

UNIVERSIDADE NOVE DE JULHO – UNINOVE
PROGRAMA DE MESTRADO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

SÉRGIO YOSHIYUKI NAKAMURA

**APLICAÇÃO DE UMA TÉCNICA PARA MELHORIA DA QUALIDADE DO
SISTEMA DE PRODUÇÃO DA ÁGUA DE REUSO: UM ESTUDO DE CASO DE
UMA ETE DO ESTADO DE SÃO PAULO**

**São Paulo
Fevereiro de 2017**

SÉRGIO YOSHIIYUKI NAKAMURA

**APLICAÇÃO DE UMA TÉCNICA PARA MELHORIA DA QUALIDADE DO
SISTEMA DE PRODUÇÃO DA ÁGUA DE REUSO: UM ESTUDO DE CASO DE
UMA ETE DO ESTADO DE SÃO PAULO**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – UNINOVE, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Prof. José Carlos Curvelo Santana, Dr. - Orientador
Prof. Silvério Catureba da Silva Filho, Dr. - Co-Orientador

São Paulo
Fevereiro de 2017

Nakamura, Sérgio Yoshiyuki.

Aplicação de uma técnica para melhoria da qualidade do sistema de produção da água de reuso: um estudo de caso de uma ETE do Estado de São Paulo. / Sérgio Yoshiyuki Nakamura. 2017.

80 f.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho - UNINOVE, São Paulo, 2017.

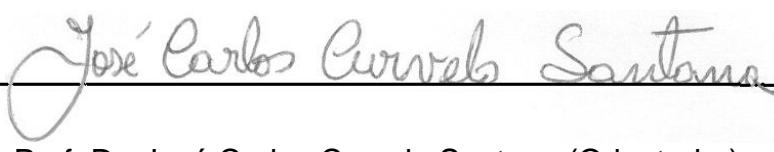
Orientador (a): Prof. Dr. José Carlos Curvelo Santana.

1. Tratamento de esgoto sanitário. 2. Membranas filtrantes. 3. Água de reuso.

I. Santana, José Carlos Curvelo. II. Titulo.

CDU 658.5

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Sérgio Yoshiyuki Nakamura em Engenharia de Produção.



Prof. Dr. José Carlos Curvelo Santana (Orientador)



PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

DE

Sérgio Yoshiyuki Nakamura

Título da Dissertação: Aplicação de uma Técnica para Melhoria da Qualidade do Sistema de Produção de Água de Reuso: Um Estudo de Caso de uma ETE do Estado de São Paulo.

A Comissão Examinadora, Composta Pelos Professores Abaixo, Considero(a) o(a) candidato(a) Sérgio Yoshiyuki Nakamura APROVADO

São Paulo, 22 de fevereiro de 2017.

Prof(a). Dr(a).José Carlos Curvelo Santana (UNINOVE/PPGEP)

Prof(a). Dr(a).Giovana da Silva Padilha (UNICAMP/FCA)

Prof(a). Dr(a).Ausdinir Danilo Bortolozo (UNICAMP/FCA)

Dedico este trabalho aos meus familiares, razão de meus esforços e crescimento, e aos meus amigos, que sempre me incentivaram em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Carlos Curvelo Santana, pelos valiosos ensinamentos e pela calma e tranquilidade transmitida. Minha sincera gratidão e admiração.

À minha esposa, Fumiko Nakamura, pela compreensão de minhas ausências do convívio familiar em determinados momentos.

À minha filha, Amanda Tiemi Nakamura, que sempre foi um exemplo de perseverança na busca de seus objetivos, mostrando-me o valor das conquistas difíceis de serem alcançadas.

Ao meu avô, Kenichi Nakamura, que participou intensamente de minha educação básica e mostrou-me o valor do estudo.

Aos meus amigos e amigas, companheiros de estudos, que compartilharam comigo suas horas de estudo e conhecimentos adquiridos.

À Universidade Nove de Julho, pela oportunidade para obtenção deste título.

A todos que contribuíram, direta e indiretamente, para a realização deste objetivo de minha vida.

A persistência é o caminho do êxito.
(Charles Chaplin)

RESUMO

A atual crise mundial de água faz com que a conscientização sobre o problema de sua finitude esteja presente em discussões, sejam elas governamentais, da iniciativa privada, de pesquisas, ecologia ou sustentabilidade. A busca por melhores formas de consumo e alternativas de tratamento e produção de água de reuso vem ganhando importância e intensificando os estudos nestas áreas. Este trabalho teve por objetivo analisar as técnicas de filtragem por membranas para tratamento dos efluentes de esgoto sanitário gerados por Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), verificando a viabilidade técnica e econômica na melhoria da qualidade da produção de água de reuso no Brasil, especificamente no Estado de São Paulo. Este Estado foi selecionado porque, nos anos de 2014 e 2015, passou por uma estiagem atípica que apresentou reduzidos índices pluviométricos não contabilizados há décadas, resultando em um possível racionamento de água para a população. Foi realizada uma pesquisa exploratória sobre membranas filtrantes e suas aplicações e uma entrevista in loco com o responsável técnico de uma grande empresa de saneamento, que produz água de reuso à partir de efluentes sanitários com uma qualidade 50% superior ao exigido pelos padrões de potabilidade, utilizando esta tecnologia. Os resultados deste trabalho indicaram estimativas favoráveis para o investimento na utilização de membranas filtrantes para a produção de água de reuso. O seu custo na planta foi estimado em 0,10 R\$ / m³ e o preço médio de venda de 1,70 R\$ / m³, permitindo economia financeira para o consumidor final, neste caso de 90,26 % / m³, e para o investidor, por estas estimativas, um retorno de investimento atrativo, com *payback* em 7,31 anos, para um contrato de 41 anos.

