadora: MSc. Eng. Julia Frick

Porto Alegre, dezembro de 2014

Sumário

Sumário	ii
Agradecimentos	iv
Resumo	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	vii
Lista de Símbolos	viii
Lista de Abreviaturas e Siglas	ix
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	2
2.1 Escassez de água e reuso	2
2.2 Regulamentação para reuso de água no Brasil	3
2.3 Referências Internacionais de reuso	5
2.4 Características e tratamento do efluente hospitalar	6
2.4.1 Características físico-químicas	6
2.4.2 Característica toxicológicas	6
2.4.3 Características microbiológicas	7
2.4.4 Tratamento de efluentes hospitalares	7
2.5 Sistemas complementares para reuso de água	8
2.6 Sistemas de Ultrafiltração	9
3 Efluente Hospitalar	11
4 Materiais e Métodos	12
4.1 Caracterização do efluente hospitalar	12
4.2 Ultrafiltração	12
4.2.1 Equipamento	12
4.2.2 Caracterização da membrana	13
4.2.3 Experimentos de UF	14
4.2.4 Decaimento do fluxo devido ao Fouling	15
4.3 Parâmetros de reuso utilizados	15
4.4 Métodos Analíticos	15
5 Resultados e Discussão	16
5.1 Caracterização do efluente hospitalar tratado	16
5.2 Retenção observada e Massa Molar de Corte da membrana de UF	17
5.3 Avaliação do comportamento de membrana com o efluente	18
5.4 Experimentos de Ultrafiltração	19
5.4.1 Permeância Hidráulica e Fouling	19
5.5 Análises físico-químicas	22
5.6 Análises Microbiológicas	26

6	Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	28
7	Referências	30

Agradecimentos

Primeiramente aos meus pais, que sempre me ensinaram os valores da vida e nunca me deixaram cair nos momentos difíceis. Obrigada pelo apoio e por não me deixar desistir dos meus sonhos.

À minha irmã, exemplo de determinação e coragem, que mesmo longe sempre esteve presente, transmitindo força e amor.

À minha orientadora Prof^a Isabel Cristina Tessaro e a minha co-orientadora Eng^a Julia Frick pelo carinho, ideias, apoio e contribuições imprescindíveis para a realização deste trabalho.

A todos os meus professores pelos ensinamentos que me tornaram capaz de ir adiante.

Ao pessoal do LASEM, pelo apoio e amizade durante os experimentos.

À professora Gertrudes Corção pela colaboração nas análises microbiológicas.

À Eng^o Química Catiane Rech e a equipe do Hospital pela atenção e contribuições, sem a qual este trabalho não se realizaria.

Ao Eng. Químico Guilherme Duarte e todos os amigos da Engebio pelos ensinamentos transmitidos ao longo do meu estágio e pela amizade que tornava os dias mais divertidos.

Aos amigos da UFRGS, principalmente aos que chegaram até aqui comigo, obrigada pelo companheirismo ao longo do curso, que esta amizade perdure ao longo de nossas vidas.

À Jaque e Tati Benvenuti pelos anos de moradia, parceria e amizade.

Às meninas de Lajeado, pela amizade de anos e pelos momentos de ausência compreendidos.

A Deus por todas as apelações atendidas durante o curso.

Resumo

A crescente preocupação com a escassez e com a qualidade da água no mundo vem aumentando o desenvolvimento e a busca por tecnologias alternativas para minimizar esta situação. O reuso tem apresentado um importante papel na diminuição da demanda de água principalmente para a agricultura e indústrias. Neste trabalho, propõe-se a utilização da técnica de ultrafiltração como etapa de polimento no tratamento de um efluente hospitalar, com o objetivo de atender aos padrões internacionais de reuso. Para caracterização do efluente e avaliação da eficiência do tratamento proposto, foram avaliados os parâmetros físico-químicos DBO, DQO e turbidez, além de análises microbiológicas de coliformes termotolerantes e *E. coli*. Para a realização dos experimentos utilizou-se uma membrana de poliétersulfona (PES) com massa molar de corte de 10 kDa. Os experimentos foram realizados em um sistema de filtração com módulo de membrana plana, a uma pressão de trabalho de 4 bar. A membrana de UF foi caracterizada quanta a sua massa molar de corte, obtendo uma média de 96,75% de retenção para uma solução de Polietilenoglicol 10.000. Após os experimentos de UF com o efluente hospitalar, foi observada a diminuição da permeância hidráulica das membranas, ocasionando num percentual de *fouling* de até 48% no caso do experimento 2. Em relação às análises físico-químicas, os resultados mostraram já baixas concentrações de DQO, DBO e coliformes termotolerantes na caracterização do efluente hospitalar antes da UF. A ultrafiltração apresentou remoções acima de 75% para turbidez e DQO, e acima de 82% para DBO. Nas análises microbiológicas observou-se que, mesmo após a UF, não foi alcançada a completa remoção de coliformes termotolerantes e *Escherichia coli*. Com exceção dos parâmetros microbiológicos, todos os parâmetros físico-químicos avaliados após a etapa de UF apresentaram-se abaixo dos valores limite estabelecidos pela legislação do estado de Washington nos EUA e pela U.S.EPA, indicando a possibilidade do reuso.

Lista de Figuras

Figura 3.1: Vista aérea da instalação da ETE hospitalar, constituída por cinco tanques fechados.	11
Figura 4.1: Fluxograma simplificado do sistema de ultrafiltração.	13
Figura 5.1: Análise de turbidez do efluente hospitalar recebido, após tratamento biológico.	16
Figura 5.2: Fluxo permeado versus pressão transmembrana para água destilada ($R^2=0,99$) e para o efluente tratado ($R^2= 0,98$).	18
Figura 5.3: Fluxo permeado de água destilada versus pressão transmembrana antes ($R^2= 0,99$) e depois ($R^2= 0,97$) da passagem do efluente no segundo experimento.	19
Figura 5.4: Fluxo permeado de água destilada antes ($R^2= 0,99$) e depois ($R^2= 0,99$) da passagem do efluente no terceiro experimento.	20
Figura 5.5: Fotografia das membranas de UF após o uso, para os três experimentos realizados.	21
Figura 5.6: Comportamento do fluxo de permeado ao longo do tempo do experimento 2	21
Figura 5.7: Comportamento do fluxo de permeado ao longo do tempo do experimento 3	22
Figura 5.8: Resultados de análises de DBO_5 imediata a coleta no hospital e antes e após os experimentos 2 e 3 de UF.	23
Figura 5.9: Resultados de análises de DQO imediata e antes e após os experimentos 2 e 3 de UF.	24
Figura 5.10: Turbidez das correntes de concentrado e permeado para os experimentos 2 e 3.	25
Figura 5.11: Comparação visual do efluente hospitalar após tratamento biológico (esquerda), tratado por UF (centro) e água potável (direita).	25

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Classificação e parâmetros de reuso definidos pela NBR 13969/97.....	4
Tabela 2.2: Parâmetros de reuso urbano não potável do estado de Washington e da U.S.EPA (2012).....	5
Tabela 2.3: Aplicabilidade de membranas.....	9
Tabela 5.2: Resultados microbiológicos do efluente após ETE.....	17
Tabela 5.3: Resultados de retenção observada através da análise de COT	17
Tabela 5.4: Resultados Microbiológicos de Coliformes termotolerantes e <i>Escherichia coli</i> para as amostras coletadas no início (01), meio (02) e fim (03) dos experimentos.....	26

Lista de Símbolos

A – Área da membrana (m^2)

C_A – Concentração corrente de alimentação ($mg.L^{-1}$)

C_p – Concentração corrente de permeado ($mg.L^{-1}$)

J – Fluxo ($L.h^{-1}.m^{-2}$)

J_f – Fluxo final ($L.h^{-1}.m^{-2}$)

J_i – Fluxo inicial ($L.h^{-1}.m^{-2}$)

J_m – Fluxo médio ($L.h^{-1}.m^{-2}$)

P_{final} – Permeância hidráulica final ($L.m^{-2}.h^{-1}.bar^{-1}$)

$P_{inicial}$ – Permeância hidráulica inicial ($L.m^{-2}.h^{-1}.bar^{-1}$)

R – Retenção observada (%)

T – Tempo (h)

V_p – Volume de permeado (L)

Lista de Abreviaturas e Siglas

CF – Coliformes Fecais

COT – Carbono Orgânico Total

CT_{er} – Coliformes Termotolerantes

Da - Daltons

DBO – Demanda Biológica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Efluentes

MBR – Biorreator com Membranas

MF – Microfiltração

NF – Nanofiltração

NMP – Número Mais Provável

OI – Osmose Inversa

OMS – Organização Mundial de Saúde

PEG – Polietilenoglicol

PES - Poliestersulfona

PSM – Processos de Separação por Membranas

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais

SS – Sólidos Suspensos

SSD – Sólidos Suspensos Dissolvidos

SST – Sólidos Suspensos Totais

UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket em português (Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo)

UF – Ultrafiltração

UFC – Unidade Formadora de Colônias

UV – Ultravioleta

1 Introdução

O Brasil ainda não apresenta diretrizes ou legislação com parâmetros adequados para a reutilização de efluentes urbanos. A legislação existente limita-se a indicar as modalidades de reuso. Porém, o cenário de escassez vem se tornando cada vez mais comum em algumas regiões do país, exigindo que os órgãos governamentais adotem alternativas que revertam ou minimizem esta situação. Além da escassez, a constante poluição dos corpos hídricos pelo lançamento de efluentes urbanos sem o adequado tratamento, contribui para a diminuição da qualidade da água disponível para consumo.

As diretrizes propostas pelo órgão de proteção ambiental americano U.S.EPA e pela legislação de alguns estados, como a Califórnia e a Flórida, nos EUA são referências internacionais de padrões de reuso seguidas por diversos países. Os parâmetros estabelecidos por estas diretrizes são classificados de acordo com o tipo de aplicação do efluente de reuso, sendo mais ou menos rigorosas dependendo da atividade.

Os efluentes hospitalares contêm altas concentrações de compostos provenientes de fármacos e microrganismos resistentes e, muitas vezes, são lançados nos corpos receptores sem nenhum tipo de tratamento prévio, comprometendo o ambiente aquático. Em alguns casos, mesmo após tratamento, são novamente descartados, sem avaliar a possibilidade da sua reutilização. Ainda, poucos estudos caracterizam efetivamente a composição destes efluentes, sendo que alguns autores comparam o efluente hospitalar ao efluente doméstico, principalmente quanto às suas características físico-químicas.

Os Processos de Separação por Membranas (PSM) estão sendo cada vez mais aplicados em tratamento de efluentes. Dentre os processos existentes podem ser citados a microfiltração (MF) e a ultrafiltração (UF) como as técnicas mais utilizadas, uma vez que promovem a retenção de sólidos suspensos, matéria orgânica e microrganismos. Os processos de UF são citados por alguns autores como uma operação de clarificação e desinfecção por membranas por permitirem a retenção de solutos maiores presentes no efluente, como macromoléculas, e microrganismos, como bactérias e vírus.

