

INSTITUTO FEDERAL
GOIANO
Câmpus Rio Verde

ENGENHARIA AMBIENTAL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MEMBRANA DE OSMOSE INVERSA NA
PRODUÇÃO DE ÁGUA PURA PARA USO LABORATORIAL: ESTUDO DE CASO
DO IF GOIANO – CAMPUS RIO VERDE**

STÉFANE SOUZA COSTA

RIO VERDE - GO
2021

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
GOIANO - CÂMPUS RIO VERDE
ENGENHARIA AMBIENTAL**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE MEMBRANA DE OSMOSE
INVERSA NA PRODUÇÃO DE ÁGUA PURA PARA USO
LABORATORIAL: ESTUDO DE CASO DO IF GOIANO – CAMPUS
RIO VERDE**

STÉFANE SOUZA COSTA

Trabalho de Curso apresentado ao Instituto Federal Goiano – Câmpus Rio Verde, como requisito parcial para a obtenção do Grau de Bacharel em Engenharia Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Me. Andriane de Melo Rodrigues

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

C837a Costa, Stéfane Souza
Avaliação do desempenho de membrana de Osmose Inversa na produção de Água Pura para uso laboratorial: Estudo de caso do IF Goiano - Campus Rio Verde / Stéfane Souza Costa; orientadora Andriane de Melo Rodrigues. -- Rio Verde, 2021.
48 p.

TCC (Graduação em Engenharia Ambiental) --
Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. Água pura. 2. Membrana. 3. Osmose Inversa. I. Rodrigues, Andriane de Melo, orient. II. Título.

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Tese | <input type="checkbox"/> Artigo Científico |
| <input type="checkbox"/> Dissertação | <input type="checkbox"/> Capítulo de Livro |
| <input type="checkbox"/> Monografia – Especialização | <input type="checkbox"/> Livro |
| <input checked="" type="checkbox"/> TCC - Graduação | <input type="checkbox"/> Trabalho Apresentado em Evento |
| <input type="checkbox"/> Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Stéfane Souza Costa

Matrícula: 2016102200740178

Título do Trabalho: Avaliação do desempenho de membrana de Osmose Inversa na produção de Água Pura para uso laboratorial: Estudo de caso do IF Goiano – Campus Rio Verde

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: Não Sim, justifique: _____

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 10/06/2021

O documento está sujeito a registro de patente? Sim Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? Sim Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 10/06/2021.

Stéfane Souza Costa

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Condriane de Melo Rodrigues

Ciente e de acordo:

Assinatura do(a) orientador(a)

ATA DE DEFESA DO TRABALHO DE CURSO (TC)

No dia 21 do mês de maio de 2021 às 9h00min, reuniu-se a banca examinadora composta pelos docentes: Andriane de Melo Rodrigues (orientadora), Alice Rocha Pereira (membro), Édio Damásio da Silva Júnior (membro), para examinar o Trabalho de Curso intitulado: “Avaliação do desempenho de membrana de osmose inversa na produção de água pura para uso laboratorial: Estudo de caso do IF Goiano – Campus Rio Verde”, da acadêmica, Stéfane Souza Costa, matrícula nº 2016102200740178 do curso de Engenharia Ambiental do IF Goiano – Campus Rio Verde. Após a apresentação oral do TC, houve arguição da candidata pelos membros da banca examinadora. Após tal etapa, a banca examinadora decidiu pela APROVAÇÃO da acadêmica. Ao final da sessão pública de defesa foi lavrada a presente ata, que segue datada e assinada pelos examinadores.

Rio Verde, 26 de maio de 2021.

Andriane de Melo Rodrigues

Me. Andriane de Melo Rodrigues
(Orientadora)

Alice Rocha Pereira

Me. Alice Rocha Pereira
(Membro)

Édio Damásio da Silva Júnior

Dr. Édio Damásio da Silva Júnior
(Membro)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus agradeço pela vida e saúde, a ele devo a minha existência, por me conceder amor e luz para meus caminhos.

A minha orientadora. Prof.^a Me. Andriane de Melo Rodrigues, por gentilmente ter me ajudado e me guiado no decorrer deste trabalho, fornecendo todo o suporte necessário, assim como todos os professores presentes na graduação.

Um agradecimento especial aos membros da minha banca examinadora, Édio e Alice, pelas observações e contribuições dadas ao trabalho.

A minha Família que sempre me deram apoio e incentivo nessa caminhada da graduação.

Ao Instituto Federal Goiano, pelo apoio financeiro e execução deste trabalho.

RESUMO

A água pura é utilizada como diluente em diversas aplicações, dentre as quais, há a produção de soluções padrões e o uso em testes laboratoriais. Dessa forma, deve seguir um padrão de controle de qualidade rigoroso. Como a água pura não é encontrada na natureza, a sua produção depende de tecnologias avançadas para remoção de íons, moléculas orgânicas de baixo peso molecular. Na literatura, membranas de Osmose Inversa vêm se destacando como uma tecnologia promissora na obtenção de água pura. Sendo assim, este trabalho objetiva avaliar o desempenho operacional do Sistema de Separação por Membrana de Osmose Inversa na produção de água ultrapura para uso laboratorial. Para tanto, o controle de qualidade da água foi realizado a partir da medição de parâmetros como o pH, condutividade, temperatura, sólidos totais dissolvidos, turbidez e absorbância UV 254nm, enquanto o desempenho operacional da membrana foi dado com base na produção de fluxo de permeado, pressão transmembrana e recuperação, permeabilidade hidráulica. A membrana alcançou boa eficiência na remoção de impurezas como demonstrada na rejeição de 97,89% da condutividade, sendo classificada, quanto à absorbância UV 254nm, como Grau 2 conforme os padrões de água ultrapura. Portanto, recomenda-se o uso dessa água para usos laboratoriais menos exigentes como lavagem/enxaguamento de vidraria, preparação de meios, soluções de pH e tampões.

Palavras-chave: água pura, membrana, osmose inversa.

ABSTRACT

Pure water is used as a diluent in several applications, among which there is the production of standard solutions and use in laboratory tests. Therefore, it must follow a strict quality control standard. As pure water is not found in nature, its production depends on advanced technologies for removing ions, organic molecules of low molecular weight. In the literature, Reverse Osmosis membranes value standing out as a promising technology in pure water. Therefore, this work aims to evaluate the operational performance of the Reverse Osmosis Membrane Separation System in the production of ultrapure water for laboratory use. For this purpose, the water quality control was carried out by measuring parameters such as pH, conductivity, temperature, total dissolved solids, turbidity and UV 254nm absorbance, while the operational performance of the membrane was given based on the production of flux, permeate, transmembrane pressure and recovery, hydraulic permeability. The membrane achieved good efficiency in removing impurities as demonstrated in the rejection of 97.89% of the conductivity, considered, for UV 254nm absorbance, as Grade 2 according to the ultrapure water standards. Therefore, it is recommended to use this water for less demanding laboratory uses such as washing / rinsing glassware, media preparation, pH solutions and buffers.

Keywords: pure water, membrane, reverse osmosis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática da seção transversal dos diferentes tipos de morfologia de membranas sintéticas.	5
Figura 2. Faixa de operação de processos de separação em membranas com relação às dimensões dos contaminantes.....	6
Figura 3. Balanço do fluxo e da concentração em uma unidade de membrana.	6
Figura 4. Princípios da Osmose Inversa.	7
Figura 5. Configuração hidráulica dos processos de separação por membranas.....	9
Figura 6. (a) Esquema da membrana em espiral, (b) Extremidades do módulo, e (c) Módulo de membrana em espiral.....	10
Figura 7. Representação esquemática do sistema de tratamento.....	15
Figura 8. Vaso de pressão contendo a membrana de Osmose Inversa.	16
Figura 9. Filtro 1 e 2 ao lado do vaso de pressão da membrana de Osmose Inversa.	16
Figura 10. Bomba de alta pressão utilizada no Sistema.	17
Figura 11. Manômetros 1 e 2 do sistema.....	17
Figura 12. Sistema de filtração com membrana de osmose inversa.....	18
Figura 13. Protocolo Experimental.....	19
Figura 14. Pressões de Água Bruta Manômetro 1 (AB M1) e Manômetro 2 (AB M2) e Pressão transmembrana.....	21
Figura 15. Vazão da água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P).	22
Figura 16. Fluxo de permeado e fluxo específico ao longo do tempo de operação nos experimentos.....	23
Figura 17. Recuperação da membrana ao longo do tempo de operação nos experimentos.	23
Figura 18. Ensaio de permeabilidade realizados antes e após os experimentos.	24
Figura 19. Concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P) e rejeição da membrana monitorados ao longo do tempo de operação nos experimentos.....	26
Figura 20. Resultados de Condutividade (Cond.) na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P) e rejeição da membrana monitorados ao longo do tempo de operação nos experimentos.....	27

Figura 21. Resultados de Absorbância UV 254 nm na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P) e rejeição da membrana monitorados ao longo do tempo de operação nos experimentos.....	28
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Pressões de alimentação para processos movidos à pressão (BERGMAN, 2005).....	4
Tabela 2. Equações dos parâmetros operacionais em sistemas de osmose inversa.....	11
Tabela 2. Especificações do CLSI para água ultrapura.	12
Tabela 3. Critérios de normalização de água pura, ISO 3698/1987.	14
Tabela 3. Padrões de Água Tipo I.	14
Tabela 6. Principais características da membrana ULP1812-50.	18
Tabela 4. Parâmetros monitorados e métodos utilizados nas análises.	20
Tabela 5. Equação da reta, coeficiente de correlação linear e a permeabilidade hidráulica para os ensaios.	24
Tabela 8. Dados dos parâmetros de qualidade da água bruta.	25
Tabela 7. Dados dos parâmetros de qualidade e de operação analisados no permeado.	26

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Objetivo Geral.....	3
2.2	Objetivos específicos	3
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
3.1	Processo de Separação por Membranas	3
3.2	Estrutura física das membranas.....	4
3.3	Materiais das membranas.....	7
3.4	Força motriz.....	8
3.5	Configuração hidráulica e dos módulos.....	8
3.6	Parâmetros operacionais	10
3.7	Água pura.....	11
4	MATERIAL E MÉTODOS	15
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5.1	Parâmetros Operacionais.....	20
5.2	Parâmetros de Qualidade	25
6	CONCLUSÕES	29
7	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	29
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30

1 INTRODUÇÃO

A água que utilizamos nas tarefas diárias e atividades domésticas, advinda da rede pública de abastecimento não é apropriada para a realização de ensaios químicos de alta complexidade em laboratórios, pois contém elevado grau de impurezas, tais como íons inorgânicos, gases e substâncias orgânicas dissolvidas de baixo peso molecular, que podem prejudicar (e até impedir) os resultados analíticos desejados (MENDES *et al.*, 2011). A água contém sais de cálcio e magnésio, que conferem dureza, além de conter outras substâncias, como ferro, sílica, manganês, cloretos, sulfatos, sódio e outros materiais suspensos. Os métodos de purificação da água utilizados no tratamento são determinados em função de sua finalidade de uso (MEDINA, 2010).

Por conta desta realidade, laboratórios requerem investimento em sistemas adequados para a purificação da água a ser utilizada em diversos ensaios analíticos mais complexos, como por exemplo, a espectrometria de absorção atômica, cromatografia líquida ou gasosa e outros procedimentos menos complexos como a preparação de reagentes, soluções e reagentes, preparação meios de cultura, alimentação de analisadores automatizados, diluições e outros procedimentos laboratoriais.

Para atender a crescente sensibilidade exigida em suas pesquisas, várias organizações profissionais têm estabelecido padrões de qualidade para água pura de uso laboratorial, as mais relevantes são: i) *Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI)* – antigo NCCLS; ii) *The International Organization for Standardization (ISO)*; iii) *The American Society for Testing and Material (ASTM)*; vi) a Farmacopeia, incluindo USP (*United States Pharmacopeia*), EP (*European Pharmacopeia*) e JP (*Japanese Pharmacopeia*).

A padronização de água reagente mais utilizada nos laboratórios brasileiros, principalmente de análises clínicas e indústria farmacêutica é a padronização proposta pela *Clinical and Laboratory Standards Institute (CLSI)* através do documento C3-A4 -*Preparation and testing of reagent water in the clinical laboratory*, onde há definições e regras para cada tipo de água obtida pelos processos de purificação, e ainda esta entidade classifica para quais fins a água purificada será empregada, tal como: água reagente para laboratório clínico (*Clinical Laboratory Reagent Water - CLRW*), água reagente especial (*Special Reagent Water - SRW*) e água para equipamentos (*Instrumental Feed Water - IFW*).

A ANVISA, em sua Resolução da Diretoria Colegiada (RDC) 302:2005, recomenda que os laboratórios clínicos, a depender do uso analítico, deve definir o grau de pureza da água a ser utilizada em suas análises, a forma de obtenção e o controle da qualidade.

Enquanto que os demais tipos de laboratórios, como os de análises de água, não apresentam padrões de água pura bem definidos, embora a depender do procedimento analítico os padrões encontram-se estabelecidos, como supramencionados.

Dentre as diversas tecnologias existentes utilizadas na produção de água pura, há a destilação, a osmose inversa, deionização, adsorção em carvão ativado, troca iônica, eletrodeionização, processos de oxidação avançada (MEDINA, 2010). Nesse cenário, a OI se destaca como uma tecnologia promissora na purificação de água por sua maior capacidade de filtração quando comparada as principais tecnologias disponíveis, apresentando rejeição aos vírus, bactérias e até mesmo a alguns íons (SPELLMAN, 2015).

A osmose inversa pode ser utilizada tanto para a concentração e recuperação de sólidos dissolvidos em água, quanto para a remoção de solutos de diferentes pesos moleculares e produção de água pura e ultrapura. Aplicações comuns da osmose inversa incluem (LI et al. 2008; KUCERA, 2010; DHAKAL, 2017): i) dessalinização da água do mar e água salobra para fins potáveis; ii) geração de água ultrapura para a indústria microeletrônica e farmacêutica; iii) produção de água para indústria de bebidas; iv) processamentos de produtos lácteos; v) tratamento de efluentes de indústrias metalúrgicas e têxteis, e vi) tratamento de águas residuárias industriais.

