



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



Utilização de Membranas de Osmose Inversa Descartadas no Reúso de Efluente Final da ETE de uma Indústria

Juliana Schenhel Zotti

Orientadora: Isabel Cristina Tessaro

Co-orientadores: Júlia Menegotto Frick Pavoni

Ígor Renz Cadore

Porto Alegre, julho de 2019

Agradecimentos

À Deus, por guiar meu caminho nos momentos mais difíceis.

À toda a minha família, especialmente meu pai Ênio e minha mãe Clenes, por todo o apoio, carinho e formação de caráter.

Aos amigos que fiz em Porto Alegre e aos que já tinha antes, minha família de coração, pelos momentos de alegria e companheirismo.

À todas as pessoas de boa índole que cruzaram meu caminho durante esses anos.

À todas as pessoas que, de uma forma ou de outra, me ajudaram a levar os desafios desses anos de graduação com bom humor e leveza.

À orientadora desse trabalho, Isabel, pela motivação transmitida desde a época do vestibular, ensinamentos e direcionamento.

Aos co-orientadores desse trabalho, Júlia e Ígor, pelo suporte, conhecimentos e prestatividade.

À todas as pessoas que tiveram boa vontade para ensinar ou ajudar, seja nos estágios ou na faculdade.

À todos os professores da UFRGS que tive contato durante esses anos de graduação, especialmente os do DEQUI, pelo ensino de excelência que tornou a realização desse trabalho possível.

SUMÁRIO

1	Introdução.....	1
2	Revisão Bibliográfica	3
2.1	Membranas.....	3
2.2	Tecnologia de separação por membranas	3
2.3	Osmose Inversa.....	8
2.3.1	Parâmetros de desempenho para osmose inversa	8
2.3.2	Pré-tratamentos	9
2.3.3	Membranas de OI descartadas	11
2.3.4	Alternativas para membranas em fim de vida útil.....	12
2.4	Reúso de água e efluentes	13
2.5	Considerações finais sobre a revisão bibliográfica.....	16
3	Materiais e Métodos	18
3.1	Materiais	18
3.1.1	Efluente final tratado	18
3.2	Sistemas de filtração	19
3.2.1	Sistema de pré-tratamento com filtro cartucho.....	19
3.2.2	Sistema de osmose inversa	20
3.3	Métodos de análise do efluente bruto, filtrado e permeado	20
3.4	Experimentos com membranas de OI descartadas	21
3.4.1	Caracterização das membranas.....	21
4	Resultados e Discussão	24
4.1	Caracterização inicial do efluente.....	24
4.2	Caracterização inicial das membranas	27
4.3	Testes com efluente	28
4.3.1	Ensaio de fluxo limite de operação.....	28
4.3.2	Operação com efluente	29
4.3	Caracterização final das membranas.....	33
4.4	Caracterização das correntes estudadas	37
5	Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	38

Resumo

O reúso de efluentes é uma interessante alternativa para a otimização do uso de recursos hídricos pelos diversos setores da indústria. Nesse contexto, é necessário que sejam estudadas tecnologias que viabilizem essa prática. A osmose inversa (OI) é amplamente utilizada em plantas de dessalinização de água ao redor do mundo e pode ser também empregada no tratamento de efluentes que contém quantidades consideráveis de sais dissolvidos em sua composição. Os módulos espirais das membranas de OI tem vida útil esperada de 5 a 8 anos e após são descartados, gerando um passivo ambiental. Uma alternativa para esse resíduo pode ser no tratamento de efluentes para produção de água de melhor qualidade, para reúso como água de resfriamento, na agricultura ou recarga de aquíferos. A proposta do presente trabalho é avaliar a utilização de membranas de OI descartadas de processos de desmineralização no tratamento de efluente final da ETE de uma indústria, visando atender à legislação e ao reúso dessa água. A avaliação da eficiência das membranas foi realizada através de ensaios com o efluente em um sistema de osmose inversa de bancada, utilizando pré-tratamento com filtro cartucho. Foram analisados os parâmetros pH, condutividade elétrica e turbidez, do efluente bruto, filtrado e permeado. Verificou-se que o pré-tratamento escolhido foi suficiente para a obtenção de efluente filtrado com turbidez menor que 1 NTU, condição requerida para a alimentação de sistemas de OI, para as três amostras de efluente testadas. Os permeados obtidos com as três amostras de membranas testadas foram comparados em relação à especificação de condutividade elétrica para a água de resfriamento fornecida pela indústria (400 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Verificou-se que o permeado obtido com a amostra de membrana III satisfazia a condição anterior, com condutividade elétrica de aproximadamente 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$. As amostras de membrana utilizadas nos testes foram caracterizadas antes e após sua utilização na operação com efluente, com o objetivo de verificar o eventual depósito de incrustações ou degradação das membranas. A análise das caracterizações indicou que houve degradação das amostras de membrana I e II. O depósito de incrustações (*fouling*), foi observado para amostra de membrana III.

Palavras chave: Reúso de efluentes, membranas de OI descartadas, efluentes industriais, tecnologia de membranas.

Abstract

The wastewater reuse is an interesting alternative for the optimization of the use of water resources by various sectors of the industry. In this context, it is necessary to study technologies that enable this practice. Reverse Osmosis (RO) is widely used in water desalination plants around the world and may also be employed in the treatment of effluents containing considerable amounts of salts in its composition. The spiral modules of RO membranes have an expected life of 5 to 8 years and are then discharged, generating an environmental passive. An alternative for this residue may be in treatment of effluents for better quality water production, for reuse as cooling water, in agriculture or aquifer recharge. The aim of this work is to evaluate the use of RO membranes discarded of demineralization processes in the treatment of the final effluent from the wastewater treatment station of an industry, in order to comply with the legislation and reuse of this water. The evaluation of membrane efficiency was carried out by testing the effluent in a reverse osmosis bench system, using pre-treatment with cartridge filter. The parameters pH, electrical conductivity and turbidity of the raw, filtered and permeate effluent were analysed. It was verified that the pre-treatment chosen was enough to obtain filtered effluent with turbidity less than 1 NTU, a condition required for the feed of RO systems, for the three effluent samples tested. The permeate obtained with the three membrane samples tested was compared in relation to the electrical conductivity specification for the cooling water provided by the industry (400 $\mu\text{S}/\text{cm}$). The permeate obtained with the membrane sample III was found to satisfy the above condition, with an electrical conductivity of approximately 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$. The membrane samples used in the tests were characterized before and after their use in the operation with effluent, in order to verify the possible deposit of incrustations or the degradation of the membranes. The analysis of the characterizations indicated that there was degradation of membrane samples I and II. The fouling deposit was observed for the membrane III sample.

Keywords: Wastewater reuse, discarded RO membranes, industrial wastewater, membrane technology.

Lista de Figuras

Figura 1. Representação esquemática de um processo genérico de separação por membranas. Adaptado de Purkait et al., 2018.....	3
Figura 2. Representação esquemática dos diferentes tipos de membranas e suas aplicações. Adaptado de Pentair, 2019.....	5
Figura 3. Comportamento da retenção de soluto em função da pressão aplicada para diferentes tipos de processos de separação com membranas.	7
Figura 4. Módulo de membrana e representação esquemática das correntes envolvidas no processo de permeação. Adaptado de: Colourandre, 2019.....	8
Figura 5. Representação da curva de fluxo limite e fluxo crítico.....	9
Figura 6. Representação esquemática da estação industrial de tratamento de efluentes. ...	19
Figura 7. Sistema de pré-tratamento com filtro cartucho.	20
Figura 8. Sistema de osmose inversa utilizado nos ensaios.	20
Figura 9. Imagem da membrana disposta no módulo utilizado em um dos experimentos.	21
Figura 10. Resultados de turbidez do efluente final para as diferentes amostras coletadas.	24
Figura 11. Fluxos e valores de permeabilidade hidráulica em diferentes pressões para os três pedaços utilizados nos ensaios com efluente.....	27
Figura 12. Retenção salina (NaCl 1500 ppm) em diferentes pressões para as três amostras de membrana de OI utilizados nos ensaios com efluente.....	28
Figura 13. Fluxo permeado para diferentes pressões transmembrana para a amostra PI utilizando efluente. Condições de operação: temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L m ⁻³	29
Figura 14. Fluxo de permeado durante a operação com efluente para a amostra PI em pressão constante de 6,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L m ⁻³	30
Figura 15. Retenção salina e condutividade elétrica do permeado durante a operação com efluente para a amostra PI em pressão constante de 6,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L m ⁻³	30
Figura 16. Fluxo de permeado durante a operação com efluente (amostra 3) para a amostra de membrana PII em pressão constante de 6,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L.m ⁻³	31
Figura 17. Retenção salina e condutividade elétrica da corrente de permeado durante a operação com efluente (amostra 3), para a amostra de membrana PII em pressão constante de 6,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L.m ⁻³	31

Figura 18. Fluxo de permeado durante a operação com efluente (amostra 3) para a amostra PIII em pressão constante de 4,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L m ⁻³	32
Figura 19. Retenção salina e condutividade elétrica do permeado durante a operação com efluente (amostra 3) para a amostra de membrana PIII em pressão constante de 4,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L m ⁻³	33
Figura 20. Fluxos de permeado para água antes do teste com efluente, após verificação do fluxo limite e após teste com efluente para diferentes pressões transmembrana utilizando a amostra PI. Condições de operação: temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L m ⁻³	34
Figura 21. Resultados dos ensaios de retenção salina para a solução de NaCl 1500 ppm antes e após o teste com o efluente, para a amostra PI utilizando diferentes pressões. Condições de operação: temperatura xx °C e vazão de alimentação de xx L m ⁻³	34
Figura 22. Fluxos de permeado para as caracterizações de permeabilidade hidráulica antes e após a passagem do efluente para o pedaço II em diferentes pressões.	35
Figura 23. Resultados dos ensaios de retenção salina para o pedaço II antes e após a passagem do efluente em diferentes pressões.	35
Figura 24. Fluxos de permeado para as caracterizações de permeabilidade hidráulica antes e após a passagem do efluente para o pedaço III em diferentes pressões.	36
Figura 25. Resultados dos ensaios de retenção salina para o pedaço III antes e após a passagem do efluente em diferentes pressões.	36

Lista de Tabelas

Tabela 1. Diferentes PSMs: princípios de operação, força motriz e aplicações.	5
Tabela 2. Amostras de efluente e datas das coletas.	18
Tabela 3. Pedacos de membrana utilizados no ensaios.	22
Tabela 4. Amostras de efluente e datas das coletas.	25
Tabela 5. Caracterização inicial das amostras de efluente.....	25
Tabela 6. Caracterização detalhada do efluente com relação à diferentes analitos.	26
Tabela 7. Resumo das características do efluente bruto, filtrado e permeado para os três pedacos de membrana testados.....	37

Lista de Abreviaturas e Siglas

MBR	Biorreatores com membranas
NF	Nanofiltração
OI	Osmose inversa
UF	Ultrafiltração
MF	Microfiltração
CIP	<i>Cleaning-in-place</i>
PA	Poliamida
PH	Permeância hidráulica
RS	Retenção salina
NTU	<i>Nefelometric turbidity unit</i>
PSM	Processos de separação por membranas
ETE	Estação de tratamento de efluentes

1 Introdução

O aumento da demanda por água potável enseja o desenvolvimento de tecnologias para o tratamento e reaproveitamento de águas, visando atender os parâmetros exigidos pela legislação. As indústrias utilizam grandes quantidades de água e geram grandes quantidades de efluentes em seus processos. Para que seja feita uma gestão eficiente dos recursos hídricos é necessário desenvolver estratégias de reaproveitamento e reúso de água.

O reúso de água na indústria ainda é uma fonte pouco explorada, apesar de serem comuns aplicações em que é permitido utilizar água de menor qualidade, como enxágues e lavagens de pátios e área externas. Sistemas de resfriamento necessitam de uma melhor qualidade da água de reúso, que normalmente é alcançada utilizando tratamentos adicionais. O reúso de efluentes em suas diferentes formas vem sendo largamente estudado e tem um importante papel, uma vez que grandes volumes de água podem ser poupados, reduzindo o volume global de água a ser captado por uma indústria e ao mesmo tempo o volume de efluente gerado.

O uso de tecnologias de membranas, como biorreatores com membranas (MBR), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI), em aplicações de reúso de efluentes vem sendo estudado tanto no meio acadêmico como no industrial. A OI é uma técnica largamente utilizada na dessalinização de águas e tem vasta aplicabilidade em relação ao reúso de efluentes, uma vez que estes normalmente contêm quantidades consideráveis de sais dissolvidos.

Os módulos espirais de membranas de OI têm vida útil relativamente curta (5 a 8 anos) e grandes quantidades desses módulos são descartadas todo ano, gerando um passivo ambiental para as indústrias. A deposição de incrustações é um dos fatores que normalmente leva à perda de eficiência das membranas, que necessitam ser repostas periodicamente. Existem pesquisas sendo realizadas com o objetivo de analisar soluções ambientalmente favoráveis para reúso de membranas de OI descartadas, visando aumentar o tempo de vida útil desse resíduo sólido industrial.

O objetivo do presente trabalho foi estudar a utilização de membranas de osmose inversa descartadas no tratamento de efluente final da estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria visando atender à legislação e o reúso desta água.

A partir do objetivo geral os seguintes objetivos específicos foram considerados:

- avaliação da necessidade de pré-tratamento para a corrente de alimentação do sistema de OI considerando a turbidez do efluente;

2 Utilização de Membranas de Osmose Inversa Descartadas no Reúso de Efluente Final da ETE de uma Indústria

- análise da qualidade do permeado obtido em relação à condutividade elétrica, turbidez e pH;
- avaliação do desempenho das membranas descartadas, assim como a verificação de eventuais degradações ou depósitos de incrustações na membrana;
- verificação da possibilidade de reúso desse efluente como água de resfriamento, segundo especificação da empresa.

2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo serão abordados os assuntos pertinentes ao entendimento desse trabalho. Inicia-se com uma descrição dos fundamentos de processos de separação por membranas (PSM). No tópico seguinte é dada ênfase à OI e estudos que contemplam o uso de membranas de OI descartadas. Após é feita uma abordagem de assuntos relacionados ao reúso de águas e efluentes. O capítulo é finalizado com considerações sobre o tema do trabalho, salientando sua importância, tendo em vista o conteúdo apresentado na revisão bibliográfica.

2.1 Membranas

Uma definição de membrana pode ser: “uma barreira que separa duas fases e restringe total ou parcialmente o transporte de uma ou várias espécies presentes”. A membrana age como uma barreira física, podendo concentrar, purificar e/ou separar elementos de uma alimentação, gerando duas correntes: a de permeado (ou filtrado), que passa através da membrana, e a de concentrado (ou rejeito) (Judd & Jefferson, 2003). Uma representação esquemática de um processo com membranas pode ser observada na Figura 1.