Desta forma, o presente trabalho propõe a utilização da técnica de ultrafiltração como etapa de polimento no tratamento de um efluente hospitalar, após o tratamento biológico convencional com fase anaeróbia e aeróbia existente no hospital. A aplicação da técnica de UF tem por objetivo atender os limites internacionais para o reuso deste efluente, como por exemplo, em descargas de vasos sanitários, irrigação paisagística, limpeza de pisos entre outras atividades que não necessitem de água com nível de potabilidade.

Entre os objetivos específicos do trabalho, estão a caracterização do efluente hospitalar utilizado e do permeado proveniente da ultrafiltração quanto às suas características físico-químicas e microbiológicas, para avaliação da eficiência do tratamento; e a avaliação da tendência ao *fouling* das membranas de UF.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Escassez de água e reuso

A escassez de água no mundo vem tornando-se cada ano mais grave gerando grande preocupação em diversos países. Alguns fatores como a crescente demanda de água, gerada pelo aumento populacional e por alguns setores da economia, juntamente com a má qualidade em que as águas servidas retornam para os recursos hídricos, torna este cenário ainda mais preocupante.

Mundialmente o consumo de água tem se mostrado mais elevado para o setor agrícola, que em alguns casos representa 70% da demanda de água doce, enquanto a indústria e o consumo doméstico representam 20 e 10%, respectivamente. Esse percentual de consumo pode ser ainda maior, podendo alcançar 90% para a agricultura em países em desenvolvimento, onde a economia é menos representada pelo setor industrial (FAO, 2014).

No Brasil, alguns programas de incentivo ao desenvolvimento tecnológico e de novas culturas de consumo, vêm sendo desenvolvidos pelos governos e órgãos não governamentais, para melhorar a conservação e evitar que a escassez piore em algumas regiões.

O lançamento de efluentes domésticos e industriais em corpos d'água, sem um tratamento adequado, contribui para o agravamento desta situação. Altas cargas orgânicas em conjunto com outros micropoluentes podem tornar a água imprópria para o consumo humano, prejudicando o tratamento das companhias de abastecimento de água potável.

Segundo a última Pesquisa Nacional de Saneamento Básico realizada em 2008 (PNSB, 2010), apenas 28,5% dos municípios brasileiros realizou o tratamento de seu esgoto, o que impacta negativamente na qualidade de nossos recursos hídricos. Mesmo na região Sudeste, onde 95,1% dos municípios coletam esgoto, menos da metade desses (48,4%) o trataram.

Entre as tecnologias que vêm sendo desenvolvidas para combater a situação de escassez, o reuso de água tem se mostrado um importante instrumento de gestão ambiental dos recursos hídricos e detentor de tecnologias já consagradas para sua adequada utilização (PHILIPPI JR, 2003).

A definição de reuso de água é classificada de diferentes formas na literatura. A Organização Mundial da Saúde (1973) define três formas de reuso:

- *reuso indireto*: quando a água já utilizada para uso doméstico ou industrial é reutilizada a jusante de seu descarregamento, na forma diluída;

- *reuso direto*: quando o esgoto tratado é reutilizado de forma planejada para irrigação, usos industriais, recarga de aquíferos e/ou água potável;
- *reciclagem interna*: quando a água é reutilizada internamente as instalações industriais, tendo como objetivo a economia de água e o controle da poluição.

WESTERHOFF (1984, apud BREGA FILHO & SANCHES MANCUSO, 2003), classifica reuso de água em duas grandes categorias práticas: potável e não potável.

Reuso potável: pode ser considerado direto quando o esgoto tratado é reutilizado diretamente no sistema de água potável, ou indireto, quando o efluente tratado é disposto em águas superficiais ou subterrâneas para diluição, para então ser captado, tratado e novamente utilizado como água potável.

Reuso não potável: é classificado de acordo com a finalidade do reuso, podendo ter fins agrícolas, industriais, recreacionais, domésticos e de manutenção de vazões.

O reuso de efluente tratado para fins não potáveis é considerado vital para aliviar a demanda de fornecimento de água e proteger o meio ambiente de poluições (MUTHUKUMARAN et al., 2011).

Porém, apesar de ser tecnicamente possível o reuso de águas servidas, alguns pontos devem ser considerados, como: o aceite ou a rejeição da população em consumir a água reciclada, a sua qualidade final, além do seu custo de produção (JORDÃO & PESSÔA, 2014).

2.2 Regulamentação para reuso de água no Brasil

Atualmente, no Brasil, os padrões de tratamento de efluente são definidos com o objetivo de atingir parâmetros de lançamento em corpos d'água. O país ainda não possui uma legislação com critérios de qualidade voltados para o reuso. A resolução 54/2005 de 28.11.2005 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos se limita a indicar as modalidades de reuso, apresentando diretrizes e critérios gerais, não estabelecendo parâmetros e padrões de qualidade.

A norma NBR 13.969/97 que trata sobre tanques sépticos e unidades de tratamento complementares traz o item "Reuso Local", o qual regulamenta a possibilidade de reuso do efluente tratado em tanques sépticos e nas respectivas unidades de tratamento complementar. Também prevê o possível uso desses efluentes, assim como estabelece quatro classes de reuso conforme apresentado na Tabela 2.1, apresentando determinados usos previstos e os respectivos padrões de qualidade a serem seguidos.

Tabela 2.1: Classificação e parâmetros de reuso definidos pela NBR 13969/97

Classe	Finalidade	Turbidez uT	CF NMP/100mL	SDT mg/L	Cloro residual mg/L	pH
1	Lavagem de carros e outros usos que requerem contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes.	5	200	200	0,5-1,5	6-8
2	Lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes.	5	500	-	>0,5	-
3	Reuso em descargas de vasos sanitários.	10	500	-	-	-
4	Reuso nos pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistemas de irrigação pontual. (*)	-	5000	-	-	-

(*) Para a Classe 4, as aplicações devem ser interrompidas pelo menos 10 dias antes da colheita.

Algumas diretrizes sobre reuso também foram propostas pelo Programa de Pesquisas em Saneamento Básico PROSAB (2006), hoje extinto. Estas diretrizes apresentam parâmetros para o reuso agrícola, urbano e em piscicultura.

Para o reuso urbano de esgotos sanitários da categoria uso predial (descarga de vasos sanitários) a diretriz estabelece um limite de Coliformes Termotolerantes de até 1.000 NMP/100 mL e ovos de helmintos de até 1 ovo/L. Ainda, considera que para concentrações de DBO e NO_3 menores que 50 e 15 mg/L, respectivamente, e potencial de oxi-redução menor ou igual a 45 mV, não é esperada a geração de odores no sistema de armazenamento.

Para usos irrestritos em parques, irrigação paisagística ou ornamental, os parâmetros a serem seguidos são: $\text{CT}_{er} < 200/100\text{mL}$, ovos de helmintos $< 1/\text{L}$ e turbidez menor do que 5 uT, não apresentando restrições para DBO, DQO e SST, devendo o efluente apresentar uma qualidade estética não objetável.

Como os parâmetros existentes hoje no país ainda não foram devidamente regulamentados é comum a utilização de legislações e diretrizes internacionais como as estabelecidas pelo Órgão de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S.EPA).

2.3 Referências Internacionais de reuso

Os estados da Califórnia, Flórida, Texas e Arizona, nos Estados Unidos, possuem legislações de reuso que são utilizados como referências internacionais. O estado da Califórnia foi o pioneiro a adotar padrões para reuso de água em atividades agrícolas em 1918. Em 2003 a Califórnia e a Flórida, juntas, foram responsáveis por uma vazão de reuso de 1,5 bilhões de metros cúbicos por ano (JORDÃO & PESSÔA, 2014).

A Agência de Proteção Ambiental Americana (U.S.EPA) criou, em 1992, diretrizes conhecidas pelo termo inglês *Guidelines* para o reuso de água. Estas diretrizes trazem sugestões de parâmetros que podem ser adotados para as diferentes aplicações da água reciclada. Desde a sua criação as *Guidelines* sofreram duas revisões, sendo a última em 2012. A Tabela 2.2 apresenta a relação entre os parâmetros de reuso exigidos pela legislação do estado de Washington e os parâmetros sugeridos pela U.S.EPA.

Tabela 2.2: Parâmetros de reuso urbano não potável do estado de Washington e da U.S.EPA (2012)

Parâmetros de reuso urbano não potável	Washington	U.S.EPA
Tratamento	<ul style="list-style-type: none"> • Oxidação • Coagulação • Filtração • Desinfecção 	<ul style="list-style-type: none"> • Tratamento secundário* • Filtração • Desinfecção
pH	-	6,0 – 9,0
DBO (mg/L)	30	≤ 10
Turbidez (NTU)	2 (média) 5 (máximo)	≤ 2
Indicador Bacteriológico	Coliformes totais 2,2/100 mL (média de 7 dias) 23/100 mL (máximo)	Não detectado
Cloro residual (mg Cl ₂ /L)	> 1 tempo de contato de 30 minutos	1 quando usado como desinfetante primário

*Tratamentos secundários incluem processos de lodo ativado, filtros biológicos, contadores biológicos rotatórios e sistemas de lagoas de estabilização. O efluente resultante não deve exceder 30 mg/L tanto de DBO como de SS.

Os parâmetros exigidos nos Estado Unidos variam conforme o estado como, por exemplo, a Flórida, que além dos parâmetros citados na Tabela 2.2, ainda exige um controle de patogênicos determinando uma amostra a cada dois anos de *Giardia* e *Cryptosporidium* para estações com vazão maiores que 1 milhão de galões por dia. Outros estados ainda podem determinar limites para nitrogênio.

A Organização Mundial da Saúde (OMS) publicou em 2006 a terceira revisão de suas diretrizes de reuso de efluentes tratados para agricultura e aquacultura, as quais são menos exigentes que as estabelecidas pela U.S.EPA, tornando-as mais adequadas para países em desenvolvimento. Como exemplo, para efluentes utilizados em irrigação de culturas consumidas cruas, campos esportivos ou parques públicos, a qualidade microbiológica requerida pela OMS é igual ou inferior a 1000 NMP CT/100 mL, e ovos de helmintos igual ou inferior a 1 ovo/L, (JORDÃO & PESSÔA, 2014).

Para que o efluente a ser reutilizado atinja os parâmetros de qualidade requeridos para sua finalidade, é necessário, primeiramente, o conhecimento das suas características, para então, determinar o melhor tratamento a ser adotado.

2.4 Características e tratamento do efluente hospitalar

O efluente hospitalar assemelha-se ao efluente doméstico quanto as suas características, como: concentração de matéria orgânica, coliformes e pH. Entretanto, apresenta elevadas concentrações de fármacos, desinfetantes e compostos químicos, além de organismos patogênicos multirresistentes a antimicrobianos (SILVEIRA, 2004).

2.4.1 Características físico-químicas

SILVEIRA (2004) caracterizou o efluente bruto do Hospital de Clínicas de Porto Alegre coletando amostras em três diferentes momentos do dia. As análises de DQO e DBO apresentaram altas oscilações na concentração resultando em um valor médio de 577,8 e 350,0 mg.L⁻¹, com um desvio padrão de 180,6 e 59,7, respectivamente. O pH monitorado durante o período experimental apresentou média de 6,7 com valor máximo de 7,5 e mínimo de 5,4, mantendo-se próximo a faixa neutra. O efluente hospitalar após tratamento e desinfecção com hipoclorito de sódio apresentou uma turbidez entre 1 e 2 NTU e uma concentração de sólidos em suspensão entre 12 e 26 mg.L⁻¹.