Palavras chave: Tratamento de esgoto sanitário; membranas filtrantes; água de reuso.

ABSTRACT

The current global water crisis makes awareness of the problem of its finiteness present in discussion, whether governmental, private, research, ecology or sustainability. The search for better forms of consumption and alternatives of treatment and production of reuse water is increasing importance and intensifying studies in those areas. The objective of this work was to analyze membrane filtration techniques for the treatment of sewage effluents generated by ETE, verifying the technical and economic feasibility of improving the quality of reuse water production in Brazil, specifically in the State of São Paulo, verifying the technical and economic viability. This state was selected because, in the years 2014 and 2015, it experienced an atypical drought that presented low rainfall indices that had not been counted for decades, resulting in a possible rationing of water for the population. An exploratory research was carried out about filter membranes and their applications and an on-site interview with the technical leader of a large sanitation company that produces reuse water from sanitary effluents with a quality 50% higher than required by the standards of potability using this technology. The results of this work indicated positive estimates for the investment in the use of filter membranes for the production of reuse water. Its cost in the plant was estimated at 0.10 R\$ / m³ and the average sale price of 1,70 R\$ / m³, allowing financial savings for the final consumer, in this case 90.26% / m³, and for the investor, according to those estimates, an attractive return on investment, with a payback of 7.31 years, for a 41-year contract.

Keywords: Treatment of sanitary sewage; filtration membranes; reuse water.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Pesquisa final.....	23
Figura 2 - Pesquisa inicial	24
Figura 3 - Distribuição espacial e quantitativa da água no planeta	25
Figura 4 - Demanda consuntiva total no Brasil (m ³ /s)	28
Figura 5 - Tratamento de água.....	36
Figura 6 - Tratamento de esgoto fase líquida.....	38
Figura 7 - Tratamento de esgoto fase sólida	38
Figura 8 - Características dos processos de separação por membranas	44
Figura 9 - Parte do aparelho que contém os filtros moleculares de membrana e um amostrador de gravidade convencional.....	45
Figura 10 - Bomba de vácuo	59
Figura 11 - Conjunto de filtração	60
Figura 12 - Membrana de filtração	60
Figura 13 - Conexão dos equipamentos para filtração	61
Figura 14 - Curva de filtração	67
Figura 15 - Efluente da ETE e permeado obtido da filtração por membranas.....	69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistema Tarifário - RMSP	52
Tabela 2 - Encargos Sociais e Trabalhistas.....	53
Tabela 3 - Dados da planta - processo de tratamento por membranas filtrantes ...	54
Tabela 4 - Custo mensal de operação da planta	62
Tabela 5 - Custo real mensal de produção	64
Tabela 6 - Comparativo Efluente x Permeado x Padrões	68

LISTA DE ANEXOS

ANEXO I - Tabela de padrão microbiológico da água para consumo humano.....	78
ANEXO II - Tabela de padrão de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção.....	79
ANEXO III - Padrão para o despejo de efluentes no esgoto.....	80

LISTA DE SIGLAS

ANA - Agência Nacional de Águas
APHA - American Public Health Association
BNDS - Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCM - Custo do Conjunto de Membranas (US\$)
CE - Comunidade Europeia
CEF - Custo Estimado com Funcionários (US\$/mês)
CEFE - Custo estimado com Funcionários e Encargos (US\$/mês)
CET - Custo Estimado do Tratamento Mensal (US\$/mês)
CETA - Custo Estimado do Tratamento Anual (US\$/ano)
CETAR - Custo Estimado Total da Água de Reuso (US\$/m³)
CETARR - Custo Estimado Total da Água de Reuso em Reais(R\$/m³)
CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CETM - Custo Estimado do Tratamento e Manutenção Mensal (US\$/mês)
CETMA - Custo Estimado do Tratamento e Manutenção Anual (US\$/ano)
CF - Coliformes Fecais
CMAR - Custo Mínimo da Água de Reuso (US\$/m³)
CMARR - Custo Mínimo da Água de Reuso em Reais (R\$/m³)
CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente
CTP - Custos Totais da Planta (US\$/mês)
CTPR - Custos Totais da Planta em Reais (R\$/mês)
DBO - Demanda Biológica de Oxigênio
DQO - Demanda Química de Oxigênio
EF - Encargos Financeiros sobre salários (%)
ETE - Estação de Tratamento de Esgoto
IIP - Investimento Inicial do Projeto (R\$)
IME - Investimento Mensal Estimado (US\$/mês)
IMER - Investimento Mensal Estimado em Reais (R\$/mês)
LME - Lucro Mensal Estimado (R\$/m³)
LU - Lucro Unitário (R\$/m³)
MMA - Ministério do Meio Ambiente
OD - Oxigênio Dissolvido
ONU - Organização das Nações Unidas