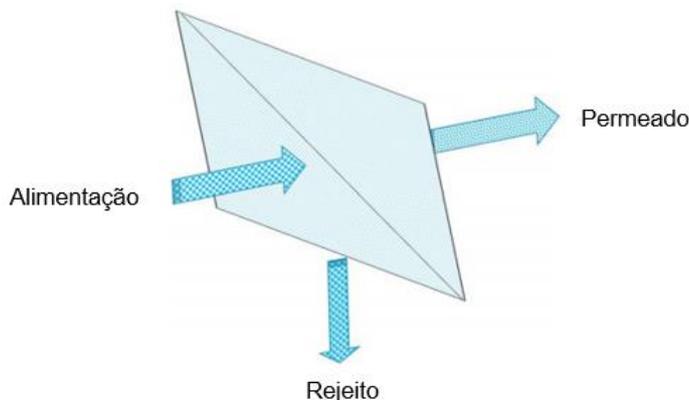


Figura 1. Representação esquemática de um processo genérico de separação por membranas. Adaptado de Purkait et al., 2018.

2.2 Tecnologia de separação por membranas

O fato de uma membrana ser altamente eficiente na separação e purificação de componentes quando utilizada como barreira semipermeável é amplamente evidente pela natureza. Nenhuma célula poderia sobreviver sem o mecanismo de seleção realizado pelas membranas. Esse conhecimento tem levado a inúmeras aplicações da tecnologia de membranas em processos de separação e purificação.

4 Utilização de Membranas de Osmose Inversa Descartadas no Reúso de Efluente Final da ETE de uma Indústria

Processos com membranas são projetados para promoverem separações físicas e físico-químicas. Em grande parte das aplicações são utilizados líquidos, mas existem também processos que envolvem separação gás-líquido ou gás-gás. Em termos de vendas de membranas, a aplicação mais comum é a hemodiálise, correspondendo a aproximadamente metade das vendas de membranas no mundo (Judd & Jefferson, 2003).

Em relação à utilização de membranas para o tratamento de efluentes, três principais vantagens em relação aos tratamentos convencionais podem ser observadas:

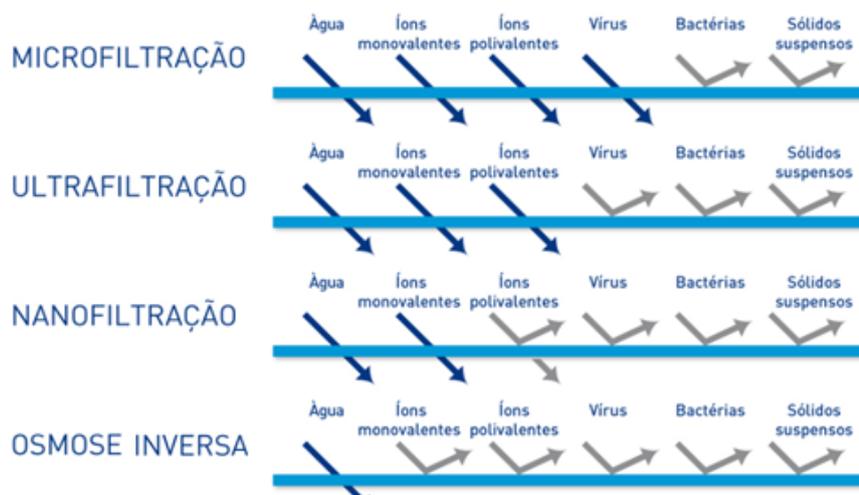
1. a separação é feita sem mudança de fase, e por isso, é mais energeticamente eficiente que a destilação, por exemplo;
2. o acúmulo de materiais é pequeno ou quase inexistente em processos que operam continuamente em estado estacionário sem necessitar ciclos de regeneração, diferentemente de processos de adsorção;
3. baixa adição de químicos, diferentemente de processos convencionais de clarificação, que geralmente requerem adição de coagulantes e floculantes.

Há uma grande variedade de PSM que diferem uns dos outros com relação ao tipo e configuração da membrana, mecanismo de transporte para os vários componentes da alimentação, natureza da força motriz e tamanho dos poros. Como resultado da força motriz, os componentes são transportados até a superfície da membrana, onde alguns passam através dela e outros são retidos na mesma (Mulder, 1996). Na Tabela 1 estão apresentadas informações gerais sobre esses processos.

Os processos de separação por membranas de maior importância industrial são a osmose inversa (OI), a nanofiltração (NF), a ultrafiltração (UF) e a microfiltração (MF), nos quais a separação ocorre devido a uma diferença de pressão aplicada. Membranas de MF têm tamanho de poro capaz de reter partículas em suspensão, colóides, protozoários, bactérias como *E. coli* e a maioria dos vírus. Membranas de UF são capazes de remover colóides e a totalidade de vírus. Membranas de NF podem remover íons divalentes e trivalentes, dureza total e moléculas orgânicas. Membranas de OI podem remover íons monovalentes e sólidos dissolvidos (Judd & Jefferson, 2003). Uma representação esquemática desses processos citados pode ser observada na Figura 2.

Tabela 1. Diferentes PSMs: princípios de operação, força motriz e aplicações.Adaptado de: Purkait, *et al.*, (2018).

Processo de separação	Força Motriz	Mecanismo de separação	Aplicações	Tamanho de poro (nm)
Microfiltração	Diferença de pressão (ΔP)	Exclusão de tamanho	Clarificação e esterilização	100 – 10 000
Ultrafiltração	Diferença de pressão (ΔP)	Exclusão de tamanho	Separação de soluções de macromoléculas	10 – 100
Nanofiltração	Diferença de pressão (ΔP)	Exclusão de tamanho / Solução-difusão	Separação de íons bivalentes de soluções	0,5 – 5
Osmose Inversa	Diferença de pressão (ΔP)	Solução- difusão	Separação de sais e microsolutos de soluções	<1,0
Diálise	Diferença de concentração (ΔC)	Difusão	Separação de sais e microsolutos de soluções de macromoléculas	<1,0
Eletrodíálise	Diferença de potencial elétrico (ΔE)	Transporte seletivo de íons ou moléculas de acordo com a carga elétrica	Dessalinização de soluções iônicas	<1,0
Membrana líquida suportada	Diferença de concentração (ΔC)	Solução- difusão	Separação e concentração de íons metálicos e espécies biológicas	<1,0
Destilação por membranas	Diferença de temperatura (ΔT)	Transporte de vapor	Concentração de soluções, obtenção de água ultrapura	1 – 10
Pervaporação	Diferença de concentração (ΔC)	Solução- difusão	Separação de orgânicos	<1,0

**Figura 2.** Representação esquemática dos diferentes tipos de membranas e suas aplicações.

Adaptado de Pentair, 2019.

De um modo geral, as membranas podem ser classificadas de acordo com a sua natureza ou morfologia. Relativamente à sua natureza, as membranas dividem-se em biológicas (vivas ou não-vivas) e sintéticas (orgânicas ou inorgânicas).

Do ponto de vista morfológico as membranas podem ser divididas em duas grandes categorias: densas e porosas. As membranas são consideradas densas quando o transporte dos componentes envolve uma etapa de dissolução e difusão através da membrana. A membrana é denominada porosa quando o transporte dos permeantes ocorre preferencialmente em uma fase fluida contínua, que preenche os poros da membrana.

Quando uma membrana apresenta duas morfologias, uma parte densa e uma parte porosa é necessário estender a classificação considerando o tipo de transporte predominante e a característica de sua seção transversal. Desta forma, quando uma membrana possui uma fina camada densa sustentada por uma estrutura porosa, também pode ser considerada como uma membrana densa, pois o principal mecanismo envolvido na separação dos componentes permeantes envolve dissolução e difusão no material dessa fina camada superficial da membrana. A variação de densidade de poros ao longo da seção transversal da membrana pode ser descrita como assimétrica ou anisotrópica (Judd & Jefferson, 2003).

As membranas comerciais de OI e NF são exemplos de membranas assimétricas. O material comumente utilizado na fabricação da camada densa (ou seletiva) é a poliamida (PA), que durante o processo de síntese da membrana é depositada sobre uma camada de polissulfona ou poliétersulfona através de uma reação de polimerização interfacial. Membranas de UF e MF são exemplos de membranas porosas. O material de fabricação dessas membranas pode ser orgânico, como polissulfona, poliétersulfona, poliacrilonitrila, polímeros à base de celulose, polietileno, polipropileno e poli(fluoreto de vinilideno), ou inorgânico, como alumina, dióxido de zircônio e dióxido de titânio. Apesar das propriedades dos materiais das membranas variarem com a composição química e com o tipo de processo, deseja-se sempre ter consideráveis resistências mecânica, térmica e química, assim como manter um alto rendimento e uma alta seletividade (Judd & Jefferson, 2003).

Nas membranas densas, utilizadas em processos de OI e NF, o mecanismo de transporte é o da solução-difusão. Nesse mecanismo o soluto de interesse se dispersa pelo material da membrana e é transportado para o outro lado da membrana através da difusão. No mecanismo de transporte por solução-difusão, os fluxos de soluto e solvente não estão associados. Assim, um aumento no fluxo de solvente não vai necessariamente levar a um aumento no fluxo de soluto através da membrana (Pal, 2017).

O mecanismo de exclusão por tamanho é aplicado a membranas porosas utilizadas nos processos de MF e UF. A diferença de tamanho entre os poros da membrana e os componentes da mistura ou solução determina a permeação de alguns componentes em detrimento de outros. O transporte ocorre de forma convectiva, sendo que os fluxos de soluto e solvente, nesse caso, estão associados. Se ocorrer um aumento do fluxo de solvente irá

ocorrer um aumento do fluxo de soluto através da membrana. Na Figura 3 pode ser observado o comportamento da retenção de soluto para diferentes tipos de processos em relação à diferença de pressão aplicada.

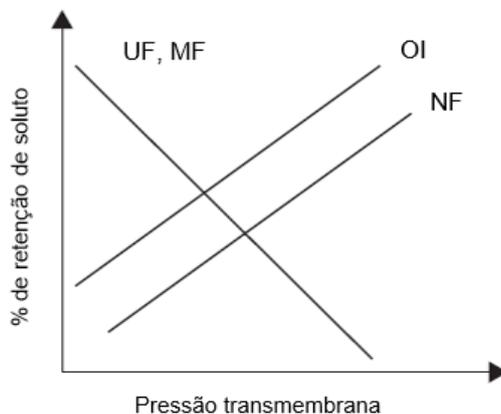


Figura 3. Comportamento da retenção de soluto em função da pressão aplicada para diferentes tipos de processos de separação com membranas.

Adaptado de: Pal, 2017.

As membranas ainda podem ter diferentes configurações, que devem favorecer o transporte de água ou solutos através da membrana. As configurações comumente empregadas para os processos de separação por membranas são: filtros cartucho, placa e quadro, espiral, tubular e fibra oca (Judd & Jefferson,2003).

Uma configuração bastante utilizada para as membranas de UF e OI é a espiral, que fornece vantagens como construção simples e robusta e alta relação área/volume de membrana. O módulo de membrana comprime dois pedaços de membrana como um sanduíche, formando uma bolsa retangular, selada em três lados; o lado aberto é conectado a um tubo perfurado central que coleta o permeado, que permeia pelo interior do envelope de membrana. O envelope de membrana é enrolado para produzir um espiral que toma forma cilíndrica. Ao longo do módulo entre as membranas também são usados espaçadores, que são importantes na promoção de turbulência. A alimentação é feita tangencialmente à superfície das membranas e o permeado percorre todo o caminho em espiral até ser coletado no duto central (Judd & Jefferson,2003). Na Figura 4 está apresentado um módulo de membrana de OI, com indicação dos diferentes componentes e da direção do escoamento das correntes de alimentação e de permeado.

2.3 Osmose Inversa

Entre as tecnologias mais aplicadas, para suprir a demanda por água de alta qualidade, está a OI, que é largamente utilizada na dessalinização de água do mar, produção de água potável, tratamento de água salobra e tratamento de efluentes (Boulahfa *et al.*,2019).

A OI vem sendo cada vez mais considerada como um dos métodos mais promissores para dessalinização de água, permitindo a remoção de partículas muito pequenas como íons monovalentes. A aplicação de membranas de osmose inversa em processos industriais é bem estabelecida em setores, como o farmacêutico, de alimentos e semicondutores.

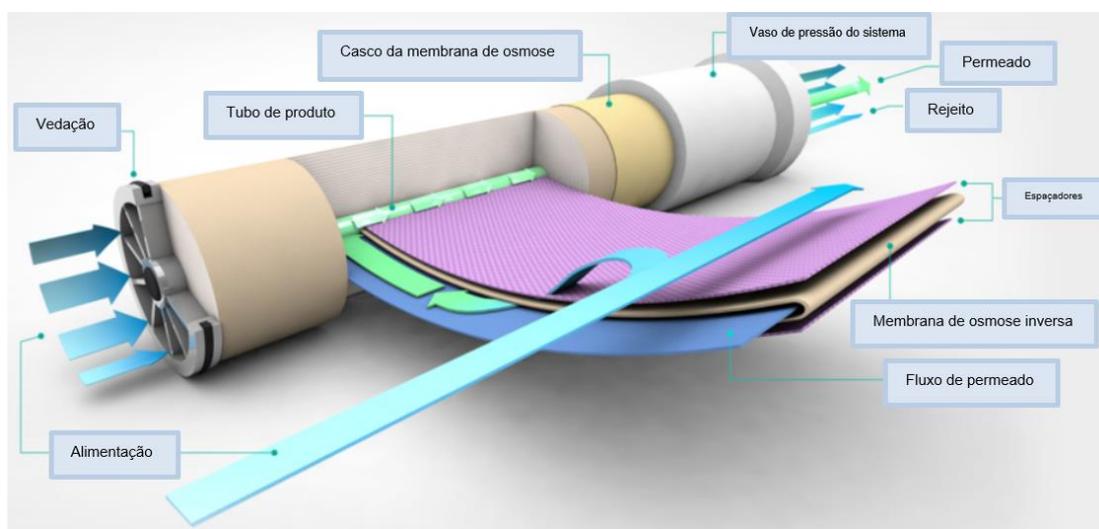


Figura 4. Módulo de membrana e representação esquemática das correntes envolvidas no processo de permeação. Adaptado de: Colourandre, 2019.

A eficiência dessa tecnologia pode ser comprometida pelo depósito de incrustações nas membranas, comumente denominado *fouling*. O *fouling* impacta o desempenho da membrana, resultando em um aumento no consumo de energia, frequência de CIPs (*cleaning-in-place* ou limpeza química), consumo de químicos, substituições de membranas e consequentemente o custo do tratamento de água (Boulahfa *et al.*,2019).