Em seus experimentos com MBR, na Suíça, KOVALOVA (2012), também obteve valores de pH próximos a neutralidade (7,8) e condutividade de 1100 µS.cm⁻¹ para o efluente hospitalar.

Parâmetros como turbidez e sólidos suspensos são indicadores do aspecto estético da água e são cada vez mais aceitos como parâmetros físico-químicos para o monitoramento de qualidade na água de reuso (ARÉVALO et al., 2008).

2.4.2 Característica toxicológicas

A toxicologia de fármacos foi avaliada por ESCHER et al. (2010) em efluente gerado por um hospital geral na Suíça, onde cerca de 2,3 kg de remédios foram excretados por

leito em um ano. Destes, 58% eram meio de contraste, 19% eram remédios laxantes, 16% antibióticos e 8% outros tipos de medicamentos. Os três medicamentos que apresentaram o maior coeficiente de risco toxicológico, sendo que se mostraram presentes no efluente mesmo após o tratamento biológico convencional, foram: *Amiodarone*, utilizado no tratamento de arritmias cardíacas; *Clotrimazole*, utilizado no tratamento de dermatomycoses; e *Ritonavir*, utilizado no tratamento de pacientes com HIV.

Meios de contraste iodados são utilizados para realçar o contraste em partes específicas do corpo em exames de imagem como ressonância magnética e radiografia. São utilizados em altas quantidades, e excretados pelo organismo. Sua estrutura é similar aos compostos resistentes ao tratamento biológico. Por si só, os meios de contraste iodados não são tóxicos, porém, são persistentes quando eliminados para o meio ambiente, podendo formar subprodutos clorados tóxicos (KOVALOVA et al., 2012).

2.4.3 Características microbiológicas

SILVEIRA (2004) obteve valores de coliformes totais na faixa de 10^6 e 10^7 NMP. 100 mL^{-1} e 10^5 a 10^6 NMP. 100 mL^{-1} para coliformes fecais de amostras de efluente hospitalar bruto. Estes valores se aproximam da faixa caracterizada para efluentes domésticos, que ficam entre 10^7 a 10^{10} NMP. 100 mL^{-1} para coliformes totais e 10^6 a 10^8 NMP. 100 mL^{-1} para coliformes fecais (METCALF & EDDY, 2003).

Um estudo comparando águas residuárias de serviço da saúde com águas residuárias urbanas demonstrou que não ocorreu diferença significativa nas análises de coliformes fecais e *Escherichia coli* entre os efluentes (GUEDES e VON SPERLING, 2005 apud PRADO, 2007).

2.4.4 Tratamento de efluentes hospitalares

Atualmente poucos hospitais no Rio Grande do Sul possuem um sistema de tratamento para seus efluentes. Muitos hospitais ainda lançam seus esgotos nas redes coletoras públicas onde o efluente hospitalar é diluído com os demais esgotos e tratado nas estações municipais, quando estas existem.

O efluente hospitalar foi analisado em quatro diferentes cenários por ESCHER et al. (2010), sendo eles: o efluente hospitalar bruto sem qualquer diluição, o efluente hospitalar após tratamento biológico convencional, e o efluente hospitalar diluído com outros esgotos antes e depois de uma estação de tratamento. Os resultados encontrados mostraram, como esperado, uma maior concentração de fármacos no efluente hospitalar bruto, tendo em vista que o tratamento biológico convencional não se mostrou eficiente na degradação da maioria dos fármacos analisados.

PRADO (2007) avaliou a remoção de microrganismos de um tratamento anaeróbio composto por um reator UASB em série com três filtros anaeróbios. O sistema não apresentou eficiência suficiente na eliminação de coliformes totais e fecais para o lançamento em corpos hídricos Classe II, conforme Resolução CONAMA 357/2005. Porém, os filtros anaeróbios apresentaram remoção do vírus da Hepatite A do efluente.

O tratamento biológico de efluentes hospitalares pode sofrer inibições da biomassa devido a desinfetantes e agentes antibactericidas presentes em alta concentração no efluente hospitalar em comparação ao efluente doméstico, como alcoóis, aldeídos e cetonas, utilizados para desinfecção em grande quantidade (KOVALOVA et al., 2012).

Segundo KOVALOVA et. al (2012), o tratamento de efluente hospitalar por MBR não é suficiente para completa eliminação de fármacos alvos, especialmente meios de contraste, antibióticos e anti-epiléticos. Porém, o tratamento biológico é necessário para a eliminação de DQO do efluente. Após a passagem do efluente pelo biorreator, foi alcançada uma eficiência de remoção de 94% e 92% para carbono orgânico dissolvido (COD) e DQO, respectivamente. Para um melhor tratamento de efluentes hospitalares é recomendado uma complementação no tratamento como processos oxidativos, adsorção por carvão ativado, entre outros.

2.5 Sistemas complementares para reuso de água

Um tratamento secundário aprimorado é necessário quando se deseja aplicar um sistema complementar de reuso. Atualmente já existem diversas técnicas que podem ser empregadas para o tratamento de efluentes sanitários com a finalidade de reutilizá-los. O nível da tecnologia empregada varia dependendo da qualidade necessária para a água de reuso.

A cloração é o processo de desinfecção mais utilizado por apresentar baixos custos para o processo, porém sabe-se que compostos clorados tóxicos podem ser gerados durante o tratamento. PRADO (2004) elevou em 84% a toxicidade do efluente após a adição de 5 mg Cl L⁻¹ utilizando hipoclorito de sódio.

KOVALOVA et. al (2013) avaliaram a remoção de micropoluentes de efluente hospitalar após o tratamento em MBR utilizando três processos complementares: ozonização, luz ultravioleta (UV) e adsorção em carvão ativado em pó. A remoção de DQO apresentou diferença significativa entre os métodos, sendo que o carvão ativado foi capaz de remover até 70%, enquanto que a UV e o O₃ removeram menos de 15%. Na remoção de micropoluentes, nenhum dos tratamentos apresentou eficiência na remoção de meios de contraste iodados; porém, para os demais fármacos, a ozonização e a adsorção em carvão ativado mostraram eliminação de 90% e 86%, respectivamente, e a radiação UV removeu apenas 33%. Para a remoção de químicos industriais o processo de luz

ultravioleta também apresentou a menor eficiência (6%) enquanto as demais apresentaram 98% (O₃) e 91% (carvão ativado).

Os Processos de Separação por Membranas (PSM) também são uma alternativa de tratamento complementar, sendo capazes de gerar efluentes de alta qualidade, próprios para fins nobres. As membranas funcionam como uma barreira seletiva que separa duas fases, restringindo, total ou parcialmente, o transporte de uma ou mais substâncias presentes nas fases. Os processos mais empregados no tratamento de efluentes são os que utilizam a diferença de pressão como força motriz no processo. Na Tabela 2.3 são apresentados estes processos, juntamente com alguns dos principais constituintes eliminados por eles.

Tabela 2.3: Aplicabilidade de membranas

Processos de separação por membranas	Constituintes eliminados
Microfiltração (MF)	SST, bactérias, protozoários, oocistos, ovos de helmintos.
Ultrafiltração (UF)	Macromoléculas, matéria orgânica biodegradável, poluentes prioritários orgânicos e vírus.
Nanofiltração (NF)	Dureza, metais pesados, nitratos compostos orgânicos sintéticos, SSD.
Osiose Inversa (OI)	Íons monovalentes, técnica muito utilizada na dessalinização e desmineralização de águas.

Fonte: Adaptação JORDÃO & PESSOA – Tratamento de Esgotos Domésticos, 2014

2.6 Sistemas de Ultrafiltração

Comparados aos processos de tratamento convencionais, os PSM apresentam diversas vantagens, como, por exemplo: economia de energia, por não ocorrer mudança de fase; seletividade; possibilitam operação em temperatura ambiente; são relativamente simples tanto no ponto de vista operacional como de escalonamento.

Os processos de MF e UF são empregados no tratamento avançado de efluentes e são eficientes para a remoção de sólidos suspensos, matéria orgânica e para desinfecção, proporcionando uma elevada qualidade do efluente final. A MF é adequada para a remoção de sólidos suspensos, incluindo microrganismos maiores, tais como protozoários e bactérias. A UF é utilizada para a remoção de vírus e macromoléculas orgânicas com massa molar (MM) entre 10³ a 10⁶ Da.

As membranas de ultrafiltração apresentam uma estrutura porosa e assimétrica, com poros entre 1 e 100 nm. Caracterizam-se pela massa molar de corte que pode variar de 1

a 500 KDa. Em processos de UF aplica-se uma faixa de pressão entre 1 e 10 bar como força motriz (MULDER, 1996; CHERYAN,1986).

Tipicamente a eficiência do processo de separação por membranas aplicada ao tratamento de efluentes é medida pela redução de sólidos em suspensão, matéria orgânica (representada pela DBO e DQO), organismos patogênicos (representados pelos coliformes totais e fecais), sólidos dissolvidos e turbidez, como nos demais processos de tratamento.

Os sistemas de separação com membranas podem ser aplicados de duas formas distintas no tratamento de efluentes: internamente ao tratamento biológico, como um biorreator com membranas (MBR), normalmente aplicado em conjunto com lodos ativados; ou como tratamento terciário, para obtenção de efluentes com alta qualidade final.

Os processos com MBR apresentam grandes vantagens em relação aos métodos convencionais de tratamento, reduzindo a quantidade de lodo gerada no processo e diminuindo o espaço físico requerido por não necessitar de etapas como a decantação secundária que ocorre no processo convencional. Porém, uma desvantagem deste processo é o *fouling* causado por materiais orgânicos e inorgânicos, que diminui o desempenho da membrana ao longo do tratamento, com a diminuição do fluxo (MUTHUKUMARAM et. al, 2011).

ARÉVALO et al. (2008) comparam o reuso de efluentes depois de um sistema terciário de ultrafiltração e após um biorreator de membranas, mostrando que o *fouling* em um MBR aumenta progressivamente, enquanto que no tratamento terciário de ultrafiltração os valores são similares ao longo de todo experimento. Outros aspectos avaliados pelos autores são DQO, turbidez, cor, sólidos suspensos, coliformes fecais e *E. coli*. Seus estudos mostram que a membrana atinge um desempenho de 27% para a remoção de DQO devido a retenção do material particulado. Porém a qualidade do sistema terciário em relação à DQO depende fortemente do tratamento biológico. No que diz respeito à desinfecção o tratamento terciário de UF apresenta excelente remoção de coliformes e *E. coli*, removendo até 100% dos microrganismos.

Uma comparação realizada entre processos de UF e MF mostrou que a UF é capaz de eliminar parâmetros como fósforo e nitrogênio de efluentes, o que o processo de MF não é capaz. Isto deve ao fato de P e N formarem compostos de macromoléculas, que são retidas pelos poros das membranas de ultrafiltração (ALONSO et. al., 2001).

