

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA - UDESC
CENTRO DE EDUCAÇÃO SUPERIOR DO ALTO VALE DO ITAJAÍ - CEAVI
ENGENHARIA SANITÁRIA

MARCIO JUNIOR DE OLIVEIRA

**TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO POR BIORREATOR À MEMBRANA SEGUIDO
DE NANOFILTRAÇÃO/OSMOSE INVERSA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO**

IBIRAMA

2018

MARCIO JUNIOR DE OLIVEIRA

**TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO POR BIORREATOR À MEMBRANA SEGUIDO
DE NANOFILTRAÇÃO/OSMOSE INVERSA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Sanitária do Centro de Educação Superior do Alto Vale do Itajaí (CEAVI), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Sanitária

Orientador: Dr. Tiago José Belli

**IBIRAMA
2018**

MARCIO JUNIOR DE OLIVEIRA

**TRATAMENTO DE ESGOTO SANITÁRIO POR BIORREATOR À MEMBRANA SEGUIDO
DE NANOFILTRAÇÃO/OSMOSE INVERSA PARA PRODUÇÃO DE ÁGUA DE REÚSO**

Trabalho de conclusão apresentado ao curso de Engenharia Sanitária do Centro de Educação Superior do Alto Vale do Itajaí (CEAVI), da Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC), como requisito parcial para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Sanitária.

Banca Examinadora:

Orientador: _____
Dr. Tiago José Belli
CEAVI/UDESC

Membro 1: _____
Emerson de Souza
PPGEA/UFSC

Membro 2: _____
Tiago Rogério Vitor Akaboci
CEAVI/UDESC

IBIRAMA, 29/11/2018

Dedico à minha amada avó Maria Luiza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por tudo que tem feito em minha vida, por sempre me nortear para as melhores direções.

Agradeço aos meus pais, Marcio e Vera por me darem condições e apoio durante a vida inteira.

Agradeço minha avó Maria Luiza por ter-me dado apoio.

Agradeço a minha Família.

Agradeço ao meu orientador Tiago José Belli, pela oportunidade oferecida, pela orientação neste trabalho e pelos ensinamentos repassados durante a graduação.

Agradeço a Franciele dos Santos, quem elaborou o trabalho com as membranas de nanofiltração e osmose inversa.

Agradeço ao Laboratório de Reúso das Águas, do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC, onde foram desenvolvidos os trabalhos anteriores.

Agradeço ao meu amigo Guilherme pela amizade, pelos incontáveis almoços, e pelas inúmeras revisões de textos e ajudas com este trabalho, além das infinitas mensagens de humor.

Agradeço a minha amiga Patrícia pela leitura e considerações deste trabalho e por fazer parte da minha formação e quem pretendo manter presente em minha vida.

Agradeço a minha amiga Dayane com quem tive a honra de trabalhar, estudar e morar durante ao longo destes 6 anos de faculdade, agradeço a tudo que ela fez por mim dentro e fora da universidade, serei eternamente grato.

Agradeço a minha amiga Agatha que me mostrou que amizades podem nascer a partir dos mais simples gestos, com quem tive a enorme satisfação de conviver e dividir momentos fantásticos que me lembrarei para todo o sempre.

Agradeço a minhas amigas Fernanda, Gabriela e Rebeca pelo companheirismo dentro e fora de sala de aula.

Agradeço a todos os professores que repassaram seus conhecimentos e contribuíram para minha formação.

Agradeço aos amigos que a UDESC me deu.

Agradeço a UDESC pela bolsa de intercambio, e a Universidade do Porto pela hospitalidade e ensinamento repassados.

Agradeço aos amigos que ganhei com o intercâmbio, em especial a Andrea, Salomé e Edouard.

Agradeço as minhas amigas de anos Thalita, Daiana, Pâmela e Paula, que sempre me apoiaram e mantiveram a amizade mesmo com a distância.

Agradeço a Prefeitura de São Miguel do Oeste pela oportunidade do estágio, em especial a Camilla, Nubia, Thalita e Vanessa.

Obrigado a todos envolvidos direta ou indiretamente na minha formação e na elaboração deste trabalho.

“A água de boa qualidade é como a saúde ou a liberdade: só tem valor quando acaba.”

(Guimarães Rosa)

RESUMO

A oferta de água é essencial para a sobrevivência humana e para o desenvolvimento agrícola e industrial, assim como para a manutenção dos ecossistemas. Com o rápido crescimento populacional e desenvolvimento de grandes centros urbanos, muitas regiões enfrentam situações de escassez, onde a demanda é maior do que a oferta de recursos hídricos, seja em termos de quantidade ou qualidade. Associado a isto temos o problema da falta de tratamento de águas residuárias, que em sua grande maioria são lançadas nos corpos hídricos sem tratamento prévio, prejudicando a qualidade das águas. Diante do exposto, o tratamento das águas residuárias torna-se importante, visto que promove a preservação da qualidade ambiental, assim como torna possível o uso de fontes alternativas de abastecimento de água. Quando o objetivo do tratamento de águas residuárias é a produção de água para reúso, tem-se empregado os processos de separação por membranas. Nestes processos as membranas de nanofiltração (NF) e de osmose inversa (OI) ganham destaque, uma vez que a sua associação a outras tecnologias de tratamento é capaz de produzir água com qualidade suficiente para diversos usos, tal como agrícola, industrial, entre outros. Desta maneira o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho do tratamento de esgoto sanitário utilizando biorreator à membrana (BRM) seguido de nanofiltração/osmose inversa com vista à produção de água para reúso. O presente estudo é baseado em dados experimentais obtidos em pesquisas anteriores (Belli, 2015 e Santos, 2016), ambos desenvolvidos junto ao Laboratório de Reúso das Águas, do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Os resultados indicaram que o pós-tratamento com NF e OI para o permeado do BRM foi capaz de remover satisfatoriamente cor, nitrito, nitrato, fosfato e carbono orgânico dissolvido, com remoção média acima de 96,9%, 64,5%, 53,6%, 94,7% e 77,4%, respectivamente. Além de remover coliformes totais e termotolerantes. Os parâmetros turbidez, nitrogênio amoniacal e demanda química de oxigênio foram removidos pelo tratamento no BRM, antes do pós-tratamento, alcançando eficiências de remoção média de 99,8%, 98,1% e 97,5%, respectivamente. Em relação aos possíveis reúsos do permeado produzido na NF e OI, pode-se dizer que há grande potencial, tanto na aplicação para fins industriais quanto agrícola, ou até mesmo para fins mais nobres como, por exemplo, reúso potável. Tendo em vista os resultados obtidos nesse trabalho, conclui-se que a aplicação de processos de NF e OI como pós-tratamento de esgoto sanitário apresentam benefícios do ponto de vista técnico, ambiental e social.

Palavras-chave: Água de reúso. Biorreator à Membrana. Nanofiltração. Osmose Inversa.

ABSTRACT

The supply of water is essential for human survival and for agricultural and industrial development, as well as for the maintenance of ecosystems. Due to rapid population growth and development of large urban centers, many regions face situations of scarcity where demand is greater than the supply of water, either in terms of quantity or quality. Moreover, there is a lack of treatment of wastewater, that in the great majority is sent in the water bodies without previous treatment, damaging the quality of the waters. In view of the above, the treatment of wastewater becomes important, since it promotes the preservation of environmental quality, as well as makes possible the use of alternative sources of water. When the purpose of wastewater treatment is the production of water for reuse, the processes of separation by membranes have been employed. In these processes the nanofiltration (NF) and reverse osmosis (RO) membranes stand out, since the association of these processes with other treatment technologies is capable of producing water with sufficient quality for a variety of uses, such as agricultural, industrial, among others . In this way, the present work has as objective to evaluate the performance of sanitary sewage treatment using membrane bioreactor (MBR) followed by nanofiltration / reverse osmosis to produce water for reuse. The present study is based on experimental data obtained in previous researches, the doctoral thesis of Belli (2015) and the work of Santos (2016), both developed in the Laboratory of Reuse of Waters, Department of Sanitary Engineering and Environmental Department of the Federal University of Santa Catarina (UFSC). The results indicated that the post-treatment with NF and OI for the BRM permeate was able to satisfactorily remove color, nitrite, nitrate, phosphate and dissolved organic carbon, with a mean removal above 96.9%, 64.5%, 6%, 94.7% and 77.4%, respectively. In addition to removing total and thermotolerant coliforms. The parameters turbidity, ammoniacal nitrogen and chemical oxygen demand were removed by treatment at MBR, before post treatment, reaching average removal efficiencies of 99.8%, 98.1% and 97.5%, respectively. In relation to the possible rejections of the permeate produced in the NF and OI, it can be said that there is great potential, both in the application for industrial purposes and agricultural, or even for more noble purposes such as reuse for drinking. Considering the results obtained in this study, it is concluded that the application of NF and OI processes as post-treatment of sanitary sewage presents benefits from a technical, environmental and social point of view.

Keywords: Membrane bioreactor. Nanofiltration. Reusing water. Reverse Osmosis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Faixa de porosidade de membranas de MF, UF, NF e OI e dimensão de diferentes espécies.....	32
Figura 2 - Esquema da morfologia da seção transversal de diferentes membranas.	35
Figura 3 - Configurações de biorreatores à membrana.	40
Figura 4 - Representação da unidade experimental.....	47
Figura 5 - Unidade experimental BRM.	48
Figura 6 - Imagem frontal e lateral da unidade experimental.....	49
Figura 7 - Unidade Experimental de NF/OI.	51
Figura 8 - Valores médios da concentração de COD antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.....	55
Figura 9 - Valores médios da concentração da demanda química de oxigênio, do esgoto e do permeado do BRM.	57
Figura 10 - Valores médios da concentração de nitrogênio amoniacal do esgoto e do permeado do BRM.	58
Figura 11 - Valores médios da concentração de nitrito antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.....	59
Figura 12 - Valores médios da concentração de nitrato antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.....	60
Figura 13 - Valores médios da concentração de fosfato antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.....	61
Figura 14 - Valores médios de cor antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.	63
Figura 15 - Valores médios de turbidez antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.	64
Figura 16 - Valores médios da alcalinidade antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.....	67
Figura 17 - Valores médios do pH antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.	68

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Processos de separação por membranas e suas especificações.	33
Quadro 2 - Materiais de membranas poliméricas disponíveis comercialmente.	34
Quadro 3 - Características do PSM: nanofiltração.	37
Quadro 4 - Características do PSM: osmose inversa.	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre a Osmose Inversa e Nanofiltração com relação ao material retido pela membrana.....	36
Tabela 2 - Eficiências de remoção dos processos de tratamento.....	40
Tabela 3 - Parâmetros de qualidade da água de reúso.....	44
Tabela 4 - Parâmetros de qualidade para diferentes classes de usos.....	45
Tabela 5 - Características do módulo de membranas do BRM.....	50
Tabela 6 - Características do esgoto sanitário (valores médios e desvio padrão).....	51
Tabela 7 - Características da membrana de NF.....	52
Tabela 8 - Parâmetros de operação dos ensaios de NF.....	52
Tabela 9 - Características da membrana de OI.....	53
Tabela 10 - Parâmetros de operação dos ensaios de OI.....	53
Tabela 11 - Parâmetros analisados.....	54
Tabela 12 - Valores médios dos resultados microbiológicos do BRM e dos ensaios de NF e OI.....	65
Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos com a legislação de potabilidade das águas.....	69
Tabela 14 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os parâmetros da NBR 13.969/1977 para Classe 1.....	70
Tabela 15 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os parâmetros de qualidade do Manual de Conservação e Reúso em Edificações (ANA, 2005) para águas de reúso Classe 1.....	71
Tabela 16 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os parâmetros de qualidade de águas aplicadas para irrigação.....	73
Tabela 17 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os requisitos de qualidade das águas para processos industriais (EPA, 1992).....	75
Tabela 18 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os padrões internacionais.....	76

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AC	Acetato de Celulose
ANA	Agência Nacional de Águas
BRM	Biorreator à membranas
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
Conama	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio (DQO)
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
MCRE	Manual de Conservação e Reúso em Edificações
MF	Microfiltração
MS	Ministério da Saúde
NBR	Norma Brasileira
NF	Nanofiltração
NA	Não Analisado
ND	Não Detectado
NMP	Número Mais Provável
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
OD	Oxigênio Dissolvido
OI	Osmose Inversa
OMS	Organização Mundial da Saúde
PA	Poliamida Aromática
PAN	Poliacrilonitrilo
PEI	Polieterimida
PES	Polietersulfona
PM	Peso Molecular
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PP	Polipropileno
PSM	Processos de Separação por Membranas
PSU	Polisulfona
PTFE	Politetrafluoroetano

PVDF	Fluoreto de polivinilideno
SINGREH	Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos
SNIS	Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento
SST	Sólidos em Suspensão Totais
TDH	Tempo de Detenção Hidráulica
UF	Ultrafiltração
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
>	Maior que
nm	Nanômetro
Δ	Delta
Da	Dalton
μm	Micrômetro
m^2	Metro quadrado
m^3	Metro cubico
mg	Miligrama
L	Litro
\approx	Aproximadamente
<	Menor que
cm	Centímetro
mm	Milímetro
\pm	Desvio padrão
®	Marca registrada
°C	Grau Celsius
\leq	Menor ou igual a

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 OBJETIVO GERAL.....	29
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	31
2.1 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS.....	31
2.1.1 Classificações	33
2.1.1.1 <i>Composição</i>	33
2.1.1.2 <i>Morfologia</i>	35
2.1.2 Nanofiltração e Osmose Inversa	36
2.1.2.1 <i>Nanofiltração</i>	36
2.1.2.2 <i>Osmose Inversa</i>	38
2.2 BIORREATOR À MEMBRANAS	39
2.3 REÚSO DO EFLUENTE TRATADO	41
2.3.1 Aplicações	42
2.3.2 Legislação	43
3 METODOLOGIA	47
3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL DO BIORREATOR À MEMBRANA	48
3.2 UNIDADE EXPERIMENTAL DE NANOFILTRAÇÃO E OSMOSE INVERSA PARA PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE BIORREATOR À MEMBRANA.....	51
3.2.1 Ensaio de Nanofiltração	52
3.2.2 Ensaio de Osmose Inversa	53
3.2.3 Parâmetros Analisados	54
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1 QUALIDADE DO PERMEADO PRODUZIDO PELO SISTEMA BRM-NF/OI.....	55
4.1.1 Matéria orgânica	55
4.1.1.1 <i>Carbono Orgânico Dissolvido</i>	55
4.1.1.2 <i>Demanda Química de Oxigênio</i>	57
4.1.2 Nitrogênio	58
4.1.2.1 <i>Nitrogênio Amoniacal</i>	58
4.1.2.2 <i>Nitrito e Nitrato</i>	59

4.1.3 Fósforo	61
<i>4.1.3.1 Fosfato.....</i>	<i>61</i>
4.1.4 Paramentros Físicos	63
<i>4.1.4.1 Cor.....</i>	<i>63</i>
<i>4.1.4.2 Turbidez.....</i>	<i>64</i>
4.1.5 Indicadores Microrbiológicos.....	65
4.1.6 Alcalinidade e pH	67
4.2 POSSIBILIDADES DE REÚSO DO PERMEADO DO BRM, NF E OI.....	69
4.2.1 Reúso potável	69
4.2.2 Reúso não potável urbano.....	70
4.2.3 Reúso agrícola	72
4.2.4 Reúso industrial	73
4.2.5 Padrões internacionais de qualidade de água de reúso.....	76
5 CONCLUSÕES.....	77
REFERÊNCIAS	79

1 INTRODUÇÃO

Como resultado do crescimento populacional e urbanização associado a maiores demandas de água para os setores industriais e agrícolas, o suprimento público de água em algumas regiões está se tornando escasso. De acordo com o Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos, estima-se que até o ano de 2050 metade da população mundial poderá estar vivendo em áreas com potencial de escassez severa de água (UN WATER, 2018).

Além do problema da falta de recursos hídricos, a deterioração da qualidade dos corpos d'água vem crescendo e, com isso, há diminuição das fontes de água próprias para satisfazer as necessidades humanas, industriais e agrícolas. Conforme dados do Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento (SNIS) divulgados pelo Instituto Trata Brasil (2018), em 2016 apenas 44,92% dos esgotos no país eram tratados, ou seja, um déficit de 55,08%. Isto significa que mais da metade do esgoto produzido em território nacional é lançado sem tratamento nos corpos hídricos.

Diante deste cenário, caracterizado pela redução dos quantitativos de recursos hídricos e falta de tratamento dos efluentes domésticos e industriais, faz-se necessário pensar em tecnologias capazes de tratar os efluentes oriundos das atividades humanas com a finalidade de reciclar a água e permitir seu reúso.

O propósito de gerenciar recursos hídricos em áreas com escassez de água é alcançar um equilíbrio entre oferta e demanda deste recurso. Para atingir o equilíbrio mencionado é importante que a qualidade das águas seja abordada como prioridade, tendo em vista que a qualidade é um fator crítico para definição do seu uso potencial. Como princípio básico, a qualidade das águas deve ser mantida de forma a suprir no mínimo as necessidades humanas (SALGOT; FOLCH, 2018).

Com os avanços feitos na tecnologia das membranas no tratamento de águas residuárias, tem-se mostrado viável substituir as etapas de separação física (decantadores) do tratamento de águas residuais convencionais por processos de separação por membrana (BOURGEOUS; DARBY; TCHOBANOGLOUS, 2001). Os biorreatores à membrana (BRM) são uma evolução do tratamento convencional e são caracterizados pela combinação da tecnologia de lodos ativados com os processos de separação por membranas (PSM). Um BRM pode substituir dois processos de separação física, filtrando a biomassa através de uma membrana. Como resultado,

a qualidade do efluente final é significativamente maior do que a gerada pelo tratamento convencional (JUDD, 2008).

No tratamento de águas residuárias os principais processos de membranas empregados são: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI). As principais diferenças entre os processos estão relacionadas à pressão exercida sobre a membrana e ao tamanho dos poros da membrana (HILAL et al., 2004).