Os equipamentos comerciais comumente utilizados na produção de água pura em laboratórios, tais como, os sistemas de purificação Milli-Q®, Super-Q® e marcas de deionizadores, apresentam manutenção de custo elevado, podendo ser realizada apenas pelos representantes das marcas, ressaltando que a troca dos módulos geralmente é inevitável. Em contrapartida, determinados módulos comerciais de osmose inversa podem se apresentar como uma alternativa de baixo custo, com vantagens na manutenção, onde o descarte dos módulos pode ser evitado por meio de limpezas químicas, que podem ser realizadas pelos próprios técnicos do laboratório.

Neste sentido, o objetivo deste trabalho, consiste em avaliar o desempenho de um sistema de separação por membranas de osmose inversa, de baixo custo e de fácil acesso, na produção de água pura para uso laboratorial.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho do sistema de separação por membrana de osmose inversa na produção de água pura para diferentes usos laboratoriais e comparar a qualidade da água produzida com normas e padrões de água pura e ultrapura para uso laboratorial.

2.2 Objetivos específicos

- Avaliar o desempenho operacional da membrana de osmose inversa (OI) quanto ao fluxo de permeado, permeabilidade hidráulica e pressão transmembrana;
- Avaliar a qualidade da água produzida e a eficiência de rejeição da membrana;
- Avaliar a necessidade de limpezas químicas frequentes.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de Separação por Membranas

A tecnologia de separação por membranas envolve a utilização de membranas sintéticas, porosas ou semipermeáveis, orgânicas ou inorgânicas e em uma configuração adequada, para separar de um fluido, partículas sólidas de pequeno diâmetro, bactérias, vírus, moléculas orgânicas, compostos iônicos de baixo peso molecular e até gases (MIERZWA, 2006). Durante o tratamento, a água é bombeada contra a superfície da membrana, em alta pressão de modo a produzir uma corrente de permeado (água produzida livre de impurezas) e outra de concentrado (água com concentração de impurezas).

De acordo com Duranceau e Taylor (2011) a membrana é tipicamente constituída por materiais sintéticos, de baixa densidade, semipermeáveis, apresentando-se permeável para alguns componentes específicos presentes na corrente de alimentação e menos permeável para outros em virtude de certas características. Os componentes impermeáveis são retidos e permanecem no lado da corrente de alimentação, formando o que se denomina como concentrado ou rejeito (BAKER, 2004).

O tratamento convencional de água é uma tecnologia utilizada geralmente para remoção de cor, turbidez e microrganismos, porém, é pouco eficiente para a remoção de substâncias dissolvidas de baixa massa molar, por exemplo, sais, fármacos, toxinas, pesticidas e íons. De acordo com SCHLEICHER (2013) em alguns países já se utilizam sistemas de

tratamento de água para abastecimento empregando membranas, desempenhando processos como: abrandamento de águas duras, remoção microbiológica e remoção de contaminantes traços (pesticidas, metais, dentre outros).

Os processos de separação por membranas que apresentam maior aplicação no tratamento de água são os processos controlados por pressão. As membranas de alta pressão, osmose inversa (OI), nanofiltração (NF), são utilizadas no tratamento avançado de água, e as membranas de baixa pressão, ultrafiltração (UF) e microfiltração (MF), são usadas em substituição aos tratamentos convencionais. Na Tabela 1 são apresentadas as pressões necessárias para o transporte do fluido através dos diferentes tipos de membranas.

Tabela 1. Pressões de alimentação para processos movidos à pressão (BERGMAN, 2005).

Processo de Separação por Membranas	Faixa de Pressões Típicamente Trabalhadas	
	(psi)	(Kpa)
Osmose Inversa	350 a 600	2.410 a 4.140
Nanofiltração	50 a 150	340 a 1.030
Ultrafiltração	3 a 50	21 a 340
Microfiltração	1 a 12	7 a 83

Os Processos de Separação por Membranas (PSM) vem se tornando uma opção tecnológica interessante para complementar ou substituir os sistemas de tratamento de água existentes. Isso tem ocorrido, principalmente, pela sua facilidade de ampliação de escala (unidades modulares), por garantir elevados níveis de remoção de contaminantes, inclusive contaminantes emergentes, permitindo o atendimento aos padrões de qualidade cada vez mais rigorosos das legislações (SIMÕES, 2016).

As membranas podem ser classificadas de diferentes maneiras: quanto ao material de origem, quanto à sua estrutura, quanto ao fluxo de permeado, quanto à sua capacidade seletiva, configuração dos módulos, configuração hidráulica, entre outros (USEPA, 2005). A afinidade com a água também é utilizada para classificação das membranas. Deste modo, seguem algumas formas de classificação das membranas.

3.2 Estrutura física das membranas

As membranas podem ser classificadas quanto à estrutura em: porosas, densas ou compostas e quanto à morfologia em: isotrópicas (simétricas) ou anisotrópicas (assimétricas). Ainda assim, as membranas são classificadas como integral quando possuem um único material envolvido em sua composição. Em relação à estrutura e morfologia, as membranas isotrópicas

porosas possuem em sua estrutura poros aleatoriamente distribuídos. As membranas isotrópicas densas constituem-se de um filme denso através do qual o permeado é transportado por difusão. Enquanto que as membranas isotrópicas eletricamente carregadas podem ser porosas ou densas carregadas com íons positivos ou negativos (BAKER, 2004). As membranas anisotrópicas apresentam uma camada superior mais fechada e fina, denominada de pele, com a presença ou não de poros em sua estrutura, como pode ser visto na Figura 1.

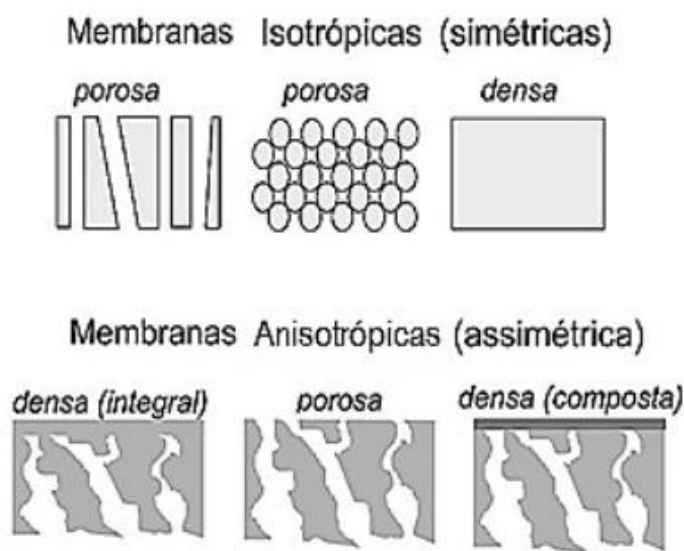


Figura 1. Representação esquemática da seção transversal dos diferentes tipos de morfologia de membranas sintéticas.

Fonte: Adaptado de HABERT et al. (2006).

Essas membranas podem ser ainda classificadas em integrais, quando essas duas regiões são compostas pelo mesmo material, ou compostas, quando um material diferente da matriz é utilizado para a formação da pele (HABERT et al., 2006). Vale ressaltar ainda que, nas membranas anisotrópicas compostas, as características da superfície da membrana que está em contato com a solução problema definem se a membrana é porosa ou densa. As membranas porosas separam as partículas por tamanho. Na Figura 2 é ilustrado as habilidades de remoção dos vários tipos de tecnologia de membrana com base no tamanho dos contaminantes removidos (BERGMAN, 2007).

Nas membranas densas, o mecanismo de separação baseia-se na diferença dos coeficientes de solubilidade e difusão entre o solvente e o soluto. Nesta faixa, não convém utilizar a convenção de diâmetro de poros pois compostos com pesos moleculares maiores como etanol são menos rejeitados enquanto íons de menor peso molecular como o cálcio são mais rejeitados.

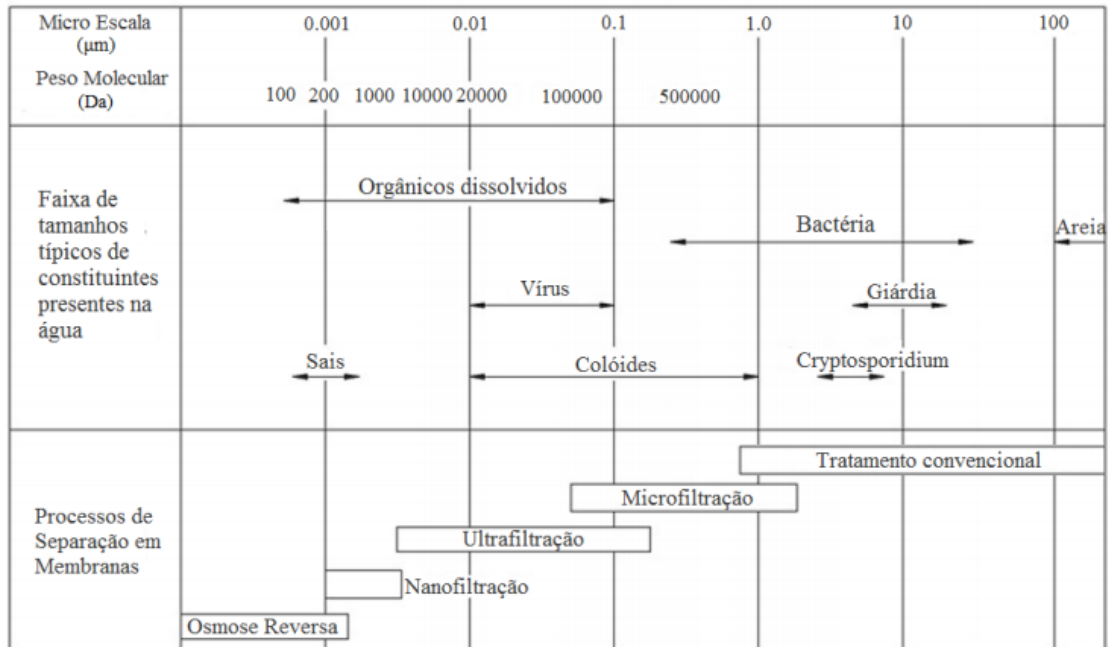


Figura 2. Faixa de operação de processos de separação em membranas com relação às dimensões dos contaminantes.

Fonte: Adaptado de BERGMAN (2007).

As membranas de Osmose Inversa são as mais restritivas dentro desta classe com eficiências da ordem de 99,7% para cloreto de sódio. As membranas de Nanofiltração situam-se em uma faixa intermediária entre as densas e as porosas (<2nm) realizadas a separação pelos dois processos (FARRUGIA, 2013). Na Figura 3 tem-se o esquema de funcionamento das membranas.

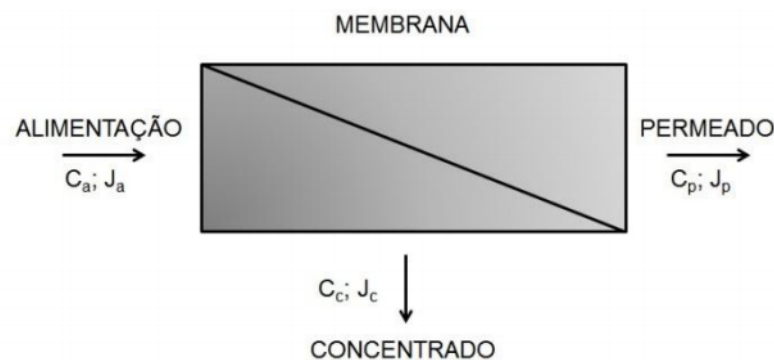


Figura 3. Balanço do fluxo e da concentração em uma unidade de membrana.

Fonte: Adaptado de MULDER (1996).

A seletividade das membranas depende da composição da água de alimentação (matéria orgânica natural, COD, pH, temperatura), das propriedades do composto a ser removido (solubilidade, coeficiente de partição octanol-água - K_{ow} , polaridade, peso molecular, efeito estérico) e das características físico-químicas da membrana (peso molecular

de corte (molecular weight cut off - MWCO), porosidade, material, permeabilidade, hidrofobicidade) (SCOTT, 1995).

De acordo com o BUENO (2013), as membranas de osmose inversa removem os contaminantes da água com um diâmetro inferior a 1 nm e removem, tipicamente, mais de 90% da contaminação iônica, a maior parte da contaminação orgânica e praticamente toda a contaminação por partículas.

A osmose inversa acontece quando uma pressão mecânica superior a pressão osmótica é aplicada no lado da solução mais concentrada invertendo-se, desta maneira, o sentido do fluxo de soluto que atravessa a membrana, obtendo-se assim uma corrente de água purificada isenta de sais, vírus, bactérias e fungos, conforme pode ser observado na Figura 4.