3 Efluente Hospitalar

As amostras de efluente hospitalar utilizadas neste trabalho foram doadas por um hospital localizado no município de Caxias do Sul – Rio Grande do Sul. O hospital possui uma estação de tratamento de efluente sanitário compacta com capacidade para tratar 250 metros cúbicos de efluente diariamente. A estação está inserida no subsolo de um novo prédio administrativo do hospital como mostra a Figura 3.1 e possui um sistema de tratamento fechado para evitar a geração de odores. A ETE é responsável pelo tratamento de todo efluente cloacal gerado no hospital, sendo constituído basicamente por: descarga de vasos sanitários, água residual de chuveiros, água residual da lavanderia, água utilizada nos refeitórios e para limpeza de pisos.

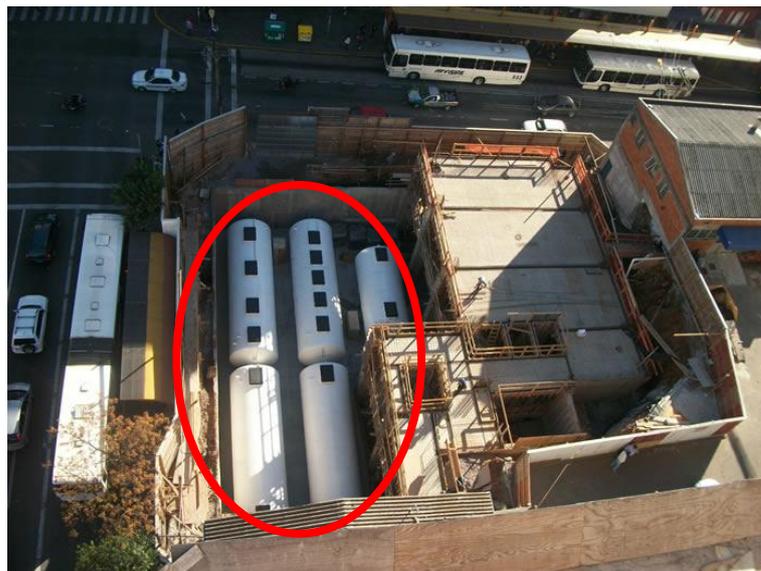


Figura 3.1: Vista aérea da instalação da ETE hospitalar, constituída por cinco tanques fechados.

Atualmente o efluente hospitalar tratado é lançado na rede coletora municipal, após passar por um sistema convencional de tratamento de efluente sanitário composto pelas seguintes etapas, brevemente descritas a seguir.

- 1- Gradeamento: onde os sólidos grosseiros são retidos para evitar a danificação de equipamentos do sistema.
- 2- Etapa anaeróbia: os microrganismos presentes no tratamento degradam a matéria orgânica sem a presença de oxigênio. Neste meio estão presentes bactérias fermentativas, acidogênicas, acetogênicas, metanogênicas e sulfetogênicas. Esta etapa é responsável por 30% de remoção da matéria orgânica.
- 3- Etapa aeróbia: responsável pela oxidação de matéria orgânica remanescente da etapa anaeróbia com o uso de oxigênio molecular. É composta basicamente por protozoários, fungos e bactérias.
- 4- Decantação secundária: clarificação do efluente através da sedimentação do lodo.
- 5- Desinfecção: remoção de microrganismos remanescentes utilizando cloração por pastilhas de hipoclorito de cálcio.

4 Materiais e Métodos

Neste capítulo estão descritos os materiais e métodos utilizados durante a realização do trabalho. Aborda a caracterização do efluente hospitalar após o tratamento biológico realizado pelo próprio hospital, a caracterização da membrana de ultrafiltração escolhida, o sistema de filtração com membranas utilizado como tratamento terciário, além dos métodos de análise adotados. Os experimentos de ultrafiltração foram realizados no Laboratório de Separação com Membranas da UFRGS (LASEM).

4.1 Caracterização do efluente hospitalar

A caracterização do efluente hospitalar foi realizada com o objetivo de melhor conhecer o efluente utilizado nos experimentos, sendo que poucos dados sobre eles são encontrados na literatura. Além disso, por se tratar de um efluente de tratamento biológico, o qual depende de uma boa operação e pode facilmente sofrer desestabilização dos microrganismos responsáveis pelo tratamento, pode resultar em amostras com diferentes características. Os microrganismos, tanto anaeróbios como aeróbios, são sensíveis a mudanças de temperatura e oscilações de carga orgânica no tratamento.

Para a caracterização do efluente determinaram-se parâmetros físico-químicos de DBO, DQO e turbidez. Ainda, foram realizadas análises microbiológicas de Coliformes totais e *Escherichia coli*.

O efluente utilizado para a realização do trabalho foi coletado no final do tratamento biológico da ETE do hospital, após passar pela desinfecção (etapa 5 descrita no Capítulo 3), e analisado em dois momentos: o primeiro, logo após a coleta, sendo o hospital o responsável pelas análises; e o segundo, quatro dias após as coletas, paralelamente às análises do efluente ultrafiltrado.

Foram recebidas três amostras do efluente, coletadas em 18 de setembro, 02 e 14 de outubro de 2014. A primeira amostra recebida foi utilizada para avaliar o comportamento da membrana com o efluente hospitalar e escolher a pressão de operação do sistema. Com a segunda e a terceira amostras foram realizados os experimentos completos de UF e feitas as caracterizações iniciais e finais para avaliação da eficiência do tratamento.

O efluente foi conservado com HCl (pH 3) e sob refrigeração, a uma temperatura de 15°C, para evitar sua deterioração. Antes da realização de cada experimento, para que fosse utilizado nas mesmas condições de trabalho da estação de tratamento do hospital, as amostras foram retiradas da refrigeração até atingirem a temperatura ambiente e neutralizadas quanto ao seu pH utilizando-se NaOH, aproximando-se do pH natural do efluente.

4.2 Ultrafiltração

4.2.1 Equipamento

O sistema de ultrafiltração utilizado encontra-se instalado no Laboratório de Separação por Membranas (LASEM) e é composto por: um vaso de alimentação

encamisado com capacidade para 4,5 litros, uma bomba centrífuga de 1,0 (um) cv e 1720 RPM, um módulo para membrana plana com alimentação tangencial e área útil de 61 cm², uma válvula a montante do módulo para recirculação e outra a jusante, ambas para controle de pressão, um *by-pass* e dois manômetros, na entrada e saída do módulo. O sistema foi operado em modo batelada, recolhendo o permeado e retornando o concentrado para o vaso de alimentação. A Figura 4.1 apresenta o sistema descrito de forma simplificada.

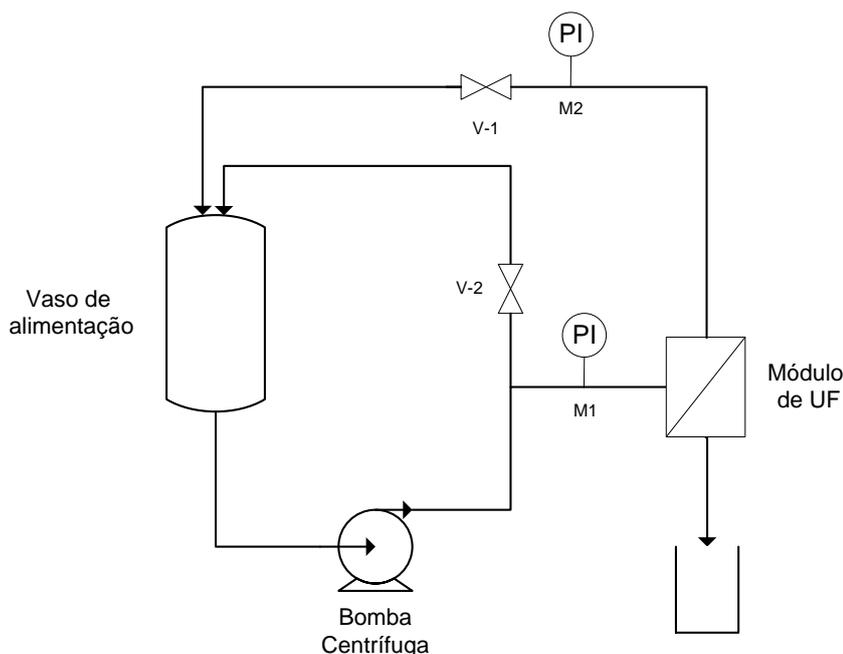


Figura 4.1: Fluxograma simplificado do sistema de ultrafiltração.

4.2.2 Caracterização da membrana

A ultrafiltração foi realizada com uma membrana plana de poliestersulfona (PES), marca Synder Filtration, com massa molar de corte de 10 kDa, suportando uma faixa de pH de 1,8 a 11 na temperatura ambiente. As demais condições limites de operação, segundo o fabricante, são: temperatura máxima de 50°C e pressão máxima de 8,3 bar. Ainda, cabe salientar que para cada experimento a membrana foi substituída, compactada até fluxo de permeado constante e caracterizada.

A compactação da membrana é necessária antes de cada experimento, pois devido ao aumento de pressão no sistema a membrana sofre um adensamento na sua microestrutura causando uma diminuição do fluxo de permeado. A compactação prévia da membrana com água destilada evita que este decaimento do fluxo seja atribuído ao *fouling*.

A compactação foi realizada na pressão máxima atingida pelo sistema, de 6 bar, superior a pressão de trabalho, para evitar que a membrana seja compactada durante a realização do experimento e, com isso, prejudicar a avaliação dos resultados.

A membrana de ultrafiltração também foi caracterizada quanto a sua massa molar de corte (MMC). Para isso, avaliou-se a retenção, que representa a fração de um componente em solução que é retida pela membrana.

Como a MMC era de 10 kDa, utilizou-se uma solução de 1% de polietilenoglicol (PEG) 10.000 e analisou-se a fração de carbono orgânico total (COT) das amostras de permeado em relação as amostras de concentrado, conforme a Equação 4.1:

$$R = 1 - \frac{C_p}{C_A} \quad (4.1)$$

onde R é a retenção observada, C_A e C_p são as concentrações das correntes de alimentação e de permeado, respectivamente.

A permeância hidráulica da membrana, antes e após a realização de cada experimento, também foi avaliada, determinando-se o coeficiente de permeância hidráulica. Para isso, o fluxo de permeado foi medido nas pressões de 2, 3, 4, 5 e 6 bar, através do cômputo de tempo para a coleta de 25 mL de permeado medidos em proveta graduada, conforme equação 4.2:

$$J = \frac{V_p (L)}{A (m^2) \times t (h)} \quad (4.2)$$

onde V_p é o volume do permeado coletado, A é a área filtrante da membrana e t é o tempo de coleta do volume de permeado.

4.2.3 Experimentos de UF

A ultrafiltração foi realizada em batelada, com a utilização de 4 litros do efluente. A pressão de trabalho escolhida foi de 4 bar, por apresentar-se abaixo da pressão crítica de trabalho, evitando uma rápida formação de *fouling* sobre a superfície da membrana.

A temperatura de operação do sistema foi mantida constante em 25 °C utilizando-se a camisa de resfriamento do vaso de alimentação que se encontrava conectada a um banho termostático. Os experimentos tiveram, em média, uma duração de 4 horas; tempo para o recolhimento da quantidade necessária de permeado para realização das análises.