PAR - Produção de Água de Reuso ($m^3/mês$)
PCP - Período Contratual do Projeto (Anos)
PGEM - Percentual de Gasto Estimado em Manutenção (%)
pH - Potencial Hidrogeniônico
PMV - Preço Médio de Venda (R\$/ m^3)
PSNT - Nanotubos de Sílica Fosforilada
PT - Fósforo Total
PVDF - Fluoreto de Polivinilideno
QCM - Quantidade de Conjuntos de Membranas (Unidade)
ROI - Return On Investment (R\$)
SABESP - Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SM - Salários Médios (US\$)
SST - Sólidos Suspensos Totais
TFP - Total de Funcionários na Planta (3 turnos)
TVUCM - Tempo de Vida Útil do Conjunto de Membranas (Anos)
UASB - Upflow Anaerobic Sludge Blanket
UNESCO - United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization
VARP - Vazão de Água de Reuso na Planta (m^3/s)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	Objetivo	18
1.1.1	Objetivos Específicos.....	18
1.2	Justificativa	18
1.3	Estrutura do Trabalho.....	19
1.4	Identificação do uso da técnica de filtragem por membranas em efluentes sanitários na literatura	21
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	25
2.1	Importância da Água	25
2.2	Reuso da Água.....	29
2.3	Tratamento da Água no sistema produtivo de água potável	35
2.4	Tratamento de esgoto – geração de efluentes	37
2.4.1	Técnicas convencionais de tratamento de esgoto	39
2.5	Técnicas de separação por membranas	42
2.6	Aplicações utilizando membranas filtrantes.....	44
3.	METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA.....	49
3.1	Pesquisa Bibliográfica	49
3.2	Elaboração do Questionário	50
3.3	Cálculos dos custos do processo	52
3.4	Experimentos com membranas filtrantes	59
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	62
4.1	Custos	62
4.2	Experimentos de filtração do efluente e esgoto de uma ETE no sistema de membranas filtrantes.....	66
5.	CONCLUSÕES	70
5.1	Sugestões para trabalhos futuros.....	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	ANEXOS	78

1. INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório da UNESCO (2015), os recursos hídricos são essenciais para o crescimento da economia e combate à pobreza, mas também são diretamente afetados pelo desenvolvimento econômico. Para encontrar uma solução para esse desafio, deve-se buscar um equilíbrio entre o suprimento e a demanda da água.

Segundo Suassuna (2004), o planeta é constituído de 1/3 de terra e 2/3 de água. Dessa fração hídrica, 97% são constituídos pelas águas dos oceanos e mares, portanto águas salgadas, restando apenas 3% de água doce.

Do percentual de água doce existente, grande parte está localizada nas calotas polares, geleiras e *icebergs*, sem condições para a captação e o transporte dessa água para uso das populações. O que resta são aproximadamente 0,3% do total de água doce disponível, para serem utilizados pelos habitantes do planeta, hoje estimados em mais de 6 bilhões de pessoas (70% desse volume são destinados à irrigação, 20% à indústria e somente 10% ao consumo humano) (UNESCO, 2003; SUASSUNA, 2004).

O Brasil detém cerca de 12% da água doce de superfície mundial. O problema é que esse volume está desigualmente distribuído: 70% estão na Amazônia, região com menos de 7% da população nacional, 15% na região Centro-Oeste, 6% na região Sul, 6% na região Sudeste e apenas 3% na região Nordeste (SUASSUNA, 2004).

O ano de 2015 foi marcado pela crise hídrica no Brasil, principalmente na região Sudeste, onde a estiagem prolongada do ano anterior acarretou uma diminuição drástica nos níveis dos reservatórios. Possibilidade de racionamento de água e de energia elétrica, devido às hidrelétricas, levaram todos a repensar o seu uso e alternativas para aumento e reuso deste bem tão necessário (G1 Fantástico, 2015; G1 Economia, 2015).

No Estado de São Paulo, segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2013), no ano de 2010, o uso consuntivo da água estava dividido da seguinte forma: 37% urbano, 37% industrial, 22% irrigação, 3% animal e 1% de uso rural. Além disto, até 2008, 11% da sua população não era atendida por rede de esgoto e 38% do

volume de esgoto coletado não era tratado, o que representa uma vulnerabilidade potencial de contaminação dos recursos hídricos.

Enquanto a demanda por água aumenta exponencialmente – espera-se um aumento por volta de 55% até 2050, cerca de 20% das fontes mundiais de água subterrânea já estão sendo superexploradas, devido a falta de um gerenciamento sustentável dos recursos. A irrigação intensa de plantações, a liberação descontrolada de pesticidas e produtos químicos em cursos d’água e a ausência de tratamento de esgoto – que são o caso para 90% das águas residuais em países em desenvolvimento – são provas dessa situação (UNESCO, 2015).

A política de importar água de bacias cada vez mais distantes para satisfazer o crescimento da demanda começou há mais de dois mil anos com os romanos, dando origem aos seus famosos aquedutos. A prática ainda persiste, resolvendo, precariamente, o problema de abastecimento de água de uma região, em detrimento daquela que a fornece. As soluções mais modernas em termos de gestão de recursos hídricos consistem em tratar e reusar os esgotos já disponíveis nas próprias áreas urbanas para complementar o abastecimento público (HESPAÑOL, 2015).

Como citado por Hespanhol (2015), o reuso da água para fins não potáveis já é uma prática em países desenvolvidos e em desenvolvimento.

O impacto do lançamento de efluentes originados de estações de tratamento de esgotos em corpos d’água é motivo de grande preocupação para a maioria dos países. Uma série de legislações ambientais, critérios, políticas e revisões procuram influir tanto na seleção dos locais de descarga quanto no nível de tratamento exigido para garantir que os impactos ambientais provocados pela disposição destes efluentes tratados sejam aceitáveis (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005a).