Embora a tecnologia dos BRM possa fornecer um efluente de alta qualidade, nem sempre é possível usar essa água diretamente como fonte alternativa para aplicação na agricultura ou indústria. Portanto, dependendo do caso, há a necessidade de um tratamento adicional para se atingir os parâmetros de qualidade que são exigidos para o reúso de águas tratadas (SERT et al., 2016). Nesse sentido, os processos de NF e OI mostram-se promissores quando o objetivo do tratamento é a produção de água para reúso, em virtude de que estes processos são capazes de remover satisfatoriamente salinidade, dureza, nitratos, cor e compostos orgânicos, além da eliminação de bactérias e vírus (YOON; LUEPTOW, 2005).

O uso planejado das águas residuais tratadas, ainda que parcialmente, pode oferecer benefícios ao meio ambiente. A utilização de água de reúso promove a redução das extrações de água potável, a reciclagem e o reúso de nutrientes, garantindo a manutenção de ambientes aquáticos por meio da redução da poluição das águas e recarga dos aquíferos (UN WATTER, 2017). Nesta perspectiva, a reutilização de águas residuais tratadas é vista como um importante elemento para satisfazer a crescente demanda de recursos hídricos, contribuindo ainda para a preservação do meio ambiente e diminuindo a poluição ambiental (SALIBA et al., 2018). Devido à alta qualidade do efluente final no tratamento de águas residuárias quando utilizada a combinação das tecnologias dos BRM com NF/OI tem-se estudado o reúso do efluente produzido por esta configuração de tratamento (FARIAS; HOWE; THOMSON, 2014; FALIZI et al., 2018; GÜNDOĞDU et al., 2018). Desta maneira, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o desempenho do tratamento de esgoto sanitário utilizando biorreator a membrana seguido de nanofiltração/osmose inversa com vista à produção de água para reúso.

1.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho do tratamento de esgoto sanitário utilizando biorreator a membrana seguido de nanofiltração/osmose inversa com vista à produção de água para reúso.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar separadamente a remoção dos poluentes oriundos do esgoto sanitário em cada etapa do tratamento (BRM; NF; OI)
- Enquadrar o permeado produzido pelo sistema de tratamento BRM-NF/OI em diferentes categorias de reúso.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

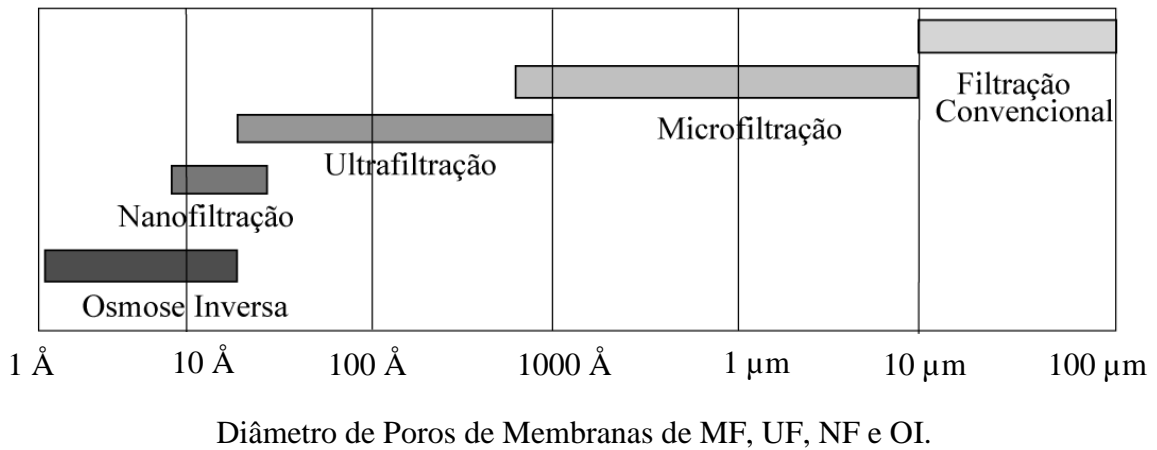
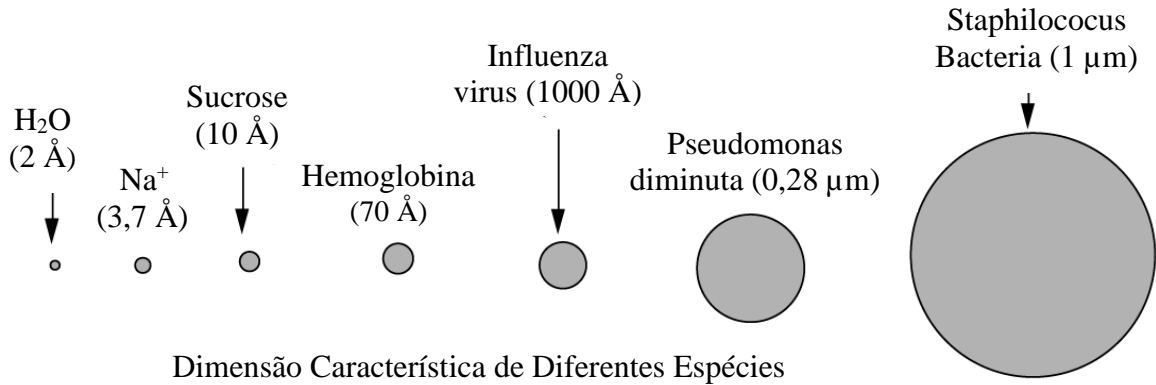
Os processos de separação por membranas (PSM) começaram a ser desenvolvidos a partir de 1960, quando o uso de membranas para tratamento de água e efluentes se difundiu, nas suas variações conhecidas como microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e osmose inversa (DEZOTTI; SANT'ANNA JR.; BASSIN, 2011). A combinação de membranas com biorreatores se tornou uma opção muito atrativa ao tratamento de esgoto, devido a suas vantagens em comparação aos tratamentos convencionais (ASLAM et al., 2017).

De acordo com Judd (2011) quando uma membrana é aplicada ao tratamento de água ou de efluentes, é inserido de um material filtrante que permite que alguns componentes físicos ou químicos passem mais facilmente através dele do que outros. Assim o principal objetivo do PMS é impedir que algumas substâncias permeiem a membrana, enquanto outras, em função de seu tamanho menor, são capazes de atravessa-la livremente produzindo o permeado.

O nível de seletividade da membrana depende do tamanho do poro. As membranas mais grossas, associadas à microfiltração (MF), podem rejeitar o material particulado. Já as membranas mais seletivas, associadas à osmose inversa (OI), podem rejeitar íons de carga simples (monovalentes), tais como sódio (Na^+) e cloreto (Cl^-), sendo que o diâmetro hidráulico destes íons é inferior a 1 nm (JUDD, 2011).

A Figura 1 apresenta faixas de porosidade para os diferentes PSM, e exemplifica os tipos de solutos retidos em cada classe de membrana.

Figura 1 - Faixa de porosidade de membranas de MF, UF, NF e OI e dimensão de diferentes espécies.



Fonte: Habert, Borges e Nobrega, 2006.

A classificação dos PSM está relacionada ao tamanho das espécies a serem separadas, aos mecanismos de rejeição ou de reflexão, às forças motrizes do processo, à estrutura química, à composição das membranas e à geometria de construção (GONÇALVES, 2003).

Os quatro principais processos de separação por membrana, são: microfiltração (MF), ultrafiltração (UF), nanofiltração (NF) e osmose inversa (OI). O Quadro 1 apresenta as especificações destes processos.

Quadro 1 - Processos de separação por membranas e suas especificações.

Processo	Força Motriz (atm)	Material Retido	Material que Permeia	Aplicações
Microfiltração (MF)	ΔP (0,5 – 2)	Material em suspensão, bactérias. Massa molar > 500 kDa (0,01 μ m).	Água e sólidos dissolvidos.	Esterilização bacteriana; clarificação vinhos e cervejas; concentração de células; oxigenação de sangue.
Ultrafiltração (UF)	ΔP (1-7)	Coloides macromoléculas PM > 5000	Água (solvente) Sais solúveis de baixo PM	Fracionamento e concentração de proteínas; Recuperação de pigmentos Recuperação de óleos.
Nanofiltração (NF)	ΔP (5-25)	Moléculas de peso molecular médio 500 < PM < 2000	Água, sais e moléculas de baixo PM	Purificação de enzimas; Biorreatores a membrana.
Osmose Inversa (OI)	ΔP (15-80)	Todo material solúvel ou em suspensão	Água (solvente)	Dessalinização de água; Concentração de suco de frutas; Desmineralização de águas.

Fonte: Adaptado de Habert, Borges e Nobrega, 2006.

Percebe-se que a aplicação dos PSM é variada, podem ser empregadas no setor alimentício ou até mesmo no tratamento de efluentes, indicando uma versatilidade de aplicação dos processos com membranas.

2.1.1 Classificações

De acordo com Santos (2015), as membranas podem ser classificadas de acordo com a configuração na qual é aplicada, a sua composição, forma e estrutura.

2.1.1.1 Composição

As membranas podem ser constituídas principalmente por dois tipos diferentes de materiais, sendo estes polímeros orgânicos ou cerâmicos. Existem também filtros de membrana metálica, mas estes têm aplicações muito específicas que não estão relacionadas à tecnologia BRM. (JUDD, 2011). De acordo com Scheneider e Tsutiya (2001), as membranas cerâmicas

são pouco empregadas no tratamento de efluentes devido ao elevado custo de aplicação em relação às membranas poliméricas.

O Quadro 2 apresenta as principais composições de diferentes materiais das membranas disponíveis comercialmente, assim como as vantagens e desvantagens e suas aplicações nos PSM.

Quadro 2 - Materiais de membranas poliméricas disponíveis comercialmente.

Membrana	Vantagens	Desvantagens	Aplicação
Acetato de celulose (AC)^a	Resistente ao cloro; Barato; Mais incrustante resistente que PA	Suscetível a pH > 6; Estabilidade térmica e química limitada; Menor permeabilidade.	UF, NF e OI
Poliamida Aromática (PA)	Mais estabilidade geral do que a AC; Mais seletiva do que AC.	Tolerância de cloro muito limitada (<0,1 mg.l ⁻¹)	NF e OI
Poliacrilonitrilo (PAN)	Alta resistência à hidrólise; Alta resistência à oxidação.	Hidrofóbico; Requer copolímeros para se tornar menos frágil.	UF e OI
Polisulfona (PSU) e Polietersulfona (PES)	Muito boa estabilidade geral; Mecanicamente forte.	Hidrofóbica	UF e OI
Fluoreto de polivinilideno (PVDF) e Politetrafluoroetano (PTFE)	Estabilidade química extremamente alta; Alta estabilidade térmica.	Altamente hidrofóbico; Estabilidade mecânica limitada; Permeabilidade intrínseca limitada; Custo elevado.	MF e UF
Polieterimida (PEI)	Alta estabilidade química; Estabilidade térmica muito alta; Mecanicamente forte.	Hidrofóbica; Menos resistente a solventes do que PVDF; Estabilidade alcalina menor do que PSU ou PAN	UF e OI
Polipropileno (PP)	Baixo Custo.	Hidrofóbica.	MF e UF

Fonte: Adaptado de Judd; Jefferson, 2003.

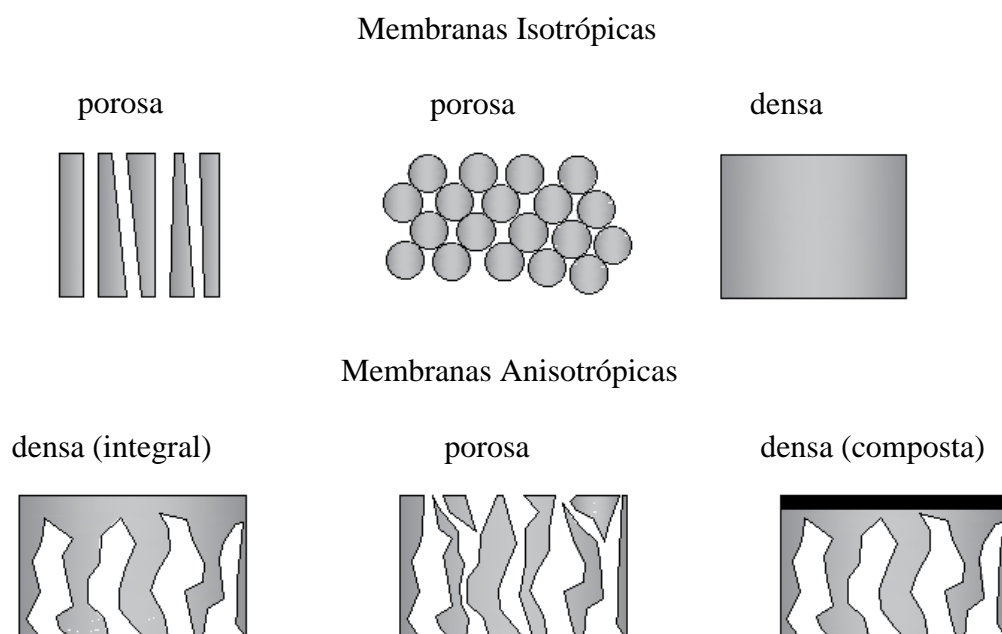
a – Siglas do nome em inglês.

Nota-se que a escolha do material das membranas está relacionada com a sua aplicação para os diferentes PSM, sendo que cada tipo de membrana apresenta vantagens e desvantagens relacionadas aos parâmetros de operação, resistência e custos.

2.1.1.2 Morfologia

A morfologia da membrana é dependente do material e/ou da maneira como ele é processado (JUDD; JEFFERSON, 2003). Para Habert, Borges e Nobrega (2006), as membranas apresentam diferentes morfologias que dependem da aplicação a que se destinam. Usualmente, as membranas podem ser classificadas em duas grandes categorias: densas e porosas. A Figura 2 exemplifica os tipos morfologia das membranas.

Figura 2 - Esquema da morfologia da seção transversal de diferentes membranas.



Fonte: Adaptado de Habert, Borges e Nobrega, 2006.

Tanto as membranas densas como as porosas podem ser isotrópicas ou anisotrópicas, ou seja, podem ou não apresentar as mesmas características morfológicas ao longo de sua espessura (HABERT, BORGES E NOBREGA, 2006).

As membranas anisotrópicas se diferenciam das isotrópicas, pois possuem uma região superior muito fina (aproximadamente 1 μm), mais fechada (com ou sem poros), chamada de pele, suportada em uma estrutura porosa. Quando ambas as regiões são constituídas por um único material a membrana é do tipo anisotrópica integral, caso contrário, é do tipo anisotrópica composta (HABERT, BORGES E NOBREGA, 2006).

2.1.2 Nanofiltração e Osmose Inversa

De acordo com Kosutic, Dolar e Kunst (2006), a osmose inversa (OI) e a nanofiltração (NF) têm sido utilizadas na produção de água potável há quase 30 anos, e são cada vez mais aplicadas em tratamentos de água e esgoto, particularmente onde a alta qualidade do efluente tratado é desejada. As membranas OI são usadas principalmente para remover sais de água salobra ou salgada e as membranas de NF são geralmente usadas para remover precursores de subprodutos de desinfecção, como matéria orgânica (PARSONS; JEFFERSON, 2003). Osmose inversa e nanofiltração têm sido amplamente utilizadas para remoção de compostos orgânicos em água e esgoto (YANG et al., 2017). Na Tabela 1 é apresentada a comparação entre, OI e NF em termos de porcentagem de retenção de solutos.

Tabela 1 - Comparação entre a Osmose Inversa e Nanofiltração com relação ao material retido pela membrana.

Soluto	OI	NF
Íons Monovalentes (Na⁺, K⁺, Cl⁻, NO³⁻)	>98%	>50%
Íons Bivalentes (Ca²⁺, Mg²⁺, SO₄²⁻, CO₃²⁻)	>99%	>90%
Bactéria e Vírus	>99%	>99%
Microsolutos (PM >100)	>90%	>50%
Microsolutos (PM <100)	0-99%	0-50%

Fonte: Mulder, 1996 apud Santos, 2016.

A partir dos dados apresentados na Tabela 1 fica evidente que a OI apresenta maior seletividade, uma vez que a porcentagem de retenção de solutos é maior que a apresentada na NF. Sendo assim, nos casos em que é desejável maior seletividade recomenda-se a aplicação do PSM de OI.

2.1.2.1 Nanofiltração

A nanofiltração (NF), um processo de membrana operada por pressão, tem o tamanho de poro entre a UF e a OI (AHMAD et al., 2004). Comparado com a OI, a NF opera não apenas sob pressões operacionais mais baixas, maiores fluxos de água e menor investimento, mas

também com altas taxas de rejeição de íons bivalentes, especialmente ânions (LU; BIAN; SHI, 2002).

A NF, é um processo com membranas capaz de reter moléculas de massa molar média de 500 a 2.000 Dalton, posicionando-se entre o limite superior da ultrafiltração e o limite inferior da osmose inversa (HABERT, BORGES E NOBREGA, 2006). Por ser um processo intermediário, entre a UF e a OI, pode-se dizer que a NF utiliza uma membrana “fechada” de UF ou uma membrana “aberta” de OI. O Quadro 3 apresenta as principais características da nanofiltração.

Quadro 3 - Características do PSM: nanofiltração.

Características do Processo de Nanofiltração	
Membrana:	Composta
Espessura:	Subcamada $\approx 150\mu\text{m}$; Primeira camada $\approx 1\mu\text{m}$
Tamanho do Poro:	$< 2\text{nm}$
Material da Membrana:	Poliamida (polimerização interfacial)
Mecanismo de Separação:	Difusão- Solução
Força Motriz:	Pressão (10-25bar)
Aplicações:	Dessalinização de Águas salobras; Remoção de Micropoluentes; Tratamento de Águas Residuais; e Retenção de Corantes (Indústrias Têxteis)

Fonte: Mulder,1996 apud Santos 2015.

Pode-se dizer então, de uma forma geral, que as membranas de NF são “mais abertas” e, portanto, com baixa rejeição a sais, mas com fluxo permeado elevado. Dessa forma, a NF pode ser operada em pressões mais baixas e vem sendo empregada num número crescente de aplicações (HABERT, BORGES E NOBREGA, 2006).