2.3.1 Parâmetros de desempenho para osmose inversa

O fluxo permeado e a retenção de soluto são os dois indicadores mais importantes de performance dos processos de separação com membranas.

O fluxo permeado (J_p) é representado em unidades de $L m^{-2}.h^{-1}$ e pode ser expresso pela Equação 1:

$$J_p = L_p \times \Delta P \quad (1)$$

sendo L_p é a permeância hidráulica da membrana em $L\ m^{-2}\cdot h^{-1}\ bar^{-1}$ e ΔP a pressão transmembrana em bar.

O fluxo limite corresponde ao fluxo máximo atingido, em regime estacionário, que pode ser alcançado com o aumento da pressão operacional, com uma determinada solução. Na Figura 5 podem ser observados os perfis característicos de fluxo em relação à pressão para a água pura (reta) e para uma solução qualquer (curva com patamar), além do ponto correspondente ao fluxo crítico. O aumento contínuo na pressão além do valor correspondente de fluxo crítico faz com que a curva se distancie cada vez mais em relação à curva para a água pura.



Figura 5. Representação da curva de fluxo limite e fluxo crítico.
Adaptado de: Nunes, 1997.

A retenção de soluto ($R\ \%$) é definida como a diferença de concentração através da membrana dividida pela concentração de soluto na alimentação. A retenção de soluto pode ser calculada pela Equação 2:

$$R\ (\%) = \frac{(c_1 - c_2)}{c_1} \times 100 \quad (2)$$

sendo c_1 é a concentração de soluto na alimentação e c_2 é a concentração de soluto no permeado, ambas em $kg\cdot m^{-3}$.

2.3.2 Pré-tratamentos

Para um bom desempenho do sistema de OI, é fundamental que haja um pré-tratamento adequado da corrente de alimentação. A definição ou escolha dos pré-tratamentos se torna complexa devido à variação natural na qualidade da água de alimentação, associada com os muitos tipos de água que podem ser tratados através de PSMs. Essas aplicações geralmente incluem água subterrânea salobra, água superficial salobra, água do mar,

efluentes industriais e domésticos, água de reaproveitamento e água ultrapura (Boulahfa *et al.*,2019).

O comportamento de um sistema de OI pode ser previsível e robusto quando a água de alimentação é pré-tratada adequadamente. Usualmente, a operação de um sistema de OI é eficiente enquanto os componentes que causam *fouling* são removidos a montante. Por definição, o propósito de um sistema de pré-tratamento é a remoção de componentes da fonte de alimentação que poderiam prejudicar as membranas e adição de quaisquer químicos necessários para permitir uma eficiente dessalinização e estender a vida útil das membranas (Henthorne & Boysen, 2015).

Diferentemente da dessalinização natural de água, as plantas de dessalinização de efluentes necessitam de sistemas de pré-tratamento mais sofisticados para condicionar a água de alimentação a níveis adequados para um sistema de OI (Madwar & Tarazi,2003). Águas de superfície, especialmente água do mar e efluentes, contêm muitos nutrientes disponíveis e oxigênio para a respiração. Assim, são sistemas ideais para o crescimento de bactérias. Por essa razão, o *biofouling* (*fouling* biológico) é também um problema comum em processos de tratamento de água que utilizam a tecnologia de membranas. No momento que ocorre *biofouling*, as bactérias podem rapidamente cobrir a superfície das membranas causando redução da permeabilidade, e podem efetivamente bloquear a alimentação dos canais dos módulos de membranas de OI, levando a um aumento da perda de carga através do módulo (Henthorne & Boysen, 2015).

No monitoramento operacional, o *biofouling* é frequentemente caracterizado pelo rápido aumento na diferença de pressão e uma diminuição na permeabilidade ou fluxo específico. Após o início do *fouling* biológico é necessário realizar o CIP rapidamente, uma vez que a pressão de alimentação necessária pode ser prejudicial às membranas, ou pode resultar em um decaimento da vazão de operação e produção de água no sistema, se não está disponível uma capacidade adequada de bombeamento.

Além do *biofouling*, existem quatro outros diferentes tipos de *fouling*, em que um pré-tratamento do sistema pode ser necessário para atenuação: *fouling* por partículas (que geralmente se refere ao *fouling* causado por partículas suspensas na água), *fouling* por colóides (muito semelhante ao *fouling* por partículas, pode ser de natureza microbiana, ou ser composto por material orgânico ou inorgânico), *fouling* orgânico (deposição de compostos orgânicos como proteínas e substâncias húmicas) e *scaling* (que consiste na cristalização e deposição de sais pouco solúveis pelos espaçadores do sistema de osmose inversa) (Henthorne & Boysen, 2015).

Em geral, um sistema de pré-tratamento de membranas de OI será composto por uma ou mais das seguintes operações unitárias: filtração, dosagem química para controle biológico, flotação, coagulação/floculação e dosagem química associada, um ou mais estágios de filtração, adição de químicos para inibição de *scaling* ou redução de cloro. O custo relativo do pré-tratamento do sistema é diretamente dependente da qualidade da água de alimentação e do número de processos de pré-tratamento necessários para o fornecimento da qualidade requerida para a corrente de alimentação do sistema de osmose inversa (Henthorne & Boysen, 2015).

2.3.3 Membranas de OI descartadas

A osmose inversa é a tecnologia de dessalinização globalmente mais utilizada. As membranas de compósitos à base de PA atualmente são utilizadas em mais de 95 % das plantas de dessalinização por OI existentes (García-Pacheco *et al.*, 2017).

Com uma vida útil esperada de 5 a 8 anos, as membranas de OI utilizadas em dessalinização devem ser consideradas como um bem de consumo frequentemente substituível e, como consequência, uma fonte de resíduo bastante peculiar. O gerenciamento do ciclo de vida das membranas tem demonstrado ter crescente interesse entre a academia e o setor industrial. Muitos trabalhos têm por foco estender o tempo de vida útil das membranas, através do desenvolvimento de melhores materiais e métodos de fabricação, operação e limpeza dos sistemas de membranas (Burn, *et al.*, 2015).

Apesar das muitas estratégias de prevenção criadas, o *fouling* ainda é inevitável e é a principal causa do descarte de milhares de toneladas de membranas todo ano. Ciclos de limpeza são conduzidos quando a pressão através da membrana, fluxo e qualidade de permeado variam entre 10 % e 15 % em relação aos valores iniciais. A reposição anual, junto ao contínuo crescimento da tecnologia de OI, está criando um acúmulo contínuo de módulos em fim de vida útil. Na dessalinização, o percentual anual de reposição de membranas está em torno de 5 % a 20 % das membranas instaladas (Greenlee, *et al.*, 2009).

Landaburu *et al.* (2016) estimaram que na Espanha (quarto maior país produtor de água dessalinizada no mundo), por volta de 81.425 módulos de membranas em fim de vida útil são anualmente dispostas em aterros. Esses resultados podem ser extrapolados para uma escala global, onde 65 % do total da capacidade de dessalinização (86,8 milhões de m³/dia) usa a OI. Considerando um percentual de reposição de membranas de 15 %, a estimativa mostra que mais de 840.000 módulos em fim de vida (ou mais de 14.000 ton) são descartados todo ano.

Geralmente, o manuseio de membranas no fim da vida útil é feito de acordo com as leis de cada país e membranas descartadas são dispostas em aterros. A disposição em aterros pode ser vista como um desperdício, ambientalmente prejudicial e uma opção custosa de gerenciamento de resíduos. A falta de alternativas e o custo, ainda conveniente, desse tipo de disposição leva essa prática a ser comum (García-Pacheco, *et al.*, 2017).

2.3.4 Alternativas para membranas em fim de vida útil

De acordo com o princípio piramidal de gerenciamento de resíduos da Diretiva Européia 2008/98/EC sobre resíduos, as opções preferidas como métodos de prevenção do material, reúso, reciclagem, recuperação e disposição devem ser aplicadas nesta ordem de prioridade (García-Pacheco, *et al.*, 2017). A prevenção é normalmente aplicada em plantas de dessalinização utilizando membranas anti-*fouling* e otimizando o processo através do uso de pré-tratamentos e ciclos de limpeza; mesmo assim, o acúmulo de membranas no fim do ciclo de vida é inevitável. Apesar do reúso direto de membranas em fim de vida útil, sem qualquer tratamento químico tradicional, ser a alternativa preferida, uma avaliação apropriada de sua performance atual, validação adicional e protocolos potenciais de limpeza química são cruciais na identificação da melhor rota alternativa para as membranas (Landaburu-Aguirre, 2016).

Na hierarquia dos resíduos, o reúso inclui a verificação, limpeza ou operações de reparação e recuperação, onde os produtos ou componentes dos produtos que se tornaram resíduo são preparados para serem reusados sem qualquer outro pré-processamento. De acordo com alguns estudos, membranas de OI em fim de vida útil apresentam performance similar às de NF (Ould Mohamedou, *et al.*, 2010).

A companhia americana Watersurplus é um exemplo de empresa fornecedora de elementos de membranas de OI, NF e UF de segunda mão. No ano de 2016 a companhia adquiriu e reusou mais de 25.000 elementos de membranas de OI que podem ser usados em diversas aplicações, como nas áreas de energia, óleo e gás, mineração, agricultura, reúso de água industrial e manufatura de químicos (Watersurplus, 2019; García-Pacheco, *et al.*, 2017). Apesar de haver interesse e alternativas para reúso de módulos de membrana de OI em fim de vida útil, essa opção nem sempre é viável devido à alta quantidade de *fouling* ou danos físicos causados por abrasão de partículas suspensas. Nesses casos, a reciclagem de membranas se torna outra potencial estratégia (Noble & Stern, 1995).

Pode ser feita a reciclagem direta ou indireta de membranas, dependendo se as membranas recicladas conservam ou não sua estrutura espiral original (García-Pacheco, *et*

al.,2017). A reciclagem direta se refere à conversão de membranas de OI em final de vida útil através da degradação parcial ou completa da camada densa de poliamida (PA), modificando características morfológicas e de performance da membrana (Landaburu-Aguirre, *et al.*,2016).

A relativa vulnerabilidade da camada de PA através do uso de agentes oxidantes convencionais vem sendo largamente estudada no contexto do envelhecimento e degradação química (Veza & Rodriguez-Gonzalez, 2003). Rodríguez et al. (2003) introduziram o conceito de transformar membranas de OI em fim de vida útil em membranas de ultrafiltração para seu futuro uso em processos de tratamento de efluentes. Nesse trabalho, hipoclorito de sódio (NaClO) e outros compostos químicos oxidantes, como peróxido de hidrogênio (H₂O₂), dodecil sulfato de sódio, e permanganato de potássio (KMnO₄), foram testados utilizando diferentes condições de operação para degradar a camada ativa de PA da membrana.

A reciclagem indireta se refere à desconstrução do módulo e o reprocessamento de toda a membrana ou algumas secções dela em produtos industriais. Ainda, pode ser uma alternativa para membranas em fim de vida útil que não podem ser diretamente recicladas e para membranas recicladas já gastas. Opções alternativas de reciclagem indireta de módulos de membranas incluem várias opções como decoração para roupas ou o uso como material agregado em concreto compósito (Landaburu-Aguirre, *et al.*, 2016).

É possível ainda a utilização de módulos de membrana em fim de vida útil na recuperação de energia. As principais categorias de processamento térmico comumente utilizadas na indústria incluem incineração, pirólise ou processamento térmico na ausência de oxigênio, gaseificação (combustão parcial com fornecimento limitado de ar para produção de gás de síntese), e conversão catalítica para óleo combustível. Ambientalmente, a gaseificação e a pirólise oferecem vantagens sobre a incineração simples, pois geram menos emissões, reduzem a quantidade de resíduos e aumentam a recuperação de energia (Wu & Williams, 2010).

2.4 Reúso de água e efluentes

O reúso de água pode ser definido, de acordo com o artigo 2º da Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005, do Conselho Nacional de Recursos Hídricos – CNRH, como o uso de água residuária ou o uso de água de qualidade inferior. Em 2017, o Relatório Global de Água das Nações Unidas mencionou que o reúso de água ainda é uma fonte pouco explorada no combate à disponibilidade de água e à sua poluição (Roccaro & Verlicchi, 2018).

A limitação das fontes tradicionais de água foi de certa forma “despercebida”, até o início do crescimento populacional. No século XX, problemas relacionados à disponibilidade de água em grandes reservatórios começaram a aparecer (Foundation for Water Research, 2016). Ainda não existe nenhuma legislação específica no Brasil sobre reúso de águas, no entanto, existe uma tendência crescente de melhoria da eficiência do uso de recursos hídricos, tanto em relação ao meio urbano quanto rural (Ambiente Brasil, 2019).

Nesse contexto, o reúso de efluente industrial tem um importante papel, visto que grandes volumes podem ser utilizados, reduzindo o volume global de água a ser captado em uma determinada indústria. A implementação de reúso e reutilização de água é um fator chave para o gerenciamento sustentável de recursos hídricos. É estratégico utilizar a água de boa qualidade em processos que requerem água de boa qualidade e, então, reutilizar a água “em cascata” em processos que requerem uma menor qualidade da água (Foundation for Water Research, 2016).

Dependendo do tipo e da qualidade do efluente, é possível fazer reúso direto ou com tratamento prévio. O reúso de efluentes na indústria tem como vantagens a redução do consumo de água, redução de custos e redução do volume de efluente gerado. Algumas desvantagens são a necessidade do conhecimento detalhado sobre as características do efluente a ser reusado, o investimento requerido, o alto nível de confiança necessário entre as indústrias, além das modificações operacionais tanto para reúso direto quanto para reúso com tratamento prévio (Sustainable Sanitation and Water Management, 2019).

O reúso de efluentes tem se tornado uma opção ambientalmente e economicamente viável para a indústria. As razões para essa seleção são a restrição de parâmetros para o descarte de efluentes exigida pela legislação e a constante redução da disponibilidade e qualidade das fontes de água. Os requerimentos de qualidade variam entre os diferentes tipos de indústria, sendo que melhores padrões de qualidade estão associados à prevenção da corrosão, *scaling* e *biofouling* de equipamentos e sistemas de distribuição. Onde há o potencial de risco de contato humano com a água reusada proveniente de efluentes tratados, o controle de organismos patogênicos se torna importante também (Gündoğdu, *et al.*, 2019).