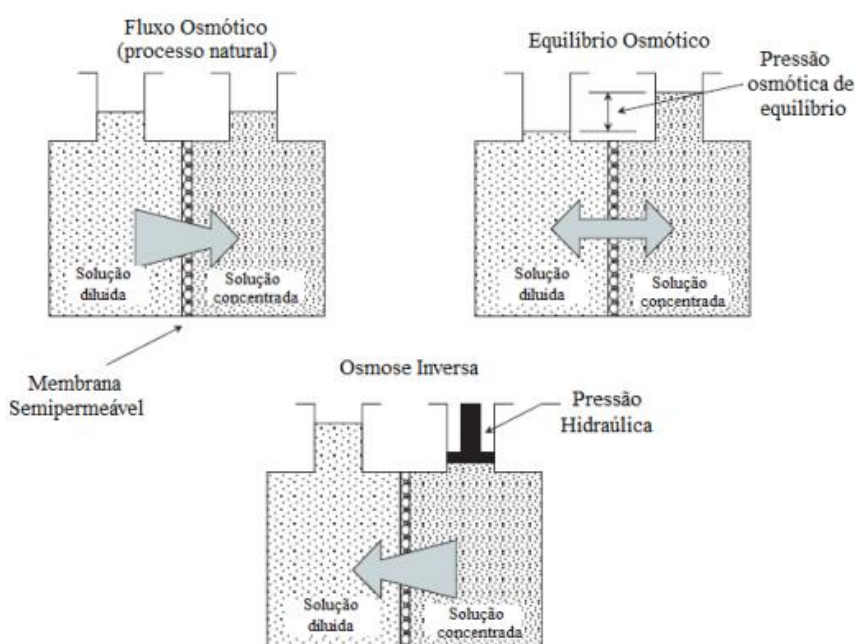


Figura 4. Princípios da Osmose Inversa.
Fonte: MIERZWA, 2006.

A taxa de transporte de água através da membrana depende das propriedades da mesma, da temperatura da solução, da diferença de pressão aplicada na membrana, e a baixa diferença de pressão osmótica entre e solução mais concentrada e a de menor concentração.

3.3 Materiais das membranas

As membranas sintéticas comerciais são produzidas a partir de duas classes distintas de material: os polímeros, que são constituídos de material orgânico como acetato de celulose; poliamidas, polissulfonas, dentre outros, e os inorgânicos, como metais e materiais cerâmicos (CUPERUS e NIJHUIS, 1993).

As membranas podem ser classificadas em três classes: 1) Membranas derivadas de acetato de celulose para dessalinização da água do mar, elas são sensíveis ao pH (3 – 8) e a temperatura (máximo 50°C) e susceptíveis aos microrganismos e desinfetantes (CHERYAN, 1998). 2) Membranas elaboradas com polímeros sintéticos, principalmente derivados de polissulfona ou poliolefina. Foram introduzidas a partir de 1975, com diferentes composições químicas e propriedades funcionais, tais como as de poliamidas e polibenzimidazóis que são resistentes à hidrólise e ao ataque de microrganismos, porém degradam na presença de cloro (ZANINI, 1994). 3) Membranas constituídas de material cerâmico a base de óxido de zircônio ou alumina depositados sobre superfície de grafite ou outros materiais. Estas membranas apresentam grande resistência mecânica, suportam altas pressões, toleram toda faixa de pH (0 a 14) e temperaturas superiores a 400°C. São quimicamente inertes e de custo muito elevado (SUTHERLAND e FREE, 1991).

3.4 Força motriz

Para que ocorra o transporte de uma espécie química através de uma membrana é necessário que uma força motriz atue sobre a mesma. As forças motrizes usadas em processos de separações por membranas são o gradiente de potencial químico e/ou o gradiente de potencial elétrico. Como os processos com membranas são, em sua grande maioria, atérmicos, o gradiente de potencial químico pode ser expresso, apenas, em termos do gradiente de pressão e de concentração (HABERT et al., 2006). Nos processos que utilizam o gradiente de pressão como força motriz (MF, UF e NF), em função da morfologia da membrana, o transporte das diferentes espécies pode ocorrer tanto por mecanismo de convecção, como também pelo mecanismo de difusão.

Nas membranas porosas, a seletividade ocorre pela exclusão das moléculas retidas na membrana, e o transporte das espécies pode tanto ser convectivo quanto difusivo dependendo do tipo de força motriz empregada. No caso de membranas densas, a seletividade depende da afinidade das diferentes espécies com o material da membrana e da difusão dos componentes, sendo o transporte essencialmente difusivo, independentemente do tipo de força motriz empregada, conhecido também como mecanismo solução-difusão.

3.5 Configuração hidráulica e dos módulos

Os processos de membranas por gradiente de pressão podem ser operados de dois modelos hidráulicos de operação diferentes: frontal ou perpendicular (*dead-end*) e cruzado ou tangencial (*crossflow*). No modo frontal ou perpendicular, uma corrente de alimentação entra

no módulo de membrana e flui verticalmente sobre a superfície da membrana e apenas um fluxo deixa o módulo. Em modo tangencial, o fluxo de alimentação flui tangencialmente pela superfície da membrana e duas correntes saem do módulo de membrana, uma de concentrado e outra de permeado (USEPA, 2005). Os modos de filtração podem ser visualizados na Figura 5.

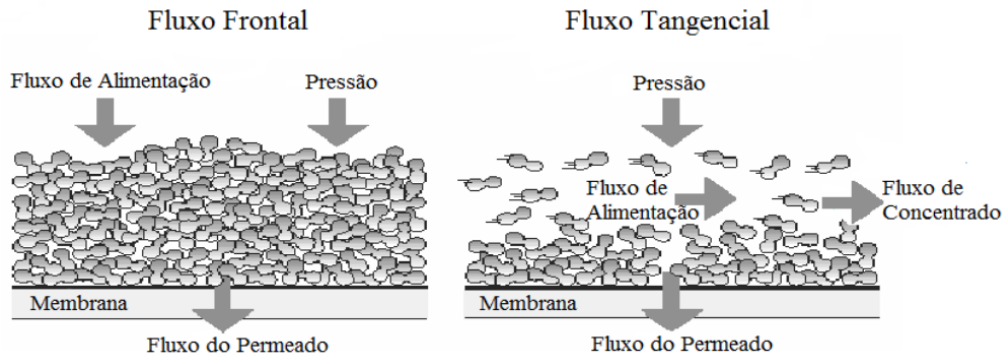


Figura 5. Configuração hidráulica dos processos de separação por membranas.
Fonte: SINGH, 2006, adaptado.

O módulo é o elemento básico de um sistema de membrana que congrega todas as estruturas necessárias para viabilizar a operação da unidade de separação. Ele é composto por: membranas; estruturas de suporte da pressão, do vácuo ou da corrente elétrica aplicados ao sistema; canais de alimentação e remoção do permeado e do concentrado.

Além disso, os módulos devem ser projetados para atender requisitos, tais como: simplicidade de manuseio, facilidade de limpeza e baixo volume morto (SCHNEIDER e TSUTIYA, 2001). Os tipos de módulos mais comuns utilizados são módulos de placa plana, módulos em espiral, módulos tubulares e módulos de fibra oca (VIGNESWARAN et al., 2012). A Figura 6 (a) mostra que dentro do módulo, folhas planas de membrana e espaçadores são enrolados entorno de um tubo coletor central de permeado, o espaçador de permeado é revestido pela folha de membrana e o espaçador de alimentação é colocado entre cada folha. No (b) apresentam as extremidades dos módulos de membrana e a (c) apresenta uma foto do módulo em espiral.

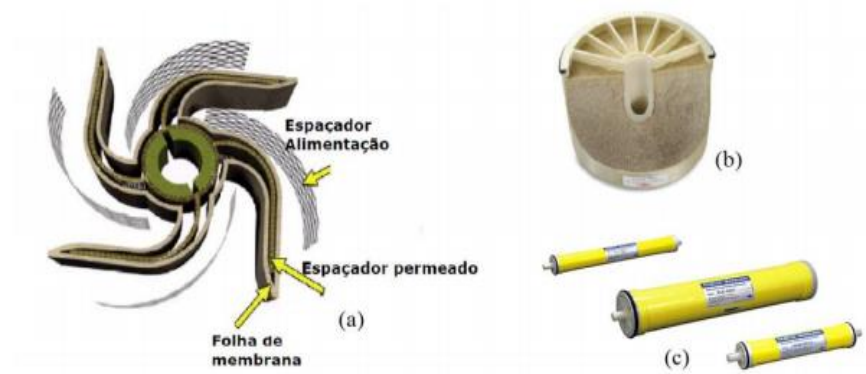


Figura 6. (a) Esquema da membrana em espiral, (b) Extremidades do módulo, e (c) Módulo de membrana em espiral.

Fonte: PEIG, 2013, modificado.

3.6 Parâmetros operacionais

Os principais parâmetros de operação que afetam o fluxo de permeado são a pressão, a temperatura, a concentração de alimentação e a velocidade tangencial. O fluxo de permeado é diretamente proporcional à pressão aplicada e inversamente proporcional à viscosidade. A viscosidade pode ser controlada pela concentração de sólidos na alimentação e pela temperatura. Sob condições restritas, a elevação da pressão ou da temperatura acarreta aumento no fluxo de permeado. Entretanto, a utilização de pressões elevadas pode ocasionar a compactação da camada de gel, aumentando a colmatagem da membrana (HWANG e KAMMERMEYER, 1998).

O aumento na concentração de alimentação afeta a viscosidade, a densidade e a difusividade da solução de alimentação, ocasionando decréscimo no fluxo de permeado. Em geral, temperaturas mais elevadas proporcionam maiores fluxos de permeados em regiões em que existe controle de pressão e de transferência de massa. O efeito da temperatura decorre da redução ocasionada na viscosidade do fluido e na mobilidade das moléculas, ou seja, na difusividade. O aumento da velocidade tangencial incrementa a taxa de permeação por provocar maior turbulência. A turbulência, proveniente de agitação ou bombeamento do fluxo, promove a desorganização na concentração de solutos na superfície da membrana e reduz a espessura da camada limite. Esse constitui um dos métodos mais simples e efetivos de se controlar o efeito da polarização da concentração (STRATHMANN, 1990).

Outro fator que também afeta o desempenho das membranas é a configuração. O alto desempenho quanto ao fluxo de permeado e retenção do soluto desejado deve ser balanceado pela sua maior propensão à colmatagem, custo, facilidade de limpeza e substituição (PORTER, 1990).

A taxa de recuperação é a razão entre a vazão de permeado e a vazão da água de alimentação. As variações da recuperação são diretamente proporcionais as do fluxo de permeado, já que quanto maior o fluxo de permeado maior a taxa de recuperação. Uma forma de aumentar a taxa de recuperação de uma membrana é o arranjo de módulos em série. Por outro lado, a rejeição é definida como a relação entre a concentração de soluto no permeado e concentração de soluto na alimentação da membrana.

Outro parâmetro operacional das membranas muito importante é a permeabilidade hidráulica que pode ser definida como a quantidade de permeado transportado através da membrana por unidade de área por unidade de tempo e por unidade de pressão. Na Tabela 2 são apresentadas as principais equações relacionadas aos parâmetros operacionais em sistemas de Osmose Inversa.

Tabela 2. Equações dos parâmetros operacionais em sistemas de osmose inversa.

Parâmetro	Definição	Equação	Equação
Recuperação	Relação entre a vazão de permeado e a vazão de alimentação	$r = \frac{Q_p}{Q_{aa}} \times 100$	onde r é a recuperação da água de alimentação (%), Q_p e Q_{aa} são as vazões (L/min) de permeado e água de alimentação, respectivamente.
Rejeição	Relação entre a concentração de soluto no permeado e concentração de soluto na alimentação	$R = \left(1 - \frac{c_p}{c_{aa}}\right) \times 100$	onde R é a rejeição (%), C_p e C_{aa} são as concentrações de soluto ($\mu\text{g/L}$) na água de permeado e alimentação, respectivamente.
Fluxo de permeado	Representa a vazão de permeado por unidade de área de uma membrana operando sob pressão	$F_p = \frac{Q_p}{A}$	onde F_p é o fluxo de permeado (L/h.m^2) e A é a área efetiva da membrana (m^2).
Fluxo específico	Fluxo normalizado em relação à pressão transmembrana	$M = \frac{F_p}{PTM}$	onde M é o fluxo específico ($\text{L/h.m}^2.\text{bar}$).

3.7 Água pura

Nos laboratórios atuais, a disponibilidade de água pura é um fator essencial, enquanto os consumidores domésticos consideram a água da torneira como sendo "pura", os cientistas de laboratório e profissionais de saúde demandam uma alta qualidade e pureza da

água para a realização de vários procedimentos, pois pesquisadores analíticos comumente estão envolvidos com elementos e compostos presentes ao nível de ppb (partes por bilhão) na água e outros materiais.

Estes contaminantes podem ter efeitos negativos em aplicações através da interação com outras substâncias, incluindo a substância em análise. Sendo assim, a ANVISA por meio de sua resolução (RDC n. 302 de 13 de outubro de 2005) estabelece que os laboratórios clínicos devam adotar e definir o grau de pureza da água reagente que irão utilizar em suas análises, bem como as formas de controle de qualidade (VIEIRA, 2005).

De forma a produzir água pura e ultrapura conforme os padrões estabelecidos pela ANVISA, as tecnologias comumente utilizadas, além da osmose inversa, são:

i) Destilação: é usada na separação de misturas homogêneas do tipo sólido-líquido, em que os componentes têm diferentes pontos de ebulição. O vapor da água aquecida é condensado, coletado e armazenado, removendo grande parte dos contaminantes.

ii) Deionização: utilizada para remoção de substâncias inorgânicas, utilizando colunas com resinas carregadas eletricamente, que liberam a troca seletiva de íons por compostos inorgânicos dissolvidos na água.

iii) Eletrodeionização: é um processo contínuo, em que a água passa por canais, deslocando para o canal de eletrodo, percorrendo através de membranas permeáveis a ânions e cátions (canais de purificação) e, depois, pelo canal de concentração. O campo elétrico criado faz que os íons removidos trilhem por canais em que ficam concentrados, ao mesmo tempo que o produto transita por outro canal e é armazenado para uso.

A qualidade da água é extremamente importante no diagnóstico clínico, pois a qualidade da água que esteja abaixo dos níveis aceitáveis não só afeta a química dos ensaios, como também pode reduzir a confiabilidade dos resultados do ensaio e aumentar os tempos de calibragem e os custos dos reagentes.

De acordo com Guia de Água Pura produzido pela ELGA *LabWater*, as normas mais relevantes para o mercado de análises clínicas são as do *Clinical and Laboratory Standards Institute* (CLSI), antigo *National Committee for Clinical Laboratory Standards*, as normas podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3. Especificações do CLSI para água ultrapura.