Mohammad et al. (2015) relatam em sua pesquisa diferentes aplicações da NF: tratamento de águas subterrâneas e superficiais contaminadas, indústria farmacêutica e biotecnologia, indústria de laticínios, indústria de alimentos, tratamento de efluentes domésticos e industriais e na dessalinização.

2.1.2.2 Osmose Inversa

Processos de membrana do tipo osmose inversa (OI) têm sido amplamente adotados para tratamento e reutilização de água (JOO; TANSEL, 2015). Para Habert, Borges e Nobrega (2006), a OI é um processo de separação com membranas usado quando se deseja reter solutos de baixa massa molar, tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose. As membranas utilizadas na OI devem ter uma seletividade maior, ou seja, devem ter os poros menores (mais fechados), apresentando uma maior resistência à permeação e, conseqüentemente, pressões de operação mais elevadas do que as utilizadas em UF.

O fluxo do permeado é no sentido inverso do fluxo osmótico normal, por esse motivo o processo se chama osmose inversa (HABERT, BORGES E NOBREGA, 2006). Na osmose inversa é exercida uma pressão no compartimento que contém a linha de alimentação, maior que a pressão osmótica, fazendo com que os sólidos dissolvidos sejam retidos e a água permeie a membrana (KUCERA, 2010). Considerando a resistência adicional da membrana, as pressões aplicadas necessárias para obter osmose inversa são consideravelmente mais altas que a pressão osmótica. O Quadro 4 apresenta as características principais da osmose inversa.

Quadro 4 - Características do PSM: osmose inversa.

Características do Processo de Osmose Inversa	
Membrana:	Assimétrica ou composta
Espessura:	Subcamada $\approx 150\mu\text{m}$; Primeira camada $\approx 1\mu\text{m}$
Tamanho do Poro:	$< 2\text{nm}$
Material da Membrana:	Poliamida (polimerização interfacial), Acetato de celulose, Poliamida Aromática.
Mecanismo de Separação:	Difusão- Solução
Força Motriz:	Pressão: Águas salobras (10-25bar) Água do mar (40- 80bar)
Aplicações:	Dessalinização de água salobra e água do mar; Produção de água ultrapura (indústria eletrônica); Concentração de suco de alimentos e açúcares (indústria alimentar).

Fonte: Mulder, 1996 apud Santos 2016.

Porter (1988), lista uma ampla variedade de aplicações para as quais o processo de osmose inversa pode ser empregado: tratamento de água potável, fornecer água utilizável onde não há disponibilidade, dessalinização, indústria alimentícia, galvanoplastia, indústria

farmacêutica, produção de água ultrapura, para fabricação de eletrônicos, recuperar águas residuais municipais (esgoto) e industriais e separação ou concentração de materiais valiosos.

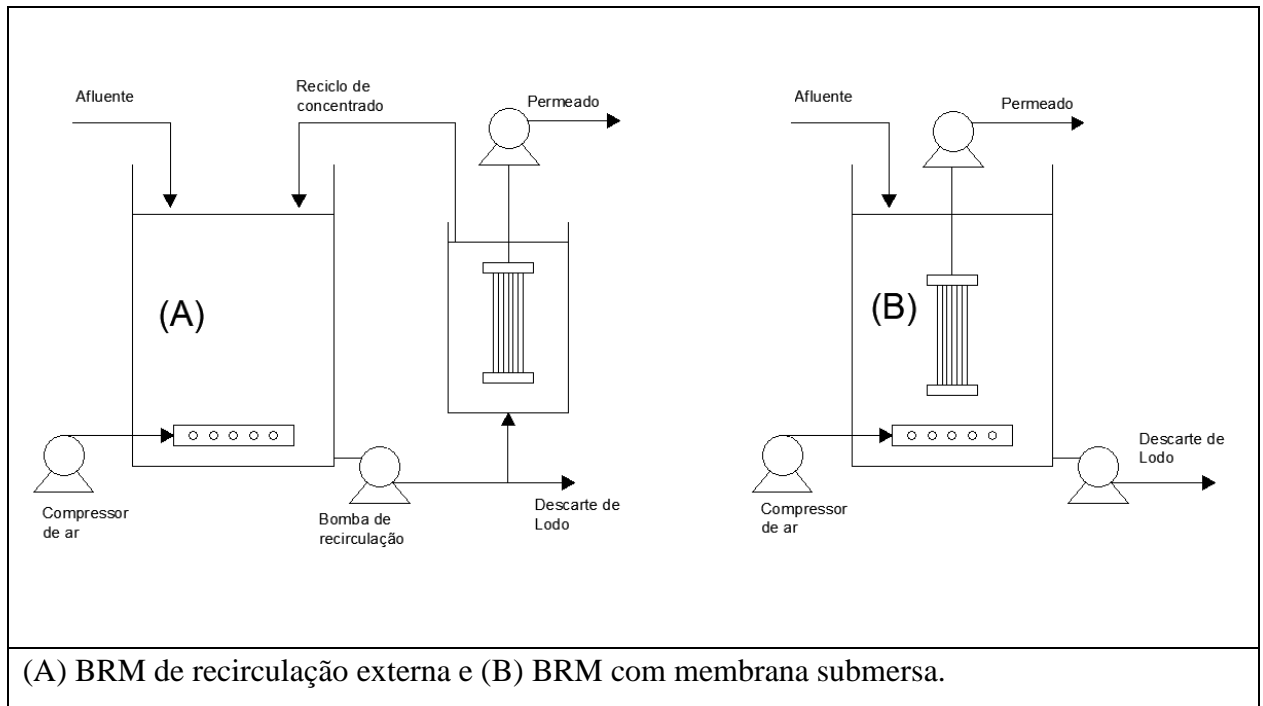
2.2 BIORREATOR À MEMBRANAS

De acordo com Judd (2016), o biorreator à membrana (BRM) é uma combinação do tratamento biológico, na grande maioria aeróbio, com a filtração por membranas, sendo capaz de produzir efluentes clarificados. Esta tecnologia está cada vez mais sendo aplicada ao tratamento de efluentes onde é exigido uma alta qualidade do efluente final, possibilitando o seu reúso.

A funcionalidade de um BRM está baseada na degradação biológica e na retenção de sólidos pelas membranas. Quando comparado aos outros sistemas de tratamento de efluentes, os BRM são capazes de se adaptar melhor às variações de cargas de matéria orgânica, devido a seletividade das membranas. Porém problemas relacionados a incrustação das membranas e a baixa carga de lodo formado dificultam sua utilização. Sendo assim, é necessário a escolha de processos de pré-tratamento e pós-tratamento, para garantir a eficiência do sistema (XIAO et al., 2014).

Os BRM podem ser configurados de duas maneiras, com as membranas instaladas fora do biorreator (BRM com recirculação externa), ou dentro do biorreator (BRM de membrana submersa) (JUDD, 2016). A Figura 3 exemplifica as possíveis configurações dos BRM.

Figura 3 - Configurações de biorreatores à membrana.



Fonte: Adaptado de Judd, 2011 e Belli, 2015.

O BRM é conhecido por apresentar algumas vantagens se comparado à outras tecnologias de tratamento de efluentes, são elas: melhor qualidade do efluente tratado, menor de área requerida (devido a dispensa de decantadores), flexibilidade de operação, taxa de produção de lodo baixa e desinfecção (VISVANATHAN; BEN AIM; PARAMESHWARAN, 2000; JUDD, 2016; OH; LEE, 2018).

Na Tabela 2 é apresentado um comparativo entre as tecnologias de tratamento de efluentes considerando as eficiências de remoção de: sólidos suspensos totais (SST), carbono orgânico dissolvido (COD) e turbidez.

Tabela 2 - Eficiências de remoção dos processos de tratamento.

	Eficiência de remoção (%)		
	SST	COD	Turbidez
Lodos Ativados	85	88,57	95,83
Processos Físicos – Químicos	70	81,43	83,33
BRM	100	97,14	>98,33

Fonte: Adaptado de Wisniewski, 2007.

Como é mostrado na Tabela 2, o desempenho do BRM se destaca sobre os demais, visto que a remoção dos parâmetros apresentados é superior à das tecnologias de tratamento convencionais.

2.3 REÚSO DO EFLUENTE TRATADO

O reúso pode ser entendido como, o aproveitamento da água após seu uso, uma ou mais vezes, depois desta ter sido empregada em alguma atividade humana (SANTOS; MANCUSO, 2003). Telles; Costa; Nuvolari (2010), afirmam que o reúso é a utilização do efluente após seu tratamento, com ou sem investimentos adicionais, e dependendo da utilização, técnicas específicas de purificação devem ser aplicadas.

A Organização Mundial da Saúde (WHO, 1973), em seu relatório sobre reúso de efluentes, apresentou três diferentes classificações acerca do reúso, são elas:

- Reúso indireto: ocorre quando a água já utilizada, mais de uma vez para fins doméstico ou industrial, é descarregada em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos e utilizada novamente a jusante, em sua forma diluída;
- Reúso direto: uso planejado e deliberado de águas residuais tratadas para algumas aplicações benéficas como irrigação, a recreação, uso industrial, recarga de aquíferos e o consumo de água potável;
- Reciclagem interna: reutilização de água dentro de plantas industriais para fins de conservação e controle da poluição.

Além dessas classificações, Telles; Costa; Nuvolari (2010) citam o reúso potável e não potável como forma de classificação. Sendo que o reúso potável é aquele em que se emprega o efluente tratado para o consumo humano após seu tratamento e o reúso não potável é aquele em que se emprega o efluente tratado para outros fins.

A prática da recuperação e reutilização (reúso) da água oriunda do tratamento de efluente é um elemento muito importante para se buscar o manejo sustentável dos recursos hídricos. Com o reúso de efluentes tratados que atendam aos parâmetros de qualidade é possível suprir a necessidade de diferentes setores como: agrícola, industrial, abastecimento público, entre outros (ROCCARO; VERLICCHI, 2018).

2.3.1 Aplicações

As possibilidades e formas potenciais de aplicação de água de reúso dependem, evidentemente, de características, condições e fatores locais, como também dos parâmetros de qualidade da água de reúso (HESPANOL, MIERZWA E PIRES, 2001).

- Reúso urbano para fins não potáveis: por oferecerem menor risco à saúde pública, este deve ser visto como uma das primeiras opções de reúso em espaços urbanos. Apesar disso, devem ser tomados cuidados para evitar o contato direto da população com a água de reúso para fins não potáveis. São exemplos de aplicação de água de reúso para fins não potáveis em ambientes urbanos: irrigação de parques e jardins públicos, centros esportivos, gramados, árvores e arbustos decorativos ao longo de avenidas e rodovias, reserva de proteção contra incêndios, controle de poeira, sistemas decorativos aquáticos, descarga sanitária em banheiros públicos, em edifícios comerciais e industriais, e lavagem de trens e ônibus públicos.
- Reúso para fins industriais: devido ao alto custo associado ao consumo de água em plantas industriais tem-se empregado o reúso em empresas como forma de reduzir despesas. As principais aplicações neste setor são: água para torres de resfriamento, caldeiras; água para construção civil, incluindo preparação e cura de concreto; água para compactação do solo; e água para lavagem de pisos e alguns tipos de peças, principalmente na indústria mecânica e processos industriais.
- Recarga de aquíferos: quando a água de reúso é aplicada à recarga de aquíferos o efluente tratado é disposto de forma controlada no solo para manutenção do nível de aquíferos. Esta técnica permite que o efluente seja infiltrado e percolado, sendo naturalmente biodegradado e filtrado pelo solo, proporcionando um tratamento adicional in situ para o efluente. Os objetivos desta prática são voltados à: proporcionar tratamento adicional de efluentes; aumentar a disponibilidade de água em aquíferos potáveis ou não potáveis; proporcionar reservatórios de água para uso futuro; prevenir subsidência do solo; e prevenir a intrusão de cunha salina em aquíferos costeiros.
- Usos agrícolas: devido ao fato de que a agricultura é um dos setores que mais consome água (chegando a até 80%, em alguns países) deve-se dar especial atenção ao reúso para fins agrícolas. Esta prática já vem sendo desenvolvida durante as duas últimas décadas, sendo que a aplicação de água de reúso na irrigação de culturas cresceu expressivamente devido aos seguintes fatores: falta de fontes alternativas de água para irrigação; custo

elevado de fertilizantes; segurança de que os riscos de saúde pública e impactos sobre o solo são mínimos desde que as precauções adequadas são efetivamente tomadas; custos elevados do tratamento de água necessário para descarga de efluentes em corpos receptores; aceitação sociocultural da prática do reúso agrícola; e reconhecimento pelos órgãos gestores de recursos hídricos do valor intrínseco da prática.

2.3.2 Legislação

Rodrigues (2005) afirma que a situação acerca da legislação do reúso de efluentes no Brasil ainda é escassa. Cunha et al. (2012) listam alguns efeitos negativos da inexistência de uma legislação que regulamente o reúso de efluentes, são eles: alto risco de contaminação do meio ambiente (caso a água não tenha sido tratada corretamente); práticas inadequadas (carência de informação dos usuários); risco à saúde pública; dificuldade de autorização dos órgãos ambientais.

Santos e Mancuso (2003) citam como principal marco legal relacionado à gestão das águas no Brasil a Lei nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SINGREH).

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 54, de 2005 define modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática de reúso direto não potável de água. A Norma NBR 13.969/1997, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), considera o aproveitamento de efluentes tratados como uma opção de destinação final. Esta norma cria classes de água de reúso, são elas:

- classe 1: lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes;
- classe 2: lavagem de pisos, calçadas e irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais para fins paisagísticos, exceto chafarizes;
- classe 3: reúso nas descargas de vasos sanitários;
- classe 4: reúso em pomares, cereais, forragens, pastagens para gados e outros cultivos através de escoamento superficial ou por sistema de irrigação pontual.

Esta Norma Técnica ainda estabelece parâmetros de qualidade para as diferentes classes, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de qualidade da água de reúso.

Classe	Parâmetro				
	Turbidez	Coliformes fecais (NMP ^a /100mL)	Sólidos dissolvidos totais (mg/L)	pH	Cloro residual (mg/L)
1	< 5	< 200	< 200	6-8	0,5-1,5
2	< 5	< 500	-	-	>0,5
3	< 10	< 500	-	-	-
4^b	-	< 5000	-	-	-

Fonte: Adaptado de ABNT, 1997. a – Número mais provável. b – Esta classe ainda conta com o parâmetro de oxigênio dissolvido (OD) que deve ser maior que 2 mg/L.

A água de reúso pode ser classificada conforme o Manual de Conservação e Reúso em Edificações de 2005. O manual classifica e dispõe sobre os padrões de qualidade da água para reúso, além de reunir as principais informações e orientações existentes pertinentes ao assunto, objetivando soluções de novas edificações ou na modernização das já existentes em questões de fonte de recursos hídricos (ANA, 2005). A classificação quanto ao reúso apresentada no manual é:

- classe 1: descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos, lavagem de roupas, lavagem de veículos e reúso para fins ornamentais (chafarizes, espelhos de água etc.);
- classe 2: os usos nessa classe são associados às fases de construção de edificações tal como lavagem de agregados, preparação de concreto, compactação do solo e controle de poeira;
- classe 3: o uso principal das águas dessa classe é na irrigação de áreas verdes e rega de jardins;
- classe 4: o principal uso das águas desta classe é o resfriamento de equipamentos de ar condicionado (torres de resfriamento).

Na Tabela 4 são apresentados os principais parâmetros de qualidade recomendados pelo Manual de Conservação e Reúso em Edificações.

Tabela 4 - Parâmetros de qualidade para diferentes classes de usos.

Classe	Parâmetro				
	Turbidez (NTU)	Coliformes fecais (NMP ^a /100mL)	Sólidos suspensos totais (mg/L)	pH	DBO (mg/L)
1	≤ 2	Não detectável	≤ 5	6-9	≤ 10
2	-	≤ 1000	30	6-9	≤ 30
3	< 5	≤ 200	< 20	6-9	< 20
4^b	-	2,2	100	6,8 – 7,2	75 ^c

Fonte: Adaptado de ANA, 2005. a – Número mais provável. b – Recomendação para torres de resfriamento com recirculação. c – Em termos de DQO.