O uso de PSM como biorreatores com membranas (MBR), MF, UF, NF e OI, integrados ou não, vem se tornando uma alternativa em potencial para o reúso de efluentes, devido à sua eficácia e viabilidade econômica. (Gündoğdu, *et al.*, 2019). A dessalinização vem sendo a principal fonte não convencional de água em muitos países, especialmente aqueles que estão sofrendo diminuição em suas fontes naturais de água. Combinando estratégias de reúso de efluentes e tecnologias de dessalinização é possível converter efluentes em água de alta qualidade para as mais diversas aplicações industriais. Algumas

especificações de qualidade para a água a ser utilizada na indústria somente são satisfeitas utilizando técnicas de dessalinização. A água com alta pureza, como a requerida para caldeiras, somente pode ser produzida por meio de métodos combinados de adsorção e separação por membranas (Madwar & Tarazi, 2003).

Exemplos de sucesso onde são utilizadas plantas de OI com alimentação de efluentes podem ser encontrados em muitos sistemas ao redor do mundo. A água produzida é utilizada para diferentes aplicações industriais ou até mesmo com qualidade suficiente para ser potável (Madwar & Tarazi, 2003).

Apesar do uso de membranas para o reúso e a recuperação de efluentes ser ainda restringida devido aos custos envolvidos, os avanços no desenvolvimento de tecnologias de membranas e as melhorias em sua eficiência e na relação custo-eficácia vem aumentando a competitividade do reúso em relação à descarga de efluentes. Alguns exemplos de projetos envolvendo recuperação e reúso em ciclo fechado utilizando membranas sugerem que é possível um tempo de retorno do investimento (*payback*) de 18 meses, com a escala de tempo sendo fortemente dependente dos custos de suprimento e descarga de efluentes (Judd & Jefferson, 2003).

A refinaria Riyadh na Arábia Saudita, possui uma planta de tratamento de água para reúso que foi construída em 1981, para dessalinização de 20.000 m³.dia⁻¹ de efluente tratado. É utilizado um processo biológico chamado *trickling filter* (filtro gotejante) como um dos pré-tratamentos previamente à OI. A planta consiste em dois estágios de clarificação, seguido de um filtro multicamadas, OI e finalmente desmineralização por troca iônica. A planta é capaz de produzir três diferentes níveis de qualidade de água, para satisfazer diferentes aplicações na refinaria, classificados de acordo com valores de turbidez, carbono orgânico dissolvido, sólidos dissolvidos totais, sólidos solúveis totais, demanda bioquímica de oxigênio, nitratos e nitrogênio amoniacal (Madwar & Tarazi, 2003).

A planta de reúso de efluente chamada “Water factory 21” na Califórnia tem grande capacidade e é capaz de transformar 57.000 m³.dia⁻¹ de efluente secundário proveniente de uma planta de lodo ativado em água de melhor qualidade. A água produzida é injetada em poços costeiros para redução da intrusão da água do mar na água subterrânea e para recarregar a capacidade do reservatório. O processo envolve clarificação do efluente, *air stripping*, recarbonatação pré-cloração, filtração, filtro de carvão ativado, pós-cloração e osmose inversa. Depois da filtração, 23.000 m³.dia⁻¹ de água passam pela osmose inversa e o permeado é misturado com 34.000 m³.dia⁻¹ de água filtrada (Madwar & Tarazi, 2003).

O projeto EU Demoware é uma iniciativa da União Europeia cujo objetivo é melhorar o reúso industrial de água na Europa. Um sistema para tratamento de efluentes foi

desenvolvido pela empresa Dow especialmente para obtenção de água com qualidade suficiente para abastecer torres de resfriamento. As empresas da região de Tarragona, na Espanha (uma das regiões de maior estresse hídrico do país), necessitam de um suprimento constante de água limpa e fresca, que anteriormente era 100 % captada do Rio Ebro, para alimentar seus sistemas de resfriamento. Como resultados do projeto, a água de *make-up* utilizada nas torres de resfriamento do Complexo Químico e Petroquímico da Dow hoje consiste em 40 % de água proveniente de reúso, equivalente a uma taxa de $160 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. A expectativa era que para o ano de 2016 a percentagem seria de 90 %, misturada com 10 % de água do Rio Ebro. O projeto contribui para a redução de consumo de água de fontes naturais e o aumento da disponibilidade de água para outros usos como na agricultura ou projetos de crescimento do turismo (Dow Filmtec, 2016).

Torres de resfriamento são equipamentos que perdem grande quantidade de água devido à respingos e principalmente à evaporação. Dessa forma, a água que circula pela torre é continuamente concentrada e é necessária uma corrente de água de reposição (*make-up*) para que a concentração dos químicos e outros componentes naturalmente presentes na água da bacia da torre se mantenha em níveis aceitáveis. É possível a obtenção de água de reúso com qualidade suficiente para ser utilizada como *make-up*, utilizando membranas de OI descartadas, como demonstrado em trabalhos anteriores.

Frick *et. al.* (2013) estudaram diferentes pré-tratamentos para um sistema de membranas de OI descartadas no reúso da corrente de purga de um sistema de torres de resfriamento como água de *make-up*. Os resultados obtidos mostraram uma redução de aproximadamente 97 % na condutividade elétrica das amostras testadas, demonstrando a aplicabilidade do método.

Em outro trabalho, Veza & Rodriguez-Gonzalez (2003) utilizaram uma planta piloto com membranas de OI descartadas para tratamento de efluente municipal secundário. Foram obtidos valores em torno de 98,5 % de retenção de soluto, com valor de condutividade correspondente aceitável caso fosse feito o reúso da água como *make-up* de torres de resfriamento.

2.5 Considerações finais sobre a revisão bibliográfica

Tendo em vista os tópicos abordados, verifica-se que é cada vez mais necessário o desenvolvimento de novas fontes sustentáveis de água e a otimização de seu uso no meio industrial.

O reúso de efluentes é uma alternativa que propicia a minimização do consumo de água e ao mesmo tempo para a redução da quantidade de efluentes gerados nas indústrias. O

número de trabalhos relacionados ao assunto vem aumentando tanto em meio acadêmico como industrial.

Nesse contexto, surge a ideia de utilização da tecnologia de OI, já consolidada no processo de desmineralização de águas. Um dos problemas inerentes à essa tecnologia é a grande quantidade gerada de módulos de membranas descartados, tendo em vista que os módulos precisam ser substituídos periodicamente.

Alternativas para o reaproveitamento desses módulos podem ser encontradas na literatura. Uma aplicação interessante é a obtenção de água de reúso através do tratamento de efluentes, para ser utilizada em processos que requerem uma menor qualidade da água.

Este trabalho visa um melhor entendimento do desempenho desse tipo de sistema, através de um estudo em escala de bancada, que permite uma avaliação da técnica utilizada e mapeamento de eventuais problemas relacionados.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo será abordada a metodologia utilizada para a realização do trabalho. Serão apresentados os materiais e métodos utilizados para as análises e os procedimentos experimentais pertinentes.

3.1 Materiais

Para os ensaios de permeabilidade hidráulica (PH) foi utilizada água destilada. Para os ensaios de retenção salina (RS) foram utilizadas soluções de NaCl 1.500 ppm em água destilada, utilizando reagente Cloreto de Sódio P.A. - A.C.S. (Synth).

As membranas de OI testadas neste trabalho são provenientes de plantas de desmineralização de água e foram descartadas há aproximadamente 10 anos (Filmtec e Hydranautics). O material da camada seletiva das membranas de OI é a PA e tem como suporte uma camada de polissulfona, cuja função é aumentar o fluxo através da membrana. A camada de polissulfona é ainda suportada por uma camada não-tecido, que serve como reforço e permite que a membrana tenha resistência mecânica suficiente para as pressões aplicadas durante a operação. Os pedaços de membrana foram armazenados em solução aquosa de metabissulfito de sódio e mantidos sob refrigeração até o seu uso.

3.1.1 Efluente final tratado

O efluente utilizado nos ensaios é a corrente final da estação de tratamento de efluentes (ETE) de uma indústria, obtido previamente à cloração final e ao lançamento no corpo hídrico. Um fluxograma simplificado da ETE pode ser visualizado na Figura 6.

As amostras foram coletadas em bombonas de 6 L e armazenadas sob refrigeração até sua utilização. O número de amostras e as datas de coleta podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2. Amostras de efluente e datas das coletas.

Amostra	Data da coleta
1	27/04/2018
2	06/06/2018
3	31/08/2018
4	05/09/2018
5	15/01/2019

Foram utilizadas nos ensaios as amostras de efluente 2, 3 e 5. A amostra 1 foi utilizada apenas para ensaios de turbidez nos testes preliminares do pré-tratamento com filtro cartucho

e a amostra 4 apresentou valor de turbidez maior que o critério estabelecido, conforme será abordado na seção 4.1. Para escolha da pressão de operação, foi feito um teste de variação de fluxo com a pressão, utilizando a amostra 2, nas pressões de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 bar.

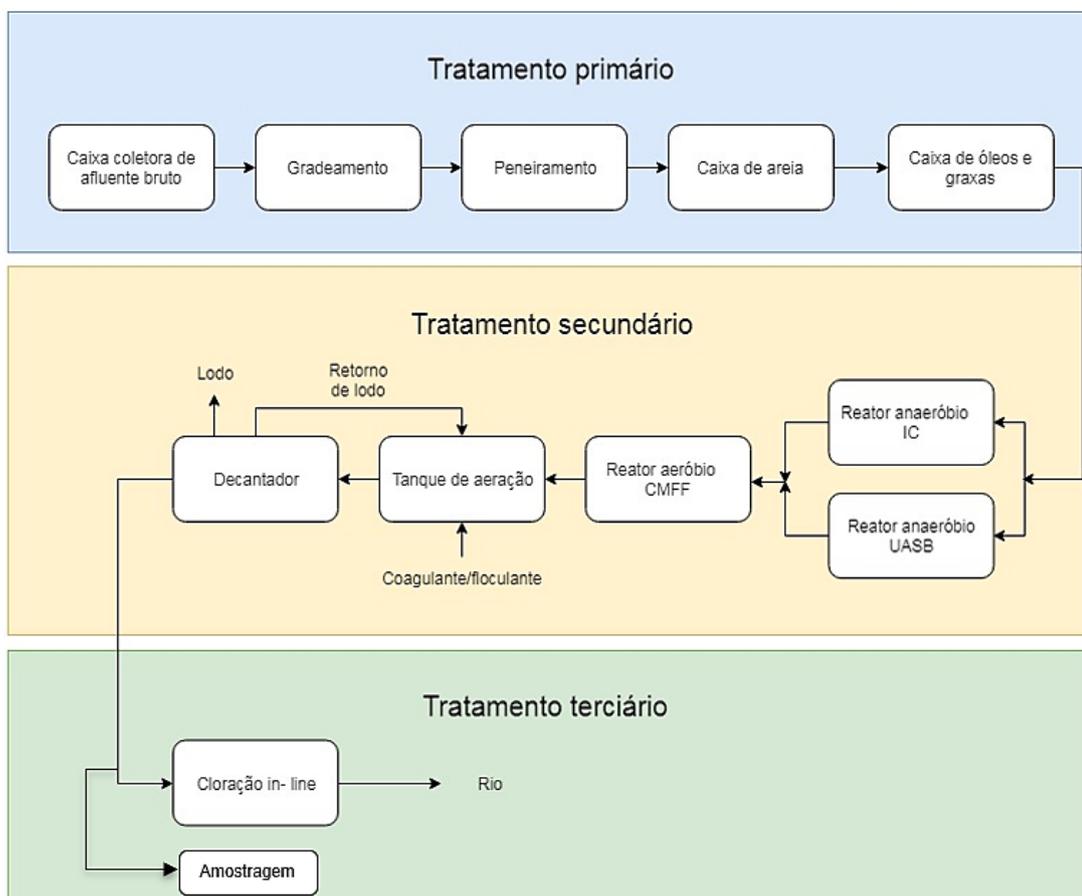


Figura 6. Representação esquemática da estação industrial de tratamento de efluentes.

3.2 Sistemas de filtração

3.2.1 Sistema de pré-tratamento com filtro cartucho

Foi utilizado filtro cartucho 5 μm de polipropileno como pré-tratamento do sistema de OI, com o objetivo de ajustar a turbidez do efluente para valores menores que 1 NTU. Bateladas do efluente filtrado (aproximadamente 1,5 L) foram adicionadas no tanque de alimentação do sistema de OI. O sistema de filtração pode ser observado na Figura 7 e consiste em um tanque de alimentação onde é colocado o efluente bruto (1), uma bomba diafragma (modelo 8030-813-239, SHURflo, México) (2), um vaso de pressão para o filtro cartucho (3) e um tanque para coleta do efluente filtrado (4).

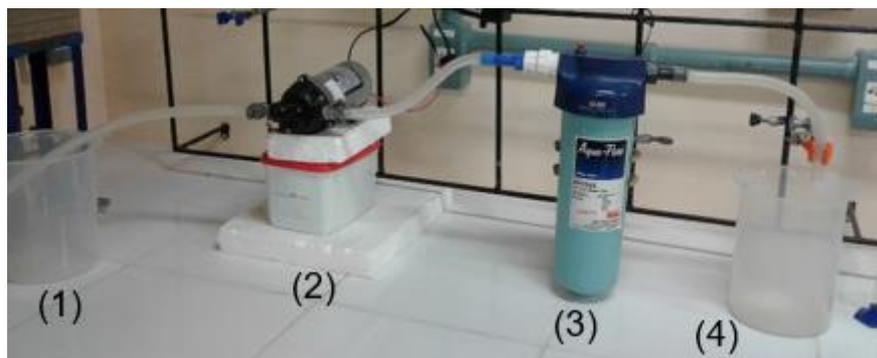


Figura 7. Fotografia do sistema de pré-tratamento com filtro cartucho.

3.2.2 Sistema de osmose inversa

O sistema de OI de bancada utilizado nos ensaios consiste em um tanque de alimentação encamisado (1), bomba diafragma (2), manômetro para medida de pressão da corrente de alimentação (3), manômetro para medida de pressão da corrente de rejeito (4), módulo para membrana plana (5), válvula para controle da vazão de rejeito (6), rotâmetro para medição de vazão de rejeito (7) e um banho termostático para controle da temperatura do tanque de alimentação. Na Figura 8 podem ser observados os componentes do sistema.