Parâmetro	Tipo I	Tipo II	Tipo III
Bactérias (UFC / ml)	≤ 10	≤ 1000	Não
pH	Não	Não	5-8

Resistividade a 25 °C (MΩ.cm)	≥ 10	≥ 1	≥ 0,1
Condutividade a 25 °C (μS / cm)	≤ 0,1	≤ 1	≤ 10
SiO ₂ (mg / l)	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 1
Sólidos Totais (mg / l)	≤ 0,1	≤ 1	≤ 5
Carbono orgânico oxidável total	≤ 0,05	≤ 0,2	≤ 1

A norma Especificação da Organização Internacional de Normalização relativa à água para uso laboratorial ISO 3696: 1987 abrange três graus de pureza da água, conforme a seguir especificados:

Tipo I: Essencialmente isenta de contaminantes iônicos e orgânicos dissolvidos ou coloidais. Adequada aos requisitos analíticos mais rigorosos, incluindo os requisitos de cromatografia líquida de alta pressão (HPLC). Deve ser produzida por tratamento adicional de água de grau 2, por exemplo, por osmose inversa ou permuta iônica, seguida de filtragem através de um filtro de membrana de 0,2 μm de para remoção de matéria de partículas ou bidestilação por um aparelho de sílica fundida.

Tipo II: Contaminantes inorgânicos, orgânicos ou coloidais muito baixos e adequados a determinações analíticas sensíveis, incluindo a espectrofotometria de absorção atômica (AAS) e a determinação de constituintes em quantidades detectáveis. Pode ser produzido por destilação múltipla, permuta iônica ou osmose inversa seguida de destilação.

Tipo III: Adequado para grande parte do trabalho de laboratório químico por via úmida e preparação de soluções reagentes. Pode ser produzido por destilação única, permuta iônica ou osmose inversa. Deverá ser utilizado para trabalho analítico comum, exceto nos casos determinados em contrário.

O Guia de Água Pura da Elga faz a distinção entre quatro graus gerais de água para laboratório purificada: i) Grau primário, ii) Deionizada, iii) Laboratório geral e iv) Ultrapura. A água de grau primário apresenta o nível de pureza inferior, com faixa de valores para condutividade de 1 a 50 μS/cm.

Já as determinações da norma da Organização Internacional de Normalização relativa à água para uso laboratorial ISO 3696/1987 encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Critérios de normalização de água pura, ISO 3698/1987.

Parâmetro	Grau 1	Grau 2	Grau 3
pH a 25°	N/A	N/A	5,0 a 7,5
Condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) a 25°	0,1	1	5
Teor de oxigênio (O_2) de matéria oxidável (mg/l)	N/A	0,08	0,4
Absorbância a 254 nm e 1 cm de comprimento do trajeto óptico (1/cm)	0,001	0,01	Não especificado
Resíduo após evaporação com aquecimento a 110° C (mg/kg)	N/A	1	2
Teor de sílica (O_2) (mg/L)	0,01	0,02	Não especificado

Na Tabela 5 é comparado os parâmetros exigidos pelas principais normas para uma água ser considerada Tipo I.

Tabela 5. Padrões de Água Tipo I.

Parâmetro	CLSI	CAP	ASTM
Resistividade mínima ($\text{M}\Omega \cdot \text{cm}$, 25°C)	10	10	18
Condutividade máxima ($\mu\text{S}/\text{cm}$, 25°C)	0,1	0,1	0,056
Silicatos, máximo (mg / l)	0,05	0,05	0,003
Diâmetro máximo de material particulado (μm)	0,2	0,22	0,2
Microorganismos - n°. máximo de unidades formadoras de colônia por mililitro (UFC / ml)	10	10	Tipo I-A: 10/1000 ml Tipo I-B: 10 / 100 ml Tipo I-C: 10 / 10 ml

Quanto ao monitoramento para manter a água purificada, segundo BREDA (2001), a água reagente precisa seguir a um padrão de controle de qualidade rigoroso a partir da determinação de resistividade e condutividade, muito úteis para estimar a quantidade de contaminantes iônicos presentes na água, porque determinam indiretamente os sólidos totais

dissolvidos. Os parâmetros de resistividade e condutividade de uma amostra de água reagentes devem ser medidas diariamente conforme descrito nas normas CLSI. Além disso, é necessário analisar substâncias orgânicas dissolvidas a partir de análises de carbono orgânico dissolvido, ou outras medidas indiretas como a medida de absorvância em 254 nm de ultravioleta.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O projeto foi desenvolvido no Instituto Federal Goiano Campus Rio Verde - Goiás utilizando um sistema de osmose inversa com três estágios, dois pré-filtros (cartucho de polipropileno e carvão ativado granular), seguidos de módulo de membrana de osmose inversa. A água de alimentação do sistema foi a água de abastecimento do campus (IF Goiano - Campus Rio Verde) advinda de um poço artesiano. Essa unidade piloto foi instalada no laboratório de Saneamento e Meio Ambiente localizado na instituição de ensino citada. A Figura 7 apresenta o diagrama esquemático da instalação piloto do sistema de osmose inversa.

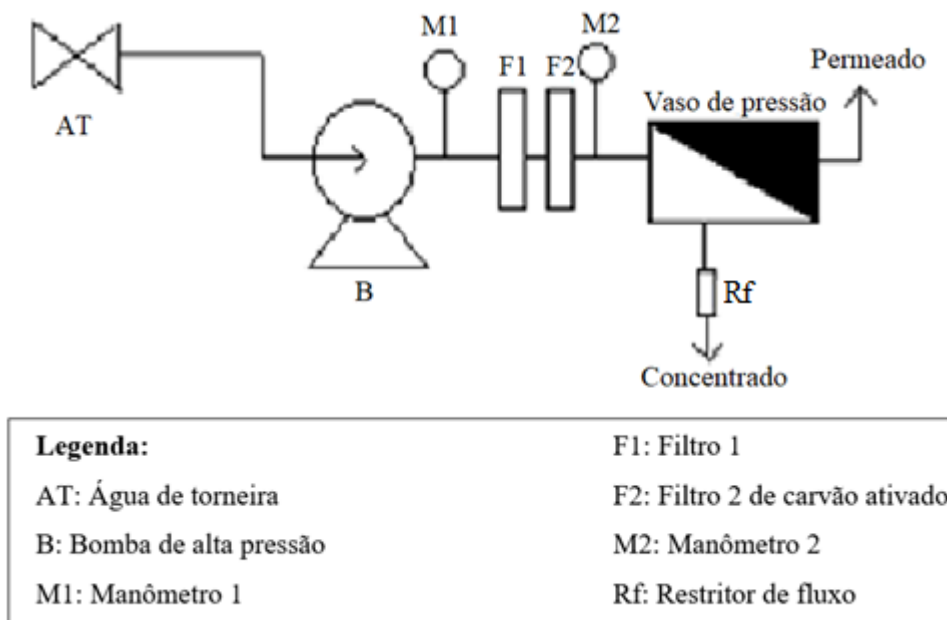


Figura 7. Representação esquemática do sistema de tratamento.

Como pode ser visto na Figura 7, a instalação piloto é constituída por uma série de elementos que permitem a operação e o controle manual de todo o sistema. Os principais componentes são descritos na sequência:

Vaso de pressão: Contém módulo de membrana de Osmose Inversa, modelo ULP1812-50 com 50GPD (0,0001 micra) fabricada por Vontron, como pode ser visto na Figura 8.



Figura 8. Vaso de pressão contendo a membrana de Osmose Inversa.

Filtro 1: Filtro de Polipropileno (T-33 PP) para a filtragem de componentes físicos suspensos na água como: areia, terra, ferrugem, sedimentos;

Filtro 2: Carvão Ativado granular (T-33 carvão block) ideal para remoção de sabor e odor, como advindos de gases e alcalinidade, além de cloro residual. Os filtros juntamente ao vaso de pressão pode ser visto na Figura 9.

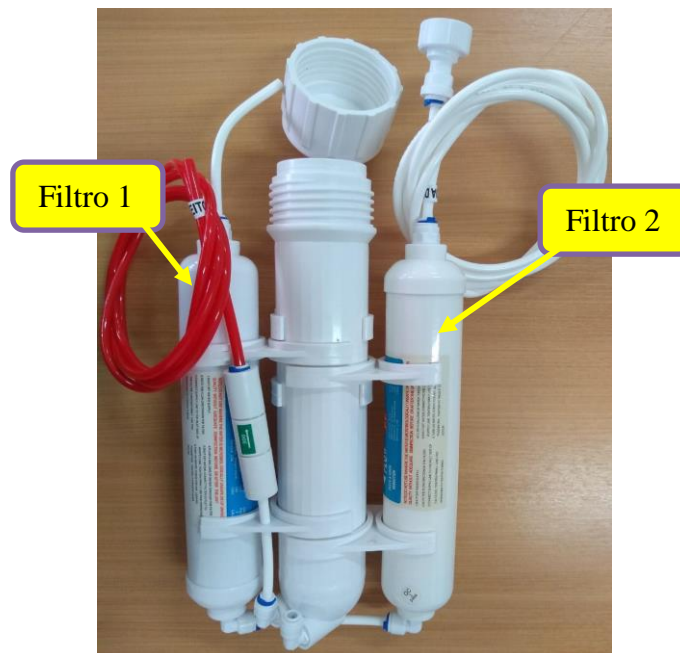


Figura 9. Filtro 1 e 2 ao lado do vaso de pressão da membrana de Osmose Inversa.

Bomba Booster (B): bomba booster de reforço, alta pressão, 50gpd e pressão máxima de 0,82737 MPa utilizada para fornecer a pressão necessária para alimentação das membranas. A bomba pode ser vista na Figura 10.



Figura 10. Bomba de alta pressão utilizada no Sistema.

Manômetro 1 e 2: manômetros de aço inoxidável, fabricante Outest, utilizados para monitorar as pressões de até 1,37895 MPa. Os manômetros podem ser vistos na Figura 11.



Figura 11. Manômetros 1 e 2 do sistema.

A Figura 12 apresenta o sistema já instalado. A água bruta, usada para alimentar o sistema, é proveniente da torneira (água de poço artesiano usada para abastecimento do Campus). Ao sair da torneira a água passa pela bomba de alta pressão e tem sua pressão medida pelo Manômetro 1. A seguir a água passa pelos filtros de cartucho e carvão ativado, e antes de entrar na membrana de osmose inversa a água tem sua pressão de alimentação medida pelo Manômetro 2. Após a passagem da água pela membrana tem-se a saída do concentrado e do permeado.



Figura 12. Sistema de filtração com membrana de osmose inversa.

A membrana de osmose inversa modelo ULP1812-50 é produzida pela Vontron Membrane Co., Ltd., China. De acordo com as orientações do fabricante (VONTRON™, 2001), a membrana de Osmose Inversa consiste em uma camada funcional feita de poliamida reticulada e uma camada de suporte feita de polissulfona microporosa. Algumas especificações da membrana utilizada podem ser conferidas na Tabela 6 de acordo com o manual do fabricante.

Tabela 6. Principais características da membrana ULP1812-50.

Modelo da Membrana OI	Rejeição (%)	Produção Média de Água (m ³ /d)	Condições de teste		
			Pressão (MPa)	Concentração NaCl (ppm)	Recuperação (%)
ULP1812-50	97,5	0,19	0,41	250	15

Os parâmetros operacionais pressão de alimentação, pressão de permeado, pressão de concentrado, vazão de concentrado e de permeado e os parâmetros de qualidade pH, condutividade elétrica, temperatura, sólidos dissolvidos totais (SDT) e absorvância medida no comprimento de onda 254 nm (ABS UV 254) foram monitorados durante todo o experimento nas frequências mostradas no protocolo experimental (Figura 13), já os parâmetros fluxo de permeado, pressão transmembrana e fluxo específico foram calculados a partir dos parâmetros medidos. A pressão era monitorada por meio de manômetros agregados a instalação piloto e a vazão era medida pelo método volumétrico.

O protocolo experimental teve início com a realização de limpeza química da membrana, seguida de ensaio de permeabilidade em água de alimentação (protocolo mostrado na Figura 13). Em seguida, foi iniciado o experimento com duração de 20,5 horas acumuladas de operação, onde o sistema foi monitorado duas vezes por semana, durante 3 horas por dia, com frequência de análises dos parâmetros operacionais (vazão, fluxo de permeado, pressão transmembrana, permeabilidade hidráulica) e de qualidade (condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, temperatura, pH, absorvância em Ultravioleta a 254 nm) a cada 30 minutos. Após isso foi realizada outra limpeza química, em seguida um ensaio de permeabilidade para o início do experimento de 50 horas ininterruptas em que foi realizado as coletas nos minutos (0, 30, 90, 150, 390, 960, 1200, 1410, 1560, 1710, 1860, 2640, 2880 e 3000 minutos). Posteriormente foi encerrado com um ensaio de permeabilidade em água de alimentação, conforme o esquema apresentado na Figura 13.