Foram coletadas amostras de 100 mL para as análises microbiológicas e de turbidez, tanto da corrente de permeado como do concentrado. As coletas foram realizadas em três momentos: início, meio e fim do experimento. O primeiro ponto após 15 (quinze) minutos do início da filtração, o segundo após 165 minutos do início e o terceiro no final de toda a coleta.

As amostras de DQO e DBO_5 do permeado foram amostras compostas, coletadas ao longo de todo o experimento, devido a grande quantidade de volume necessária para análise, em relação ao fluxo de permeado do experimento. Para verificação da eficiência de remoção de DQO e DBO pela membrana de UF, as características das amostras foram comparadas com as análises de DQO e DBO do efluente hospitalar antes da UF.

4.2.4 Decaimento do fluxo devido ao *Fouling*

O *fouling* é caracterizado pelo declínio do fluxo de permeado através da membrana com o tempo, causado pelo depósito constante e indesejável de matéria orgânica, inorgânica ou crescimento microbiano (*biofouling*) na superfície e/ou nos poros da membrana (CHERYAN, 1986).

O percentual de *fouling* foi determinado pela razão entre os coeficientes de permeância hidráulica da membrana, medidos antes e após a filtração do efluente, segundo a Equação 4.3:

$$\% \text{ fouling} = \left(1 - \frac{P_{\text{final}}}{P_{\text{inicial}}}\right) \times 100 \quad (4.3)$$

onde P_{final} e P_{inicial} representam a permeância hidráulica após e antes da filtração, respectivamente.

4.3 Parâmetros de reuso utilizados

Os resultados obtidos foram avaliados para atender a legislação do estado de Washington nos Estados Unidos e as diretrizes da U.S.EPA, cujos limites foram apresentados anteriormente na Tabela 2.2, por apresentarem valores mais rigorosos que os estabelecidos pela NBR 13.969/97.

4.4 Métodos Analíticos

As análises de carbono orgânico total foram realizadas na Central Analítica do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, através do analisador Shimadzu TOC-V CSH – combustão catalítica a 680 °C e detector infravermelho não dispersivo.

As análises de DBO₅ e DQO foram analisadas em laboratório contratado. Os métodos analíticos utilizados seguiram os padrões do *Standard Methods 22st* – Método 5210 B [PNT017-EF] com limite de detecção de 0,2 mg/L e Método 5220 B [PNT013-EF], com limite de detecção de 4,0 mg/L, para os respectivos parâmetros.

Para as medidas de turbidez, o equipamento utilizado foi o turbidímetro da marca Policontrol, modelo AP2000, devidamente calibrado antes da realização de cada análise.

As análises microbiológicas foram realizadas pelo Instituto de Ciências Básicas da Saúde (ICBS) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Utilizou-se o método de membrana filtrante em ágar LES-Endo e o resultado foi determinado pela média da contagem em duplicata das sementeiras.

5 Resultados e Discussão

5.1 Caracterização do efluente hospitalar tratado

A Tabela 5.1 apresenta os resultados obtidos para a análise de DBO e DQO do efluente hospitalar após o tratamento biológico. Foram recebidos 3 lotes de efluente, um para cada experimento realizado, denominados Coleta 1, 2 e 3. As análises imediatas representam as análises realizadas pelo hospital no dia da coleta e as demais foram realizadas por laboratório contratado, após a realização dos experimentos.

Tabela 5.1: Resultados análises físico-químicas para DBO₅ e DQO

Análises	DBO ₅ (mg/L) Imediata	DQO (mg/L) Imediata	DBO ₅ (mg/L) LASEM	DQO (mg/L) LASEM
Coleta 1	0	27	20,1	43,0
Coleta 2	52	97	33,3	81
Coleta 3	39	114	20,9	60,8

Os resultados obtidos mostraram que o efluente analisado imediatamente após a saída da desinfecção da ETE já apresentava resultados muito baixos tanto para DBO como para DQO. Para o lançamento de efluentes líquidos em águas superficiais o efluente hospitalar na saída da estação de tratamento do hospital já atende os limites estabelecidos pela Resolução CONSEMA 128/2006, que determina um limite de 100 e 300 mg O₂/L de DBO₅ e DQO, respectivamente, para uma vazão de 250 m³.dia⁻¹.

Tanto a DBO como a DQO sofreram uma diminuição de concentração durante a conservação do efluente, porém o contrário foi observado na primeira amostra.

Os valores resultantes da caracterização quanto à turbidez estão apresentados na Figura 5.1.

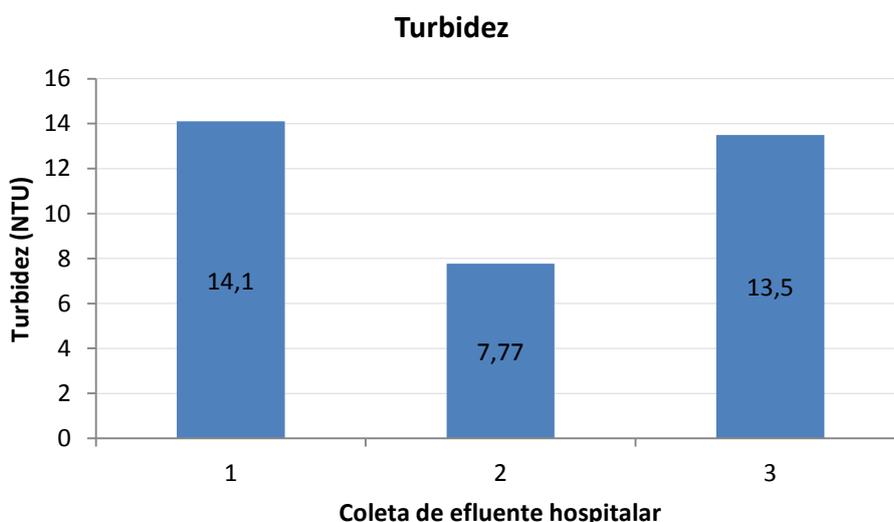


Figura 5.1: Análise de turbidez do efluente hospitalar recebido, após tratamento biológico.

A turbidez do efluente hospitalar tratado foi superior à turbidez obtida por SILVEIRA (2004), após o tratamento com contadores biológicos e desinfecção com cloração do efluente do hospital de Clínicas de Porto Alegre.

Ainda, observa-se que estes valores, tanto de turbidez como de DQO e DBO, são superiores aos permitidos pela legislação de Washington caso fosse destinado ao reuso, sendo necessária uma etapa adicional de tratamento.

Na Tabela 5.2 são apresentados os resultados microbiológicos de coliformes termotolerantes e *Escherichia coli* obtidos durante a caracterização do efluente final da ETE hospitalar.

Tabela 5.2: Resultados microbiológicos do efluente após ETE

Amostra	Coliformes termotolerantes (UFC/mL)- Análise Imediata	Coliformes termotolerantes (UFC/mL) antes UF	E. Coli (UFC/mL) antes UF
Coleta 1	ND*	3,50E+02	3,25E+02
Coleta 2	7,80E+01	1,04E+03	1,35E+02
Coleta 3	1,30E+02	<1,00E+00	<2,00E+00

*ND – Não Detectado

A primeira análise imediata de coliformes realizada no dia da coleta mostrou a completa eliminação de coliformes pela cloração no final do tratamento da ETE. Houve um aumento de coliformes termotolerantes entre as três coletas, de uma unidade logarítmica entre a segunda e a terceira. Os coliformes termotolerantes analisados antes da UF não apresentaram uma coerência com os resultados imediatos, pois ora são maiores e ora são menores. A *E. coli* apresentou duas unidades logarítmicas de UFC para as duas primeiras coletas e menor que 2 UFC/ml na terceira coleta.

5.2 Retenção observada e Massa Molar de Corte da membrana de UF

Na Tabela 5.3 estão apresentados os resultados obtidos para as análises de carbono orgânico total, durante a caracterização da membrana com uma solução de PEG 10.000, para análise de retenção. A análise de retenção caracteriza a massa molar de corte da membrana para a qual ela possui uma retenção observada superior a 90%.

Tabela 5.3: Resultados de retenção observada através da análise de COT

Pressão (bar)	Amostra concentrado	COT (mg/L)	Amostra permeado	COT (mg/L)	R _{obs} (%)
6	6C	5180	6P	199,3	96,1
5	5C	4928	5P	190,7	96,1
4	4C	5176	4P	158,7	96,9
3	3C	5075	3P	116,8	97,7
2	2C	5061	2P	97,79	98,0

De acordo com os resultados obtidos, para todas as pressões analisadas a retenção ficou acima de 90% para o PEG 10.000, significando que a MMC fornecida pelo fabricante está correta.

Ainda, pode-se observar uma diminuição da retenção da membrana com o aumento da pressão. Isto pode ser devido ao fato de que, ao utilizar pressões mais elevadas, ocorre um aumento na concentração de partículas próximas à superfície da membrana, forçando a sua passagem através dos poros, diminuindo a eficiência de retenção.

5.3 Avaliação do comportamento de membrana com o efluente

Após a caracterização da MMC da membrana, realizou-se um experimento com a primeira amostra de efluente recebida para avaliar o comportamento destas membranas com o efluente em questão, de modo a obter a permeância hidráulica antes e após os experimentos com o efluente e determinar a pressão a ser utilizada nos experimentos posteriores.

A Figura 5.2 apresenta o comportamento do fluxo da membrana com a variação de pressão durante a caracterização com água destilada e após com o efluente hospitalar.

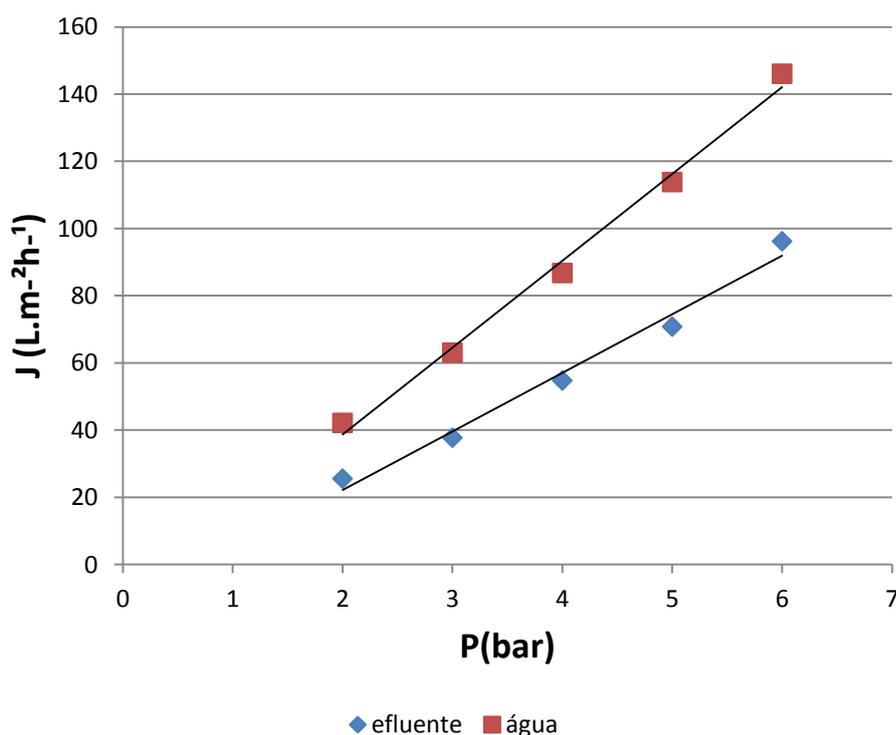


Figura 5.2: Fluxo permeado versus pressão transmembrana para água destilada ($R^2=0,99$) e para o efluente tratado ($R^2=0,98$).