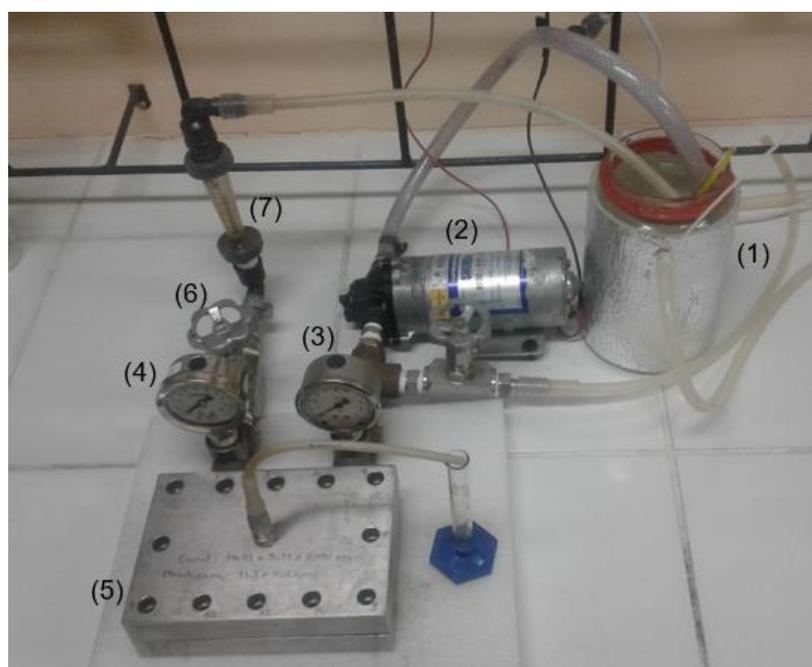


Figura 8. Fotografia do sistema de osmose inversa utilizado nos ensaios.

3.3 Métodos de análise do efluente bruto, filtrado e permeado

A eficiência da OI como tratamento para o efluente em questão foi avaliada através das características do efluente bruto, do efluente filtrado e do efluente permeado

considerando os parâmetros de condutividade elétrica, pH e turbidez. A condutividade elétrica do permeado obtida foi comparada com o valor máximo de condutividade elétrica permitido para a água de resfriamento utilizada na indústria (400 $\mu\text{S}/\text{cm}$).

As medidas de turbidez foram feitas em turbidímetro da marca Policontrol, modelo AP2000. O pH foi medido utilizando medidor de pH da IONLAB, modelo PHB500. As medidas de condutividade elétrica foram feitas em condutivímetro da Digimed, modelo DM31. Para as análises de cloro livre e total foi utilizado o kit da Merck, Mcolortest™ Chlorine Test Pack (114803/1, 114803/2 e 114803/3).

As análises de condutividade elétrica, turbidez e pH foram realizadas para caracterização do efluente antes e após sua passagem pela membrana, como também para o efluente bruto. A turbidez do efluente e a concentração de cloro livre e cloro total na saída da estação também foram monitorados periodicamente para verificar a necessidade do uso de pré-tratamento e a viabilidade de aplicação da OI.

3.4 Experimentos com membranas de OI descartadas

3.4.1 Caracterização das membranas

Os experimentos foram realizados com pedaços de membrana plana cortados de módulos espirais descartados. Para cada novo experimento, um novo pedaço de membrana foi utilizado. Na Figura 9 pode ser observado um pedaço de membrana disposto no módulo utilizado nos testes.



Figura 9. Imagem da membrana disposta no módulo utilizado em um dos experimentos.

22 Utilização de Membranas de Osmose Inversa Descartadas no Reúso de Efluente Final da ETE de uma Indústria

Com o intuito de determinar a melhor pressão de operação com o efluente, foi realizado ensaio de fluxo limite utilizando a amostra PI. As medições de fluxo foram realizadas para as pressões de 3, 4, 5, 6, 7, e 8 bar.

Anteriormente à realização dos experimentos com o efluente, foi feita a caracterização do pedaço de membrana através de teste de permeabilidade hidráulica utilizando água destilada e retenção salina utilizando solução de NaCl 1.500 ppm.

Foram utilizados 3 pedaços de membrana nos diferentes testes realizados. Na Tabela 3 podem ser observadas informações sobre os pedaços de membrana utilizados.

Tabela 3. Pedaços de membrana utilizados nos ensaios.

Amostra	Testes realizados
PI	PH e RS (iniciais), Fluxo limite com efluente, Operação com efluente, PH e RS (após a passagem do efluente)
PII	PH e RS (iniciais), Operação com efluente, PH e RS (após a passagem do efluente)
PIII	PH e RS (iniciais), Operação com efluente, PH e RS (após a passagem do efluente)

Para as amostras PI e PII foram utilizadas as pressões de 3, 4, 5 e 6 bar nos testes de caracterização. Para a amostra PIII foram utilizadas as pressões de 3, 3.5, 4 e 4,5 bar. A taxa de rejeito foi mantida em 3 L.min⁻¹ e a temperatura da corrente de alimentação foi controlada entre 24 °C e 26 °C para todos os ensaios realizados.

O fluxo permeado (J_p) foi obtido a partir da Equação 3:

$$J_p = \frac{\Delta V}{A \cdot \Delta t} \quad (3)$$

sendo Δt é o tempo necessário para permeação de 5 mL (ΔV) de água destilada através da membrana de área A (58,83 cm²). As medidas de tempo foram tomadas em triplicata, 15 min após o início dos testes nas pressões determinadas, para garantir a estabilização do fluxo.

O mesmo tempo de estabilização foi adotado nos testes de retenção salina (RS), obtida pela Equação 4:

$$RS = \frac{C_A - C_P}{C_A} \times 100 \quad (4)$$

sendo C_A e C_P são as condutividades elétricas da alimentação e do permeado, respectivamente. A concentração total de sais em uma solução diluída tem relação direta com sua condutividade elétrica, portanto, é possível usar os valores medidos de condutividade ao longo dos experimentos no cálculo da retenção salina (ou retenção de soluto).

Uma nova caracterização da membrana foi realizada após os testes com efluente. Através da comparação dos testes de permeabilidade hidráulica e retenção salina antes e após a passagem do efluente, é possível avaliar o desempenho da membrana, incluindo a possível degradação ou formação de *fouling*.

4 Resultados e Discussão

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos no estudo das características do efluente final da ETE, seu tratamento com membranas de OI descartadas e a avaliação do desempenho das mesmas. Primeiramente é descrita a caracterização inicial de diversas amostras de efluente e das membranas descartadas de OI. Na sequência são mostrados resultados referentes aos ensaios de operação do sistema de OI com efluente, avaliando a estabilidade do sistema com relação ao fluxo e retenção salina. Por fim, são apresentados resultados referentes à caracterização final das membranas, no intuito de avaliar o possível depósito de incrustações ou degradação nas mesmas.

4.1 Caracterização inicial do efluente

Um dos parâmetros mais importantes na caracterização da corrente de alimentação de um sistema de OI é a turbidez. A utilização de filtro cartucho como pré-tratamento do sistema de OI poderia se tornar insuficiente caso os valores de turbidez estivessem muito elevados. Para que fosse possível assegurar a eficácia do método de pré-tratamento, foi realizado um monitoramento da turbidez do efluente final tratado, com o objetivo de verificar variações temporais nesse parâmetro. Na Figura 10 é possível observar os resultados do acompanhamento da turbidez para diferentes amostras de efluente coletadas.

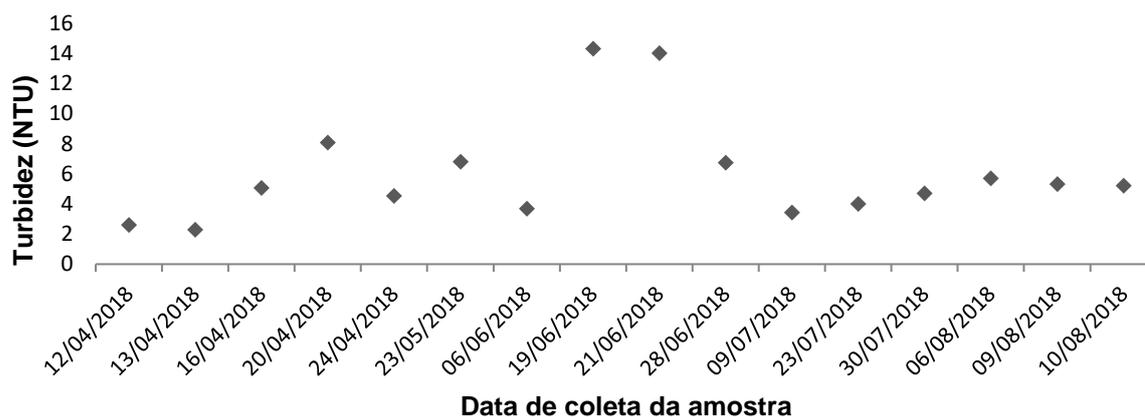


Figura 10. Resultados de turbidez do efluente final para as diferentes amostras coletadas.

A variabilidade observada entre os valores de turbidez das amostras coletadas é inerente ao sistema de tratamento de efluentes. O afluente bruto que entra na estação pode sofrer variações na carga orgânica ou na concentração de químicos tóxicos ao lodo e dessa

forma alterar a eficiência da estação e a qualidade do efluente final. Conforme acompanhamento da turbidez de 12/04/2018 até 10/08/2018 foi calculado o valor médio de turbidez de 6,0 NTU.

Determinou-se que os ensaios com efluente seriam realizados se a turbidez do efluente estivesse menor que a média calculada de 6 NTU. Dentre as 5 amostras de efluente coletadas, conforme consta na Tabela 4, apenas 4 satisfizeram a restrição anterior. A amostra 1 foi utilizada somente para o experimento de verificação da turbidez da corrente de saída do sistema de filtro cartucho, i.e., para verificar a eficiência do sistema de pré tratamento adotado. Na Tabela 5, podem ser observados os resultados das análises de turbidez, pH e condutividade das amostras utilizadas nos ensaios.

Tabela 4. Amostras de efluente e datas das coletas.

Amostra	Data da coleta	Turbidez (NTU)
1	27/04/2018	3,67
2	06/06/2018	4,80
3	31/08/2018	3,30
4	05/09/2018	6,60
5	15/01/2019	4,36

Tabela 5. Caracterização inicial das amostras de efluente.

Parâmetro	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 5
Turbidez (NTU)	4,8	3,3	4,4
pH	8,4	8,5	8,3
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	2.600	2.640	2.530

As características do efluente relativas a outros parâmetros foram fornecidas pela empresa, sendo que os valores de concentração para cada analito são valores médios, uma vez que as análises foram realizadas por duas empresas diferentes. Na Tabela 6 podem ser observados resultados de análises do efluente realizados para amostras coletadas em dois dias diferentes (amostras A e B).

Dentre os compostos detectados é possível perceber que o efluente tem considerável quantidade de sais dissolvidos, haja vista os altos teores de sódio e cloretos, além de um alto valor para alcalinidade. O teor de sílica é baixo, o que favorece a utilização da OI, já que altos teores de sílica tendem a contribuir para a formação de incrustações na membrana.

Tabela 6. Caracterização detalhada do efluente com relação à diferentes analitos.

Analito	Resultados		Unidade
	Amostra A 01/02/2018	Amostra B 09/04/2018	
Alcalinidade P (CaCO ₃)	--	21	mg/L
Alcalinidade M (CaCO ₃)	--	1063	mg/L
Alumínio	--	1,393	mg/L
Arsênio	<0,01	--	mg/L
Boro	0,14	0,175	mg/L
Brometo	--	<1,00	mg/L
Cádmio	<0,004	--	mg/L
Carbono orgânico não purgável	--	9,27	mg/L
Chumbo	<0,006	--	mg/L
Cloreto	--	148	mg/L
Cobre dissolvido	<0,01	0,007	mg/L
Condutividade elétrica	--	2300	µS/cm
Cromo hexavalente	<0,02	--	mg/L
DBO5	14,4	--	mg/L
Dureza total (como CaCO ₃)	--	31,3	mg/L
Enxofre (SO ₄)	--	10,2	mg/L
Ferro dissolvido	1,95	0,841	mg/L
Fluoreto	0,184	<1,00	mg/L
Fosfato	--	2,96	mg/L
Manganês dissolvido	<0,01	0,003	mg/L
Materiais flutuantes	--	--	mg/L
Mercúrio	<0,1	--	µg/L
Níquel	<0,01	--	mg/L
Nitrato	--	28,4	mg/L
Óleos e graxas mineral	<10	--	mg/L
Óleos e graxas vegetal/animal	<10	--	mg/L
pH	8,86	8,5	mg/L
Potássio	--	29,2	mg/L
Sílica	--	4,6	mg/L
Sódio	--	717	mg/L
Sólidos sedimentáveis	<0,1	--	mg/L
Zinco	0,07	--	mg/L
Benzeno	<2	--	ug/L
Clorofórmio	<2	--	ug/L
Dicloroetano	<6	--	ug/L
Estireno	<5	--	ug/L
Etilbenzeno	<0,02	--	ug/L
Tetracloroeto de carbono	<2	--	ug/L
Tolueno	<5	--	ug/L
Xileno total	<0,1	--	ug/L
Nitrogênio amoniacal	<5	--	mg/L
Sulfeto	<0,1	--	mg/L

4.2 Caracterização inicial das membranas

Todos os pedaços de membranas utilizados no trabalho foram caracterizados em relação à permeância hidráulica e retenção salina. Os resultados para as amostras PI, PII e PIII podem ser observados nos gráficos das Figuras 11 e 12.

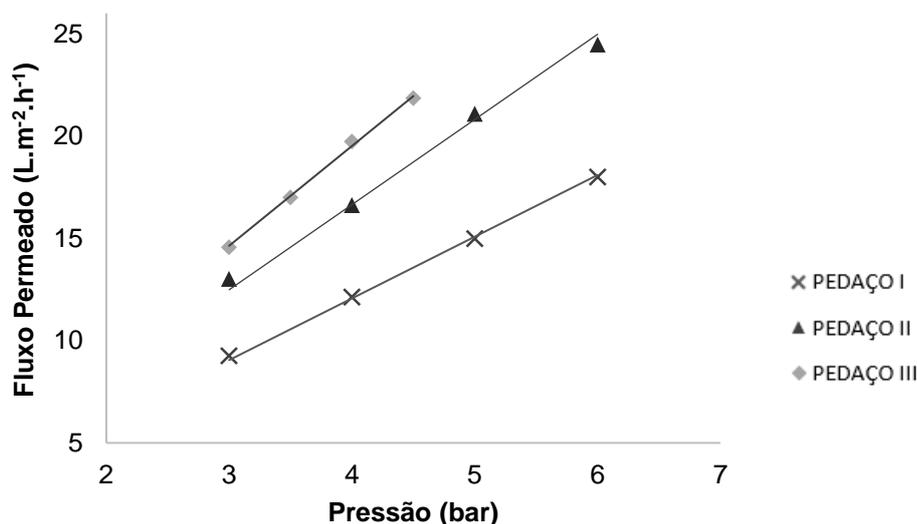


Figura 11. Fluxos e valores de permeabilidade hidráulica em diferentes pressões para os três pedaços utilizados nos ensaios com efluente.

Os resultados mostram uma relação linear do fluxo permeado com a pressão para as três amostras de membrana. Os maiores fluxos foram observados para a amostra PIII seguido pela amostra PII, sendo a amostra PI a que apresentou os menores fluxos. A partir dos valores de fluxo foram calculadas as permeâncias hidráulicas para as três amostras de membranas, sendo iguais a $4,9 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$, $4,2 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$ e $3,0 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}.\text{bar}^{-1}$, para as amostras PIII, PII e PI, respectivamente.