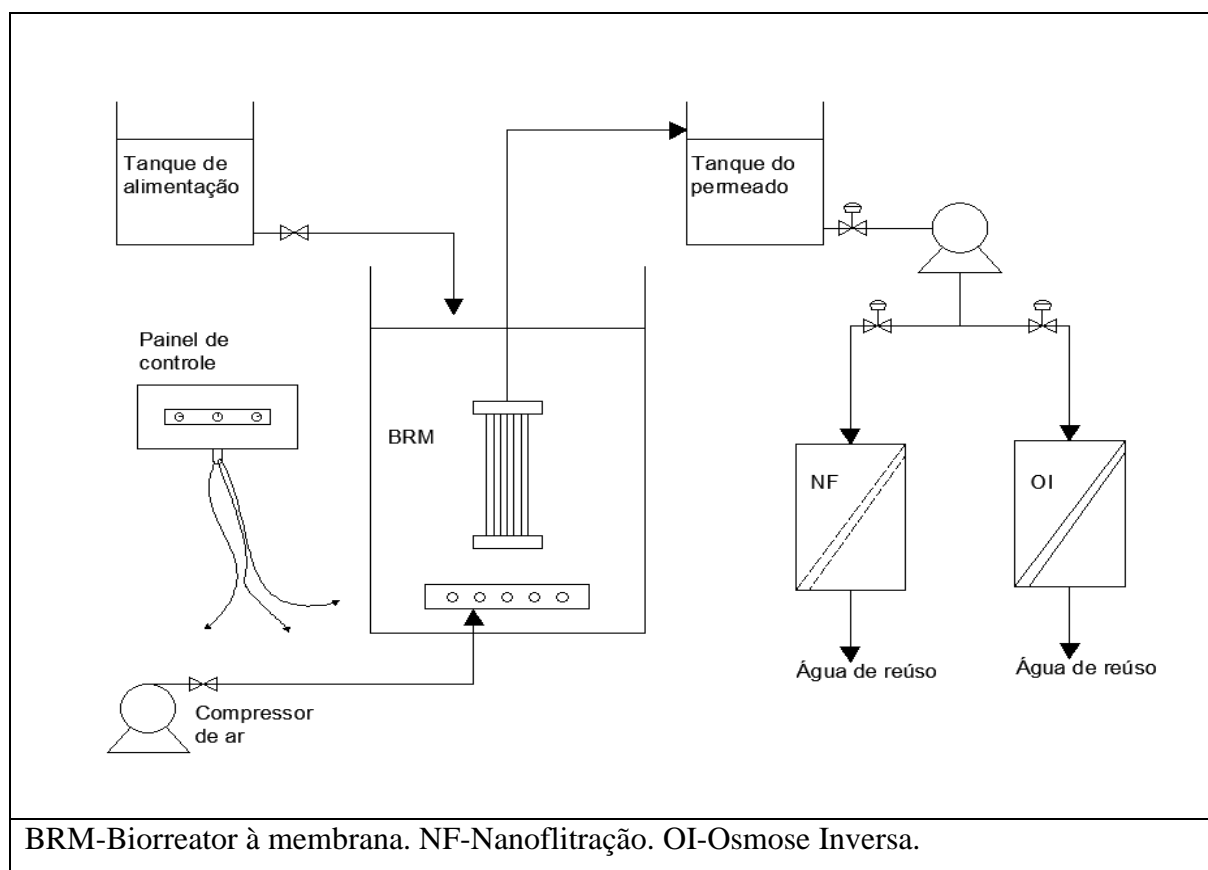
Sendo assim, existem duas referências que podem ser utilizadas para o controle da qualidade das águas de reúso no âmbito nacional, a NBR 13.969/1997, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e o Manual de Conservação e Reúso em Edificações de 2005. As aplicações para a água de reúso apresentadas nas duas referências divergem entre si em alguns aspectos. Nota-se diferenças nas aplicações para cada tipo de classe, assim como para alguns parâmetros, tal como cloro residual.

3 METODOLOGIA

O presente estudo é baseado em dados experimentais obtidos em pesquisas anteriores: Belli (2015) e Santos (2016), ambos desenvolvidos junto ao Laboratório de Reúso das Águas, do departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

A proposta deste trabalho é avaliar a junção da tecnologia de tratamento de efluente biorreator à membrana com as tecnologias de pós-tratamento nanofiltração e osmose inversa. Na Figura 4 é apresentada a uma representação da unidade experimental.

Figura 4 - Representação da unidade experimental.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

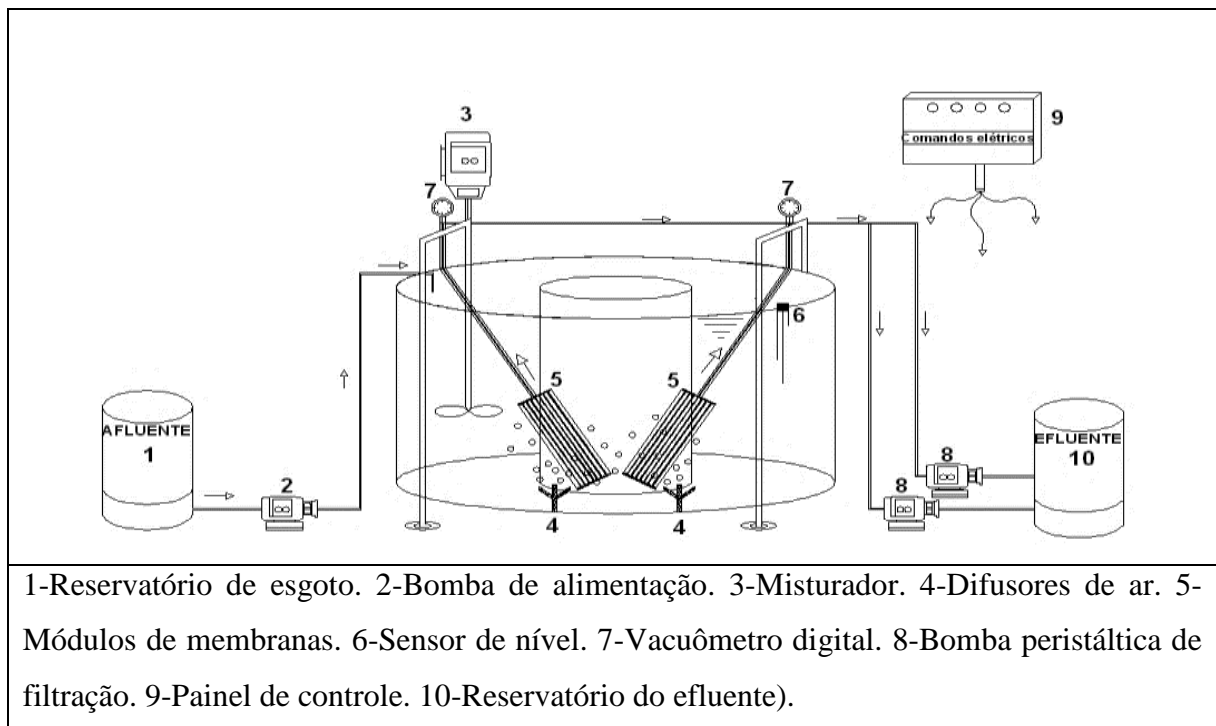
O sistema de tratamento de esgoto era composto pelo Biorreator à membrana seguido de pós-tratamento do permeado por nanofiltração e osmose inversa. O desempenho do BRM foi avaliado por meio do monitoramento da qualidade do afluente e do efluente (esgoto bruto e permeados do BRM, NF e OI) assim como proposto nos trabalhos de Andrade et. al. 2015; Falizi et al., 2018; Gündoğdu et al., 2018. Os parâmetros de avaliação foram: cor, turbidez,

nitrito, nitrato, fosfato, carbono orgânico dissolvido, alcalinidade, pH, indicadores microbiológicos (coliformes fecais e coliformes termotolerantes), demanda química de oxigênio e nitrogênio amoniacal.

3.1 UNIDADE EXPERIMENTAL DO BIORREATOR À MEMBRANA

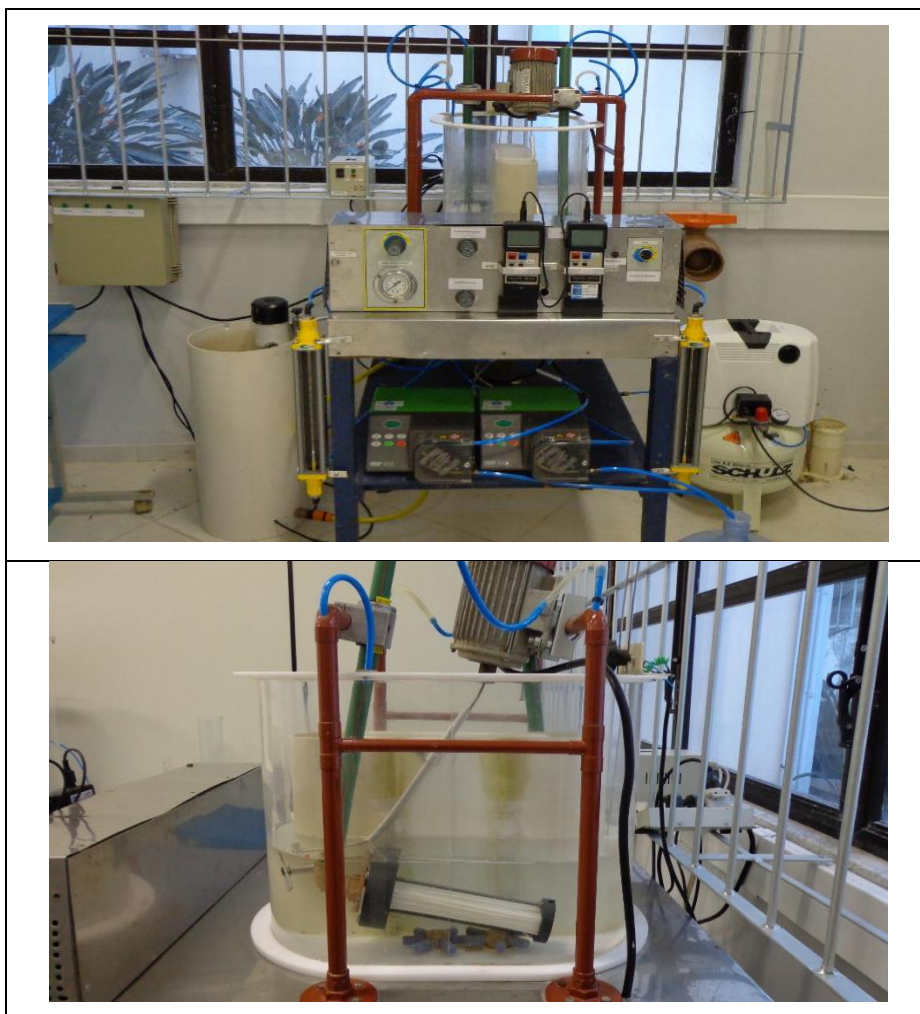
O BRM utilizado no trabalho de Belli (2015) tinha um volume útil de 15 L, no reator foram instalados dois módulos submersos de membrana de ultrafiltração para realizar a separação do concentrado e do permeado. A Figura 5 apresenta a representação esquemática da unidade piloto do biorreator à membrana e a Figura 6 as imagens desta unidade experimental.

Figura 5 - Unidade experimental BRM.



Fonte: Belli, 2015.

Figura 6 - Imagem frontal e lateral da unidade experimental.



Fonte: Belli, 2015.

O BRM foi equipado com um painel de controle que automatizava toda a unidade experimental, que era composta por: bomba centrífuga; misturador; compressor de ar; bombas peristálticas; rotômetros; e dois vacuômetros digitais (BELLI, 2015). As características dos módulos de membranas utilizados no BRM são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Características do módulo de membranas do BRM.

Fabricante	--	Société Polymem
Material da Membrana	--	Polisulfona
Conformação	--	Fibra Oca
Número de fibras	--	72
Diâmetro dos poros	µm	0,08
Área filtrante	m ²	0,09
Comprimento das fibras	cm	20
Comprimento do módulo	cm	25
Diâmetro externo das fibras	cm	2,52
Diâmetro interno das fibras	mm	1,40
Espaçamento entre as fibras	mm	2

Fonte: Belli, 2015.

A operação do BRM foi dividida em duas etapas e sete estratégias (E), sendo quatro estratégias aplicadas na primeira etapa e três na segunda. A Etapa 1 envolveu a avaliação do desempenho do BRM e da filtrabilidade do licor misto mediante a variação da idade do lodo (80, 40 e 20 dias). Na Etapa 2, avaliou-se a utilização de agentes químicos como auxiliares na remoção de nutrientes e minimizadores do processo de colmatação das membranas. Os dados experimentais utilizados neste trabalho correspondem aos dados da primeira etapa, E-2 (idade do lodo de 40 dias) e E-3 (idade do lodo de 20 dias). Os parâmetros de operação correspondentes a estas estratégias são os seguintes (BELLI, 2015):

- Fluxo de filtração (J): 6,25 L.m².h⁻¹
- Taxa de troca volumétrica (TTV): 20 %
- Vazão do permeado (Qperm): 18 L.dia⁻¹
- Tempo de detenção hidráulica (TDH): 20 horas
- Temperatura (°C): variável
- Taxa de aeração na membrana: 3,3 a 5,3 m³.m⁻².h⁻¹

Esgoto sanitário foi utilizado como afluente para alimentar o BRM, captado diretamente da rede coletora de esgotos do bairro Pantanal, na cidade de Florianópolis/SC (BELLI, 2015). A Tabela 6 apresenta a caracterização do esgoto sanitário utilizado, sendo que os parâmetros analisados foram: demanda química de oxigênio, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, fosforo total, sólidos suspensos totais e potencial hidrogeniônico.

Tabela 6 - Características do esgoto sanitário (valores médios e desvio padrão).

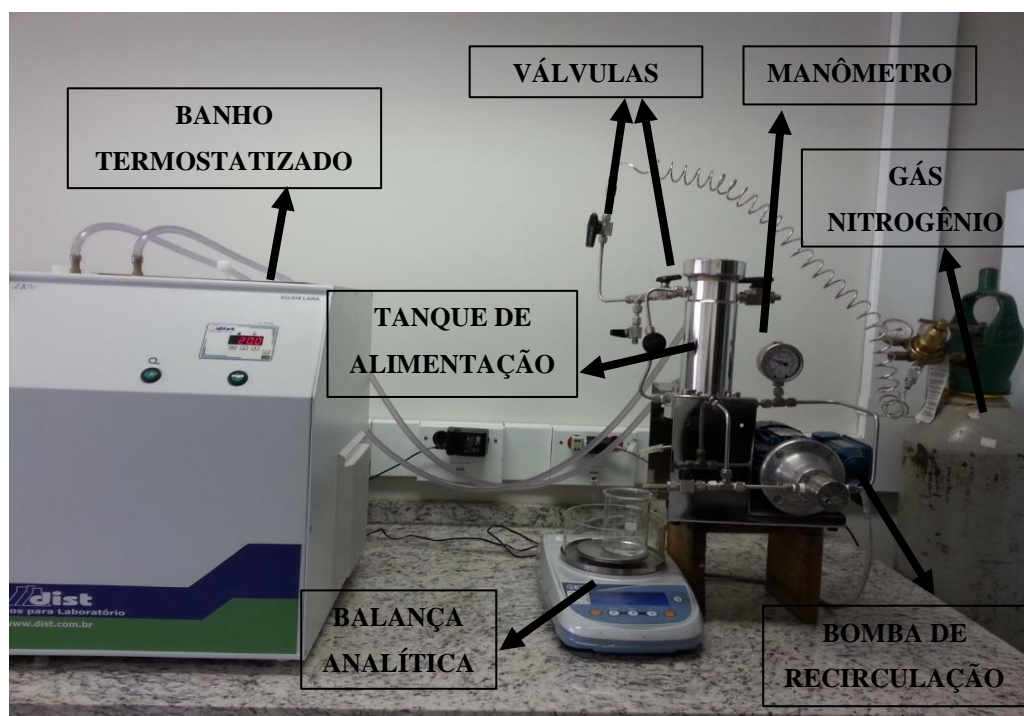
	DQO (mg O ₂ .L ⁻¹)	Ntotal (mg.L ⁻¹)	N-NH₄⁺ (mg.L ⁻¹)	Ptotal (mg.L ⁻¹)	SST (mg.L ⁻¹)	pH
Etapa 1						
E-2	749±161	64,5±12	54,4±8,2	6,7±1,7	127±38,6	7,4±0,16
E-3	782±128	73,9±11	57,6±9,3	7,9±2,2	136±72,5	7,3±0,16

Fonte: Belli, 2015.

3.2 UNIDADE EXPERIMENTAL DE NANOFILTRAÇÃO E OSMOSE INVERSA PARA PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE BIORREATOR À MEMBRANA

A unidade experimental utilizada por Santos (2016) era composta por: tanque de alimentação encamisado e pressurizado a partir de um cilindro de nitrogênio gasoso, bomba centrífuga para recirculação do concentrado, banho termostaticado para controle da temperatura, balança analítica para monitoramento do fluxo de permeado, e válvulas e manômetros para controle da pressão aplicada. A Figura 7 apresenta a unidade experimental utilizada por Santos (2016).

Figura 7 - Unidade Experimental de NF/OI.



Fonte: Santos, 2016.

3.2.1 Ensaios de Nanofiltração

Para os ensaios de nanofiltração foi utilizado uma membrana plana (NF90) fabricada em poli(étersulfona), da marca Dow Chemical Company®. Foi realizado ensaio de fluxo crítico para determinar as pressões de operação da membrana. Assim, estabeleceu-se condições subcríticas, críticas e supercríticas com as pressões de 6 bar, 8 bar e 12 bar, respectivamente. O volume adotado do reservatório de alimentação foi de 500 ml com uma taxa de recuperação de 70% (SANTOS, 2016). A Tabela 7 apresenta as características da membrana de NF.

Tabela 7 - Características da membrana de NF.

Características da Membrana de NF	
Nome Comercial	NF90
Fabricante	Dow Chemical Company®
Rejeição Salina (%)	>97 MgSO ₄
Máx. Pressão (Bar)	41
Máx. Temperatura (°C)	45
Faixa Ótima De pH	2-11

Fonte: Santos, 2016.

Para os ensaios de NF foi utilizado como afluente o permeado produzido no BRM da pesquisa de Belli (2015). Os parâmetros operacionais usados para os ensaios de nanofiltração são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Parâmetros de operação dos ensaios de NF.

Características	Unidade	Valores utilizados
Área da Membrana	m ²	0,0028
Material da Membrana	--	poli(étersulfona)
Pressões de Operação	Bar	6, 8 e 12
Volume de Operação	mL	500
Temperatura de Operação	°C	20
Taxa de Recuperação	%	70

Fonte: Santos, 2016.

3.2.2 Ensaio de Osmose Inversa

A membrana utilizada no ensaio de Osmose Inversa (modelo SG - GE Osmotics®) era do tipo plana fabricada em poliamida composta, marca GE Osmotics®. Assim como no ensaio de NF, para esta etapa também foi realizado o ensaio de fluxo crítico, deste modo, as pressões subcríticas, críticas e supercríticas adotadas foram de 12 bar, 16 bar e 20 bar, respectivamente. O volume utilizado para os ensaios de OI foi de 300 mL, com 210 mL de recuperação (SANTOS, 2016). A Tabela 9 apresenta as características da membrana de OI.

Tabela 9 - Características da membrana de OI.

Características da Membrana de OI	
Nome comercial	SG
Fabricante	GE Osmonics®
Rejeição Salina (%)	98,5 NaCl
Máx. Pressão (bar)	41
Máx. Temperatura (°C)	45
Faixa Ótima de pH	4-11

Fonte: Santos, 2016.