Como esperado a permeância com o efluente foi inferior à permeância utilizando água, observado pelo coeficiente angular da reta que reduziu de $25,8 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$ para $17,4 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$. Com isso foi escolhida a pressão intermediária de 4 bar dentro da faixa testada (2 a 6 bar) para realização dos demais experimentos, pois utilizando-se pressões

muito elevadas poderia resultar numa maior ocorrência de *fouling*, e pressão muito baixas inviabilizaria a coleta da quantidade necessária de permeado para as análises.

5.4 Experimentos de Ultrafiltração

Com a segunda e terceira amostras de efluente recebidas, realizou-se os experimentos de ultrafiltração, avaliando a eficiência de remoção da membrana para os parâmetros turbidez, DBO, DQO, Coliformes Termotolerantes e *E. Coli*.

5.4.1 Permeância Hidráulica e Fouling

A permeância hidráulica é representada pela razão da permeabilidade hidráulica e a espessura da membrana (L_p/e) e calculada através do coeficiente angular da reta obtida pela variação do fluxo de permeado em função da variação de pressão.

As Figuras 5.3 e 5.4 mostram o fluxo de permeado no segundo e terceiro experimento, antes e após a filtração com efluente, em função da pressão aplicada.

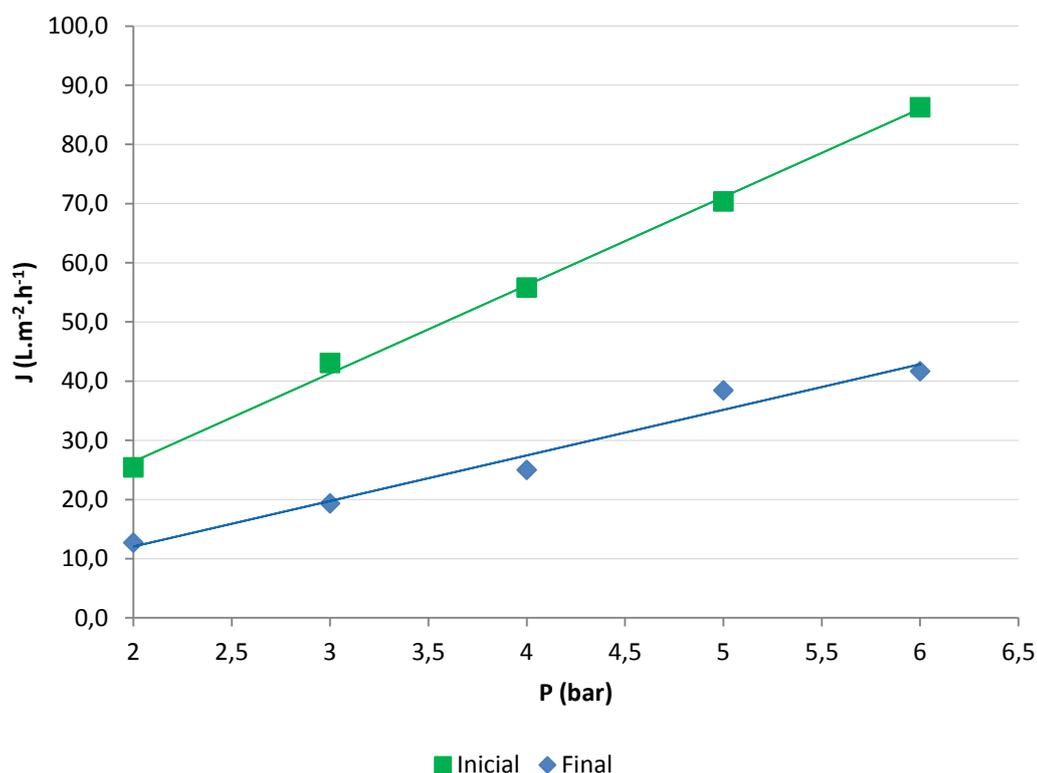


Figura 5.3: Fluxo permeado de água destilada versus pressão transmembrana antes ($R^2= 0,99$) e depois ($R^2= 0,97$) da passagem do efluente no segundo experimento.

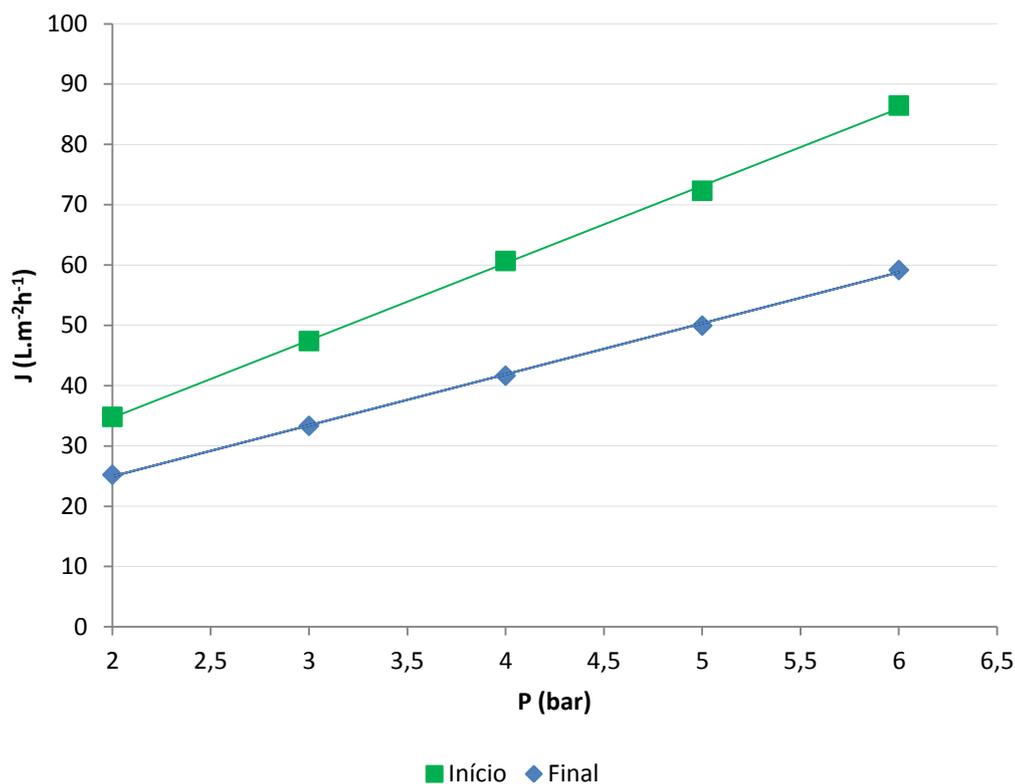


Figura 5.4: Fluxo permeado de água destilada antes ($R^2 = 0,99$) e depois ($R^2 = 0,99$) da passagem do efluente no terceiro experimento

A permeância hidráulica obtida para cada membrana antes de cada experimento foi de $14,9 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ($r^2=0,9978$) para a segunda membrana e $12,8 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$ ($r^2=0,9993$) para a terceira membrana.

Pela análise dos gráficos das Figuras 5.3 e 5.4 observa-se a diminuição da inclinação da reta na caracterização após o experimento, representando uma diminuição nos fluxos de permeado, sendo indicativo da ocorrência de *fouling*.

O percentual de redução de fluxo (*% fouling*) para os experimentos em ordem de execução foi de 48,29% e 34,07%.

A Figura 5.5 apresenta uma fotografia das três membranas de UF utilizadas nos experimentos, após o uso.



Figura 5.5: Fotografia das membranas de UF após o uso, para os três experimentos realizados.

Podemos notar pelo escurecimento das membranas, que houve um acúmulo de matéria depositada em sua superfície, provável causa da diminuição do fluxo. Algumas características do efluente de alimentação, como por exemplo, altas concentrações de nutrientes orgânicos e inorgânicos aumentam a tendência ao *fouling*.

As Figuras 5.6 e 5.7 apresentam o fluxo de permeado ao longo do tempo para o segundo e terceiro experimentos, onde melhor se pode observar a sua diminuição com o decorrer dos ensaios.

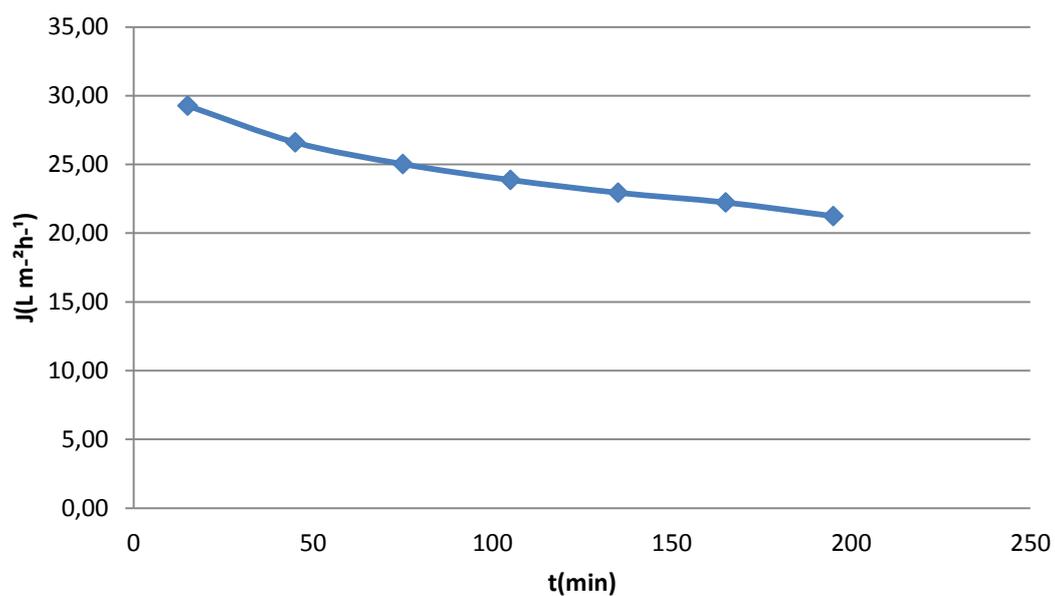


Figura 5.6: Comportamento do fluxo de permeado ao longo do tempo do experimento 2