Os resultados dos ensaios de caracterização de retenção salina mostram que as três amostras testadas apresentam tendência crescente da retenção salina em relação ao aumento da pressão (Figura 11). Os valores obtidos ficaram entre 90 e 70 % para todas as pressões, o que caracteriza as membranas descartadas num patamar próximo à retenção apresentada por membranas de nanofiltração para íons monovalentes (Ould Mohamedou, *et al.*, 2010 ; Nicolini, 2017).

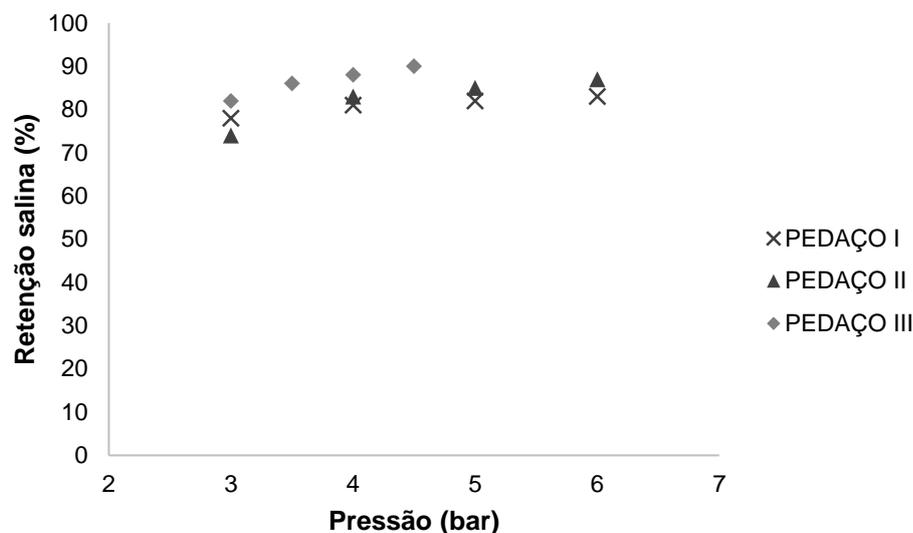


Figura 12. Retenção salina (NaCl 1500 ppm) em diferentes pressões para as três amostras de membrana de OI utilizados nos ensaios com efluente.

Os testes de permeância hidráulica e retenção salina foram realizados em pressões menores para o pedaço III, pois, conforme será exposto na seção 4.3, ao longo da operação com efluente, os pedaços de membrana I e II apresentaram uma possível degradação.

4.3 Testes com efluente

4.3.1 Ensaio de fluxo limite de operação

O fluxo limite é o valor a partir do qual um aumento de pressão não provoca um aumento no fluxo de permeado. O ensaio de determinação de fluxo limite foi feito apenas para a amostra PI. No gráfico apresentado na Figura 13 podem ser observados os resultados de fluxo para as pressões de 3, 4, 5, 6, 7 e 8 bar. Percebe-se um aumento contínuo do fluxo permeado com o aumento da pressão e a ausência de um valor limite para a faixa de pressão utilizada. Nesse caso, a pressão de operação a ser utilizada poderia chegar até 8 bar. Porém, devido a limitações do sistema utilizado, a pressão de operação escolhida inicialmente foi de 6 bar. Os resultados obtidos com relação ao fluxo limite foram admitidos também para as demais amostras de efluente testadas, haja vista que as variações nas características do efluente que poderiam alterar o fluxo limite podem ser desconsideradas.

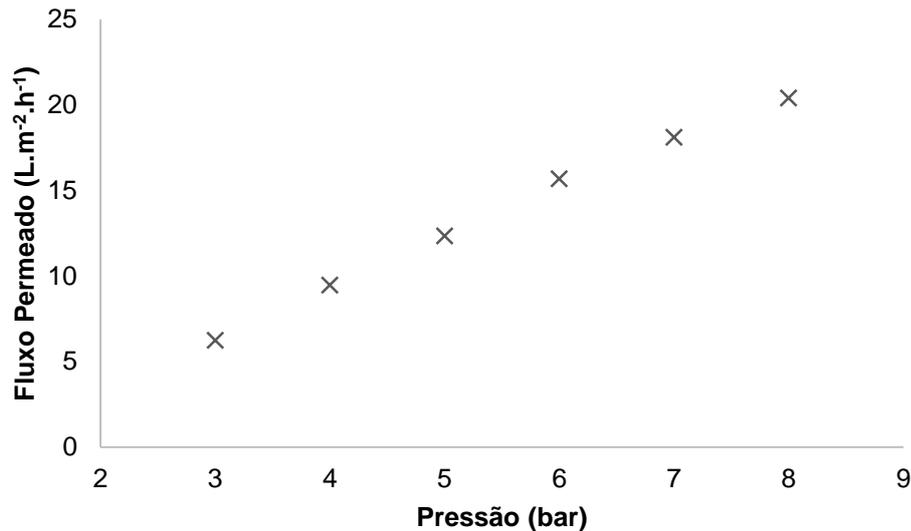


Figura 13. Fluxo permeado para diferentes pressões transmembrana para a amostra PI utilizando efluente (amostra 2). Condições de operação: temperatura 25 °C e vazão de alimentação 3 L.m⁻³.

4.3.2 Operação com efluente

Os testes com o efluente foram realizados em pressão constante com o objetivo de verificar a qualidade do permeado em relação à especificação de condutividade elétrica para água de resfriamento da indústria (400 $\mu\text{S}/\text{cm}$), para que a alternativa de reúso estudada tivesse viabilidade. O desempenho da membrana foi estudado comparando a permeância hidráulica e a retenção salina para uma solução de NaCl, antes e após a passagem do efluente; desta forma é possível identificar a formação de incrustações ou a degradação da membrana causadas pelo contato da membrana com o efluente.

No primeiro teste, o sistema de OI de bancada foi operado durante 2,5 h no ensaio com o efluente (amostra 2) em pressão constante de 6,0 bar utilizando a amostra PI. A turbidez da solução de alimentação foi de 0,60 NTU. Na Figura 14 está apresentado o fluxo permeado para o efluente em função do tempo, é possível observar que o fluxo atingiu o valor aproximadamente estável de 17,0 L.m⁻².h⁻¹, após 45 min de operação.

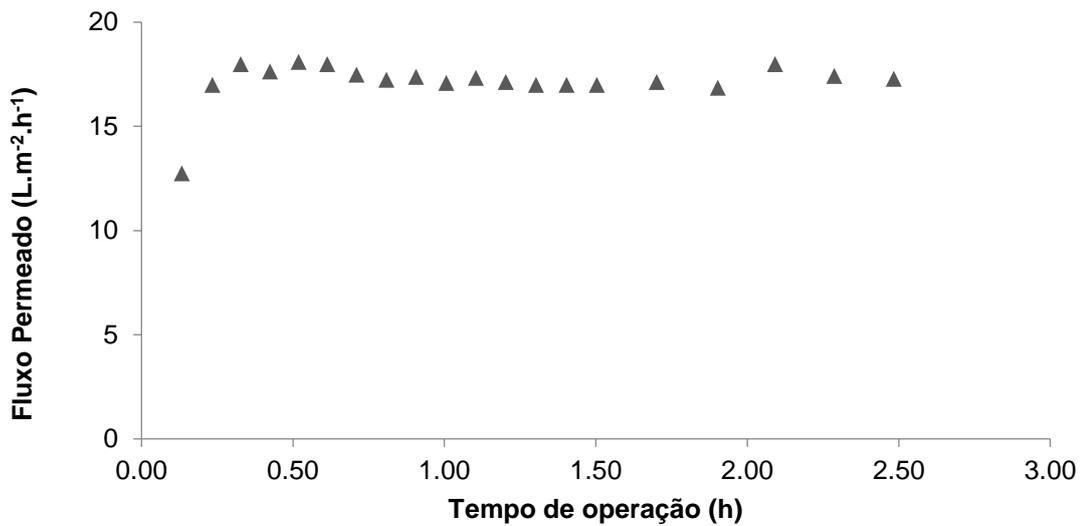


Figura 14. Fluxo de permeado durante a operação com efluente (amostra 2) para a amostra PI em pressão constante de 6,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L.m⁻³.

Na Figura 15 estão apresentados os resultados de retenção salina e de condutividade elétrica para o efluente em função do tempo de operação para a amostra PI. Analisando os valores de retenção salina do permeado observa-se que foi atingido o valor aproximadamente estável de 75 % em 2 h de operação, com condutividade elétrica correspondente de 630 μ S/cm.

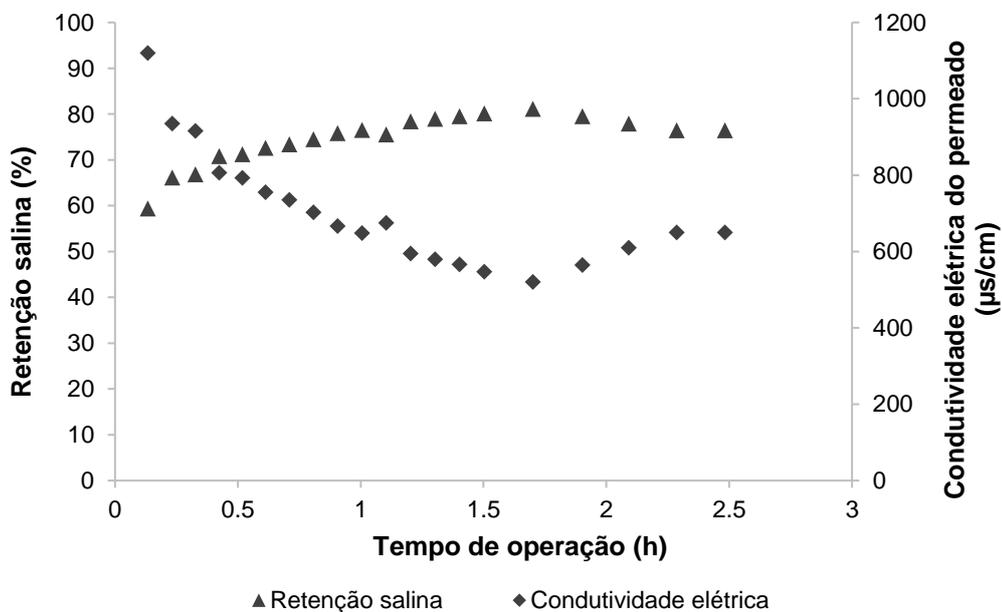


Figura 15. Retenção salina e condutividade elétrica do permeado durante a operação com efluente (amostra 2) para a amostra PI em pressão constante de 6,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L.m⁻³.

No segundo teste, o tempo de operação para o ensaio com a amostra PII foi de 1,5 h e utilizou-se a amostra 3 de efluente. A turbidez da solução de alimentação do sistema de osmose inversa foi de 0,86 NTU. Nas Figuras 16 e 17 estão apresentados os resultados de fluxo permeado e de retenção salina em função do tempo, respectivamente. Observa-se que o fluxo de permeado ao final do experimento foi de aproximadamente $28 \text{ L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ e que um valor aproximadamente estável de 70 % de retenção salina foi atingido, com condutividade de permeado correspondente de $840 \mu\text{S}/\text{cm}$.

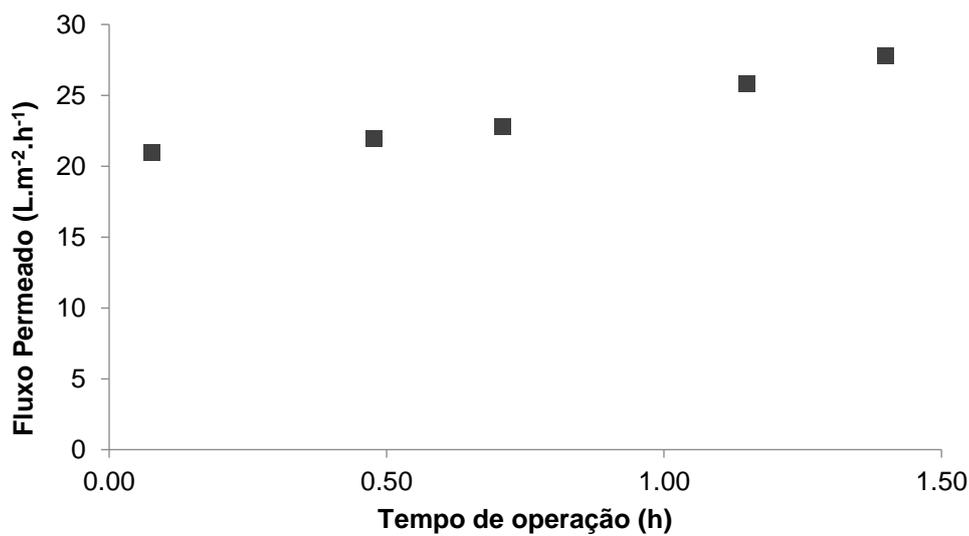


Figura 16. Fluxo de permeado durante a operação com efluente (amostra 3) para a amostra de membrana PII em pressão constante de 6,0 bar, temperatura $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e vazão de alimentação de $3 \text{ L}\cdot\text{m}^{-3}$.

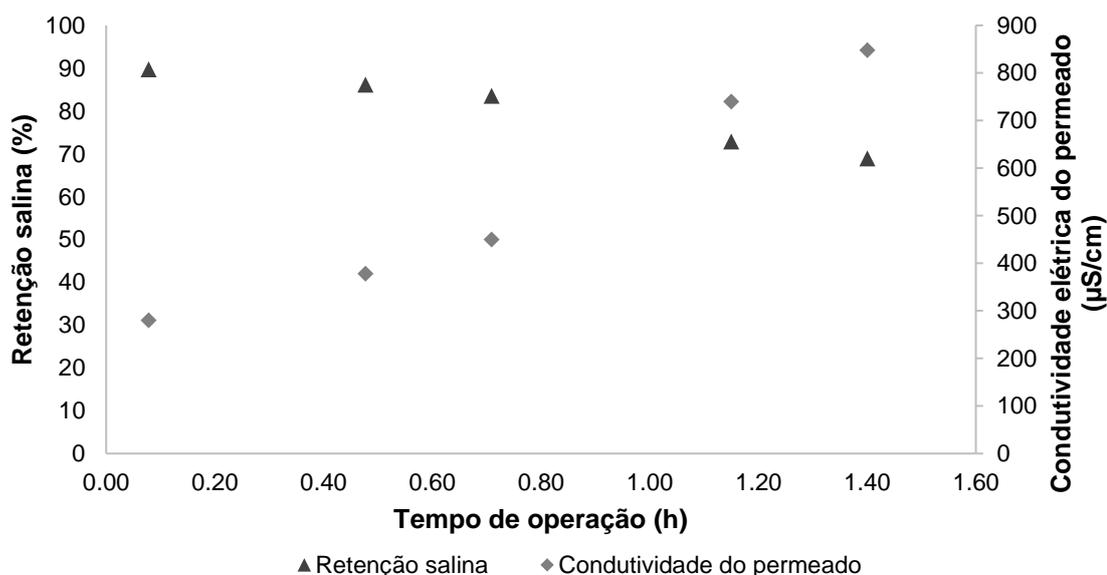


Figura 17. Retenção salina e condutividade elétrica do permeado durante a operação com efluente (amostra 3), para a amostra de membrana PII em pressão constante de 6,0 bar, temperatura $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e vazão de alimentação de $3 \text{ L}\cdot\text{m}^{-3}$.