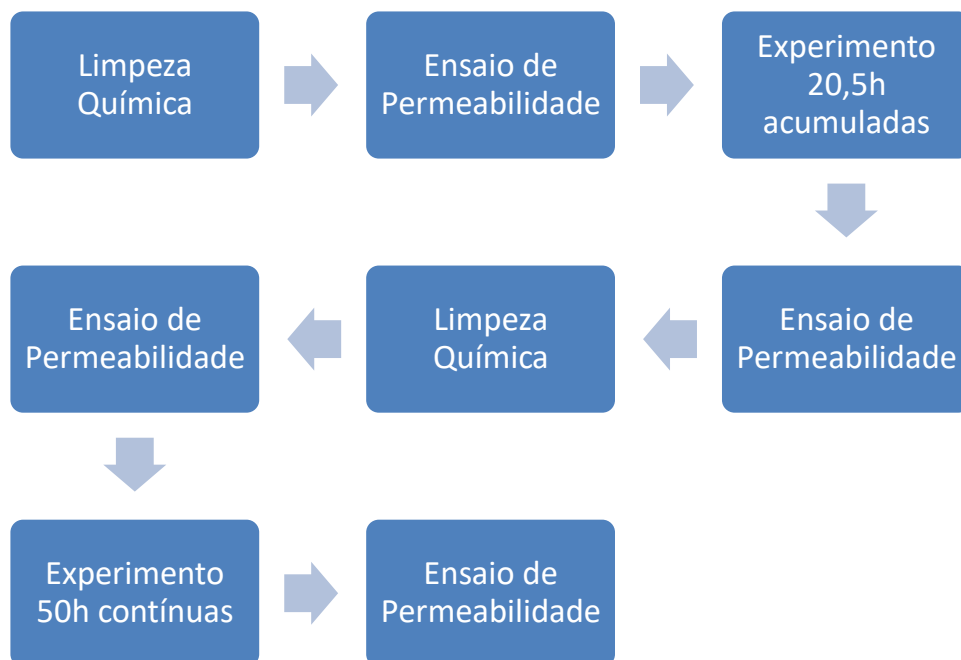


Figura 13. Protocolo Experimental.

Protocolo de limpeza química: A limpeza química da membrana foi realizada ao início e ao final do experimento de 20,5 horas acumuladas, no intuito de prevenir ou retardar a formação de depósitos, restabelecer as características iniciais de operação, como o fluxo e a permeabilidade e avaliar a reprodutibilidade dos experimentos. A limpeza química foi realizada após a retirada total dos resquícios de concentrado do sistema, que era expulso da membrana com a alimentação do módulo com água deionizada em baixas pressões. O procedimento de limpeza envolve uma limpeza alcalina (solução de hidróxido de sódio a 0,1%), que atua na

remoção do depósito causado por matéria orgânica natural, seguida por limpeza ácida (solução de ácido sulfúrico a 0,1%), que visa eliminar os sais de dureza e hidróxidos metálicos (RODRIGUES, 2018).

Ensaio de permeabilidade com água pura: A permeabilidade hidráulica pode ser definida como a quantidade de permeado transportado através da membrana por unidade de área por unidade de tempo e por unidade de pressão. A permeabilidade da membrana foi medida pela passagem de água de alimentação através da membrana sob diferentes pressões de alimentação (RODRIGUES, 2018).

Os parâmetros de qualidade e os métodos utilizados estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros monitorados e métodos utilizados nas análises.

Parâmetro	Método
Condutividade	Condutivímetro (2510.B, SM-22*)
Absorbância UV 254nm	Absorção de raios ultravioleta (UV) em 254 nm, com cubeta de quartzo de 10mm (5910.B, SM22*)
Sólidos Totais Dissolvidos	Condutivímetro
pH	Potenciométrico (4500.B, SM-22*)
Temperatura	Visual

*SM-22: Standard Methods, 22ª Edição (APHA, AWWA, WEF, 2012)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Parâmetros Operacionais

A Figura 14 apresenta o comportamento das pressões trabalhadas durante os experimentos e também da pressão transmembrana. Onde o manômetro 1 mede a pressão da água bruta antes de entrar nos filtros e o manômetro 2 mede a pressão antes da água bruta entrar na membrana de Osmose Inversa.

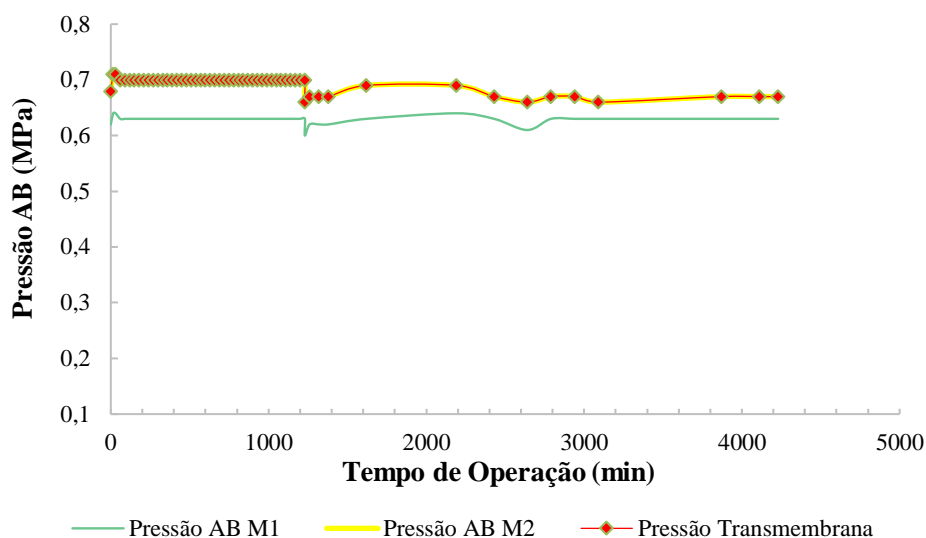


Figura 14. Pressões de Água Bruta Manômetro 1 (AB M1) e Manômetro 2 (AB M2) e Pressão transmembrana.

O comportamento das pressões avaliadas mostrou que até o tempo de operação de 1230 minutos que se refere ao experimento de 20,5 horas acumuladas as pressões se mantiveram constantes, a partir dos 1230 minutos teve início o experimento de 50 horas seguidas, que interferiu e causou uma maior variação na pressão ao longo do tempo, pois após o início do experimento de 50 horas ininterruptas as análises tinham um intervalor maior do que no experimento de 20,5 horas acumuladas. Porém em geral foi uma baixa variação pois a pressão de água bruta chegou ao máximo de 6,4 bar no manômetro 1 e 7,1 bar no manômetro 2.

A pressão transmembrana pode ser definida como o gradiente de pressão utilizado como força motriz para o transporte de água através da membrana, nesse caso como demonstrado no gráfico a pressão transmembrana foi igual a pressão do manômetro 2, isso pode ser explicado pela presença do restritor de fluxo presente no sistema de OI que tem a função de anular perda de pressão na membrana, ou seja, a pressão que entra na membrana é a mesma que sai. Pode-se observar também que a pressão medida na entrada da membrana foi maior do que a pressão medida na entrada dos filtros, isso pode ser explicado também pela presença do restritor de fluxo no sistema.

Na Figura 15 são apresentados os valores das vazões de água bruta, concentrado e permeado monitorados ao longo dos experimentos. As vazões tiveram pouca variação de acordo com o tempo de operação do sistema, isso pode ser explicado pela boa qualidade da matriz de alimentação da membrana.

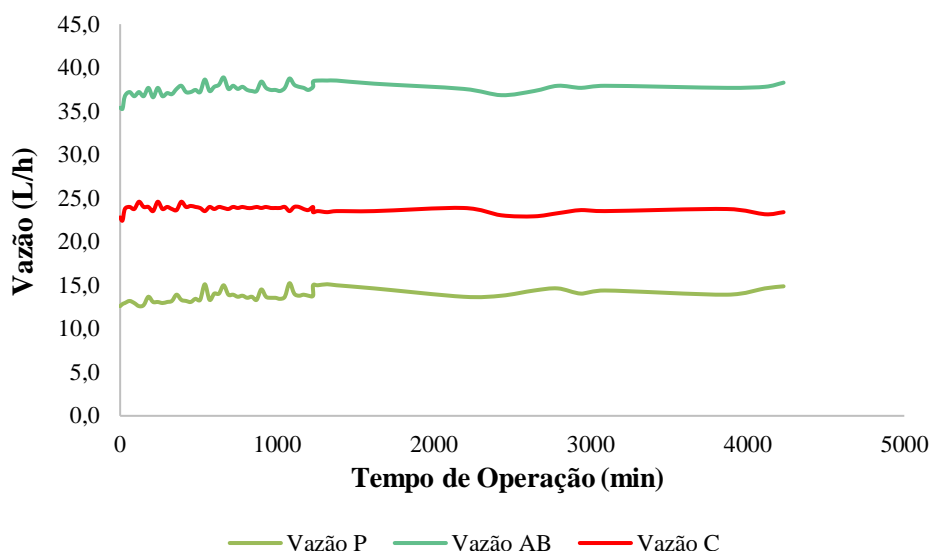


Figura 15. Vazão da água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P).

Na Figura 16 são apresentados os valores do fluxo de permeado monitorados ao longo dos experimentos e o fluxo específico calculado a partir da razão entre o fluxo de permeado e pressão transmembrana. Pode ser observado que o fluxo de permeado apresentou pouca variação durante o experimento, além disso, é possível perceber que, com a queda da pressão transmembrana (Figura 14) sendo que o fluxo de permeado continua praticamente constante (Figura 15), o fluxo específico de permeado aumenta, a partir das 20,5h isso pode ser explicado pela eficiência das limpezas químicas realizadas que retirou qualquer possível incrustação na membrana que causaria a queda no fluxo de permeado.

No estudo realizado por Jiang et al. (2021), utilizando a membrana ULP1812-50, o valor médio do fluxo de permeado relatado pelos autores foi de 35,9 L/h.m², aplicando pressão de alimentação de 10 bar, que se apresenta pouco inferior ao obtido neste trabalho.

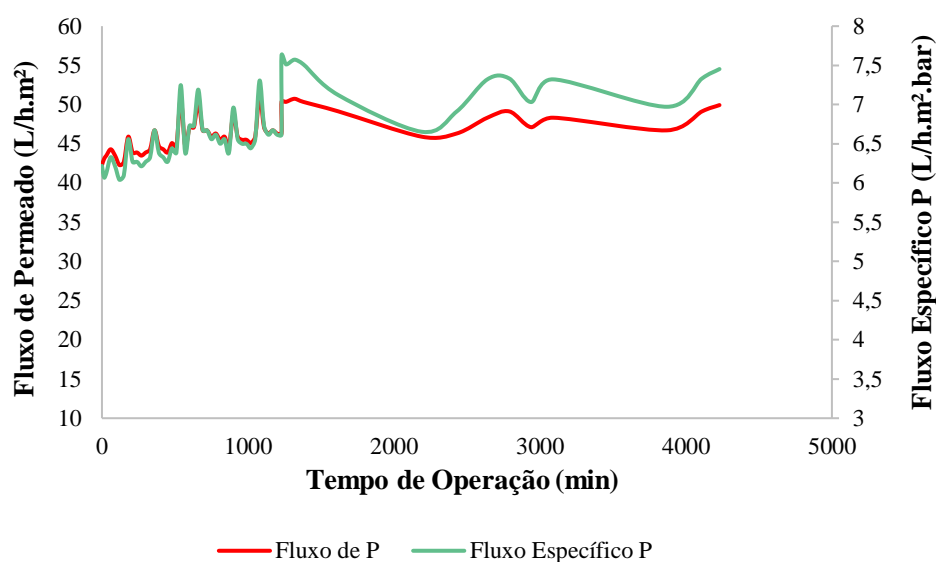


Figura 16. Fluxo de permeado e fluxo específico ao longo do tempo de operação nos experimentos.

A Figura 17 demonstra que a taxa de recuperação variou muito pouco entre os experimentos, mantendo-se na faixa de 33 a 39%.

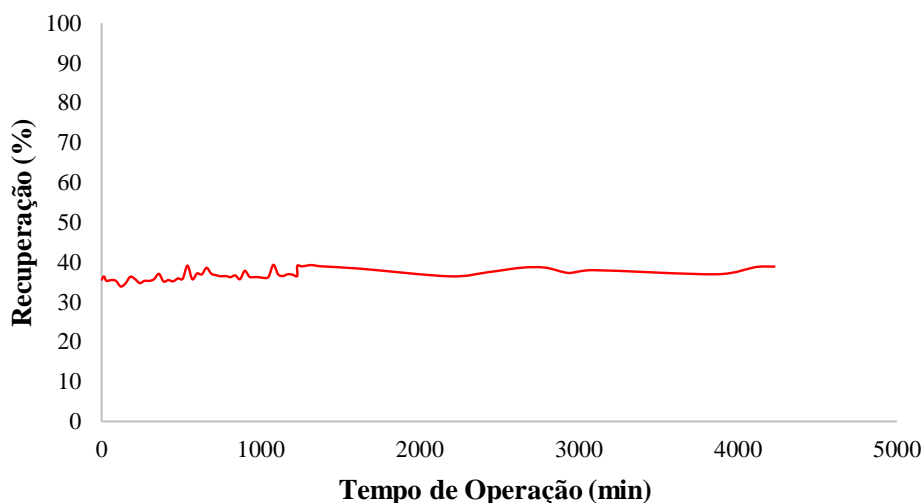


Figura 17. Recuperação da membrana ao longo do tempo de operação nos experimentos.

García (2017) obteve recuperação máxima de 30% pela membrana ULP1812-50, que comparada à recuperação máxima deste trabalho apresenta-se um pouco inferior, o que pode estar relacionado à menor pressão de alimentação (5 bar) empregada. De acordo com o manual do fabricante (VONTRON™, 2001) a recuperação esperada é de 15% para este modelo de membrana, dessa forma a membrana apresentou uma recuperação o dobro do esperado.

No intuito de avaliar a eficiência das limpezas químicas e a ocorrência de depósito irreversível na membrana, foram realizados ensaios de permeabilidade após às limpezas. A Figura 18 apresenta o comportamento do fluxo de permeado em função da pressão

transmembrana nos ensaios de permeabilidade, enquanto a Tabela 8 apresenta a permeabilidade hidráulica, bem como as equações da reta e o coeficiente de correlação gerados.

A permeabilidade hidráulica varia em função do fluxo de permeado e da pressão aplicada, tamanho de poro, efeito de compactação da camada polimerização e níveis de depósito da membrana. A presença de depósito nas membranas podem ser estreitar ou bloquear os poros, favorecendo o mecanismo de rejeição de exclusão por tamanho (coar). No entanto, determinados níveis de depósitos ou redução da permeabilidade hidráulica pode afetar o fluxo de permeado e rejeição das membranas.