Do mesmo modo que no ensaio de NF, foi utilizado como afluente o permeado produzido no BRM da pesquisa de Belli (2015). Na Tabela 10 são apresentados os parâmetros operacionais usados para os ensaios de OI.

Tabela 10 - Parâmetros de operação dos ensaios de OI.

Características	Unidade	Valores Utilizados
Área da Membrana	m ²	0,0028
Material da Membrana	--	Poliamida composta
Pressões de Operação	bar	12, 16 e 20
Volume de Operação	mL	300
Temperatura de Operação	°C	20
Taxa de recuperação	%	70

Fonte: Santos, 2016.

3.2.3 Parâmetros Analisados

Para avaliar o desempenho dos processos de NF e OI foram realizadas análises das amostras coletadas do permeado do BRM e do permeado depois da passagem pelo pós-tratamento de NF e OI (SANTOS, 2016). A Tabela 11 apresenta os parâmetros analisados por Belli (2015) e Santos (2016) e a metodologia empregada em cada parâmetro.

Tabela 11 - Parâmetros analisados.

PARÂMETRO	METODOLOGIA
Carbono Orgânico Dissolvido	Método do carbono orgânico não purgável (TOC-LCSH marca SHIMADZU).
Nitrito, Nitrato, Fosfato e Cloreto	Cromatografia líquida de troca iônica.
pH	Método potenciométrico e leitura em pHmetro ThermoScientific Orion.
Alcalinidade	Medido pela modificação de pH através da adição de ácido sulfúrico 0,02 N.
Turbidez	Método em turbidímetro Hach 2100P.
Cor	Método colorimétrico em espectrofotômetro Hach modelo 2800
Demanda Química de Oxigênio	Método colorimétrico de refluxo fechado, com Kit HACH (método 8000) e leitura em espectrofotômetro Hach DR/5000.
Nitrogênio Amoniacal	Método de Nessler com kit HACH (método 10031) e leitura em espectrofotômetro Hach modelo DR/5000.

Fonte: Belli, 2015; Santos, 2016.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 QUALIDADE DO PERMEADO PRODUZIDO PELO SISTEMA BRM-NF/OI

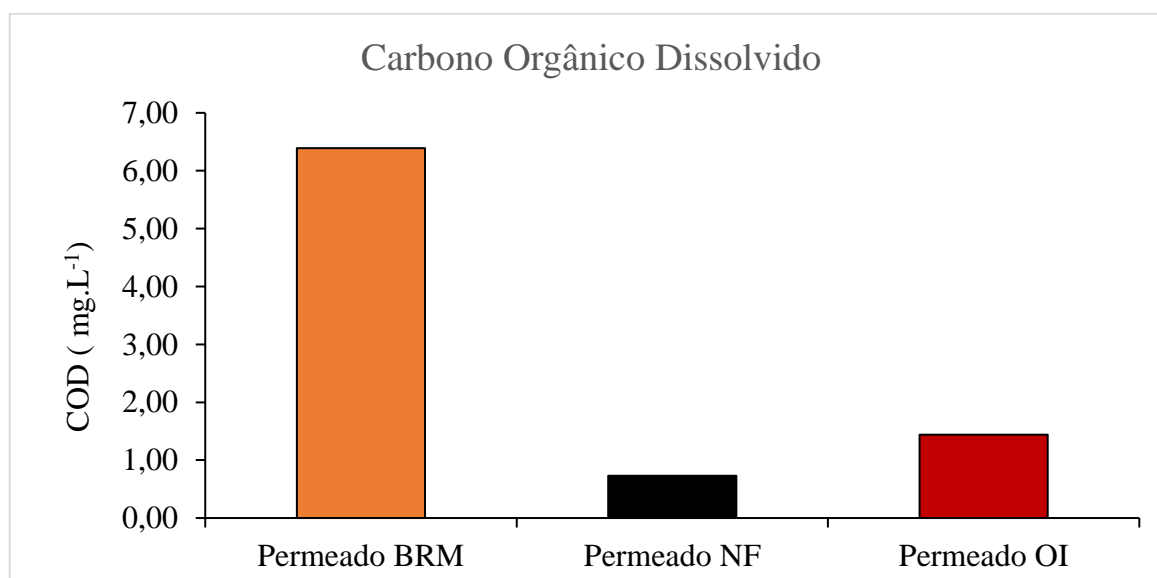
Neste tópico são apresentados e discutidos os resultados obtidos para os diferentes parâmetros analisados por Belli (2015) e Santos (2016) após a passagem do esgoto pelo BRM e pelo pós-tratamento de NF e OI. Os parâmetros analisados foram: cor, turbidez, nitrito, nitrato, fosfato, carbono orgânico dissolvido, alcalinidade, pH, microrganismos, nitrogênio amoniacal e demanda química de oxigênio.

4.1.1 Matéria orgânica

4.1.1.1 Carbono Orgânico Dissolvido

Na Figura 8 são apresentadas as médias dos resultados obtidos das análises de carbono orgânico dissolvido (COD), nos permeados do BRM, NF e OI.

Figura 8 - Valores médios da concentração de COD antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Como pode ser observado na Figura 8, a remoção de COD do permeado do BRM foi mais eficiente nos ensaios de NF, cuja remoção média foi de 88,66%, enquanto nos ensaios de

OI foi de 77,46%. Andrade et al. (2015) estudaram a aplicação de BRM seguido de NF para o tratamento de efluentes da indústria de laticínios para produção de água de reuso. Os autores reportam uma eficiência de 88% para as membranas de NF na remoção de COD, valor esse próximo do encontrado neste trabalho.

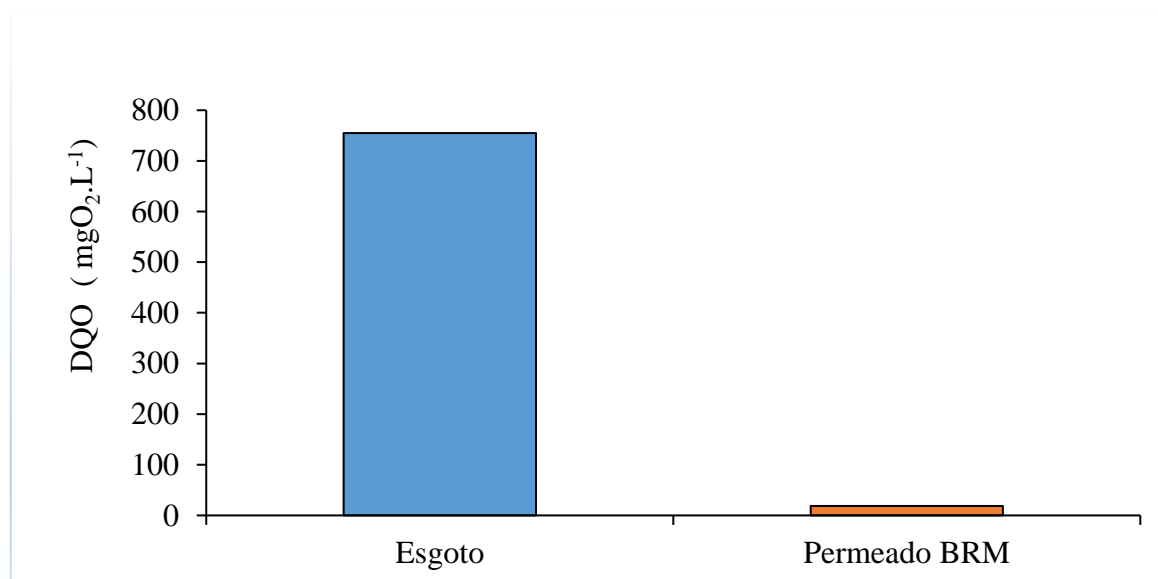
Gündoğdu et al. (2018) afirmam que a diferença no desempenho das membranas pode estar associada à diversidade nas suas propriedades, tal como tamanho dos poros, carga superficial, características hidrofóbicas ou hidrofílicas e estrutura ou composição da camada ativa para as membranas empregadas. Li et al. (2018) avaliaram os impactos na incrustação de membrana de NF e OI, e afirmam que as membranas de OI são mais suscetíveis à incrustação orgânica do que a membrana de NF, devido à maior hidrofobicidade das membranas de OI. Os autores ainda relataram que a camada de incrustação pode diminuir significativamente o desempenho das membranas. Tang, Chong e Fane (2011), ressaltam que a formação de uma camada incrustante pode afetar adversamente o fluxo da membrana como resultado da resistência hidráulica da camada incrustante e/ou da pressão osmótica.

O COD é um parâmetro que indica poluição orgânica para águas e efluentes. A presença de compostos orgânicos em massas de água pode ocasionar a redução do oxigênio dissolvido devido à degradação biológica do carbono orgânico (KATSOYIANNIS; SAMARA, 2007).

4.1.1.2 Demanda Química de Oxigênio

Na Figura 9 são apresentados os valores médios da concentração da demanda química de oxigênio do esgoto e do permeado do BRM.

Figura 9 - Valores médios da concentração da demanda química de oxigênio, do esgoto e do permeado do BRM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

A demanda química de oxigênio (DQO) não foi analisado após os ensaios de NF e OI. Porém, os resultados das análises do permeado do BRM indicam que a remoção para este parâmetro foi eficiente, mesmo sem pós-tratamento. A eficiência média de remoção foi de 97,53%, para a DQO, esta alta eficiência esta relacionada a remoção da matéria orgânica tanto por vias microbiológicas (nitrificação e remoção biológica otimizada de fósforo - EBPR) quanto por retenção de matéria orgânica pela membrana. Mannina et al. (2018) reportam em seu estudo com BRM a eficiência de remoção de DQO acima de 98%, que está próxima ao resultado encontrado neste trabalho. Jin et al. (2013) operaram um BRM em escala piloto, integrando a NF e OI para tratar águas residuais para reutilização industrial, as remoções globais atingiram 96,6%. Robinson (2007) alcançou eficiência superior a 98% de remoção de DQO utilizando a combinação de BRM/NF para tratamento de efluente de um aterro sanitário. Sendo assim, pode-se esperar que tanto a NF quanto a OI sejam eficientes na remoção da DQO remanescente no permeado do BRM.

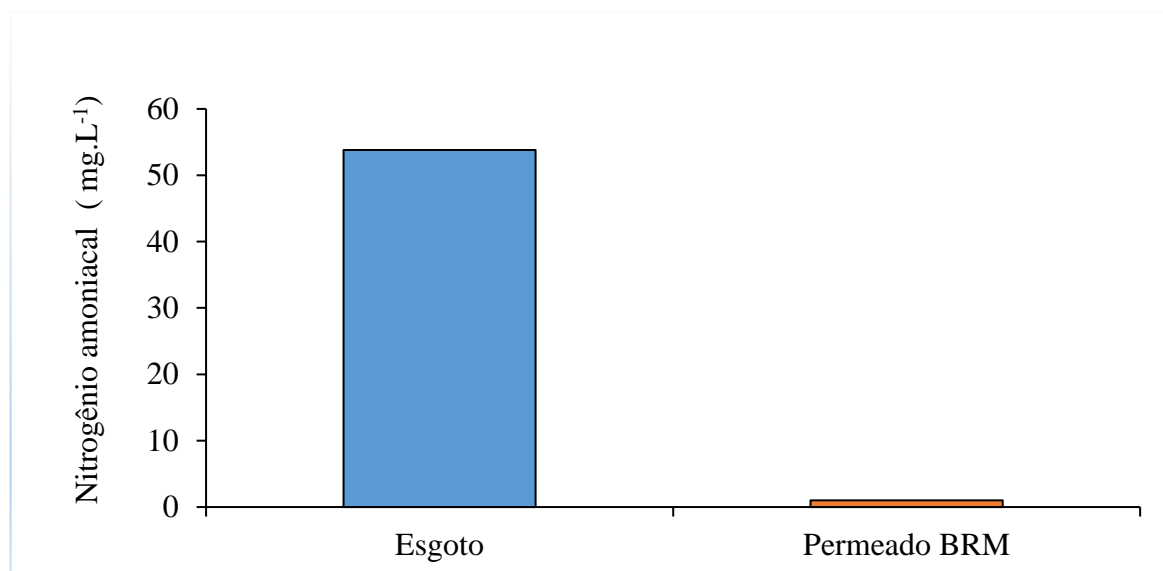
Em termos de padrões de lançamento de esgoto sanitário o parâmetro DQO atenderia a exigência da Resolução N° 430 de 2011 do Conama. Uma vez que em termos de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO 5 dias, 20°C) a resolução estabelece o valor máximo para lançamento igual a 120 mg.L-1. Considerando que a DQO do permeado do BRM apresentou uma concentração média de 18,6 mg.L-1, pode-se afirmar que este parâmetro também atenderia a legislação, uma vez que a DQO é sempre maior que a DBO em virtude de que a DBO mede somente a matéria orgânica biodegradável e a DQO mede toda a matéria presente que possa ser oxidada (VON SPERLING, 2014).

4.1.2 Nitrogênio

4.1.2.1 Nitrogênio Amoniacal

Na Figura 10 são apresentados os valores médios da concentração de nitrogênio amoniacal do esgoto e do permeado do BRM.

Figura 10 - Valores médios da concentração de nitrogênio amoniacal do esgoto e do permeado do BRM.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O parâmetro nitrogênio amoniacal não foi analisado após os ensaios de NF e OI. Porém, os resultados das análises do permeado do BRM indicam que a remoção deste parâmetro foi eficiente, mesmo sem pós-tratamento. A eficiência média de remoção foi de 98,12%, esta

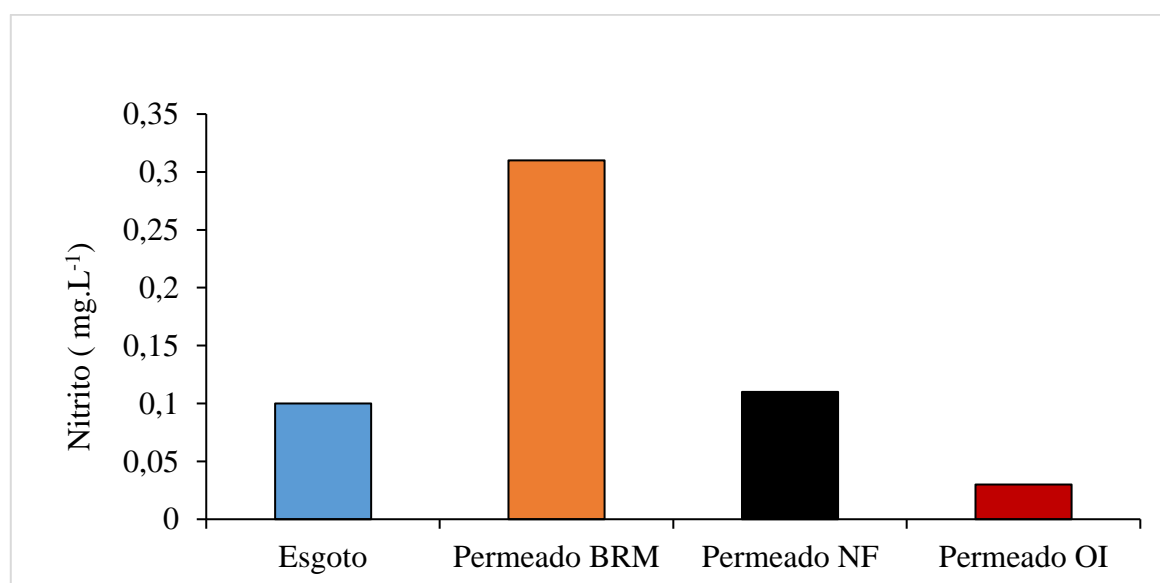
elevada eficiência esta relaciona a remoção pela retenção da membrana assim com pelo consumo de amônia na etapa de nitrificação. Jin et al. (2013) operaram um BRM em escala piloto, integrando a NF e OI para tratar águas residuais para reutilização industrial, as remoções globais atingiram 99,9% (nitrogênio amoniacal). Robinson (2007) alcançou eficiência superior a 99,95% de remoção de nitrogênio amoniacal utilizando a combinação de BRM/NF para tratamento de efluente de um aterro sanitário. Sendo assim, pode-se esperar que tanto a NF quanto a OI sejam eficientes na remoção do nitrogênio amoniacal remanescente no permeado do BRM.

Em termos de padrões de lançamento de esgoto sanitário este parâmetro atenderia a exigência da Resolução N° 430 de 2011 do Conama. Para o nitrogênio amoniacal a resolução estabelece o limite máximo em 20 mg.L⁻¹, sendo que o permeado do BRM apresentou uma concentração média de 1,01 mg.L⁻¹ para este parâmetro, abaixo do limite.

4.1.2.2 Nitrito e Nitrato

Na Figura 11 são apresentadas as médias dos resultados obtidos nas análises de concentrações de nitrito do esgoto bruto, dos permeados do BRM, NF e OI.

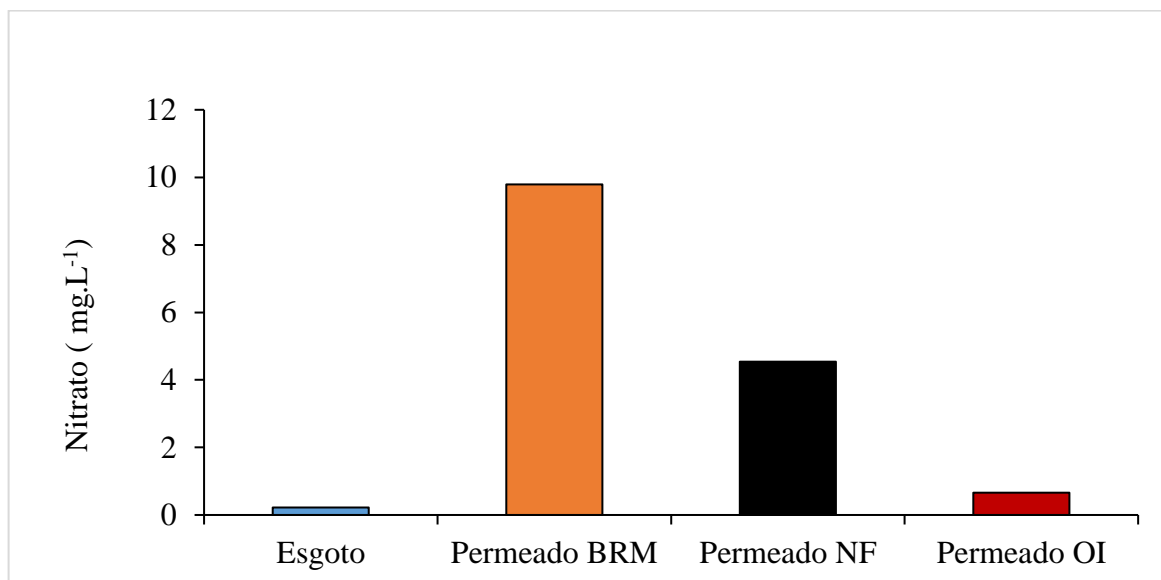
Figura 11 - Valores médios da concentração de nitrito antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Na Figura 12 são apresentadas as médias dos resultados obtidos das análises de concentrações de nitrato do esgoto bruto, dos permeados do BRM, NF e OI.