Estudos estão sendo realizados para melhorar a qualidade do efluente do tratamento do esgoto sanitário, como o de Passarini (2011), que por microfiltração, utilizando membranas, reutilizou o líquido microfiltrado, devidamente caracterizado, na irrigação de culturas de milho e feijão.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem por objetivo verificar a viabilidade técnica e econômica para melhoria da qualidade da produção de água de reuso obtida de efluentes do tratamento de esgoto sanitário com a utilização de técnicas de filtragem por membranas.

1.1.1 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos:

- Realizar pesquisas secundárias em outros trabalhos sobre qualidade da água de reuso;
- Realizar pesquisas verticais sobre tratamento de efluentes com técnicas de filtragem por membranas;
- Realizar análises de eficiência e custos do processo de produção de água de reuso baseado em membranas filtrantes;
- Realizar experimentos com efluentes de esgoto sanitário e técnica de filtragem por membranas, avaliando os resultados da modelagem e comparações com normas vigentes.

1.2 Justificativa

A atual crise hídrica pela qual o Estado de São Paulo atravessa faz com que medidas sejam tomadas para minimizar a falta de água para o consumo humano. Como verificado, este consumo é de 37% do volume de água tratada do estado. O consumo industrial apresenta o mesmo percentual e o de irrigação é de 22%. Além disto, do total de esgoto coletado, 38% não é tratado (ANA, 2013).

Diante deste panorama, incentivar o sistema produtivo para o tratamento de esgoto, principalmente com a perspectiva de melhoria do seu efluente, para que o mesmo possa ser reutilizado, tornou-se um foco de pesquisa interessante a ser

abordado por este trabalho. A produção de água de reuso com qualidade e custos acessíveis, que possa substituir em parte o consumo industrial ou de irrigação, ou até aumentar a disponibilidade para o consumo humano, deve ser uma das prioridades do Brasil e do mundo.

Com isso, a situação hídrica mundial requer conscientização social e governamental e consequente atenção da Engenharia de Produção em alterações processuais no reuso de água, minimizando a escassez crescente de água para consumo humano. No tocante ao Estado de São Paulo, que passa por um período de estiagem fora dos padrões das últimas décadas, a busca por alternativas que possam minimizar a falta de água para o consumo humano é de suma importância. Assim, este trabalho propôs uma pesquisa e revisão na literatura, respondendo as seguintes questões:

As atuais técnicas de tratamento de esgoto sanitário produzem uma água de reuso de boa qualidade?

Esta qualidade pode ser alcançada até o nível de potabilidade?

A utilização da técnica de membranas filtrantes possui custos acessíveis?

Com base na pesquisa, as respostas prováveis e provisórias às questões enunciadas geraram neste trabalho as seguintes hipóteses:

Com a aplicação e os procedimentos das atuais técnicas de tratamento de esgoto sanitário não se obtém água de reuso de qualidade (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005a).

Com pós-tratamento do efluente, utilizando técnicas de filtragem por membranas, pode-se melhorar a qualidade da água de reuso obtida a partir do esgoto sanitário, chegando ao nível de potabilidade (HESPAÑHOL, 2015).

1.3 Estrutura do Trabalho

A estrutura deste trabalho dividiu-se em três partes. Na primeira, realiza-se uma pesquisa exploratória horizontal sobre as técnicas atualmente utilizadas para tratamento de esgoto sanitário, realizando um levantamento na literatura sobre a

eficiência destas técnicas no mundo e particularmente no Brasil, concentrando no Estado de São Paulo.

Na segunda parte do trabalho, a pesquisa exploratória foca na obtenção de dados sobre água de reuso e a técnica de filtragem por membranas, com uma revisão da bibliografia contemporânea, com o objetivo de estabelecer considerações teóricas sobre esta técnica.

Na terceira parte do trabalho realiza-se experimentos e comparações de resultados da utilização das técnicas de filtragem por membranas baseadas nas atuais normas e padrões que norteiam o reuso da água.

Estas partes estão divididas nos seguintes capítulos, sequencialmente: Introdução, Fundamentação Teórica, Metodologia e Procedimentos de Pesquisa, Resultados e Discussões e Conclusões.

Capítulo 1 - Introdução: Neste capítulo apresenta-se uma visão geral do estudo, o objetivo, os objetivos específicos e a justificativa do trabalho, focado na importância da água para o ser humano, o crescimento mundial de sua demanda, sua escassez e a procura crescente de alternativas para suprir as demandas, com a necessidade notória da prática de reuso da água para os mais variados fins, com utilização de tecnologias que propiciem cada vez mais a sua sustentabilidade, ressaltando a falta de tratamento do esgotamento sanitário, assim como um melhor tratamento de seus efluentes, promovendo melhorias ambientais e econômicas.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica: Busca-se, neste capítulo, o levantamento literário de estudos pertinentes ao tema. Segundo o Capítulo 1, expõe-se a importância da água, sua situação mundial, sua distribuição e o crescente aumento de sua demanda. Define-se o reuso da água, o tratamento de água, o tratamento de esgoto e as técnicas que propiciam um melhor tratamento de efluentes sanitários, sendo neste último verificado o processo de separação por membranas. O reuso de efluentes para diversos fins, atendendo as regulamentações vigentes e melhorando a sua qualidade e aumentando o leque de aplicações.