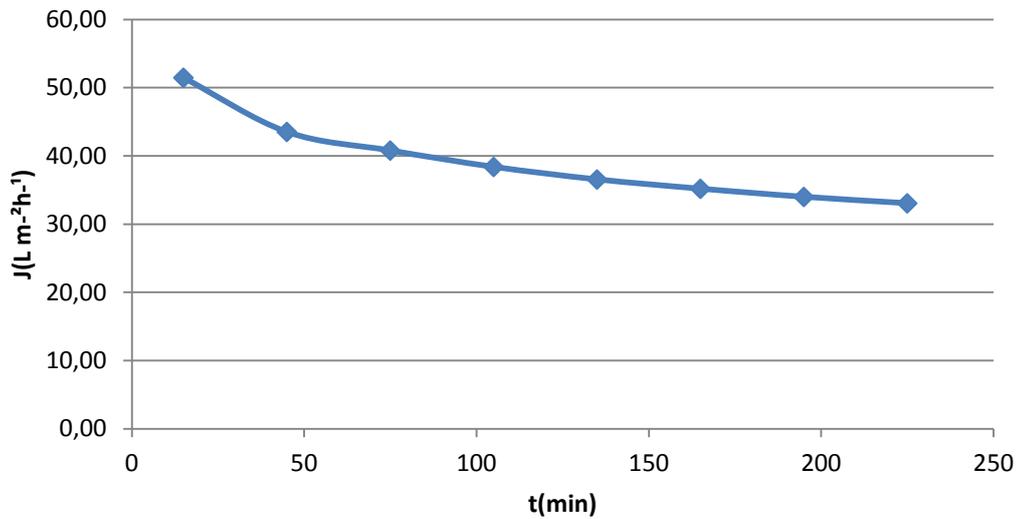


Figura 5.7: Comportamento do fluxo de permeado ao longo do tempo do experimento 3

O fluxo médio de permeado foi determinado pela relação entre o fluxo inicial e o fluxo final de cada experimento, dado pela Equação 5.1 (CHERYAN, 1989):

$$J_m = J_f + 0,33(J_i - J_f) \quad (5.1)$$

Os fluxos médios de permeado para os experimentos 2 e 3 foram de 23,3 L.m⁻².h⁻¹ e 39,1 L.m⁻².h⁻¹, respectivamente.

5.5 Análises físico-químicas

A Figura 5.8 apresenta os resultados obtidos para as análises de DBO₅ imediatamente após a coleta no hospital e antes e após os experimentos de ultrafiltração, para o segundo e terceiro experimentos.

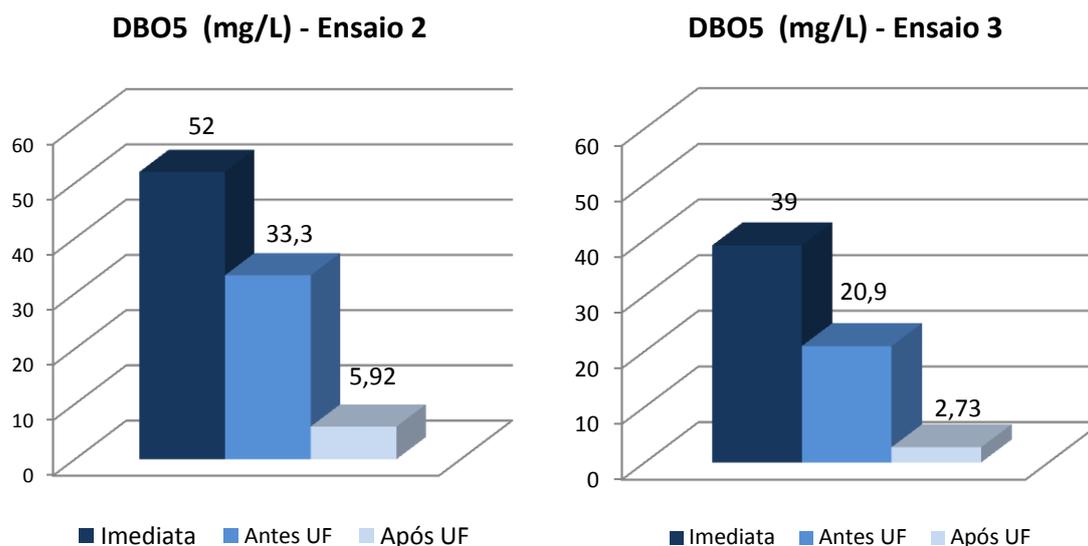


Figura 5.8: Resultados de análises de DBO₅ imediata a coleta no hospital e antes e após os experimentos 2 e 3 de UF.

Pela análise dos resultados apresentados na Figura 5.8 observa-se que após a ultrafiltração, os valores de DBO apresentaram concentrações de 5,9 mg O₂.L⁻¹ e 2,7 mg O₂.L⁻¹, respectivamente, atingindo eficiências de remoção de 82, % para o segundo e 86, % para o terceiro experimento.

De acordo com os valores obtidos, os efluentes tratados pela UF atendem o limite de DBO estabelecido pela legislação do estado de Washington nos Estados Unidos, que exige um limite de DBO de 30 mg O₂.L⁻¹, além de atender também o limite recomendado pela U.S.EPA (2012) em sua diretriz de menos que 10 mg O₂ L⁻¹.

A Figura 5.9 apresenta os dados obtidos para as análises de DQO imediatamente após a coleta no hospital e antes e após os experimentos de ultrafiltração, para o segundo e terceiro experimentos.

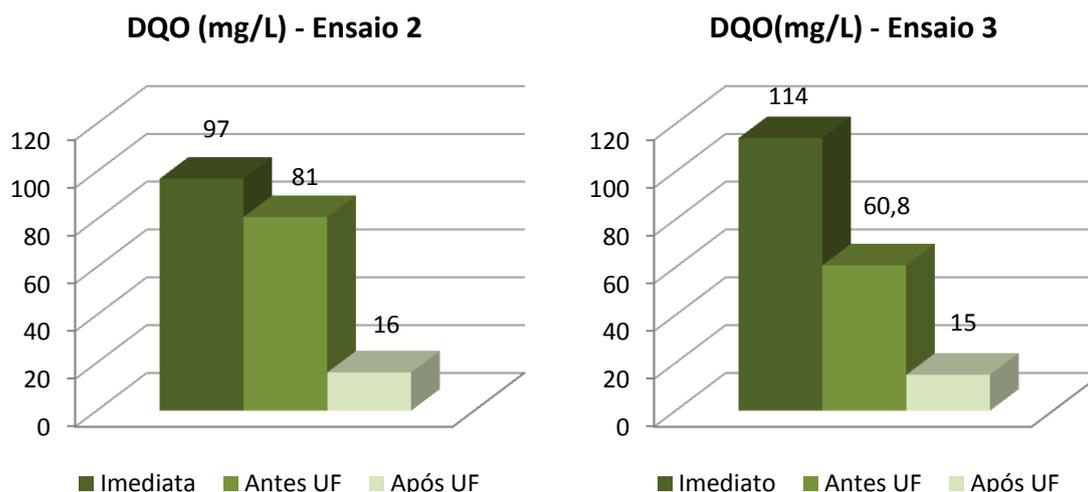


Figura 5.9: Resultados de análises de DQO imediata e antes e após os experimentos 2 e 3 de UF.

Assim como as análises de DBO, a DQO também apresentou uma redução após a ultrafiltração, resultando em uma concentração final de $16,0 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ para o experimento 2 e $15 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$ para o experimento 3. A eficiência de remoção de DQO pela membrana de UF foi de 80,% e 75, % para os experimentos 2 e 3, respectivamente.

A DQO não é um parâmetro exigido para reuso de efluentes, porém foi avaliada para analisar a eficiência do sistema de UF. O resultado obtido apresentou uma eficiência maior que a apresentada por ARÉVALO et al. (2008) em seu estudo que foi de apenas 27%, utilizando um módulo de UF com membrana plana de fluoreto de polivinilideno (PVDF) com poros de $0,05 \mu\text{m}$ como tratamento terciário de efluente doméstico, cuja DQO antes da UF era de $200 \text{ mg O}_2 \cdot \text{L}^{-1}$.

Também foi avaliada a remoção de turbidez pela membrana de UF. A Figura 5.10 apresenta os valores de turbidez das amostras das correntes de concentrado e permeado para três pontos de coleta: início (1), meio (2) e fim (3) de cada experimento.

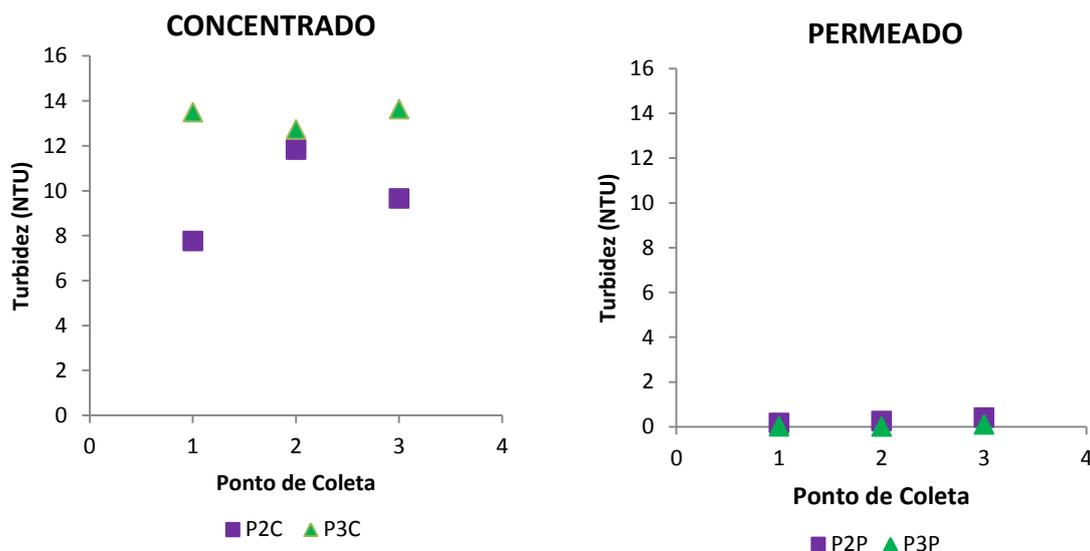


Figura 5.10: Turbidez das correntes de concentrado e permeado para os experimentos 2 e 3.

Os pontos P2C e P3C representam as coletas de amostras da corrente de concentrado e os pontos, P2P e P3P representam as amostras da corrente de permeado dos dois últimos experimentos de ultrafiltração. As linhas de amostragem foram coletadas simultaneamente em três momentos durante o experimento – início, meio e fim.

A remoção de turbidez apresentou alta eficiência, atingindo 97, % e 99, % de remoção para os experimentos 2 e 3, respectivamente.

Os valores médios de turbidez para os permeados dos experimentos 2 e 3 foram 0,28 ($\pm 0,12$) e 0,05 ($\pm 0,05$), respectivamente. Para ambos os experimentos, os valores estão abaixo do estabelecido tanto pela legislação de Washington EUA, quanto pela diretriz da U.S.EPA que estabelecem um valor máximo de 2,0 NTU para possibilitar o reuso do efluente.

A Figura 5.11 mostra a comparação visual entre as amostras do efluente hospitalar após tratamento biológico, o efluente após tratamento por UF e água potável.