Os resultados dos ensaios de permeabilidade encontram-se na Figura 18.

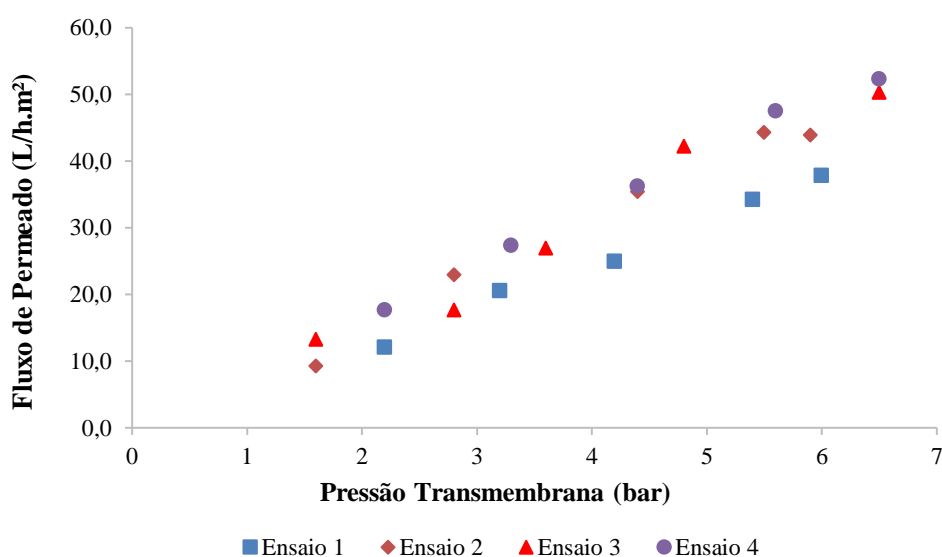


Figura 18. Ensaios de permeabilidade realizados antes e após os experimentos.

A permeabilidade hidráulica apresentou-se inferior no ensaio 1, o que pode ser explicado pelo fato desse ensaio ter sido realizado antes da limpeza química, após a limpeza no ensaio 2 foi observado um aumento na permeabilidade hidráulica, conforme pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8. Equação da reta, coeficiente de correlação linear e a permeabilidade hidráulica para os ensaios.

Ensaio	Equação da reta	Coefficiente de determinação (R ²)	Permeabilidade hidráulica (L/h.m ² .bar)
1	$y = 6,6643x - 2,057$	$R^2 = 0,9933$	6,66
2	$y = 8,175x - 1,8592$	$R^2 = 0,9813$	8,18
3	$y = 8,2534x - 1,7375$	$R^2 = 0,9606$	8,25
4	$y = 8,2229x + 0,0609$	$R^2 = 0,9956$	8,22

Entre os ensaios 2 e 3 foi feita uma nova limpeza química, o que explica novamente o sutil aumento na permeabilidade. Anteriormente ao experimento de 50 horas seguidas (3.000 min) foi realizado o ensaio 3, enquanto que o ensaio 4 foi realizado ao término deste experimento. Neste sentido, observa-se que ao trabalhar 50 horas seguidas, sem interrupção, a membrana não apresentou redução na permeabilidade hidráulica, indicando que não ocorreu depósito orgânico na membrana, o que dispensa a necessidade de limpezas frequentes.

5.2 Parâmetros de Qualidade

A matriz de alimentação utilizada nos experimentos foi a água tratada do IF Goiano, campus Rio Verde (água de poço artesiano, sem cloração). A Tabela 9 apresenta a qualidade da água de alimentação para os parâmetros monitorados neste trabalho, Sólidos Totais Dissolvidos (STD), absorvância medida no comprimento de onda 254 nm (ABS UV254), condutividade elétrica, temperatura, PH e rejeição da condutividade elétrica.

Tabela 9. Dados dos parâmetros de qualidade da água bruta.

Parâmetro	Nº de dados	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	57	310,19	437,5	280,4	34,38
pH	57	7,3	7,75	6,21	0,42
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	57	26,63	30,7	17,4	2,34
ABS UV 254 nm	43	0,03	0,157	0,001	0,04
STD (mg/L)	57	198,52	280	179,46	22
Rejeição Condutividade Elétrica	57	96,02	97,95	90,45	1,37

Os valores de condutividade elétrica encontrados para água doce estão compreendidos entre 5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (MESTRINHO, 2013) dessa forma pôde ser observado que a condutividade da matriz de alimentação está relativamente alta e isso pode ser explicado pela grande quantidade de sais (cátions e ânions) presentes na água e também a hidrogeologia das águas subterrâneas locais.

A Tabela 10 representa as médias dos valores obtidos na medição dos parâmetros de qualidade e de operação, em que os parâmetros de qualidade referem-se a água produzida (permeado).

Tabela 10. Dados dos parâmetros de qualidade e de operação analisados no permeado.

Parâmetro	Nº de dados	Média	Máximo	Mínimo	Desvio Padrão
Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	57	12,22	31,27	8,54	4,22
pH	57	6,55	7,76	5,34	0,62
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	57	27,20	33,6	23,5	2,17
ABS UV 254 nm	43	0,01	0,04	0,001	0,01
STD (mg/L)	57	7,82	20,0	5,47	2,70
Vazão AB (L/h)	57	37,6	35,3	35,3	0,69
Vazão P (L/h)	57	13,8	12,6	12,6	0,70
Vazão C (L/h)	57	23,8	22,4	22,4	0,39
Pressão Manômetro (bar)	57	6,9	7,1	6,6	0,14
Fluxo de permeado (L/h.m ²)	57	46,32	51,14	42,28	2,37
Fluxo específico (L/h.m ² .bar)	57	6,69	7,63	6,04	0,44

Comparando com García (2017) que fez uso da mesma membrana utilizada neste trabalho (ULP1812-50) que obteve média de $22,5 \mu\text{S}/\text{cm}$ de condutividade do permeado tendo como matriz de alimentação água de abastecimento da cidade de La Orotava, a condutividade deste trabalho foi cerca de 50% mais baixa.

A Figura 19 apresenta a rejeição de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) pela membrana, onde observa-se que a eficiência de remoção de sólidos totais dissolvidos ao longo de todo o período do experimento alcançou 97,92%.

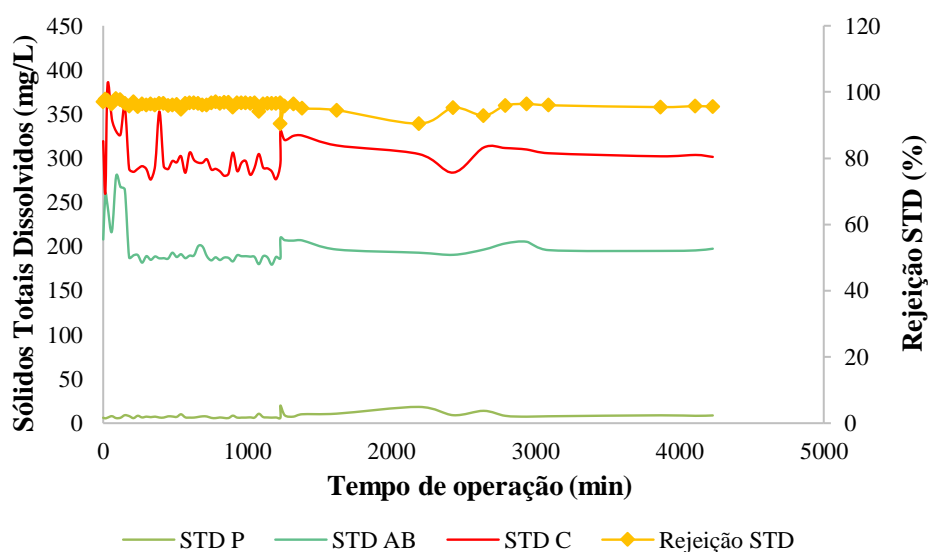


Figura 19. Concentração de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P) e rejeição da membrana monitorados ao longo do tempo de operação nos experimentos.

A Figura 20 apresenta a rejeição de Condutividade elétrica pela membrana, utilizando a água tratada do IF Goiano como matriz de alimentação. Observa-se que a membrana apresentou eficiência de remoção de condutividade em até 97,89%, a condutividade é um parâmetro relacionado à concentração de íons presentes na água, ou seja, à concentração de materiais nela dissolvidos.

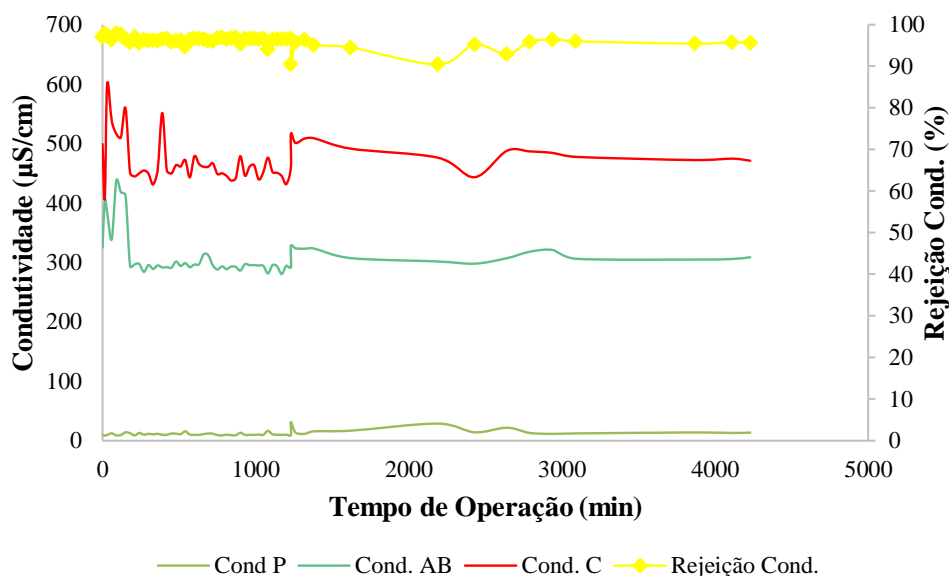


Figura 20. Resultados de Condutividade (Cond.) na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P) e rejeição da membrana monitorados ao longo do tempo de operação nos experimentos.

Observa-se comportamento similar na concentração de STD e condutividade ao longo do tempo nas correntes de concentrado, permeado e água bruta. Tais análises, corroboram com os resultados de permeabilidade hidráulica, mostrando que os íons presentes na matriz de alimentação foram removidos pela membrana sem causar depósitos ou polarização de concentração na membrana. De acordo com Rodrigues (2018), as incrustações na superfície da membrana, a depender de suas características físico-químicas, tendem a ser de origem orgânica.

Considerando que a ABS UV254 estima de maneira indireta o conteúdo de matéria orgânica natural (MON) na água, entende-se que a membrana também removeu a MON, o que explica a não redução da permeabilidade hidráulica ao longo do tempo nos experimentos, conforme observado na Figura 21, que apresenta o resultado do monitoramento de absorvância medida no comprimento de onda 254 nm (ABS UV254), realizado ao longo dos experimentos.

Os resultados de ABS UV254 medidos nas correntes de água bruta, permeado e concentrado apresentaram redução dos valores após os primeiros 200 min de filtração, mantendo valores constante até o fim da filtração. Tal redução inicial pode indicar adsorção da

MON na superfície da membrana conforme discutido por Nghiem *et al.* (2008); Comerton *et al.* (2009); Pereira (2015); Rodrigues (2018).

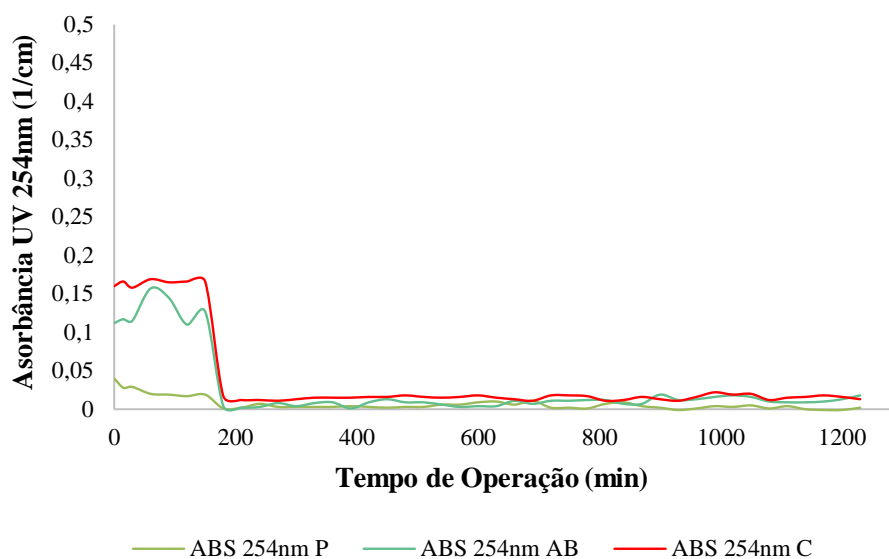


Figura 21. Resultados de Absorbância UV 254 nm na água bruta (AB), concentrado (C) e permeado (P) e rejeição da membrana monitorados ao longo do tempo de operação nos experimentos.

Nos experimentos finais de 50 horas seguidas, não foi possível continuar analisando o parâmetro de ABS UV250, devidos erros apresentados pelo equipamento, onde os resultados no permeado apresentaram valores negativos (abaixo do limite de detecção do equipamento).

Embora, não tenha sido possível realizar todas as análises do padrão ISO (Tabela 4), observa-se que para condutividade elétrica e ABS UV254 a água produzida neste trabalho se encaixa em graus diferentes. Com base nos valores medidos de absorbância a água em estudo enquadra-se em grau 2, já quanto aos resultados de condutividade ela não se encaixa em nenhum dos graus.