Capítulo 3 – Metodologia e Procedimentos de Pesquisa: Descreve-se o método de pesquisa com o uso de palavras-chaves, realizando uma revisão na literatura com foco no assunto do trabalho, a metodologia de pesquisa em campo

utilizada, o planejamento experimental, os materiais e métodos de caracterização físico-química e de tratamento do efluente sanitário e a análise dos custos envolvidos.

Capítulo 4 – Resultados e Discussões: Este capítulo é destinado a apresentar as análises dos dados levantados, entre análises quantitativas e qualitativas, identificando se todos os objetivos foram alcançados e a viabilidade do estudo. Basicamente verifica-se o emprego de membranas filtrantes para obtenção de um permeado de qualidade, obtido do esgotamento sanitário.

Capítulo 5 – Conclusão: Conclui-se o trabalho a partir da discussão dos resultados obtidos e propõem-se direções para pesquisas futuras.

1.4 Identificação do uso da técnica de filtragem por membranas em efluentes sanitários na literatura

Realizadas pesquisas em duas bases de dados, Scopus (www.scopus.com) e ScienceDirect (www.sciencedirect.com), utilizando-se palavras-chaves combinadas em torno do foco da pesquisa. As palavras-chaves e suas combinações foram as seguintes:

- i. “*Membranes*”
- ii. “*Membranes and Water*”
- iii. “*Membranes and Water and Effluent*”
- iv. “*Membranes and Water and Effluent and Treatment*”
- v. “*Membranes and Water and Effluent and Treatment and Waste*”
- vi. “*Membranes and Water and Effluent and Treatment and Waste and Sanitary*”

A base de dados Scopus apresentou nesta pesquisa inicial uma quantidade superior de publicações, fazendo com que fossem realizadas pesquisas mais detalhadas nesta base.

Com a pesquisa realizada com a palavra chave “*Membranes*” ou “*Membranes and Water*”, as publicações, em sua grande maioria dos Estados Unidos, são artigos relacionados à bioquímica e genética, com pouca aplicabilidade no foco deste trabalho.

Introduzindo a palavra chave “*Effluent*” na pesquisa, o país que mais publicou passa ser a China, em assuntos ligados à ciência ambiental. Cabe ressaltar que o autor que mais publicou foi o espanhol Barcelo, D. O mesmo ocorreu adicionando-se a palavra “*Treatment*”, ficando a pesquisa como “*Membranes and Water and Effluent and Treatment*”.

A introdução da palavra “*Waste*” na pesquisa fez com que o título fonte da maioria das publicações focasse em investigações sobre água e não mais dessalinização, que era a tônica até então.

Finalmente, fechando a pesquisa em palavras chaves ligadas ao foco do trabalho, ficando “*Membranes and Water and Effluent and Treatment and Waste and Sanitary*”, o resultado encontrado na base de dados da Scopus foram publicações de artigos, em sua maioria nos Estados Unidos, com foco em ciência ambiental e título fonte como ciência e tecnologias da água, com o autor holandês van Lier, J.B. com mais publicações. Nota-se que o Brasil passa a integrar entre os cinco países que mais publicaram nesta linha.

Para verificação do estado da arte nesta linha de pesquisa, foram consideradas apenas as publicações de 2015 e 2016, resultando na China com maior número de publicações, 19, e o Brasil em segundo lugar com 10 publicações.

Realizou-se nova pesquisa em meados de 2016 na base de dados Scopus utilizando palavras-chaves combinadas em torno do foco da pesquisa. As palavras-chaves e suas combinações foram as mesmas utilizadas anteriormente:

Com relação à associação dos artigos, observou-se inicialmente a predominância na área médica, uma vez que membranas tiveram sua utilização originada nas intervenções médicas.

Quando a palavra “*water*” é inserida na pesquisa, já as associações dos artigos voltam-se às universidades, onde os estudos relacionados ao meio ambiente era o foco das pesquisas.

A partir da inserção da palavra “*effluent*”, as associações dos artigos são com universidades e áreas ligadas à tecnologia, o que era de se esperar, pois as pesquisas dirigiam-se para o “como” tratar a água através de membranas. Esta tendência manteve-se com a inclusão da palavra “*treatment*” e também após a inclusão de “*waste*” na pesquisa.

Com a inclusão da palavra “*sanitary*” na pesquisa, nota-se que os artigos tornam-se específicos, originados nos centros de pesquisa de utilização da tecnologia de membranas, com número de publicações bem reduzido.

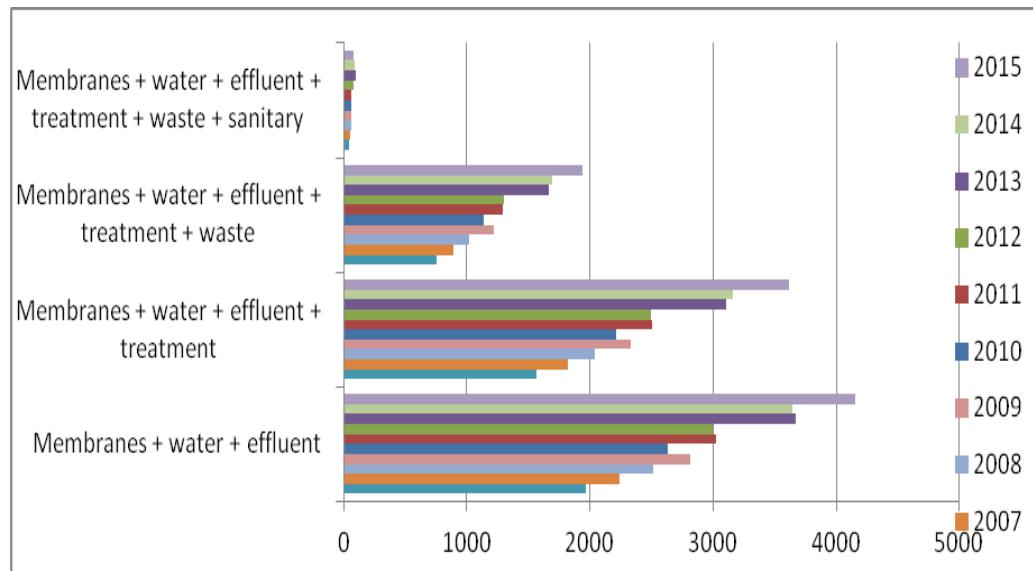
Verificou-se nesta pesquisa que enquanto o foco da discussão está voltado para o reuso da água e tecnologia, os Estados Unidos é o país que mais publicou. Contudo, quando o fator do tratamento da água está ligado a esgotamento sanitário, a China passa a ser a dominante e o Brasil surge também com publicações.