Figura 12 - Valores médios da concentração de nitrato antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Como pode-se perceber nas Figura 11 e Figura 12 houve um aumento na concentração de nitrito e nitrato após a passagem do efluente pelo BRM. Este resultado é explicado pela ocorrência de nitrificação e nitratação (oxidação da amônia a nitrito e nitrato) por vias autotróficas durante a fase aeróbia no BRM (METCALF & EDDY, 2016; SEPEHRI; SARRAFZADEH, 2018). Desta forma para a remoção de nitrito e nitrato é necessário um pós-tratamento do permeado do BRM.

Para os dois parâmetros analisados após a NF e OI, percebe-se que tanto para os ânions de nitrito (NO_2^-) quanto para os ânions de nitrato (NO_3^-) a membrana de OI obteve o melhor desempenho de remoção comparado aos outros processos. A porcentagem média de remoção de nitrito e nitrato para OI foi de 90,32% e 93,26%, respectivamente. Em contrapartida, o desempenho da membrana de NF foi de 64,52% e 53,63% para nitrito e nitrato, respectivamente. Qin et al. (2006) estudaram a aplicabilidade da combinação do BRM com OI no tratamento de efluente doméstico para produção de água de reuso e alcançaram a eficiência de 93 a 94,3% de remoção de nitrato. Cartagena et al. (2013) reportam que o tratamento com BRM seguido de NF/OI mostrou eficiências de remoção acima de 90% de nitrato em ambas as

membranas, em termos de nitrito os autores comentam que o mesmo foi quase totalmente transformado em nitrato pelo processo de nitratação.

A remoção de nitrato no efluente é importante devido aos problemas que o mesmo pode causar se descartado em concentrações elevadas em corpos hídricos. A presença de nitrogênio nas águas residuais pode desencadear ou intensificar o fenômeno da eutrofização, que acarreta em prejuízos à comunidade aquática (BHAGOWATI; AHAMAD, 2018).

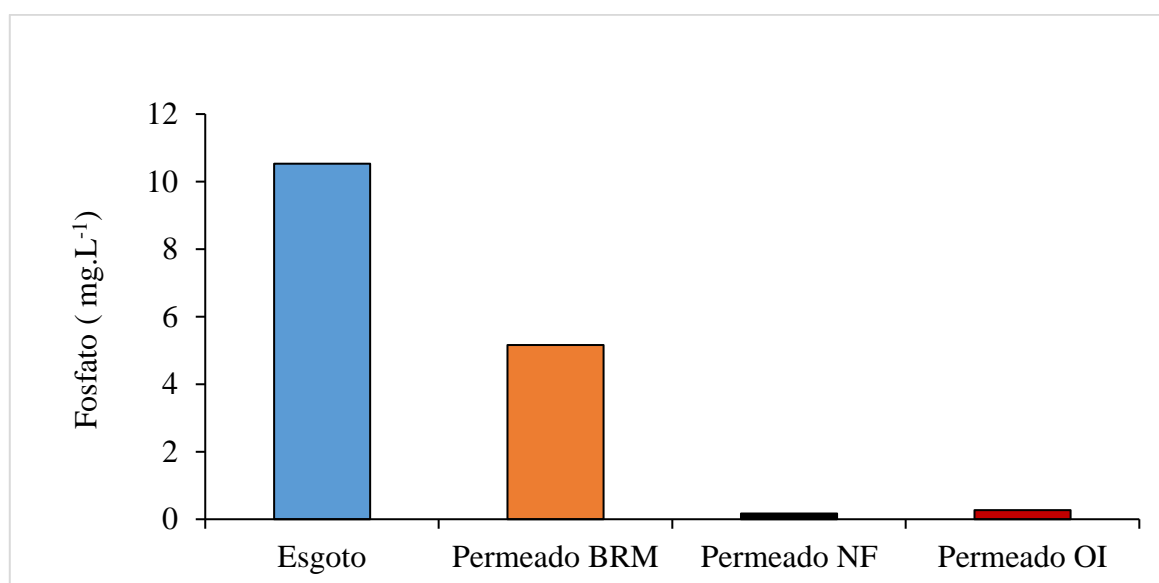
Se o destino deste efluente é o reúso, mais especificamente o reúso potável, a remoção de nitrato deve ser eficiente, uma vez que este pode acarretar problemas de saúde pública, como surtos de metahemoglobinemia, doença conhecida também como síndrome do bebê azul (VON SPERLING, 2014).

4.1.3 Fósforo

4.1.3.1 Fosfato

Na Figura 13 são apresentadas as médias dos resultados obtidos das análises de fosfato (PO_4^{3-}) no esgoto bruto, nos permeados do BRM, NF e OI.

Figura 13 - Valores médios da concentração de fosfato antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Em termos de remoção de fosfato o BRM apresentou uma eficiência média de 51% de remoção. Kim et al. (2010) operaram um BRM piloto e alcançaram uma eficiência de remoção de fosfato próxima a 59%, semelhante ao valor encontrado neste trabalho. Entretanto, para fazer o reúso deste efluente é necessário alcançar uma concentração mais baixa de fosfato, uma vez que a concentração de fosfato do permeado do BRM foi de 5,16 mg. L⁻¹, acima do permitido para o reúso urbano não potável ou agrícola (AYERS E WESTCOT, 1991; ANA, 2005). Sendo assim, faz-se necessária a aplicação de um tratamento complementar para possibilitar o reúso deste permeado.

No pós-tratamento a remoção de fosfato em ambas as membranas foi satisfatória, porém na membrana de NF houve remoção média um pouco mais significativa, de 96,71%, já na membrana de OI a remoção média foi de 94,77%. Mamo et al. (2016) reportam uma eficiência de remoção próxima a encontrada neste trabalho. Os autores operaram uma planta piloto de BRM-NF para tratar efluentes urbanos e alcançaram eficiência média de remoção de fosfato de 97,6%. Sert et al. (2017) avaliaram a aplicabilidade da nanofiltração e osmose inversa para reutilização de efluentes industriais tratados utilizando duas membranas de NF (HL-GE e DL-GE) e uma de OI (AG-BWRO). As membranas de NF apresentaram remoção média de 58,3 % (HL-GE) e 55,5 % (DL-GE), já a membrana de OI apresentou remoção média de 50,6 % (AG-BWRO). Os autores justificam o melhor desempenho das membranas de NF pelo fato de que os íons carregados negativamente são rejeitados em certa medida por interações de repulsão em vez do mecanismo de retenção, uma vez que nas membranas de OI o mecanismo de exclusão de tamanho afeta mais a rejeição do que o mecanismo eletrostático. Van Voorthuizen, Zwijnenburg e Wessling (2005) comentam que a membrana de NF (NF90) pertence a um grupo de membranas onde os efeitos de carga e tamanho desempenham um papel na separação. Pode ser possível que na remoção do fosfato houve interferência da carga negativa da membrana de NF com carga negativa dos ânions de fosfato, favorecendo a remoção deste ânion.

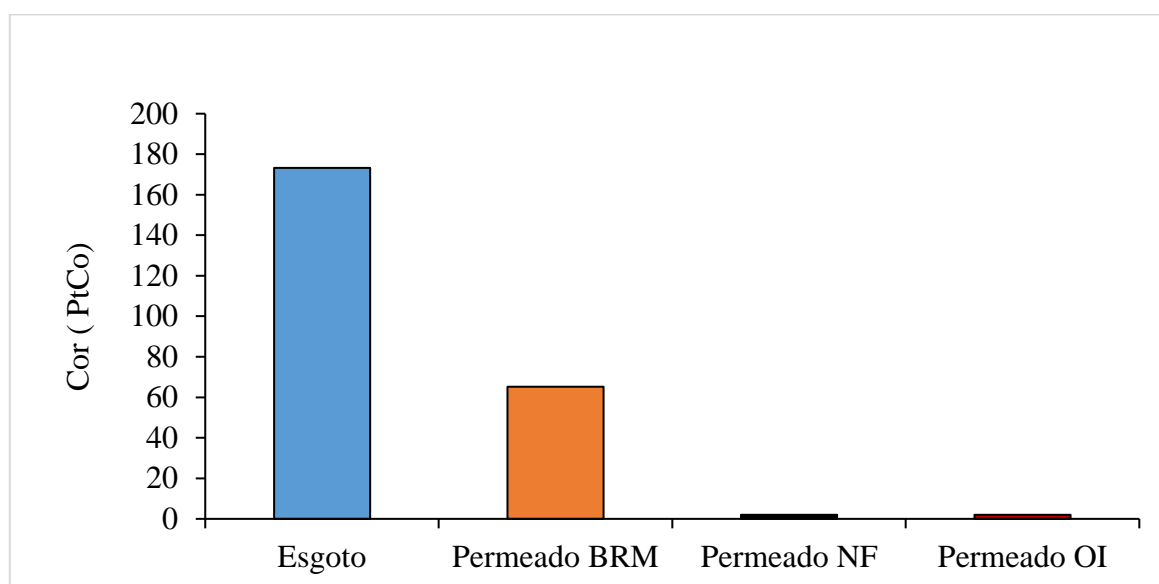
O fosfato é uma fonte de fósforo, um dos nutrientes que pode desencadear ou intensificar o processo de eutrofização, sendo importante a remoção deste parâmetro dos efluentes antes do despejo no meio ambiente para preservar a qualidade dos corpos d'água receptores (BHAGOWATI; AHAMAD, 2018).

4.1.4 Parâmetros Físicos

4.1.4.1 Cor

Na Figura 14 são apresentadas as médias dos valores obtidos das análises de cor do esgoto, dos permeados do BRM, NF e OI.

Figura 14 - Valores médios de cor antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

O tratamento do esgoto com BRM garantiu uma remoção média de 62,34%, onde o permeado do BRM apresentou cor média de 65,22 PtCo, considerada bastante expressiva. Entretanto, quando o objetivo do tratamento de águas residuárias é produzir um efluente para possíveis reúsos, a cor é um parâmetro de qualidade exigido, como por exemplo para indústria têxtil onde é recomendado uma cor menor que 5 PtCo (EPA, 1992). Sendo assim, faz-se necessário um tratamento adicional para remover a cor deste efluente possibilitando seu reúso.

As membranas de NF e OI possuem capacidade de reter sólidos dissolvidos responsáveis por conferirem cor ao efluente, sendo assim a remoção de sólidos dissolvidos esta diretamente relacionada a remoção de cor. Os resultados do pós-tratamento apresentaram uma remoção de cor satisfatória, chegando a uma eficiência de 96,93% de remoção deste parâmetro em ambos os ensaios. Resultados similares foram reportados por Tam et al. (2007), onde foi alcançada a eficiência de 97% para remoção de cor do efluente de um BRM seguido por OI

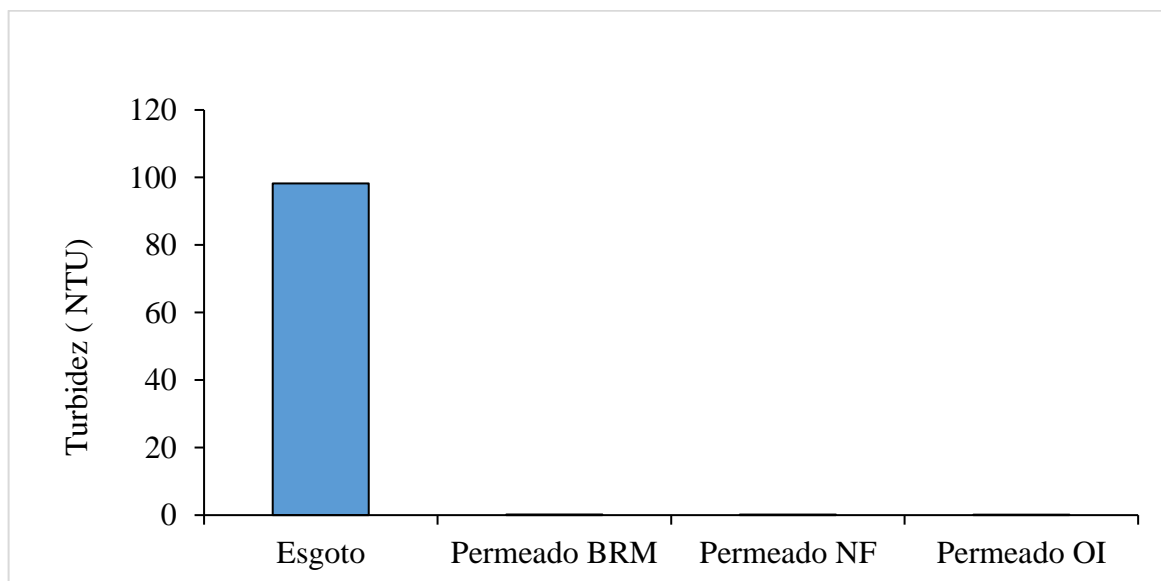
aplicado ao tratando efluente doméstico. Hacıfazlıoğlu et al. (2018) estudaram a aplicação da combinação do BRM com pós-tratamento de NF e OI para o tratamento de águas residuárias de uma planta industrial, os autores reportam uma eficiência de remoção de cor do efluente de 94% (NF) e de 97,9% (OI) para a pressão aplicada de 20 bar.

É importante ressaltar que a remoção de cor do efluente está diretamente associada ao aspecto estético (aspecto visual do efluente) e este relacionado com a aceitação do efluente para o reúso (VON SPERLING, 2014).

4.1.4.2 Turbidez

Na Figura 15 são apresentadas as médias dos valores obtidos das análises de turbidez do esgoto bruto, dos permeados do BRM, NF e OI.

Figura 15 - Valores médios de turbidez antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Quanto à turbidez do efluente verificou-se que o permeado do BRM apresentou média abaixo de 0,19 NTU, indicando eficiente remoção de turbidez no próprio BRM, cuja eficiência média de remoção foi de 99,8%. Dada a remoção expressiva de turbidez já na primeira etapa do tratamento não foi verificada redução considerável após a passagem pelo pós-tratamento de NF e OI.

Alturki et al. (2010) reportam em seu trabalho o desempenho de um sistema BRM que apresentou uma eficiente remoção de turbidez (média de turbidez do permeado de 0,2 NTU). Sert et al. (2016) avaliaram o desempenho de membranas de NF (NF90) e OI (BW30) integradas ao BRM e encontraram valores médios de turbidez de 0,17 e 0,13 para NF e OI, respectivamente, chegando a resultados próximos dos encontrados neste trabalho.

A presença da turbidez no efluente tratado pode gerar um desconforto em termos estéticos, além de prejudicar o processo de desinfecção devido a possibilidade de presença dos microrganismos patogênicos nas partículas em suspensão remanescentes (VON SPERLING, 2014).

4.1.5 Indicadores Microbiológicos

As análises microbiológicas foram em termos de Coliformes Totais e Coliformes termotolerantes. Na Tabela 12 são apresentadas as médias dos resultados das análises de microrganismos dos permeados do BRM, NF e OI.

Tabela 12 - Valores médios dos resultados microbiológicos do BRM e dos ensaios de NF e OI.

	BRM	NF	OI
Coliformes Totais (NMP^a.100 mL⁻¹)	1,03	ND ^b	ND
Coliformes Termotolerantes (NMP.100 mL⁻¹)	ND	ND	ND

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018. a – Número mais provável por 100 mL; b – Não detectado.

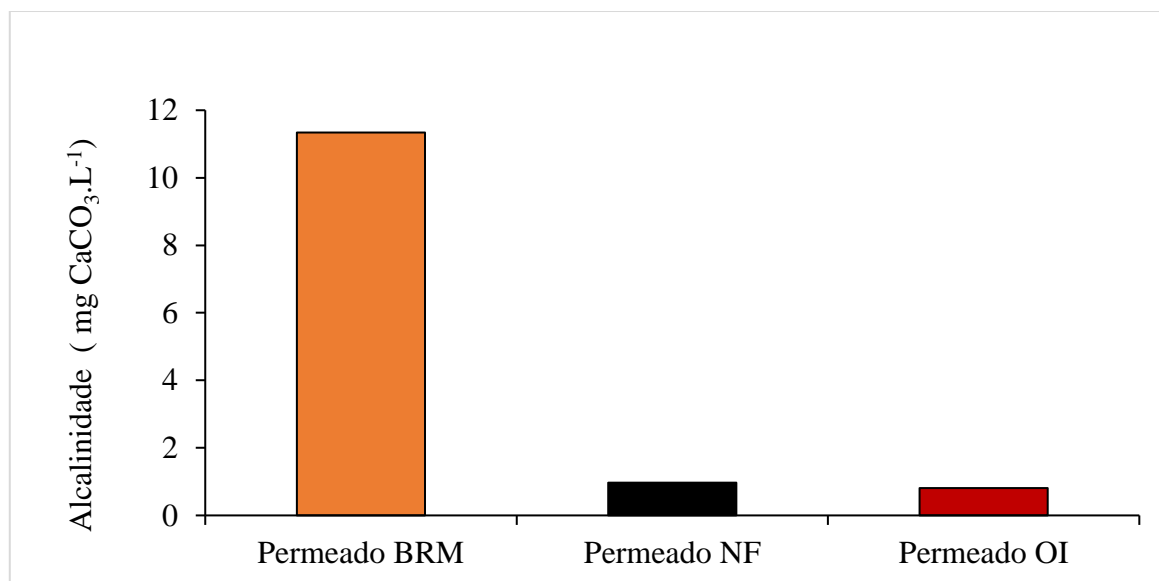
Percebe-se que a remoção de microrganismos em ambas as membranas é eficiente, uma vez que tanto na NF quanto na OI não foram detectados microrganismos nas análises realizadas, tendo em vista que tais microrganismos ficam retidos nas membranas de NF e OI, devido ao tamanho dos poros das membranas. Os coliformes termotolerantes já não foram detectados no permeado do BRM e a concentração de coliformes totais foi muito baixa ($< 2 \text{ NMP} \cdot 100 \text{ mL}^{-1}$). Silva (2014) estudou a aplicabilidade de membranas no pós-tratamento de esgoto para reúso e constatou que tanto para a NF quanto para a OI não foi detectado coliformes termotolerantes no permeado. Choi, Kim e Hong (2016) avaliaram o desempenho de membranas de OI para reutilização potável direta, os autores reportaram que não foi detectado coliformes fecais nem *Escherichia coli* no permeado do sistema.