Quanto aos índices propostos pela CLSI para água reagentes utilizada em laboratório clínico (CLRW), os padrões de referência para resistividade deve ser maior ou igual a 10 Ω (ohms)/cm à 25°C, condutividade menor igual a 0,1 μ S/cm à 25°C, sílica de 0,0 mg/dL e ABS UV 254 de 0,0 l/cm. Sendo assim, a água produzida (permeado) não atende aos padrões CLSI para condutividade, mas quanto a ABS UV254 a membrana estudada apresentou valores em torno de 0,0 na corrente de permeado ao longo de todo de operação.

6 CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados observa-se que o sistema de pré-filtração e membrana de OI utilizado consegue entregar o permeado com qualidade constate mesmo após 50 horas de uso ininterruptos. Em termos de manutenção, os resultados de permeabilidade hidráulica corroboram que as limpezas químicas da membrana podem ser realizadas após pelo menos 70 horas de uso.

Embora a água produzida (permeado) não atenda aos padrões de água pura apresentados neste trabalho, a depender do uso laboratorial ela poderá ser ou não utilizada. Se o uso exigir uma baixa quantidade de íons, a água produzida já não atende, como o uso para cromatografia líquida de alto desempenho (HPLC) e a espectrometria de massa acoplada à cromatografia líquida (LC-MS), já que nestes ensaios a água tem que atender padrão de água ultrapura (grupo 1), tendo exigência que a água apresente baixos níveis de moléculas orgânicas e íons, que podem ser prejudiciais a coluna. Dessa forma, se fosse necessário obter um grau de pureza elevado o sistema OI estudado poderia ser complementado por outras tecnologias ou método de purificação, a fim de obter uma água de maior qualidade.

No entanto, a água produzida atingiu um grau de qualidade que pode ser utilizado em usos laboratoriais menos exigentes, como é o caso do laboratório de Saneamento e Meio Ambiente do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, onde os ensaios são simplificados, tais como a lavagem e o enxágue de vidrarias, preparação de reagentes e soluções, análises prioritárias de efluentes, onde os equipamentos utilizados não requerem alto grau de pureza, como *jar test*, digestor DQO, turbidímetro, condutivímetro, colorímetro, outros. Além disso, a membrana removeu MON com eficiência, podendo ser utilizada em situações em que estas substâncias são um problema.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando os resultados obtidos e as limitações experimentais enfrentadas nesta pesquisa, recomenda-se:

- Realizar experimentos em escala piloto de maior duração com uma matriz de alimentação com condutividade mais baixa no intuito de melhor avaliar o desenvolvimento dos depósitos orgânicos e desempenho operacional;
- A avaliação do desempenho das membranas em diferentes valores de pH, temperatura e outras condições operacionais;

- Realizar experimentos em escala piloto de longa duração com variação da MON no intuito de melhor avaliar o desenvolvimento dos depósitos orgânicos e desempenho operacional.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 22ª Edição, AWWA, E.U.A, 2012.

AQUINO, A. A. As Diferenças Entre Nanofiltração, Ultrafiltração, Microfiltração e Osmose Reversa. **Meio Filtrante**. São Paulo, 2011.

BAKER, R.W. **Membrane Technology and Applications**. 2nd edition. John Wiley & Sons Ltd. California.USA. 545 p, 2004.

BARBOSA, I. M. **Avaliação do uso de membranas de ultrafiltração modificadas com nanopartículas de argila para tratamento de esgotos**. 2017. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

BERGMAN, R. **Reverse osmosis and nanofiltration**: AWWA manual. American Water Works Association, E.U.A., 226p, 2007.

BRASIL. **Ministério da Saúde. Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA)**. Dispõe sobre regulamentação técnica para funcionamento de laboratórios clínicos. Resolução da Diretoria Colegiada, RDC no 302, 2005.

BREDA, E. M. **Água grau reagente para laboratório e outros fins especiais**. UNICAMP, Campinas, p. 31, 2001.

BUENO, M.Z. **Nanofiltração e Osmose Inversa Aplicadas à Remoção de Agrotóxicos (Carbamatos) em Águas de Abastecimento: Avaliação em Escala de Bancada**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Florianópolis, SC, 194p, 2013.

CHERYAN, M. (Ed.) **Ultrafiltration and microfiltration handbook**. Lancaster: Technomic Publ., 526 p, 1998.

CLSI, Clinical and Laboratory Standards Institute. **Preparation and testing of reagent water in the clinical laboratory**. Approved guide line. 4th ed. CLSI document C3-A4 [ISBN 1-56238-610-7], 2006.

COMERTON, A.M., ANDREWS, R.C., BAGLEY, D.M. — **The influence of natural organic matter and cations on the rejection of endocrine disrupting and pharmaceutically active compounds by nanofiltration**. Water research, 43, 613–622, 2009.

CRITTENDEN, J.C; TRUSSELL, R.R.; HAND, D.W.; HOWE, K.J.; TCHOBANOGLIOUS, G. **MWH's Water Treatment: Principles and Design**. John Wiley & Sons, 3 rd ed. USA, 1901 p., 2012.

CUPERUS, F.P.; NIJHUIS, H.H. Applications of membrane technology to food processing. **Trends in Food Science & Technology**, v. 7, p. 277-282, 1993.

DHAKAL, N., **Controlling biofouling in seawater reverse osmosis membrane systems**. Taylor and Francis group, 2017.

DURANCEAU, S.J., TAYLOR, J.S. “Membranes”. In: Edzwald, J.K. (ed) **Water Quality & Treatment: A Handbook on Drinking Water**. Mc Graw Hill, New York, EUA, 11.1-11.106, 2011.

ELGA LABWATER. **Pure Lab Water Guide**. Disponível em: <https://www.elgalabwater.com/pure-water-guide>. Acesso em: 21 Maio de 2021.

FARRUGIA, B. F. Membranas de filtração, tecnologia eficiente em aplicações diversas. **Meio Filtrante**. São Paulo, ano 12, n 64, 2013.

GARCÍA, C.B. **Comparación del comportamiento de membranas de OI y NF para la mejora de la calidad del agua de abasto municipal**. 2017.

GONGYI JIANG, HONGDI LI, MENG XU, HUIMIN RUAN. Sustainable reverse osmosis, electrodialysis and bipolar membrane electrodialysis application for cold-rolling wastewater treatment in the steel industry, **Journal of Water Process Engineering**, Volume 40, 2021.

HABERT, A.C; BORGES, C.P; NOBREGA, R. **Processo de separação com membranas**. Série Escola Piloto em Engenharia Química - COPPE/UFRJ. Ed. e-papers. RJ. 180 p, 2006.

HWANG, S.T.; KAMMERMEYER, K. Membranes in Separations. In: CHERYAN, M. (Ed.). **Ultrafiltration and microfiltration handbook**. Chicago: Technomic Publ., 526p, 1998.

KUCERA, J. **Reverse Osmosis: Design, Processes and Applications for Engineers**. Scrivener Publishing LLC. USA. 416 p. 2010.

LI, N.N.; FANE, A.G.; HO, W.S.W.; MATSUURA, T. **Advanced Membrane Technology and Applications**. John Wiley & Sons, Inc., Publication. USA. 2008. 989 p.

MENDES, M. E. et al . **A importância da qualidade da água reagente no laboratório clínico**. J. Bras. Patol. Med. Lab., Rio de Janeiro, v. 47, p. 217-223, 2011.

MESTRINHO, Suely Schuartz Pacheco. **Qualidade e classificação das águas subterrâneas**. In: GIAMPÁ, Carlos Eduardo Quaglia; GONÇALES, Valter Galdiano (Org.). **Águas subterrâneas e poços tubulares profundos**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013. Cap. 14. p. 18-496.

MIERZWA, J.C. **Processos de separação por membranas para tratamento de água**. In: Pádua, V.L. (coord) **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e 116 microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento de água para consumo humano**. ABES/RJ, Sermograf, Belo Horizonte, MG, 335-379, 2006.

NGHIEM, L.D., VOGEL, D., KHAN, S. Characterizing humic acid fouling of nanofiltration membranes using bisphenol A as a molecular indicator. **Water Research**, 42, 4049-4058, 2008.

PEREIRA, A.R. **Remoção de cilindrospermopsina por carvão ativado granular e nanofiltração no tratamento de água para consumo humano: estudo em escala de bancada**”. Trabalho de conclusão de curso, Universidade de Brasília Engenharia Ambiental, Brasília, DF, 92p. 2015.

PORTER, M.C. Ultrafiltration. In: PORTER, M.C. (Ed.) **Handbook of industrial membrane technology**. New Jersey: Noyes Publications, 1990.

RODRIGUES, A.M. **Avaliação em escala piloto do desempenho operacional e rejeição dos perturbadores endócrinos bisfenol-a e cilindrospermopsina por membranas de nanofiltração**. Dissertação (Mestrado) em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos. 2018. 143 p. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2018.

SCHLEICHER, A.T. **Remoção de estrona, estradiol, etinilestradiol e bisfenol-A por meio de nanofiltração aplicada ao tratamento avançado de águas para consumo humano**. Dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Publicação PTARH.DM-153/13, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 107p., 2013.

SCHNEIDER, R.P.; TSUTIYA, M.T. Membranas Filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso. 1ª Ed., **ABES**, São Paulo, 2001.

SCOTT, K. Handbook of Industrial Membrane. First Edition. UK. **Elsevier Advanced Technology**. 945 p, 1995.

SIMÕES, C. P.P. **Avaliação operacional e remoção de bisfenol-A no tratamento de água por diferentes tipos de membranas: avaliação em escala piloto**. Dissertação de mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2016.

SPELLMAN, F. R. **Reverse Osmosis: A guide for the nonengineering professional**. Taylor and Francis group, 2015.

STRATHMANN, H. Synthetic membrane sand their preparation. In: PORTER, M.C. (Ed.) **Handbook of industrial membrane technology**. New Jersey: Noyes Publications, 1990.

SUTHERLAND, J.; FREE, M.J. A method for monitoring leak age through membranes during ultrafiltration of milk. **Journal Dairy Technology**, Austr, v.46, p.40-42, 1991.

USEPA. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Membrane Filtration Guidance Manual**. USA. 332 p. 2005.

VALDIVIA, M. RODES YANET, PEDRO-VALDÉS, SANDRA, LAUREL-GÓMEZ, MAYLIN. **AGUA PARA USO EN LABORATORIOS**. Boletín Científico Técnico INIMET. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=223017807002>. Acesso em: 14 de junho de 2021.

VIEIRA L. 2005. RDC 302: 2005 – **Edição comentada: compreendendo o regulamento**. Labtest, Minas Gerais, p. 50.

VIGNESWARAN, S.; SATHANANTHAN, S.; SHON, H. K.; KANDASAMY, J.; VISVANATHAN, C. Delineation of Membrane Process. p 45-58. In: **Membrane technology and environmental applications**. American Society of Civil Engineers, 2012.

ZANINI, J.M. **Reaproveitamento de águas de lavagem das lavadoras de garrafas das indústrias de bebidas**. Engarrafador Moderno, Santo André, v.36, p.8-13, 1994.

ZHAO, YANGYING & KONG, FANXIN & WANG, ZHI & YANG, HONG-WEI & WANG, XIAO-MAO & XIE, YUEFENG & WAITE, T. Role of membrane and compound properties in affecting the rejection of pharmaceuticals by different RO/NF membranes, **Frontiers of Environmental Science & Engineering**, 2017.

ANEXO A

Tabela A.1 – Dados operacionais da membrana ULP1812-50.

Tempo de operação total (min acumulados)	Pressão Manômetro-1 (bar)	Pressão Manômetro-2 (bar)	Vazão Água Bruta (L/min)	Vazão Concentrado (L/min)	Vazão Permeado (L/min)	fluxo de permeado P (L/h.m ²)	fluxo específico P (L/h.m ² .bar)	Recuperação (%)
0	6,2	6,8	0,59	0,38	0,21	42,28	6,22	35,59
15	6,4	7,1	0,588	0,374	0,214	43,09	6,07	36,39
30	6,4	7,1	0,612	0,396	0,216	43,49	6,13	35,29
60	6,3	7	0,62	0,4	0,22	44,30	6,33	35,48
90	6,3	7	0,612	0,396	0,216	43,49	6,21	35,29
120	6,3	7	0,62	0,41	0,21	42,28	6,04	33,87
150	6,3	7	0,612	0,4	0,212	42,68	6,10	34,64
180	6,3	7	0,628	0,4	0,228	45,91	6,56	36,31
210	6,3	7	0,61	0,392	0,218	43,89	6,27	35,74
240	6,3	7	0,628	0,41	0,218	43,89	6,27	34,71
270	6,3	7	0,612	0,396	0,216	43,49	6,21	35,29
300	6,3	7	0,618	0,4	0,218	43,89	6,27	35,28
330	6,3	7	0,616	0,396	0,22	44,30	6,33	35,71
360	6,3	7	0,626	0,394	0,232	46,71	6,67	37,06
390	6,3	7	0,632	0,41	0,222	44,70	6,39	35,13
420	6,3	7	0,62	0,4	0,22	44,30	6,33	35,48
450	6,3	7	0,62	0,402	0,218	43,89	6,27	35,16
480	6,3	7	0,624	0,4	0,224	45,10	6,44	35,90
510	6,3	7	0,62	0,398	0,222	44,70	6,39	35,81
540	6,3	7	0,644	0,392	0,252	50,74	7,25	39,13
570	6,3	7	0,622	0,4	0,222	44,70	6,39	35,69