Para o terceiro teste, com a amostra PIII, foi utilizada pressão de 4,0 bar, menor que a utilizada para as amostras PI e PII. A turbidez da solução de alimentação do sistema de OI foi de 0,60 NTU. Foi observado que para o teste realizado com a amostra PI houve aumento gradual da retenção salina até 1 h e 40 min de operação, seguida de diminuição contínua desse parâmetro até o final da operação, indicando um possível efeito combinado de incrustação e degradação da membrana, ou ainda alguma instabilidade operacional. Para a amostra PII houve um aumento do fluxo de permeado e uma diminuição da retenção salina ao longo do tempo de operação, indicando uma diminuição na seletividade e possível degradação da membrana. Na tentativa de avaliar esse fenômeno e obter estabilidade operacional, a pressão de operação foi reduzida no terceiro teste realizado com a amostra PIII.

Nas Figuras 18 e 19 estão apresentados o fluxo permeado e a retenção salina em relação ao tempo para a amostra PIII, respectivamente. A partir dos dados obtidos é possível observar um patamar a partir de aproximadamente 1 h de operação para o fluxo permeado. O valor de fluxo encontrado se mostrou estável em aproximadamente $12 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-1}$ até o final da operação, no tempo de aproximadamente 3 h. O valor de retenção salina se mostrou estável e em torno de 93 % ao longo de toda a operação, como pode ser observado na Figura 19. O valor de condutividade elétrica do permeado mostrou pouca variação ao longo do experimento, estabilizando em aproximadamente $180 \mu\text{S/cm}$.

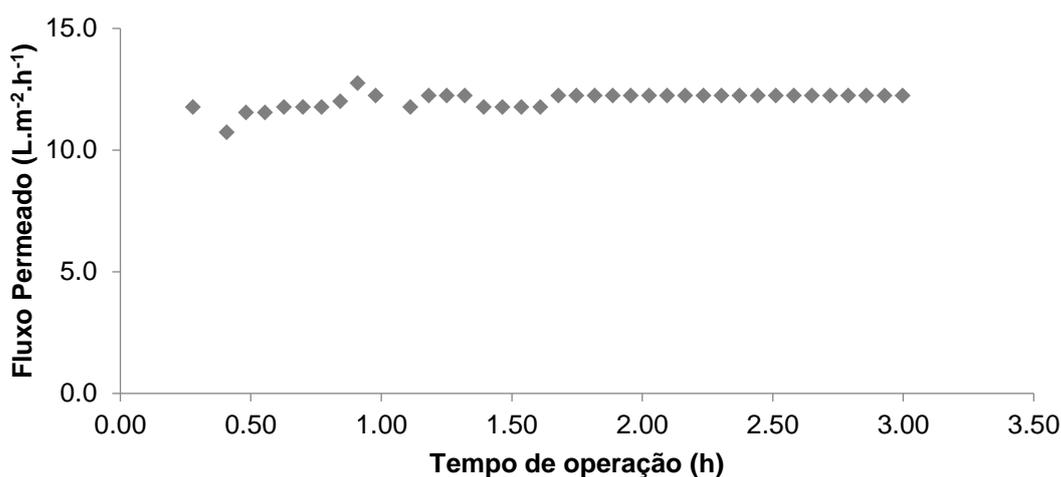


Figura 18. Fluxo de permeado durante a operação com efluente (amostra 3) para a amostra PIII em pressão constante de 4,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L.m^{-3} .

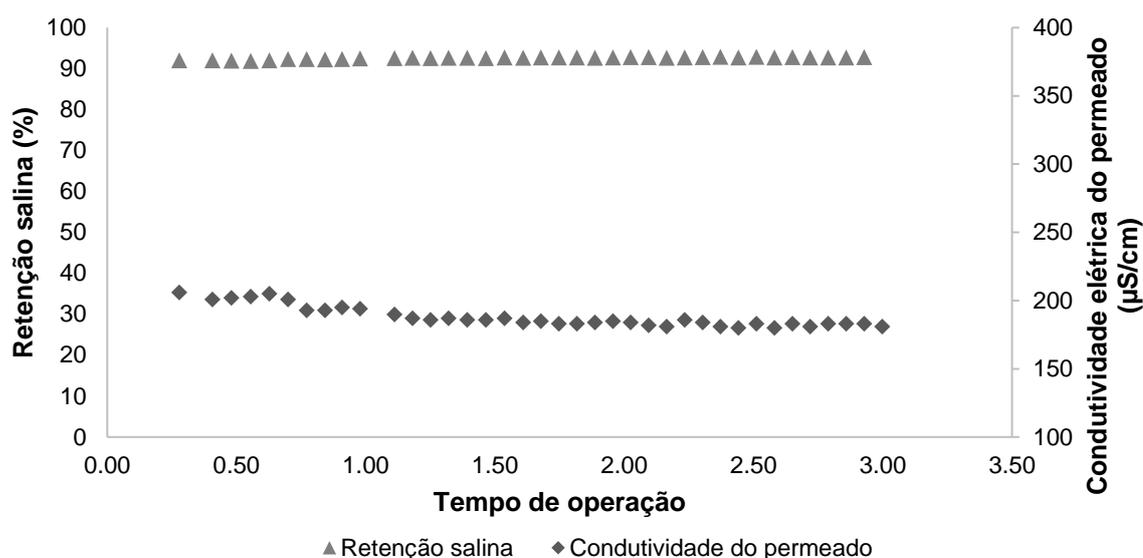


Figura 19. Retenção salina e condutividade elétrica do permeado durante a operação com efluente (amostra 3) para a amostra de membrana PIII em pressão constante de 4,0 bar, temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L.m⁻³.

4.3 Caracterização final das membranas

Após cada ensaio com efluente foi realizada a caracterização final das membranas quanto à permeância hidráulica e à retenção salina. Os resultados foram comparados com as caracterizações iniciais com o objetivo de avaliar a influência do efluente no desempenho das membranas.

Nos gráficos das Figuras 20 e 21 estão apresentados os resultados de permeância hidráulica e retenção salina antes e após o teste com o efluente para a amostra de membrana PI. No gráfico da Figura 20 é possível observar um aumento gradativo dos valores de permeância hidráulica, tanto após o ensaio de fluxo limite como após a operação com o efluente. Percebe-se ainda uma diminuição dos valores de retenção salina após a passagem do efluente para todas as pressões testadas (Figura 21).

Estes resultados mostram uma possível degradação da membrana após o teste com o efluente, causada por algum componente, ou mais de um, presente no efluente. É possível que tenha ocorrido a oxidação da camada seletiva de PA devido à substâncias como a monocloramina, considerando que se trata de um efluente proveniente de uma indústria onde se utilizam compostos químicos contendo cloro (Silva *et. al.*, 2006). Ainda, uma variedade de compostos oxidantes eventualmente presentes no efluente podem ter contribuído para a degradação da camada seletiva de PA (Veza & Rodriguez-Gonzalez, 2003).

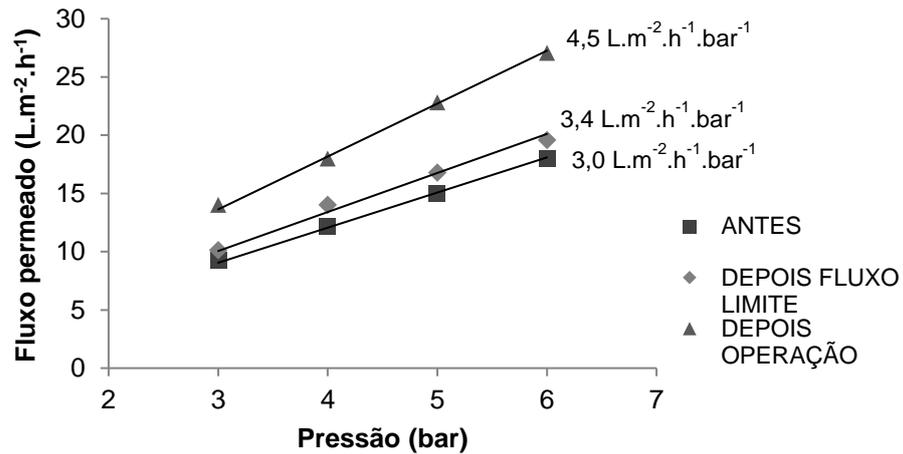


Figura 20. Fluxos de permeado para água antes do teste com efluente, após verificação do fluxo limite e após teste com efluente para diferentes pressões transmembrana utilizando a amostra PI. Condições de operação: temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L.m⁻³.

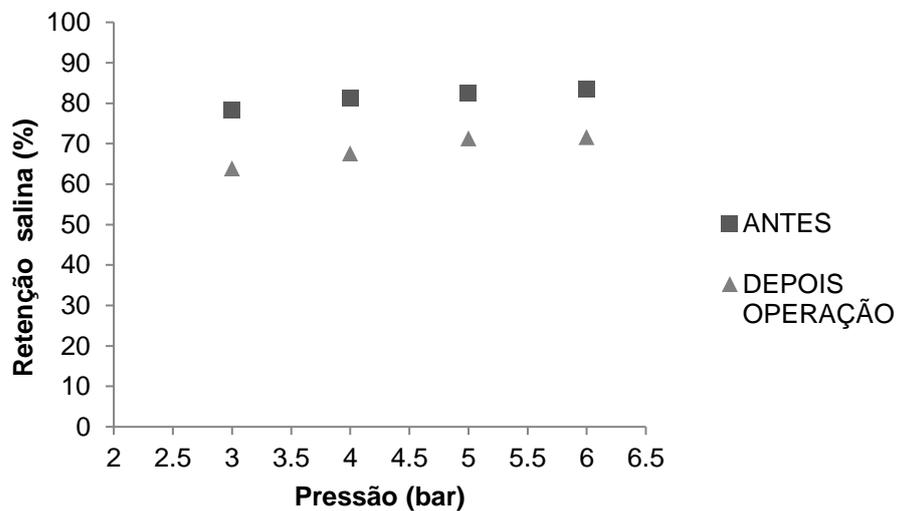


Figura 21. Resultados dos ensaios de retenção salina para a solução de NaCl 1500 ppm antes e após o teste com o efluente, para a amostra PI utilizando diferentes pressões. Condições de operação: temperatura 25 °C e vazão de alimentação de 3 L.m⁻³.

Nas Figuras 22 e 23 estão apresentados os resultados de fluxo permeado para água e retenção salina para a solução de NaCl 1500 ppm para diferentes pressões de operação, para a amostra PII. Observa-se que houve um aumento da permeância hidráulica de 4,1 para 4,4 L m⁻² h⁻¹ bar⁻¹, comparando a caracterização antes e após a passagem do efluente. Os resultados de retenção salina mostram que houve uma diminuição do parâmetro após a passagem do efluente em relação à caracterização realizada inicialmente (Figura 23). Além disso, foi observada uma diminuição da retenção salina com o aumento da pressão.

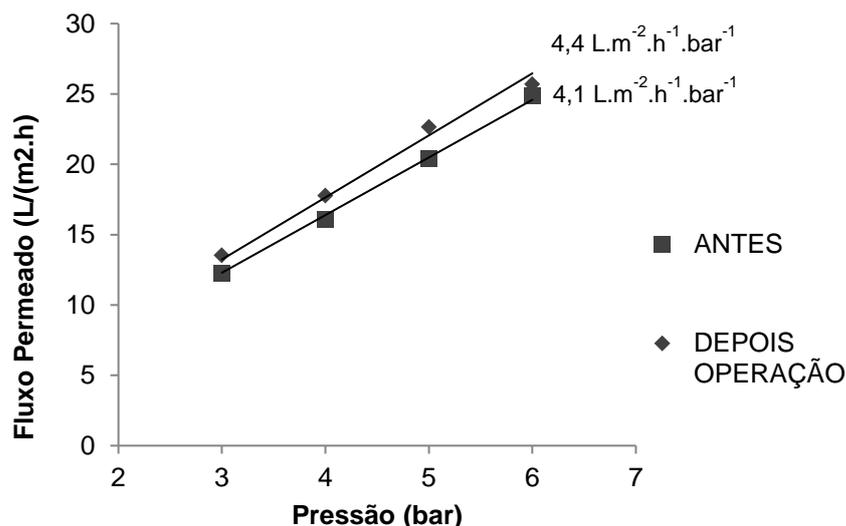


Figura 22. Fluxos de permeado para as caracterizações de permeabilidade hidráulica antes e após a passagem do efluente para o pedaço II em diferentes pressões.

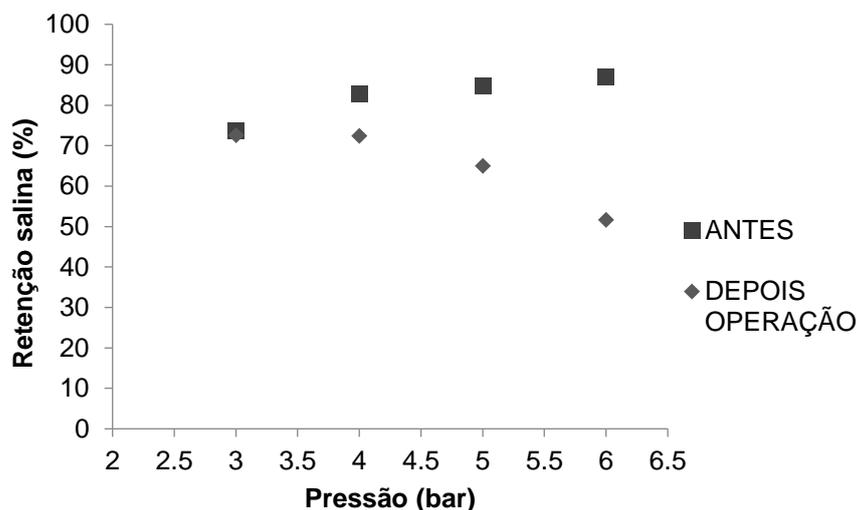


Figura 23. Resultados dos ensaios de retenção salina para o pedaço II antes e após a passagem do efluente em diferentes pressões.