Em nova pesquisa também realizada em meados de 2016, na base de dados ScienceDirect, foram obtidos os valores semelhantes à pesquisa na base de dados Scopus.

Os dados abaixo, referentes à pesquisa, foram gerados pela ferramenta da própria página de pesquisa da ScienceDirect.

Na Figura 1 está apresentado o resultado da pesquisa com a utilização de todas as palavras chaves, verificando o baixo número de publicações.

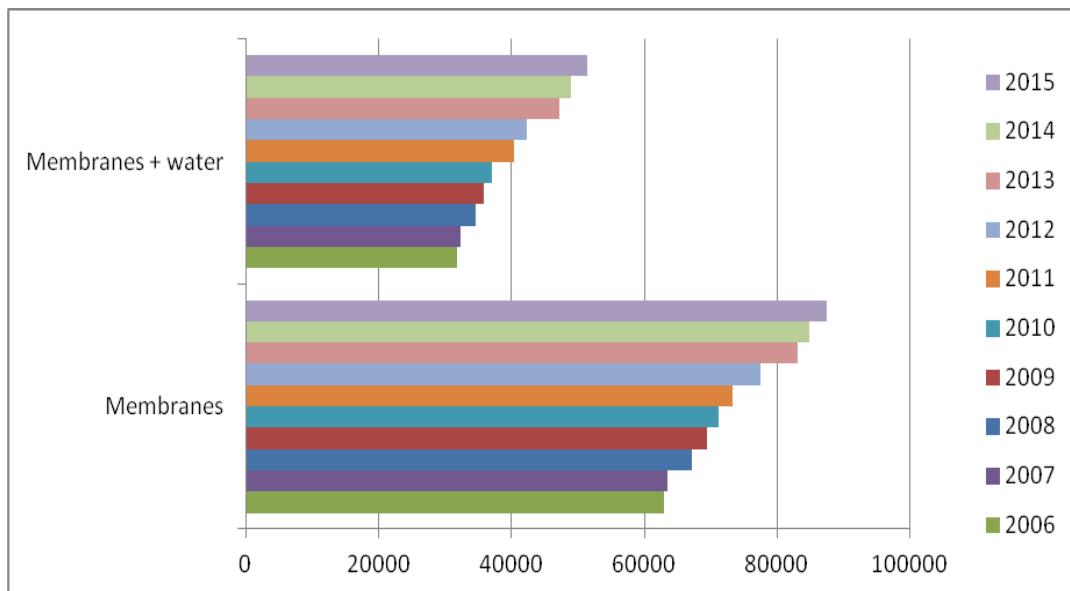
Figura 1 - Pesquisa final



Fonte: ScienceDirect

Na Figura 2 está apresentado o resultado da pesquisa com a utilização das palavras chaves iniciais, verificando várias publicações relacionadas com membranas e água.

Figura 2 - Pesquisa inicial



Fonte: ScienceDirect

Pesquisas sobre os processos de separação por membranas e, consequentemente, sobre a aplicação dessa tecnologia no tratamento de água para abastecimento público são limitadas, mesmo considerando os problemas relacionados à qualidade da água dos mananciais e o avanço tecnológico ocorrido nas últimas décadas, com especial destaque à tecnologia de separação por membranas (MIERZWA *et al.*, 2008).

Analizando as Figuras 1 e 2 anteriores, nota-se que o interesse pela tecnologia de filtragem por membranas, seja para preservação do meio-ambiente, seja para o reuso da água, vem crescendo com o passar dos anos. Porém, quando é inserida a palavra “sanitary” na pesquisa, verifica-se que é um assunto pouco explorado. Com esta palavra na pesquisa, busca-se o reuso da água obtida do esgotamento sanitário, cujo tratamento norteia-se pelo uso de membranas filtrantes.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Importância da Água