Figura 5.11: Comparação visual do efluente hospitalar após tratamento biológico (esquerda), tratado por UF (centro) e água potável (direita).

Observa-se que o efluente tratado por ultrafiltração apresentou um aspecto visual comparável ao da água potável, e não apresentou odor.

5.6 Análises Microbiológicas

Na Tabela 5.4 estão apresentados os resultados microbiológicos de coliformes termotolerantes e *Escherichia coli* das amostras coletadas no início, meio e fim dos experimentos.

Tabela 5.4: Resultados Microbiológicos de Coliformes termotolerantes e *Escherichia coli* para as amostras coletadas no início (01), meio (02) e fim (03) dos experimentos.

	Amostra	E. Coli (UFC/mL)	% remoção	Coliformes termotolerantes (UFC/mL)	% remoção
ENSAIO 1	Concentrado-01	3,25E+02		3,50E+02	
	Permeado -01	7,20E-01	99,7	4,70E-01	99,8
	Concentrado-02	6,40E+02		8,05E+02	
	Permeado -02	9,60E-01	99,8	7,92E+00	99,0
	Concentrado-03	4,42E+02		4,70E+02	
	Permeado -03	2,75E+01	93,7	1,48E+02	68,5
ENSAIO 2	Concentrado-01	1,35E+02		1,04E+03	
	Permeado -01	7,50E+01	44,4	1,85E+02	82,1
	Concentrado-02	1,95E+02		>1,00E+3	
	Permeado -02	1,33E+02	31,7	4,15E+02	58,3
	Concentrado-03	1,93E+02		>1,00E+3	
	Permeado -03	8,50E+01	55,9	2,23E+02	77,6
ENSAIO 3	Concentrado-01	<2,00E+00		<1,00E+00	
	Permeado -01	<1,00E+00	49,8	<2,00E+00	0,00
	Concentrado-02	5,00E+01		8,00E+01	
	Permeado -02	1,00E+00	98,0	2,50E+00	96,8
	Concentrado-03	2,80E+02		4,00E+02	
	Permeado -03	7,25E+01	74,1	1,57E+02	60,7%

A eficiência de remoção de coliformes foi determinada pelas unidades logarítmicas removidas pelo processo de ultrafiltração, dada por:

$$Eficiência (\%) = 1 - 10^{-uni.log.remov} \quad (5.2)$$

A ultrafiltração removeu até três unidades logarítmicas (99%) de coliformes termotolerantes e *E. coli* no primeiro experimento. Nos demais a eficiência foi menor, mas ocorreu a remoção de até 2 unidades logarítmicas para ambas as análises. A concentração tanto de coliformes termotolerantes como de *E. coli* aumentou nas amostras de permeado do final dos experimentos devido ao aumento da concentração na alimentação.

O efluente hospitalar já apresentava baixos valores de coliformes antes da ultrafiltração devido à etapa de desinfecção por hipoclorito de cálcio na ETE. Porém, ainda não atendia a legislação de Washington que estabelece um limite de 2,2 NMP.100mL⁻¹ para coliformes totais. Porém, após a etapa de ultrafiltração, ainda não foi possível observar a completa eliminação de microrganismos, proposta por ARÉVALO et al. (2008), não atendendo ao limite estabelecido pela legislação americana para reuso.

6 Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

A caracterização do efluente hospitalar tratado apresentou valores baixos para DBO, DQO e coliformes termotolerantes, aceitáveis para o lançamento em corpos hídricos segundo a Resolução CONSEMA 128 de 2006. Porém, mesmo adequados para descarte, não atingem os limites internacionais de reuso apenas com o tratamento biológico realizado pelo hospital.

A técnica da ultrafiltração utilizada como etapa de polimento no tratamento do efluente, apresentou uma boa capacidade para remoção de turbidez, DQO e DBO, melhorando sua qualidade final e aspecto visual, conforme também é descrito na literatura. A eficiência de remoção de DBO pela membrana de UF foi de até 86, % enquanto que a de DQO foi de até 80, %. A remoção de turbidez apresentou o melhor resultado de eficiência, reduzindo até 99, % da turbidez inicial, obtendo-se um valor médio de 0,05 NTU para o terceiro experimento.

Observou-se também uma diferença entre as análises do efluente realizadas imediatamente após a coleta no hospital e antes dos experimentos de UF, três dias após a coleta. Esta diferença pode ter sido ocasionada pela degradação do efluente, mesmo com os cuidados de conservação adotados.

A caracterização da membrana comprovou a massa molar de corte especificada pelo fabricante, apresentando retenções acima de 90% para o composto PEG 10.000, atingindo valores maiores em pressões de trabalho menores que 4 bar.

Foi observada uma elevada queda na permeância hidráulica das membranas após os experimentos de UF, atingindo um valor para o percentual de *fouling* de até 48, %. No entanto, este fenômeno poderia ser suavizado com a utilização de um pré-filtro no sistema, diminuindo a quantidade de partículas maiores presentes no efluente, que podem ter se depositado na superfície da membrana. Ainda, poderia ter sido avaliada a recuperação do fluxo de permeado através de limpezas químicas, sem a necessidade da troca das membranas.

A eliminação de coliformes não foi completa, não atingindo os valores estabelecidos para reuso. No entanto como as diretrizes e legislações dos Estados Unidos estabelecem a necessidade de cloro residual numa concentração superior a 1,0 (um) mg.L⁻¹, a quantidade de microrganismos presentes tenderia a ser reduzida ainda mais, podendo atingir os limites estabelecidos de coliformes totais no efluente de reuso.

A utilização de membranas no tratamento de efluentes hospitalares resulta em efluentes de alta qualidade, sem utilização de produtos químicos, baixa demanda energética, menor geração de lodo no tratamento e requer menos espaço físico. No entanto, uma completa caracterização do efluente a ser tratado é necessária para a correta implantação do sistema com membranas.

Mesmo apresentando diversos benefícios o PSM, ainda é uma técnica considerada cara para países em desenvolvimento como o Brasil, porém é uma tecnologia plenamente dominada e em expansão.

De acordo com os resultados obtidos, as seguintes sugestões para trabalhos futuros podem ser citadas:

- utilização do sistema de UF com limpeza química da membrana para avaliação da recuperação do fluxo de permeado e da remoção de *fouling*;
- utilização de outras técnicas, já aplicadas no reuso de efluentes, para o reuso de efluente hospitalar como, por exemplo, UV, ozonização, adsorção por carvão ativado, entre outros;
- avaliação da retenção de outros parâmetros, não exigidos para o reuso de água não potável, mas que podem ser relevantes em se tratando de efluente hospitalar como a retenção de vírus, microrganismos resistentes e alguns compostos orgânicos presentes no efluente hospitalar;
- implantação e avaliação de um sistema piloto de ultrafiltração em modo contínuo no final do tratamento da ETE hospitalar utilizando membranas de fibra oca;
- implantação e avaliação de uma unidade piloto de MBR com lodo ativado para o tratamento de efluente hospitalar;
- dimensionamento e avaliação econômica da implantação de um sistema de UF para uma ETE hospitalar, visando o reuso do efluente.

7 Referências

ALONSO, E., SANTOS, A., SOLLIS, G. & RIESCO, P., On the feasibility of urban wastewater tertiary treatment by membranes: a comparative assessment. *Desalination*, v. 141 p. 39-51, 2001.

ARÉVALO, J. et al., Wastewater reuse after treatment by tertiary ultrafiltration. *Desalination*, 4 April, v. 243 p. 32-41, 2008.

BREGA FILHO, D. & SANCHES MANCUSO, P. C., Conselho de reúso de água. In: P. C. SANCHES MANCUSO & H. F. DOS SANTOS, eds. *Reúso de Água*. São Paulo: Manole, p. 21-36, 2003.

CHERYAN, M., *Ultrafiltration Handbook*. Lancaster, Pennsylvania (USA): Technomic Publishing AG, 1986.

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos Resolução 54/2005, Brasília D.F., 2005.

ESCHER, B. I. et al., Environmental toxicology and risk assessment of pharmaceuticals from hospital wastewater. *Water Research*, 17 August, v. 45 p. 75-92, 2010.

FAO, 2014. *Water uses*. Disponível em:
<http://www.fao.org/nr/water/aquastat/water_use/index.stm> Acesso em 18 Outubro 2014.

FLORENCIO, L., KOPSCHITZ XAVIER B., R. & MANSUR A., M. (coordenadores), *Tratamento e Utilização de Esgotos Sanitários, PROSAB Edital 04*, Rio de Janeiro, 2006.

PNSB - *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico* IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Rio de Janeiro, 2010.

JORDÃO, E. P. & PESSÔA, C. A., Conservação e reuso da água. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. 7ª Edição ed. Rio de Janeiro: ABES, p. 1023-1054, 2014.

KOVALOVA, L. et al., Hospital Wastewater Treatment by Membrane Bioreactor: Performance and Efficiency for Organic Micropollutant Elimination. *Environmental Science & Technology*, 25 January, p. 1536-1545, 2012.

KOVALOVA, L. et al., Elimination of Micropollutants during Post-Treatment of Hospital Wastewater with Powdered Activated Carbon, Ozone, and UV. *Environmental Science & Technology*, 11 June, p. 7899-7908, 2013.

METCALF & EDDY, Inc., *Wastewater Engineering - Treatment and Reuse*. 4th ed. New York, NY: McGraw-Hill Companies, 2003.

MULDER M., *Basic principles of membrane technology*. 2º Edição. Klumer Academic Publishers, 1996.

MUTHUKUMARAN, S., NGUYEN, D. A. & BASKARAN, K., Performance evaluation of different ultrafiltration membranes for the reclamation and reuse of secondary effluent. *Desalination*, 20 July, v. 279 p. 383-389, 2011.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. *Reuse of effluents: methods of wastewater treatment and health safeguards. Of a WHO meeting of experts. Technical report series* Geneva, 1973.

PHILIPPI JR, A., Reúso de água: uma tendência que se firma. In.: P. C. SANCHES MANCUSO & H. F. DOS SANTOS, eds. *Reúso de Água*. São Paulo: Manole, p. XII-XVIII, 2003.

PRADO, T., Avaliação da eficiência de um sistema de tratamento de efluente hospitalar por processo anaeróbio na remoção de coliformes, *Pseudomonas aeruginosa*, *Klebsiella pneumoniae* resistentes a antibióticos e Vírus da Hepatite A, Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz – FIOCRUZ - Escola Nacional de Saúde Pública – ENSP, Departamento de Saneamento e Saúde Ambiental - DSSA. 2007.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - *NBR 13.969 - Tanques septicos - Unidade de tratamento complementar e disposição dos efluentes líquidos -Projeto construção e operação*. Rio de Janeiro. 1997.

SILVEIRA, I. C. T., *Cloro e Ozônio aplicados à desinfecção de efluente hospitalar tratado em contadores biológicos rotatórios, com avaliação de efeitos tóxicos em Daphnia similis*. 2004. 173 f. Tese - Universidade Federal do Rio Grande do Sul - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Porto Alegre. 2004.

U.S.EPA, *Guidelines for Water Reuse*, EPA/600/R, Whashington, D.C. (USA) -12/618. 2012