A remoção destes microrganismos indica boa qualidade do efluente em termos bacteriológicos. Considerando que a presença de microrganismos na água pode ocasionar doenças como gastroenterites, a eliminação dos microrganismos do efluente se torna importante tanto para a sua destinação final quanto para possível reúso, principalmente quando a contato direto com os seres humanos.

4.1.6 Alcalinidade e pH

Na Figura 16 são apresentadas as médias dos resultados obtidos das análises de alcalinidade dos permeados do BRM, NF e OI.

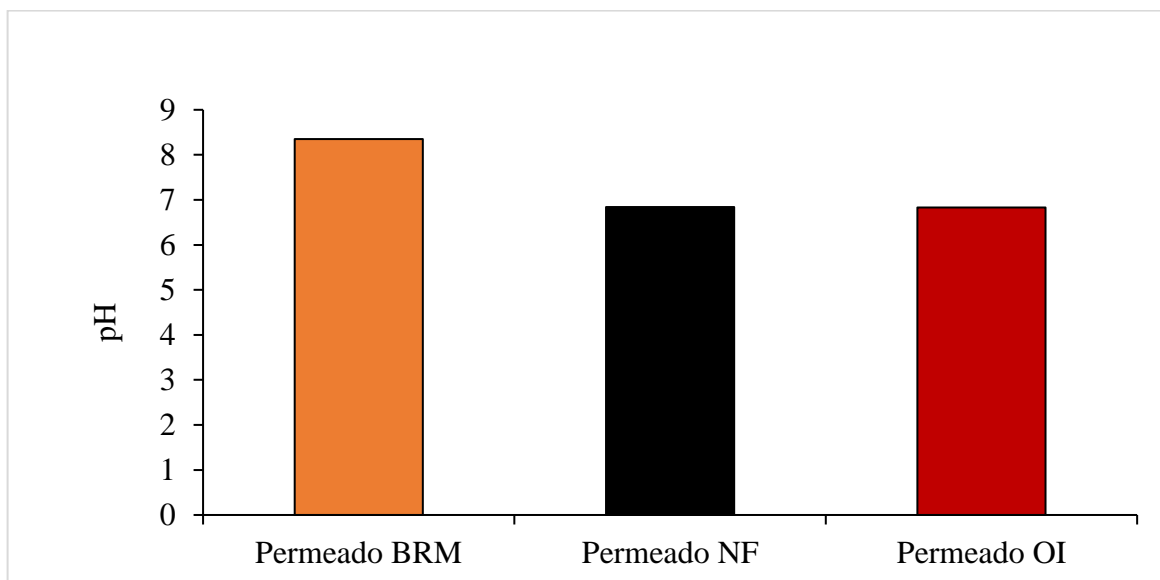
Figura 16 - Valores médios da alcalinidade antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Na Figura 17 são apresentados os valores médios de pH dos permeados do BRM, NF e OI.

Figura 17 - Valores médios do pH antes e após os ensaios de filtração com as membranas de NF e OI.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2018.

Pode-se perceber no gráfico da Figura 16 que tanto para NF quanto para OI houve diminuição da alcalinidade do permeado, e conseqüentemente do pH também, como é mostrado na Figura 17. Maestri (2007) comenta que a diminuição do pH é consequência da redução da alcalinidade. Na maioria dos estudos realizados com membranas de NF e OI foi evidenciada a diminuição do pH até níveis próximos da neutralidade (pH igual a 7) (JIN et al., 2013; SERT et al., 2017; TOMASINI et al., 2017; HACIFAZLIOĞLU et al., 2018).

A Resolução N° 430 de 2011 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução N° 357 de 2005. Para efluentes de sistemas de tratamento de esgotos sanitários a resolução estabelece a faixa de lançamento entre 5 e 9 para o pH, neste caso o permeado de ambas as membranas atenderia a condição de lançamento para este parâmetro.

4.2 POSSIBILIDADES DE REÚSO DO PERMEADO DO BRM, NF E OI

Como apresentado no tópico anterior, os permeados produzidos tanto do BRM quanto no pós-tratamento de NF e OI indicaram qualidade satisfatória. Isto demonstra que o uso de processos de separação por membranas é capaz de produzir um efluente com potencial de reúso. Neste tópico serão discutidas as possíveis formas de reúso dos permeados analisados neste trabalho: reúso potável, reúso agrícola e reúso industrial.

4.2.1 Reúso potável

No Brasil o reúso potável direto de efluentes tratado ainda não é regulamentado e nem muito aceito pela sociedade. Porém, com os problemas enfrentados nos grandes centros urbanos, onde a demanda passa a superar a oferta, vem ocorrendo uma mudança no pensamento coletivo e soluções alternativas são consideradas para satisfazer a demanda. Sendo assim, os processos de separação por membranas surgem como uma alternativa para este problema.

A Tabela 13 apresenta a comparação entre os resultados obtidos neste trabalho e os parâmetros exigidos para potabilidade da água conforme a Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017 que revoga a Portaria nº 2.914 de 12 de dezembro de 2011 do Ministério da Saúde (MS).

Tabela 13 - Comparação dos resultados obtidos com a legislação de potabilidade das águas.

Parâmetros de potabilidade	PRC nº 5, Anexo XX.	Permeado BRM	Permeado NF	Permeado OI
Cor (PtCo)	15	65,22	2	2
Turbidez (NTU)	0,5	0,19	0,17	0,14
Nitrito (mg.L ⁻¹)	1	0,31	0,11	0,03
Nitrato (mg.L ⁻¹)	10	9,79	4,54	0,66
Coliformes Totais (NMP ^a .100 mL ⁻¹)	Ausência em 100 mL	1,03	ND ^b	ND
Coliformes termotolerantes (NMP.100 mL ⁻¹)	Ausência em 100 mL	ND	ND	ND

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018. a – Número mais provável por 100 mL; b – Não detectado.

Como pode ser verificado na Tabela 13, os permeados da NF e OI atendem a todos os padrões de potabilidade analisados neste trabalho. Nota-se também que o permeado do BRM atende quatro dos seis parâmetros analisados, indicando uma boa qualidade do efluente já na saída do BRM. Sendo assim, fica evidente a eficiência do pós-tratamento com as membranas de NF e OI, uma vez que o permeado produzido apresenta alta qualidade tendo como referência os padrões de qualidade da Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017.

4.2.2 Reúso não potável urbano

Para fins não potáveis a qualidade exigida da água para reúso não é tão restritiva, mesmo assim é necessário manter alguns padrões de qualidade, uma vez que para este uso pode ocorrer o contato direto da água de reúso com a população. Na literatura nacional são encontradas duas referências principais no que diz respeito a reúso não potável: a NBR 13.969/1997, da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), e o Manual de Conservação e Reúso em Edificações (ANA, 2005).

A NBR 13.969/1997 classifica os possíveis reúsos em 4 classes, sendo a mais restritiva a classe 1, a qual é destinada a lavagem de carros e outros usos que requerem o contato direto do usuário com a água, com possível aspiração de aerossóis pelo operador, incluindo chafarizes. A Tabela 14 apresenta a comparação das análises dos permeados do BRM, NF e OI com os parâmetros de qualidade estabelecidos pela NBR 13.969/1997 para a classe 1.

Tabela 14 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os parâmetros da NBR 13.969/1997 para Classe 1.

Parâmetros de qualidade	NBR 13.969/1997 (CLASSE 1)	Permeado BRM	Permeado NF	Permeado OI
Turbidez (NTU)	< 5	0,19	0,17	0,14
Coliformes termotolerantes (NMP^a.100 mL⁻¹)	< 200	ND ^b	ND	ND
pH	6,0 - 8,0	8,4	6,8	6,8
Cloro residual (mg.L⁻¹)	0,5 – 1,5	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018. a – Número mais provável por 100 mL; b – Não detectado.

Com exceção do pH do permeado do BRM, que resultou acima do valor estipulado, dentre os parâmetros analisados todos atenderam as exigências da NBR 13.969/1997, indicando uma boa qualidade do permeado da NF e OI. A NBR 13.969/1997 ainda recomenda a presença de concentração de cloro residual no efluente final, sendo assim para o reúso de águas classe 1 seria necessário fazer a cloração do permeado.

De acordo com o Manual de Conservação e Reúso em Edificações (ANA, 2005), as águas de reúso são classificadas em 4 classes, sendo que a classe 1 é a classe que apresenta um destino mais nobre em relação as outras classes. Os principais usos para as águas tratadas de classe 1, nos edifícios, são principalmente: descarga de bacias sanitárias, lavagem de pisos, fins ornamentais (chafarizes, espelhos de água etc.), lavagem de roupas e de veículos.

Na Tabela 15 é apresentado um comparativo dos permeados produzidos no BRM, na NF e na OI, com os padrões de qualidade estipulados no Manual de Conservação e Reúso em Edificações (ANA, 2005).

Tabela 15 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os parâmetros de qualidade do Manual de Conservação e Reúso em Edificações (ANA, 2005) para águas de reúso Classe 1.

Parâmetros de qualidade	MCRE (CLASSE 1)	Permeado BRM	Permeado NF	Permeado OI
Cor (PtCo)	≤ 10	65,22	2	2
Turbidez (NTU)	≤ 2	0,19	0,17	0,14
Coliformes termotolerantes (NMP^a.100 ML⁻¹)	ND ^b	ND	ND	ND
pH	6,0 - 9,0	8,4	6,8	6,8
Nitrito (mg.L⁻¹)	≤ 1	0,31	0,11	0,03
Nitrato (mg.L⁻¹)	< 10	9,79	4,54	0,66
Fosfato (mg.L⁻¹)	≤ 0,1	5,16	0,17	0,27
Nitrogênio amoniacal (mg.L⁻¹)	≤ 20	1,01	NA ^c	NA

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018. a – Número mais provável por 100 mL; b – Não detectado; c – Não analisado.

A partir da comparação apresentada na Tabela 15 verifica-se que para os três permeados analisados que o parâmetro fosfato não atende ao valor estipulado pelo Manual de Conservação e Reúso em Edificações (ANA, 2005) para águas de reúso classe 1. O parâmetro cor do

permeado do BRM também ultrapassa o limite fixado pelo manual. Para os demais parâmetros analisados todos atendem satisfatoriamente os parâmetros de qualidade.

4.2.3 Reúso agrícola

Sabe-se que a agricultura é um dos setores que mais consome água no mundo. O último Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento de Recursos Hídricos, estimou que até 70% das águas utilizadas em todo o mundo são destinadas à agricultura, sendo a maior parte usada para irrigação (UN WATER, 2018). Por esse aspecto, a busca por fontes alternativas de água para a agricultura torna-se interessante para reduzir a pressão que este setor sobre a demanda de recursos hídricos. O uso de esgotos tratados para irrigação de culturas pode ser considerado uma destas fontes alternativas.

Quando o reúso do efluente tratado é para fins agrícola, além do conhecimento sobre as características do efluente, também é necessário conhecer as características do solo. De acordo com Embrapa (2018), quando ocorre a irrigação do solo com água de baixa qualidade, como por exemplo alta salinidade, as características químicas do solo podem ser afetadas, prejudicando a produtividade do solo.

Desta forma é recomendado que parâmetros de qualidade sejam monitorados e atendidos para águas de reúso empregadas na irrigação. Na Tabela 16 são comparadas as médias dos resultados das análises dos permeados do BRM, NF e OI com os valores usuais empregados nas águas de irrigação (ARAGUÉS et al. 1979; AYERS E WESTCOT, 1991 e EMBRAPA, 2010).

Tabela 16 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os parâmetros de qualidade de águas aplicadas para irrigação.

Parâmetros de qualidade	Intervalo usual na água de irrigação	Permeado BRM	Permeado NF	Permeado OI
Turbidez (NTU)	< 40	0,20	0,17	0,14
Cloretos (mg.L⁻¹)	0 - 30	67,64	12,58	4,86
Nitrato (mg.L⁻¹)	0 - 10	9,79	4,54	0,66
Nitrogênio amoniacal (mg.L⁻¹)	0 - 5	1,01	NA ^a	NA
Fosfato (mg.L⁻¹)	0 - 2	5,16	0,17	0,27
pH	6,0 – 8,5	8,4	6,8	6,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018. a – Não analisado.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 16, percebe-se que tanto o permeado da NF quanto da OI atende perfeitamente todos os padrões recomendados para a aplicação de águas na irrigação. Quanto ao permeado do BRM, nos quesitos de concentrações de cloretos e fosfato, o mesmo ultrapassa os limites estabelecidos. Por outro lado, os demais parâmetros atendem aos limites. A importância da remoção de cloretos se justifica uma vez que a presença destes íons pode causar a “queima” das folhas quando a água de irrigação é pulverizada diretamente sobre as plantas (EPA, 2012).

4.2.4 Reúso industrial

A utilização de efluentes tratados para reduzir o consumo de água bruta e a quantidade de efluentes gerados pode se tornar uma solução para o problema da falta de recursos hídricos, sobretudo nas indústrias onde o consumo de água é significativo, como têxtil, aço, papel e química (DILAVÉ et al., 2018). O reúso para fins industriais deve ser analisado de forma individual para cada setor industrial, em virtude de que para cada ramo industrial tem-se padrões de qualidade específicos. Deste modo serão comparados os resultados deste trabalho com algumas possíveis áreas de reúso industrial.

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA) publicou em 1992 um manual com diretrizes para reutilização de água. Neste documento são apresentados requisitos

de qualidade da água aplicadas a processos industriais para os principais setores que demandam grandes volumes de água para seu desenvolvimento.

Na Tabela 17 são comparados os requisitos de qualidade da água para processos industriais (papel e celulose, química, petroquímica e carvão, têxtil e cimenteira) com os permeados do BRM, NF e OI, avaliados neste trabalho.

Tabela 17 - Comparação do permeado do BRM, NF e OI com os requisitos de qualidade das águas para processos industriais (EPA, 1992).

Parâmetros de qualidade	Papel e celulose (branqueamento)	Química	Petroquímica e Carvão	Têxtil	Cimenteira	Permeado BRM	Permeado NF	Permeado OI
Nitrato (mg.L⁻¹)	SL ^a	< 5	SL	SL	< 250	9,79	4,54	0,66
Cloretos (mg.L⁻¹)	< 200	< 500	< 300	< 250	SL	67,64	12,58	4,86
Alcalinidade (mg.L⁻¹)	SL	< 125	SL	< 100	< 400	11,34	0,97	0,81
SST (mg.L⁻¹)	< 10	< 5	< 10	< 5	< 500	ND ^b	ND	ND
Cor (PtCo)	< 30	< 20	SL	< 5	SL	65,22	2	2
pH	6 - 10	6,2 – 8,3	6 - 9	6 - 9	6,5 – 8,5	8,4	6,8	6,8

Fonte: Elaborado pelo autor, 2018. a – Sem limite; b – Não detectado.

De acordo com os dados apresentados na Tabela 17, os permeados de NF e OI atendem os parâmetros analisados para todos os processos industriais considerados. Observa-se, inclusive, que a tecnologia do BRM produz permeado com qualidade suficiente para atender todos os requisitos dos processos industriais de petroquímica e carvão e cimenteira. Os valores de nitrato e pH para processos da indústria química não foram atendidos, assim como o requisito de cor para os processos da indústria de papel e celulose, química e têxtil.

4.2.5 Padrões internacionais de qualidade de água de reúso

A partir da análise da Tabela 18 percebe-se que para todos os parâmetros estipulados pelas legislações internacionais analisados neste trabalho os permeados produzidos atenderiam aos padrões exigidos. Os resultados demonstram uma excelente qualidade dos permeados produzidos, sobretudo após o uso da NF e OI, indicando que o efluente final poderia ser aplicado as diversas formas de reúso previstos nas legislações. É importante ressaltar que as legislações internacionais podem servir de referência na ausência de legislação nacional ou podem servir de modelo para futuras publicações nacionais.

5 CONCLUSÕES

Com relação aos resultados obtidos na operação dos processos de nanofiltração e osmose inversa como pós-tratamento de efluente de biorreator à membrana tratando esgoto sanitário, pode-se concluir que:

- Nos processos de NF e OI a qualidade do permeado produzido indica uma eficiência satisfatória visto que obteve-se bons resultados de remoção média de cor de 96,93% e 96,93%, nitrito de 64,52% e 90,32%, nitrato de 53,63% e 93,26%, fosfato de 96,71% e 94,77% e COD de 88,58% e 77,43%, para NF e OI, respectivamente, além de remover coliformes totais e termotolerantes ao nível de não serem detectados no permeado gerado por ambos os processos.
- Em relação à turbidez, nitrogênio amoniacal e DQO o permeado do BRM já apresentava elevado grau de remoção, com eficiência média de remoção de 99,8%, 98,1% e 97,5%, respectivamente.
- Referente aos resultados alcançados na comparação da qualidade dos permeados produzidos com parâmetros de qualidade da água, a combinação das tecnologias de BRM e NF/OI mostrou grande potencial para produção de água de reúso, especialmente para aplicação industrial, tal como nas indústrias têxtil e de papel, assim como para fins agrícolas, além de atender aos padrões estabelecidos por legislações internacionais.
- Além do mais, pode-se dizer inclusive que os permeados produzidos a partir da associação das tecnologias BRM e NF/OI apresentam alto grau de qualidade, permitindo a reutilização dos efluentes tratados para fins mais nobres, como água potável. Isso pode ser afirmado considerando que os permeados da NF e OI atenderam os padrões de qualidade de águas para consumo humano (PRC nº 5, de 28 de setembro de 2017) analisados neste trabalho.
- Sendo assim, essa tecnologia surge não somente com uma solução para o tratamento de efluentes e assim sanar um grande problema do saneamento brasileiro, mas também como uma solução para as regiões que sofrem com problemas de escassez de recursos hídricos, uma vez que esta tecnologia pode-se gerar um efluente com elevado potencial de reutilização para fins diversos.