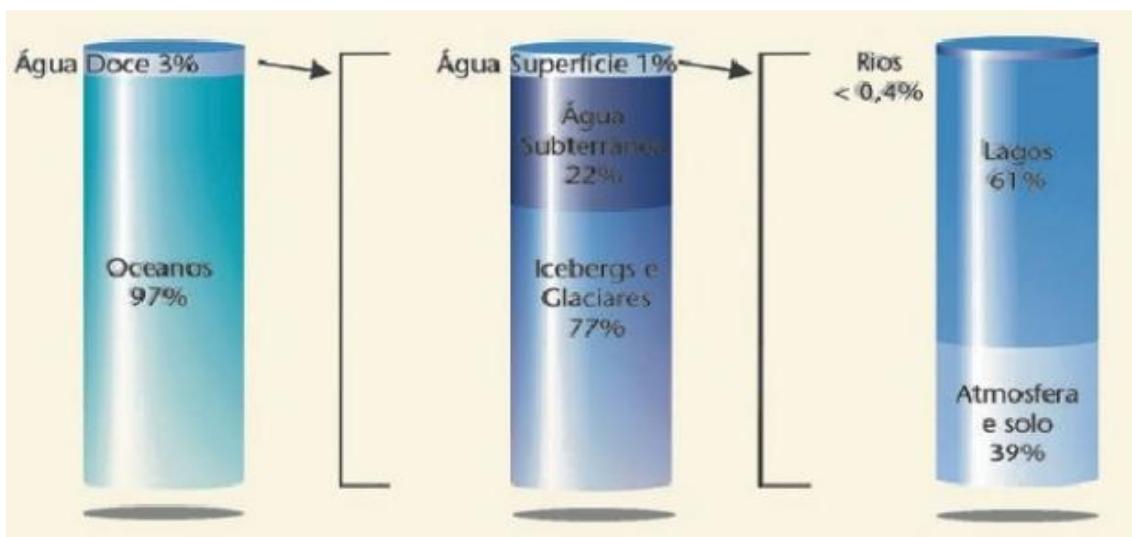
Nesta seção é apresentada a importância da água, a crise hídrica e a escassez mundial de água potável. Sem água, não haveria vida na Terra. Todos os seres vivos necessitam de água para sua existência. Apesar de sua abundância, apenas um pequeno percentual é apropriado para o consumo humano.

O planeta Terra é formado por $\frac{3}{4}$ de água (doce e salgada) e apenas $\frac{1}{4}$ de terra (continentes e ilhas) (SABESP, 2015).

De acordo com a Figura 3, a água apropriada para o consumo humano é a doce. E ela representa apenas 3% do total de águas do mundo (os outros 97% são água salgada, disposta em mares e oceanos). A distribuição da água doce do planeta se dá dessa maneira:

- ✓ 1% nos rios e lagos.
- ✓ 77% nos polos, geleiras e icebergs.
- ✓ 22% em leitos subterrâneos.

Figura 3 - Distribuição espacial e quantitativa da água no planeta



Fonte: UNESCO (2003)

Segundo Suassuna (2004), 70% do volume mundial de água doce disponível são destinados à irrigação, 20% à indústria e somente 10% ao consumo humano.

Seja por questões de saúde ou saneamento, ambiente ou cidades, alimentos, indústria ou produção de energia, o século XXI é o século em que o problema primordial é a qualidade e gestão da água (UNESCO, 2003).

Ações de desenvolvimento insustentável e governança com falhas têm afetado a qualidade e disponibilidade dos recursos hídricos no mundo, comprometendo aspectos sociais e econômicos. A demanda de água doce continua aumentando exponencialmente e caso o equilíbrio entre esta demanda e a oferta não seja restaurado, o mundo deverá enfrentar um déficit global de água cada vez mais grave (UNESCO, 2015).

De acordo com o crescimento populacional e das atividades econômicas, muitos países estão atingindo rapidamente condições de escassez de água ou se deparando com limites para o desenvolvimento econômico (ONU, 1992).

Juntamente com o crescimento populacional, a urbanização e a industrialização também aumentam a demanda por água. Conforme a população rural, normalmente usuária de poços artesianos locais, muda-se para prédios residenciais urbanos com água encanada, o consumo de água residencial pode facilmente triplicar (CETESB, 2016).

Estima-se que, até 2050, a demanda mundial por água aumente em 55%, principalmente devido à crescente demanda do setor industrial, sistemas de geração de energia termoelétrica e usuários domésticos. A indústria aumentará sua demanda em até 400% e a agricultura precisará de água para produzir mundialmente 60% a mais de comida, e 100% a mais em países em desenvolvimento e a indústria (UNESCO, 2015).

As diversas demandas pela água impõem difíceis decisões de alocação e limitam o crescimento de setores críticos para o desenvolvimento sustentável, em particular para a produção de alimentos e energia. A competição pela água aumenta o risco de conflitos localizados e as desigualdades se perpetuam no acesso aos serviços, com impactos significativos nas economias locais e no bem-estar humano (UNESCO, 2015).

A perturbação dos ecossistemas, devida à intensa urbanização, práticas agrícolas inadequadas, desmatamento e poluição estão entre os fatores que ameaçam a capacidade do meio ambiente de fornecer serviços ecossistêmicos, incluindo o provisionamento de água limpa. A extração excessiva é um fenômeno novo, em geral restrito a última metade do século, resultante do desenvolvimento de bombas poderosas a diesel ou elétricas, que proporcionaram a capacidade de extrair água dos aquíferos com uma rapidez maior do que sua recarga pela chuva (UNESCO, 2015; CETESB, 2016).

De acordo com ANA (2015), em termos globais, o Brasil possui grande oferta de água, observando-se que passam no território brasileiro em média cerca de 260.000 m³/s, dos quais 205.000 m³/s estão na bacia do rio Amazonas, sobrando para o restante do território 55.000 m³/s de vazão média.

O território brasileiro contém cerca de 12% de toda a água doce do planeta. Apesar desta abundância, seus recursos hídricos não são inesgotáveis e o acesso à água não é igual para todos. As características geográficas de cada região e as mudanças de vazão dos rios, que ocorrem devido às variações climáticas ao longo do ano, afetam a distribuição (MMA, 2016).