600	6,3	7	0,63	0,396	0,234	47,11	6,73	37,14
630	6,3	7	0,634	0,4	0,234	47,11	6,73	36,91
660	6,3	7	0,648	0,398	0,25	50,34	7,19	38,58
690	6,3	7	0,626	0,396	0,232	46,71	6,67	37,06
720	6,3	7	0,632	0,4	0,232	46,71	6,67	36,71
750	6,3	7	0,626	0,398	0,228	45,91	6,56	36,42
780	6,3	7	0,63	0,4	0,23	46,31	6,62	36,51
810	6,3	7	0,624	0,398	0,226	45,50	6,50	36,22
840	6,3	7	0,622	0,398	0,228	45,91	6,56	36,66
870	6,3	7	0,622	0,4	0,222	44,70	6,39	35,69
900	6,3	7	0,64	0,398	0,242	48,72	6,96	37,81
930	6,3	7	0,628	0,4	0,228	45,91	6,56	36,31
960	6,3	7	0,624	0,398	0,226	45,50	6,50	36,22
990	6,3	7	0,624	0,398	0,226	45,50	6,50	36,22
1020	6,3	7	0,622	0,398	0,224	45,10	6,44	36,01
1050	6,3	7	0,628	0,4	0,228	45,91	6,56	36,31
1080	6,3	7	0,646	0,392	0,254	51,14	7,31	39,32
1110	6,3	7	0,634	0,4	0,234	47,11	6,73	36,91
1140	6,3	7	0,63	0,4	0,23	46,31	6,62	36,51
1170	6,3	7	0,628	0,396	0,232	46,71	6,67	36,94
1200	6,3	7	0,624	0,394	0,23	46,31	6,62	36,86
1230	6,3	7	0,63	0,4	0,23	46,31	6,62	36,51
1230	6	6,6	0,64	0,39	0,25	50,34	7,63	39,06
1260	6,2	6,7	0,642	0,392	0,25	50,34	7,51	38,94
1320	6,2	6,7	0,642	0,39	0,252	50,74	7,57	39,25
1380	6,2	6,7	0,642	0,392	0,25	50,34	7,51	38,94
1620	6,3	6,9	0,636	0,392	0,244	49,13	7,12	38,36
2190	6,4	6,9	0,626	0,398	0,228	45,91	6,65	36,42
2430	6,3	6,7	0,614	0,384	0,23	46,31	6,91	37,46

2640	6,1	6,6	0,622	0,382	0,24	48,32	7,32	38,59
2790	6,3	6,7	0,632	0,388	0,244	49,13	7,33	38,61
2940	6,3	6,7	0,628	0,394	0,234	47,11	7,03	37,26
3090	6,3	6,6	0,632	0,392	0,24	48,32	7,32	37,97
3870	6,3	6,7	0,628	0,396	0,232	46,71	6,97	36,94
4110	6,3	6,7	0,63	0,386	0,244	49,13	7,33	38,73
4230	6,3	6,7	0,638	0,39	0,248	49,93	7,45	38,87

Tabela A.2 – Dados de qualidade da água utilizando a membrana ULP1812-50.

Tempo de operação total (min acumulados)	Temp. AB (°C)	Temp. C (°C)	Temp. P (°C)	Cond. AB (µS/cm)	Cond. C (µS/cm)	Cond. P (µS/cm)	pH - AB	pH - C	pH- P	ABS 254nm - AB	ABS 254nm- C	ABS 254nm- P	STD AB (mg/L)	STD C (mg/L)	STD P (mg/L)
0	24,4	23,6	23,5	325	499	9,62	7,5	7,49	5,66	0,112	0,16	0,04	208	319,36	6,1568
15	24	24,1	24,4	404,4	408,1	8,54	7,41	7,5	5,72	0,117	0,166	0,028	258,816	261,184	5,4656
30	23,5	22,8	23,5	385,2	599,6	9,77	7,15	7,26	5,34	0,115	0,158	0,029	246,528	383,744	6,2528
60	23,8	24,7	24,9	338,9	538,3	12,42	7,3	7,46	5,7	0,157	0,169	0,02	216,896	344,512	7,9488
90	24,7	25,6	24,5	437,5	516,3	8,96	7,4	7,53	5,63	0,145	0,165	0,019	280	330,432	5,7344
120	25,1	24,2	24,4	417,7	510,5	9,63	7,43	7,45	5,69	0,11	0,166	0,017	267,328	326,72	6,1632
150	24,1	24,3	24,8	413,2	559,7	14,17	7,17	7,4	5,7	0,127	0,166	0,019	264,448	358,208	9,0688
180	25	25	25,3	293,2	450,1	12,56	6,33	6,03	7,63	0,004	0,017	0,001	187,648	288,064	8,0384
210	24,6	24,6	24,2	297	444,7	8,93	6,21	6,26	7,03	0,002	0,012	0,002	190,08	284,608	5,7152
240	24,4	24,8	25,1	297,4	450	13,11	6,37	6,43	7,23	0,003	0,012	0,007	190,336	288	8,3904
270	24,2	24,5	24,4	284	454,7	10,16	6,45	6,46	7,32	0,008	0,011	0,003	181,76	291,008	6,5024
300	24,2	24,4	24,2	295,6	449,4	11,57	6,48	6,48	7,43	0,004	0,013	0,003	189,184	287,616	7,4048
330	24,6	24,5	25,5	289	431	10,69	6,42	6,46	7,42	0,008	0,015	0,003	184,96	275,84	6,8416
360	26,9	26,5	27,1	295	455,4	11,59	7,5	6,68	7,51	0,009	0,015	0,003	188,8	291,456	7,4176
390	25,3	25,2	26,8	291,6	551,5	10,01	6,6	6,59	7,56	0,001	0,015	0,004	186,624	352,96	6,4064
420	24,2	24,6	24,4	292	454,7	9,96	6,84	6,73	7,76	0,009	0,016	0,003	186,88	291,008	6,3744
450	25,2	24,8	25,5	291,1	449,5	12,12	6,73	6,75	7,53	0,013	0,016	0,002	186,304	287,68	7,7568
480	24,4	24,2	26,3	301,6	463,8	11,82	6,75	6,74	7,51	0,009	0,018	0,003	193,024	296,832	7,5648
510	24,5	24,7	25,8	294	461,4	11,11	6,79	6,67	7,5	0,009	0,016	0,003	188,16	295,296	7,1104
540	30,1	30,6	30,6	299	472,4	15,79	7,31	7,1	5,55	0,006	0,015	0,006	191,36	302,336	10,1056
570	27	27,2	27,1	292	443	10,3	7,47	7,47	5,97	0,003	0,016	0,006	186,88	283,52	6,592
600	27,5	27,9	27,5	296,5	478,8	9,87	7,51	7,54	6,05	0,004	0,018	0,009	189,76	306,432	6,3168
630	27,1	26,8	27,5	296,8	465,6	9,92	7,49	7,55	6,12	0,004	0,015	0,01	189,952	297,984	6,3488
660	27,3	27,1	27,5	313,5	460,9	11,1	7,34	7,53	6,33	0,011	0,013	0,006	200,64	294,976	7,104
690	26,6	26,7	26,8	312,3	460,9	12,13	7,35	7,57	6,4	0,007	0,011	0,011	199,872	294,976	7,7632

720	27,9	28,4	28,1	295,2	466,9	11,83	7,4	7,45	7,3	0,011	0,018	0,002	188,928	298,816	7,5712
750	17,4	27,8	27,6	288,1	448,9	9,38	7,61	7,62	6,85	0,011	0,018	0,002	184,384	287,296	6,0032
780	27,7	27,8	27,3	293,5	450	9,01	7,46	7,67	7,2	0,012	0,017	0,001	187,84	288	5,7664
810	27,7	27,7	27,9	288,7	445,6	10,09	7,67	7,75	6,74	0,012	0,011	0,007	184,768	285,184	6,4576
840	27,9	27,9	26,9	293,1	437,7	9,33	7,61	7,69	6,84	0,007	0,012	0,009	187,584	280,128	5,9712
870	28,1	27,9	27,8	292,4	441,6	9,14	7,56	7,6	7,24	0,007	0,016	0,004	187,136	282,624	5,8496
900	28,8	29,5	30,9	286,3	478,8	13,32	7,75	7,55	6,48	0,019	0,013	0,002	183,232	306,432	8,5248
930	26,6	27	25,09	297,2	445,9	9,8	7,54	7,64	6,63	0,012	0,011	-0,001	190,208	285,376	6,272
960	25,9	26,2	25,7	295,4	460,9	9,89	7,45	7,63	6,54	0,013	0,016	0,001	189,056	294,976	6,3296
990	24,4	25,6	24,7	295,5	463,4	9,89	7,39	7,6	6,42	0,016	0,022	0,004	189,12	296,576	6,3296
1020	27	27,2	27,3	294,7	439,6	10,29	7,44	7,56	6,56	0,018	0,019	0,003	188,608	281,344	6,5856
1050	27,1	27,1	27,3	294,3	451,8	9,83	7,47	7,59	6,9	0,016	0,02	0,005	188,352	289,152	6,2912
1080	30,1	31,8	33,6	281,4	476,3	16,67	7,46	7,41	6,04	0,01	0,012	0,001	180,096	304,832	10,6688
1110	28,6	28,6	28,5	295,4	452,1	10,82	7,5	7,54	6,49	0,009	0,015	0,004	189,056	289,344	6,9248
1140	28,5	28,6	28,4	293,4	450,9	10,17	7,46	7,52	6,49	0,009	0,016	0	187,776	288,576	6,5088
1170	28,4	28,5	28,5	280,4	445,4	9,85	7,45	7,53	6,45	0,01	0,018	-0,001	179,456	285,056	6,304
1200	28,3	28,3	28,3	294,3	431,7	10,12	7,41	7,52	6,41	0,013	0,016	-0,001	188,352	276,288	6,4768
1230	28,1	28,4	28,3	291,8	459,9	9,72	7,41	7,53	6,36	0,018	0,013	0,002	186,752	294,336	6,2208
1230	27,5	29	28,4	327,8	516,3	31,27	7,55	7,62	6,03				209,792	330,432	20,0128
1260	27,3	28,3	28,2	323,7	500,9	13,87	7,52	7,68	6,02				207,168	320,576	8,8768
1320	26,2	28,8	27,7	323	508,4	11,56	7,57	7,75	6,02				206,72	325,376	7,3984
1380	25,4	27,4	28,2	323,4	509	15,84	7,56	7,76	6,03				206,976	325,76	10,1376
1620	29,3	29,7	29,8	307,3	491,4	16,87	7,6	7,77	6,16				196,672	314,496	10,7968
2190	27,3	27,8	27,8	301,6	476,2	28,81	7,68	7,8	6,21				193,024	304,768	18,4384
2430	28,7	28,9	29	297,9	443,4	14,13	6,68	7,82	6,37				190,656	283,776	9,0432
2640	30,2	30,3	30,5	307,1	487,7	21,87	7,63	7,81	6,39				196,544	312,128	13,9968
2790	28,3	27,9	28,9	318	486,8	13,03	7,68	7,87	6,42				203,52	311,552	8,3392
2940	27,1	27,7	27,9	320,9	484,2	11,52	7,67	7,8	6,44				205,376	309,888	7,3728
3090	29,4	29,8	29,5	306,2	477,6	12,25	7,62	7,81	6,5				195,968	305,664	7,84

3870	28,7	29	29,2	304,8	472,2	13,92	7,64	7,81	6,53	195,072	302,208	8,9088
4110	30,5	30,4	30,5	305,7	474,6	13,02	7,69	7,84	6,6	195,648	303,744	8,3328
4230	30,7	30,8	30,9	308,7	471,1	13,7	7,69	7,82	6,42	197,568	301,504	8,768

Tabela A.3 – Dados de permeabilidade obtidos antes do início do experimento de 20,5 horas acumuladas.

Pressão AB M1 (bar)	Pressão AB M2 (bar)	Vazão Permeado (L/min)	Vazão Água Bruta (L/min)	Vazão Concentrado (L/min)	Fluxo de P (L/(h*m ²))
2	2,2	0,06	0,246	1,86	12,08
3	3,2	0,102	0,342	2,4	20,54
4	4,2	0,124	0,414	2,9	24,97
5	5,4	0,17	0,518	3,48	34,23
5,6	6	0,188	0,552	3,64	37,85

Tabela A.4 – Dados de permeabilidade obtidos após o fim do experimento de 20,5 horas acumuladas.

Pressão AB M1 (bar)	Pressão AB M2 (bar)	Vazão Permeado (L/min)	Vazão Água Bruta (L/min)	Vazão Concentrado (L/min)	Fluxo de P (L/(h*m ²))
2	1,6	0,046	0,213	1,67	9,26
3	2,8	0,114	0,36	2,46	22,95
4	4,4	0,176	0,496	3,2	35,44
5	5,5	0,22	0,58	3,6	44,30
5,4	5,9	0,218	0,586	3,68	43,89

Tabela A.5 –Dados de permeabilidade obtidos antes do início do experimento de 50 horas ininterruptas.

Pressão AB M1 (bar)	Pressão AB M2 (bar)	Vazão Permeado (L/min)	Vazão Água Bruta (L/min)	Vazão Concentrado (L/min)	Fluxo de P (L/(h*m²))
2	1,6	0,066	0,236	1,7	13,29
3	2,8	0,088	0,316	2,28	17,72
4	3,6	0,134	0,414	2,8	26,98
5	4,8	0,21	0,56	3,5	42,28
6	6,5	0,25	0,64	3,9	50,34

Tabela A.6 –Dados de permeabilidade obtidos após o fim do experimento de 50 horas ininterruptas.

Pressão AB M1 (bar)	Pressão AB M2 (bar)	Vazão Permeado (L/min)	Vazão Água Bruta (L/min)	Vazão Concentrado (L/min)	Fluxo de P (L/(h*m²))
2	2,2	0,088	0,288	2	17,72
3	3,3	0,136	0,404	2,68	27,38
4	4,4	0,18	0,49	3,1	36,24
5	5,6	0,236	0,592	3,56	47,52
6	6,5	0,26	0,65	3,9	52,35