Tendo em vista os resultados obtidos nesse trabalho, conclui-se que os processos de NF e OI como proposta para o pós-tratamento de esgoto sanitário apresentam benefícios técnicos, ambientais e sociais. Do ponto de vista técnico, os processos cumprem satisfatoriamente seu

papel no tratamento de efluente. Do ponto de vista ambiental, os processos contribuem indiretamente para a preservação do meio ambiente por meio da remoção de poluentes que poderiam prejudicar os ecossistemas naturais. E, por fim, do ponto de vista social, os processos de NF e OI promovem a salubridade ambiental e saúde pública, além da possibilidade de suprirem as necessidades de regiões que carecem de recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. NBR nº 13.969, de 30 out. 1997. **Tanques sépticos**: unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos; projeto, construção e operação. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

AHMAD, A.I. et al. Development of a highly hydrophilic nanofiltration membrane for desalination and water treatment. **Desalination**, [s.l.], v. 168, p.215-221, ago. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2004.07.001>.

ALTURKI, Abdulhakeem Ali et al. Combining MBR and NF/RO membrane filtration for the removal of trace organics in indirect potable water reuse applications. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 365, n. 1-2, p.206-215, dez. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2010.09.008>.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS - ANA. **Conservação e uso da água em edificações**. Brasília-DF:ANA, 2005

ANDRADE, L. H. et al. Reuse of dairy wastewater treated by membrane bioreactor and nanofiltration: technical and economic feasibility. **Brazilian Journal Of Chemical Engineering**, [s.l.], v. 32, n. 3, p.735-747, set. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-6632.20150323s00003133>.

ARAGÜÉS, R.; A. et. al. **Calidad de agua para riego**. I: criterios generales. Zaragoza: ITEA, 1979.p.3-17.

ASLAM, Muhammad et al. Membrane bioreactors for wastewater treatment: A review of mechanical cleaning by scouring agents to control membrane fouling. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 307, p.897-913, jan. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2016.08.144>.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W.. **A qualidade de água na agricultura**. Campina Grande: UFPB, p. 208, 1991.

BELLI, T. J. **Biorreator à membrana em batelada sequencial para a remoção de nutrientes de esgoto sanitário**: desempenho do tratamento, colmatção das membranas e estratégias de otimização. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2015.

BHAGOWATI, Biswajit; AHAMAD, Kamal Uddin. A review on lake eutrophication dynamics and recent developments in lake modeling. **Ecohydrology & Hydrobiology**, [s.l.], p.3-16, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.03.002>.

BOURGEOUS, Keith N; DARBY, Jeannie L; TCHOBANOGLIOUS, George. Ultrafiltration of wastewater: effects of particles, mode of operation, and backwash effectiveness. **Water Research**, [s.l.], v. 35, n. 1, p.77-90, jan. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1354\(00\)00225-6](http://dx.doi.org/10.1016/s0043-1354(00)00225-6).

CARTAGENA, Pablo et al. Reduction of emerging micropollutants, organic matter, nutrients and salinity from real wastewater by combined MBR–NF/RO treatment. **Separation And Purification Technology**, [s.l.], v. 110, p.132-143, jun. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2013.03.024>.

CHOI, Byeong Gyu; KIM, David Inhyuk; HONG, Seungkwan. Fouling evaluation and mechanisms in a FO-RO hybrid process for direct potable reuse. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 520, p.89-98, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2016.07.035>.

CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS - CNRH. Resolução nº 54, de 2005. **Estabelece critérios gerais para reuso de água potável..** Brasília , 2005.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE - CNRH. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011. **Condições e padrões de lançamento de efluentes.** Brasília, 2011.

CUNHA, Iara Nunes et al. Aspectos regulatórios para reúso de água no brasil. In: congresso brasileiro de gestão ambiental, 3., 2012, Goiânia. **Anais...** Goiânia: IBEAS, 2015. p. 1 - 7. Disponível em: <<http://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2012/VIII-005.pdf>>. Acesso em: 14 set. 2018.

DEZOTTI, Márcia; SANT'ANNA JR., Geraldo Lippel; BASSIN, João Paulo. **Processos biológicos avançados:** para tratamento de efluentes e técnicas de biologia molecular para o estudo da diversidade microbiana.. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. x, 357 p.

DILAVER, Mehmet et al. Hot wastewater recovery by using ceramic membrane ultrafiltration and its reusability in textile industry. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 171, p.220-233, jan. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.015>.

EL-FADEL, M. et al. Impact of SRT on the performance of MBRs for the treatment of high strength landfill leachate. **Waste Management**, [s.l.], v. 73, p.165-180, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2017.12.003>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Qualidade da água de irrigação**. Cruz das Almas: Embrapa, 2010. 234 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Reuso da água produzida na irrigação do abacaxizeiro ornamental**: efeitos sobre as características químicas do solo. Fortaleza: Embrapa, 2018. 29 p.

EPA - U.s. Environmental Protection Agency. **Manual: Guidelines For Water Reuse**. Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 1992.

EPA - U.s. Environmental Protection Agency. **2012 guidelines for water reuse.**, Washington, D.C.: U.S. Environmental Protection Agency, 2012.

EPA - Environment Protection Agency. **2003 guidelines for environment management**: Use of Reclaimed water. Victoria: EPA, 2003.

ERNST, M. et al. An integrated wastewater treatment and reuse concept for the Olympic Park 2008, Beijing. **Desalination**, [s.l.], v. 202, n. 1-3, p.293-301, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.067>.

FALIZI, Nasim Jalilnejad et al. Evaluation of MBR treated industrial wastewater quality before and after desalination by NF and RO processes for agricultural reuse. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 22, p.103-108, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.01.015>.

FARIAS, Elizabeth L.; HOWE, Kerry J.; THOMSON, Bruce M.. Effect of membrane bioreactor solids retention time on reverse osmosis membrane fouling for wastewater reuse. **Water Research**, [s.l.], v. 49, p.53-61, fev. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2013.11.006>.

GONÇALVES, Ricardo F. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, RIMA, 2003. Disponível em: <<https://www.finep.gov.br/images/apoio-e-financiamento/historico-de-programas/prosab/ProsabRicardo.pdf>>. Acesso em: 31 ago. 2018.

GÜNDOĞDU, Merve et al. 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**, [s.l.], fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.02.009>.

HABERT, Alberto Cláudio; BORGES, Cristiano Piacsek; NOBREGA, Ronaldo. **Processos de Separação por Membranas**. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. 181 p.

HACIFAZLIOĞLU, M.c. et al. Effect of pressure on desalination of MBR effluents with high salinity by using NF and RO processes for reuse in irrigation. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 25, p.22-27, out. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.06.001>.

HESPANHOL, Ivanildo; MIERZWA, José Carlos; PIRES, Lienne Carla. **Proposta de Reuso de Esgotos tratados Pela Usina Degeração de Energia Carioba – I**. (Parecer Técnico). São Paulo, 2001. p.1-36.

HILAL, N. et al. A comprehensive review of nanofiltration membranes: Treatment, pretreatment, modelling, and atomic force microscopy. **Desalination**, [s.l.], v. 170, n. 3, p.281-308, nov. 2004. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2004.01.007>.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Esgoto: saneamento principais estatísticas**. 2018. Disponível em: <<http://www.tratabrasil.org.br/saneamento/principais-estatisticas/no-brasil/esgoto>>. Acesso em: 26 out. 2018.

JIN, Xuewen et al. Coking wastewater treatment for industrial reuse purpose: Combining biological processes with ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis. **Journal Of Environmental Sciences**, [s.l.], v. 25, n. 8, p.1565-1574, ago. 2013. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s1001-0742\(12\)60212-5](http://dx.doi.org/10.1016/s1001-0742(12)60212-5).

JOO, Sung Hee; TANSEL, Berrin. Novel technologies for reverse osmosis concentrate treatment: A review. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 150, p.322-335, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.027>.

JUDD, Simon. The status of membrane bioreactor technology. **Trends In Biotechnology**, [s.l.], v. 26, n. 2, p.109-116, fev. 2008. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tibtech.2007.11.005>.

JUDD, S. **The MBR Book: Principles and Applications of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment**. 2º ed – Elsevier Ltd, Oxford, UK, 2011.

JUDD, S.j.. The status of industrial and municipal effluent treatment with membrane bioreactor technology. **Chemical Engineering Journal**, [s.l.], v. 305, p.37-45, dez. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cej.2015.08.141>.

JUDD, Simon; JEFFERSON, Bruce. **Membranes for industrial wastewater recovery and re-use**. Oxford: Elsevier, 2003. 291 p.

KATSOYIANNIS A, SAMARA C. O destino do carbono orgânico dissolvido (DOC) no processo de tratamento de águas residuais e sua importância na remoção de contaminantes de águas residuais. **Environ Sci Pollut Res Int**. 2007; 14 : 284-92.

KOSUTIC, K; DOLAR, D; KUNST, B. On experimental parameters characterizing the reverse osmosis and nanofiltration membranes' active layer. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 282, n. 1-2, p.109-114, 5 out. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2006.05.010>.

KUCERA, Jane. **Reverse osmosis design, process, and applications for engineers**. Salem: Jonh Wiley & Sons, 2010. 416 p.

LI, Chen et al. Removal of PhACs and their impacts on membrane fouling in NF/RO membrane filtration of various matrices. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 548, p.439-448, fev. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2017.11.032>.

LU, Xiaofeng; BIAN, Xiaokai; SHI, Liuqing. Preparation and characterization of NF composite membrane. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 210, n. 1, p.3-11, dez. 2002. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0376-7388\(02\)00120-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0376-7388(02)00120-5).

MAESTRI, R. S. **Biorreator à membrana como alternativa para o tratamento de esgotos sanitários e reúso da água**. 2007. 101 p. Dissertação. (Mestrado em Engenharia Ambiental) Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis , 2007.

MAMO, Julian et al. Fate of NDMA precursors through an MBR-NF pilot plant for urban wastewater reclamation and the effect of changing aeration conditions. **Water Research**, [s.l.], v. 102, p.383-393, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2016.06.057>.

MANAGÓ, Bruna Luiza. **TREATMENT OF PULP WASTEWATER BY MEMBRANE BIOREACTOR**. 2018. 84 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Universidade Estadual do Centro-oeste, Irati, 2018.

MANNINA, Giorgio et al. Integrated fixed-film activated sludge membrane bioreactors versus membrane bioreactors for nutrient removal: A comprehensive comparison. **Journal Of Environmental Management**, [s.l.], v. 226, p.347-357, nov. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.006>.

METCALF & EDDY. **Tratamento de efluentes e recuperação de recursos**. 5.ed. Porto Alegre: AMGH, 2016. xxvii, 1980p.

MINISTÉRIO DA SAÚDE - MS. Portaria de Consolidação nº 5, de 28 de setembro de 2017. **Consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde**. Brasília, 2017.

MOHAMMAD, A.w. et al. Nanofiltration membranes review: recent advances and future prospects. **Desalination**, [s.l.], v. 356, p.226-254, jan. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.10.043>.

OH, Hyun-suk; LEE, Chung-hak. Origin and evolution of quorum quenching technology for biofouling control in MBRs for wastewater treatment. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 554, p.331-345, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2018.03.019>.

PARSONS, Simon; JEFFERSON, Bruce. **Introduction to potable water treatment processes**. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2006. 190 p.

PORTER, Mark C.. **Handbook of industrial membrane technology**. Pleasanton, California: Noyes Publications, 1988. 604 p.

QIN, Jian-jun et al. New option of MBR-RO process for production of NEWater from domestic sewage. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 272, n. 1-2, p.70-77, mar. 2006. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2005.07.023>.

ROBINSON, Tony. Membrane bioreactors: nanotechnology improves landfill leachate quality. **Filtration & Separation**, [s.l.], v. 44, n. 9, p.38-39, nov. 2007. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0015-1882\(07\)70288-4](http://dx.doi.org/10.1016/s0015-1882(07)70288-4).

ROCCARO, Paolo; VERLICCHI, Paola. Wastewater and reuse. **Current opinion in environmental science & health**, [s.l.], v. 2, p.61-63, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.008>.

RODRIGUES, Raquel dos Santos. **As dimensões legais e institucionais do reúso de água no Brasil**: proposta de regulamentação do reúso no Brasil. Dissertação (Mestrado) EPUSP-PHD - São Paulo, 2005. 177 p.

SALGOT, Miquel; FOLCH, Montserrat. Wastewater treatment and water reuse. **Current Opinion In Environmental Science & Health**, [s.l.], v. 2, p.64-74, abr. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.005>.

SALIBA, R. et al. Stakeholders' attitude towards the reuse of treated wastewater for irrigation in Mediterranean agriculture. **Agricultural Water Management**, [s.l.], v. 204, p.60-68, maio 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2018.03.036>.

SANTOS, Franciele dos. **Processos de nanofiltração e osmose inversa para pós-tratamento de efluente de biorreator à membrana**. 2015. 102 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SANTOS, Hilton Felício dos; MANCUSO, Pedro Caetano Sanches. **Reúso de água**. São Paulo: Manole, c2003. 579 p. (Coleção ambiental.).

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

SEPEHRI, Arsalan; SARRAFZADEH, Mohammad-hosseini. Effect of nitrifiers community on fouling mitigation and nitrification efficiency in a membrane bioreactor. **Chemical Engineering And Processing - Process Intensification**, [s.l.], v. 128, p.10-18, jun. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2018.04.006>.

SERT, Gökhan et al. Investigation of mini pilot scale MBR-NF and MBR-RO integrated systems performance - preliminary field tests. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 12, p.72-77, ago. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.06.008>.

SERT, Gökhan et al. Performances of some NF and RO membranes for desalination of MBR treated wastewater. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], v. 16, p.193-198, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2016.11.009>.

SILVA, Layane Priscila de Azevedo. **Utilização de membranas no pós-tratamento de esgoto para reúso do permeado e aproveitamento do concentrado**. 2014. 128 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

TAM, L.s. et al. A pilot study for wastewater reclamation and reuse with MBR/RO and MF/RO systems. **Desalination**, [s.l.], v. 202, n. 1-3, p.106-113, jan. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2005.12.045>.

TANG, Chuyang Y.; CHONG, T.h.; FANE, Anthony G.. Colloidal interactions and fouling of NF and RO membranes: A review. **Advances In Colloid And Interface Science**, [s.l.], v. 164, n. 1-2, p.126-143, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cis.2010.10.007>.

TELLES, Dirceu D'Alkmin; COSTA, Regina Helena Pacca Guimarães; NUVOLARI, Ariovaldo. **Reúso da água: conceitos, teorias e práticas**. 2. ed. São Paulo: E. Blucher, 2010. 408 p.

TOMASINI, Horacio R. et al. Concentrate management for integrated MBR-RO process for wastewater reclamation and reuse-preliminary tests. **Journal Of Water Process Engineering**, [s.l.], p.70-77, ago. 2017. Elsevier <http://dx.doi.org/10.1016/j.jwpe.2017.07.020>.

UN WATER. **Informe mundial de las naciones unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2018**: soluciones basadas em la naturaleza para la gestión del agua. Paris: UNESCO, 2018.

UN WATER. **Relatório mundial das nações unidas sobre o desenvolvimento dos recursos hídricos 2017**. Itália: UNESCO. 2017.

VAN VOORTHUIZEN, Ellen M.; ZWIJNENBURG, Arie; WESSLING, Matthias. Nutrient removal by NF and RO membranes in a decentralized sanitation system. **Water Research**, [s.l.], v. 39, n. 15, p.3657-3667, set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2005.06.005>.

VISVANATHAN, C.; AIM, R. Ben; PARAMESHWARAN, K.. Membrane separation bioreactors for wastewater treatment. **Critical Reviews In Environmental Science And Technology**, [s.l.], v. 30, n. 1, p.1-48, jan. 2000. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/10643380091184165>.

VON SPERLING, Marcos. **Introdução a qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 4.ed. Belo Horizonte: UFMG, 2014. 472 p. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias ; 1).

WHO - World Health Organization. **Reuse of effluents:** methods of wastewater treatment and health safeguards. Of a WHO meeting of experts. Technical report series.N° 517. Geneva, 1973.Disponível em:

<http://apps.who.int/iris/bitstream/handle/10665/41032/WHO_TRS_517.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 31 ago. 2018.

WISNIEWSKI, Christelle. Membrane bioreactor for water reuse. **Desalination**, [s.l.], v. 203, n. 1-3, p.15-19, fev. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2006.05.002>.

XIAO, Kang et al. Engineering application of membrane bioreactor for wastewater treatment in China: Current state and future prospect. **Frontiers Of Environmental Science & Engineering**, [s.l.], v. 8, n. 6, p.805-819, 8 nov. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11783-014-0756-8>.

YANG, Linyan et al. Removal of haloacetic acids from swimming pool water by reverse osmosis and nanofiltration. **Water Research**, [s.l.], v. 116, p.116-125, jun. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2017.03.025>.

YOON, y; LUEPTOW, R. Removal of organic contaminants by RO and NF membranes. **Journal Of Membrane Science**, [s.l.], v. 261, n. 1-2, p.76-86, 15 set. 2005. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2005.03.038>.