Na Figura 24 podem ser observados os resultados de fluxo permeado de água antes e após a passagem de efluente para a amostra de membrana PIII. Houve uma diminuição da permeância hidráulica da membrana após a passagem do efluente em relação à caracterização inicial de $4,9 \text{ L m}^{-2} \text{ h}^{-1} \text{ bar}^{-1}$. Entretanto, os resultados da caracterização final de retenção salina para solução de NaCl 1500 ppm apresentados na Figura 25, mostram que praticamente não houve alteração em relação ao valor inicial de aproximadamente 90 %. Neste caso, pode não ter ocorrido degradação da membrana, apenas a ocorrência de *fouling* ou ainda, um efeito pode ter mascarado o outro.

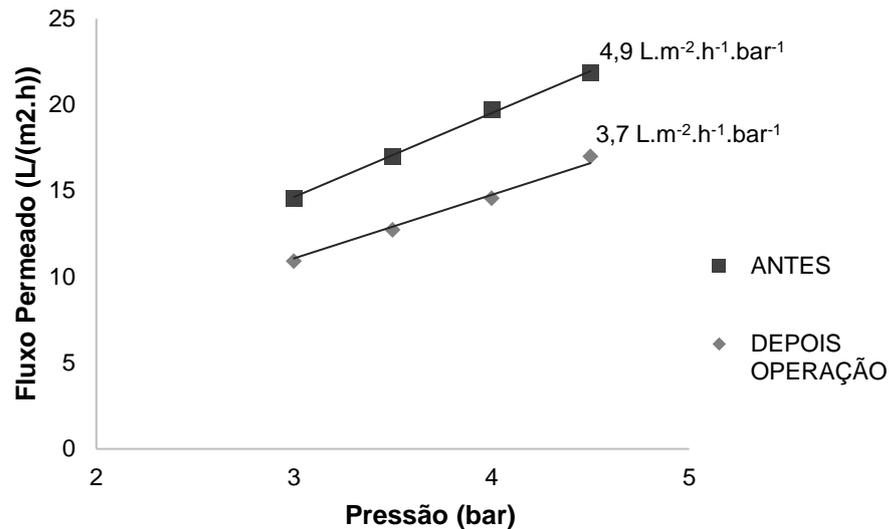


Figura 24. Fluxos de permeado para as caracterizações de permeabilidade hidráulica antes e após a passagem do efluente para o pedaço III em diferentes pressões.

O fenômeno de diminuição do fluxo de permeado através da membrana após a passagem do efluente pode ter ocorrido possivelmente devido ao *fouling* (possivelmente mais de um tipo). A alimentação utilizada nos testes foi a corrente final de uma estação de tratamento de efluentes e contém, naturalmente, vários tipos de contaminantes que podem ter se depositado e/ou interagido com o material da membrana, provocando uma queda de desempenho. Cabe salientar que a formação de *fouling* inorgânico correlacionada à presença de sílica é pouco provável, já que o efluente possui baixa concentração desse composto.

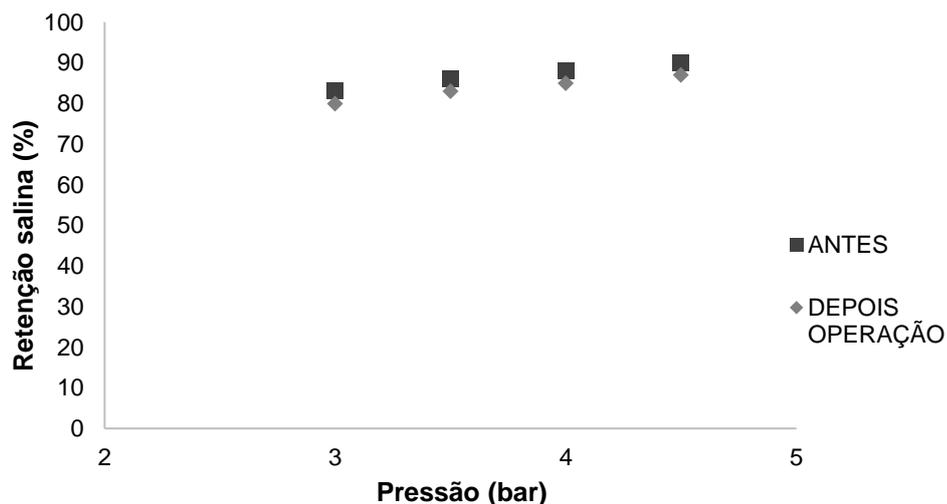


Figura 25. Resultados dos ensaios de retenção salina para o pedaço III antes e após a passagem do efluente em diferentes pressões.

4.4 Caracterização das correntes estudadas

Na Tabela 7 é possível observar os parâmetros de qualidade do efluente bruto, filtrado e permeado para as três amostras de membrana testadas. O valor máximo de condutividade elétrica permitido para a água de resfriamento nos sistemas de torres de resfriamento da indústria é 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, este valor foi fornecido pela empresa na qual o efluente foi coletado. Comparando os valores de condutividade elétrica dos permeados obtidos para as três amostras de membrana testadas, somente a corrente obtida com a amostra PIII seria passível de reuso como água de resfriamento. Este resultado, provavelmente, foi obtido devido ao menor valor de pressão utilizado, possibilitando uma operação mais estável e menos agressiva à membrana.

Tabela 7. Resumo das características do efluente bruto, filtrado e permeado para os três pedaços de membrana testados.

Efluente	Parâmetro	Pedaço I	Pedaço II	Pedaço III
Permeado	Condutividade elétrica (uS/cm)	630	840	180
	Turbidez (NTU)	0,03	0,02	0,01
	pH	8,36	8,20	8,38
Filtrado	Condutividade elétrica (uS/cm)	2600	2640	2530
	Turbidez (NTU)	0,60	0,86	0,60
	pH	8,36	8,20	8,38
Bruto	Condutividade elétrica (uS/cm)	2600	2640	2530
	Turbidez (NTU)	4,80	3,30	4,36
	pH	8,36	8,20	8,38

5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros

No presente trabalho foi estudada a possibilidade de reúso do efluente final da ETE de uma indústria utilizando membranas de osmose inversa descartadas de processo de desmineralização de águas. A alimentação do sistema de OI não poderia exceder o valor de turbidez de 1 NTU. Um acompanhamento da turbidez do efluente foi realizado com o objetivo de verificar variações nesse parâmetro e definir o pré-tratamento do sistema de OI. O sistema com filtro cartucho 5 μm foi o pré-tratamento escolhido e todas as amostras de efluente filtrado apresentaram valores de turbidez menores que 1 NTU, aceitáveis para a corrente de alimentação do sistema de OI.

Através das caracterizações iniciais das membranas descartadas constatou-se que os valores de retenção salina variaram de 70 a 93 %, valores aceitáveis quando se deseja obter água com qualidade inferior à obtida com membranas de OI novas, que tem valores de retenção salina mais altos, entre 95 e 99 %. Através da comparação das caracterizações antes e após a passagem do efluente foram observados indícios de degradação para as amostras de membrana PI e PII e *fouling* para a amostra PIII.

O teste realizado com a amostra PIII apresentou estabilidade operacional, com fluxo e condutividade de permeado de aproximadamente 12 $\text{L}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ e 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Considerando a especificação de condutividade elétrica de 400 μS para a água de resfriamento da indústria, o permeado obtido nesse teste seria passível de reúso para este fim, contudo, ainda seriam necessárias análises de outros parâmetros do efluente para assegurar todas as especificações de qualidade.

Os valores de condutividade elétrica obtidos para os testes realizados com as amostras PI e PII foram de 630 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 840 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente, maiores daquele estabelecido pela empresa para reúso. Uma opção de aplicação para casos onde a retenção salina das membranas descartadas é inferior, é o reúso como água de irrigação, cujas restrições de condutividade elétrica são mais abrangentes que para a água de resfriamento.

Para trabalhos futuros sugere-se um estudo mais aprofundado das características do efluente principalmente em relação à componentes que potencialmente favoreceriam a degradação, como oxidantes, ou a deposição de incrustações na membrana, como microrganismos e substâncias orgânicas. Ainda, realizar um mapeamento de possíveis variações na composição do efluente final ao longo do tempo, em relação à variações de composição do afluente bruto na entrada da ETE. Após, uma avaliação mais detalhada do pré-tratamento necessário, visando um melhoramento da operação do sistema de OI.

Referências

AMBIENTE BRASIL, Legislação e Normatização do Reúso da Água. Disponível em: <http://ambientes.ambientebrasil.com.br/agua/uso_e_reuso_da_agua/legislacao_e_normatizacao_do_reuso_da_agua.html>

Acesso em Junho de 2019.

Boulaifa, H.; Belhamidi, S.; F.; El Fadil, A.; Elmidaoui, A. Demineralization of brackish surface water by reverse osmosis: The first experience in Morocco. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 7, Issue 2, 2019.

Burn, S.; Hoang, M.; Zarzo, D.; Olewniak, F.; Campos, E.; Bolto, B.; et al. Desalination Techniques—A Review of the Opportunities for Desalination in Agriculture. *Desalination*, v. 364, p. 2–16, 2015.

Dow Filmtec, Wastewater reuse in cooling towers brings success. *Filtration + Separation*, v. 53, Issue 2, p. 12–14, 2016.

FOUNDATION FOR WATER RESEARCH, Water Reuse. Disponível em: <<http://www.fwr.org/waterre/frr0024.pdf>>

Acesso em Junho de 2019.

Frick, J. M.; Tessaro I. C. Evaluation of pre-treatments for a blowdown stream to feed a filtration system with discarded reverse osmosis membranes, *Desalination*, v. 341, p. 126 – 134, 2014.

García-Pacheco, R.; Lawler, W.; Landaburu-Aguirre, J.; García-Calvo, E.; Le-Clech, P. End-of-Life Membranes: Challenges and Opportunities. *Comprehensive Membrane Science and Engineering*, Second Edition, Elsevier, p. 293 –310, 2017.

Greenlee, L. F.; Lawler, D. F.; Freeman, B. D.; Marrot, B.; Moulin, P. Reverse Osmosis Desalination: Water Sources, Technology, and Today's Challenges. *Water Research*, v. 43, p. 2317–2348, 2009.

Gündoğdu M.; Jarma Y. A.; Kabay, N.; Pek, T. Ö.; Yüksel, M. Integration of MBR with NF/RO processes for industrial wastewater reclamation and water reuse-effect of membrane type on product water quality. *Journal of Water Process Engineering*, v. 29, 2019.

Henthorne, L.; Boysen, B.; State-of-the-art of reverse osmosis desalination pre-treatment. *Desalination*, v. 356, p. 129 – 139, 2015.

Illustration Reverse Osmosis Membrane. Disponível em:

<<http://www.colourandre.com/portfolio/3d-illustration-reverse-osmosis-membrane/>>

Acesso em Junho de 2019.

Judd, S.; Jefferson B. *Membranes for Industrial Wastewater Recovery and Re-use*. Elsevier p. 2 – 35, 2003.

Landaburu-Aguirre, J.; García-Pacheco, R.; Molina, S.; Rodríguez-Sáez, L.; Rabadán, J.; García-Calvo, E. Fouling Prevention, Preparing for Re-use and Membrane Recycling. Towards Circular Economy in RO Desalination. *Desalination*, v. 393, p. 16–30, 2016.

Madwar, K.; Tarazi, H. Desalination techniques for industrial wastewater reuse. *Desalination*, v. 152, p. 325 – 332, 2003.

Membrane Technology in General. Disponível em:

<<https://xflow.pentair.com/pt-pt/technologies/membrane-technology-in-general>>

Acesso em Junho de 2019.

Mulder, M. *Membrane Technology*, Kluwer Academic Publishers 2nd edition, p. 10 – 20, 1996.

Nicolini, J. V. Formulação de água de injeção por nanofiltração para recuperação avançada do petróleo. *Tese de Doutorado*, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química COPPE, UFRJ.2017.

Noble, R.; Stern, S. A. *Membrane Separations Technology, Principles and Applications*, First Edition, v. 2, Elsevier Science, 1995.

Nunes, R. F. Utilização de processos de separação com membranas para purificação e reúso da água de lavadoras de roupa. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Química COPPE, UFRJ.2018.

OLAM- CIÊNCIA E TECNOLOGIA, Reúso de água no contexto da gestão de recursos hídricos: impacto, tecnologias e desafios. Disponível em:

<<http://www.rc.unesp.br/igce/planejamento/download/rodrigo/reuso.pdf> Acesso em Junho de 2019.>

Ould Mohamedou, E.; Penate Suarez, D. B.; Vince, F.; Jaouen, P.; Pontie, M. New Lives for Old Reverse Osmosis (RO) Membranes. *Desalination*, v. 253, p. 62–70, 2010.

Pal, P. *Industrial Water Treatment Process Technology*, First Edition, Butterworth-Heinemann, p. 173 – 242, 2017.

Purkait, M. K.; Sinha, M. K.; Mondal, P.; Singh, R. *Introduction to Membranes. Stimuli Responsive Polymeric Membranes – Smart Polymeric Membranes*, First Edition, Academic Press, p. 2 – 8, 2018.

Roccaro, P.; Verlicchi, P. Wastewater and reuse. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, v. 2, p. 61 – 63, 2018.

Rodríguez, J. J.; Jiménez, V.; Trujillo, O.; Veza, J. M. Reuse of Reverse Osmosis Membranes in Advanced Wastewater Treatment. *Desalination*, v. 150, p. 219–225, 2002.

Silva, M. K.; Tessaro, I. C.; Wada, K. Investigation of oxidative degradation of polyamide reverse osmosis membranes by monochloramine solutions. *Journal of Membrane Science*, v. 282, p. 375-382, 2006.

SUSTAINABLE SANITATION AND WATER MANAGEMENT, Wastewater reuse in industry. Disponível em:

<<https://sswm.info/water-nutrient-cycle/water-use/hardwares/optimisation-water-use-industries/wastewater-reuse-in-industry> >

Acesso em Junho de 2019.

Veza, J. M.; Rodriguez-Gonzalez, J. J. Second Use for Old Reverse Osmosis Membranes: Wastewater Treatment. *Desalination*, v.157, p. 65–72, 2003.

WATERSURPLUS, Case Study: Repurposed RO Membrane Program and Rental Project Profile. Disponível em:

<<http://www.watersurplus.com/watersurplus-resources-membrane-program-case-study.cfm>>

Acesso em Junho de 2019.

Wu, C.; Williams, P. T. Pyrolysis–Gasification of Plastics, Mixed Plastics and Real-World Plastic Waste with and without Ni–Mg–Al Catalyst. *Fuel*, v. 89, p. 3022–3032, 2010.