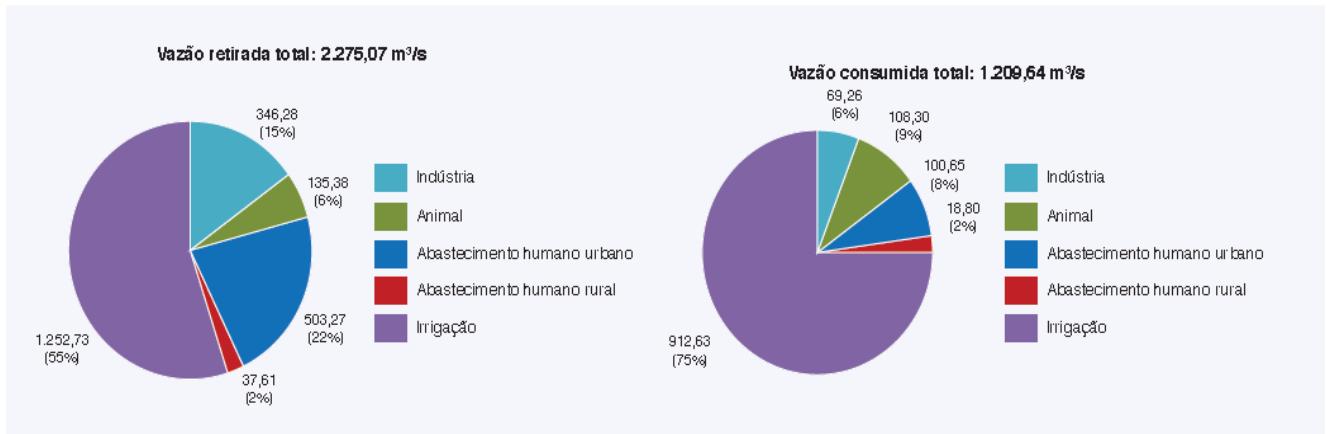
Para manter uma maior garantia de água ao longo do tempo, é necessária a utilização de reservatórios ou açudes, capazes de reservar água nos períodos úmidos para ofertar nos períodos mais secos (ANA, 2015).

As demandas de recursos hídricos apresentadas no relatório da ANA (2015) utilizaram os seguintes dados: para uso industrial, foram usadas as outorgas estaduais e federais até julho de 2014; a demanda animal foi calculada com base nos dados de rebanho por município para o ano de 2013; a demanda humana considerou dados da estimativa populacional do IBGE – ano-base 2013; e a demanda para irrigação foi calculada para o ano-base 2014 utilizando dados dos planos de recursos hídricos e levantamento de pivôs por imagem de satélite, além de taxas anuais de crescimento da área irrigada calculadas pela Câmara Setorial de Equipamentos de Irrigação da Abimaq.

A Figura 4 apresenta a demanda consuntiva total no Brasil, que foi de 2.275,07 m³/s, quando considerada a vazão retirada. O setor de irrigação foi responsável pela maior parcela de retirada (55% do total), seguido das vazões de

retirada para fins de abastecimento humano urbano, industrial, animal e abastecimento humano rural. A vazão efetivamente consumida foi de 1.209,64 m³/s.

Figura 4 - Demanda consuntiva total no Brasil (m³/s)



Fonte: ANA (2015)

Diante deste cenário, na busca por alternativas de soluções, deve-se considerar um equilíbrio entre o suprimento e a demanda da água.

Porém, de acordo com UNESCO (2015), a situação não está nem próximo a isto. Apesar do progresso considerável que tem sido realizado recentemente, no mundo, 748 milhões de pessoas ainda não têm acesso a fontes de água potável de qualidade. E aqueles mais afetados são as pessoas de baixa renda, os desfavorecidos e as mulheres.

Em uma economia mundial mais integrada, a escassez de água cruza fronteiras. Cita-se como exemplo o comércio internacional de grãos, para a produção de 1 tonelada de grãos são necessárias 1.000 toneladas de água. Desta forma, a importação de grãos seria a maneira mais eficiente para os países com déficit hídrico importarem água (CETESB, 2016).

Investir na melhoria da gestão dos recursos hídricos e dos serviços associados pode contribuir para a redução da pobreza e apoiar o crescimento econômico. Com investimentos em infraestrutura e gestão, adequadamente financiados, operados e mantidos, facilitam as mudanças estruturais necessárias para o avanço da economia. Muitas vezes isso significa uma melhoria na renda,

tornando possível aumentar os gastos com saúde e educação, reforçando a dinâmica de auto sustentabilidade do desenvolvimento econômico (UNESCO, 2015).

A maioria dos modelos econômicos não valoram os serviços essenciais oferecidos pelos ecossistemas de água doce, muitas vezes levando ao uso insustentável dos recursos hídricos e à degradação desses ecossistemas. A poluição causada pelo não tratamento de efluentes domésticos e industriais e pelo escoamento de áreas agrícolas também enfraquece a capacidade dos ecossistemas de fornecerem serviços relacionados à água (UNESCO, 2015).

Conforme o artigo 1º da Lei 9.433 (BRASIL, 1997), a Política Nacional de Recursos Hídricos baseia-se em 6 fundamentos, entre eles:

“I – a água é um bem de domínio público;

II – a água é um recurso natural limitado, dotado de valor econômico;

III – em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;...”

A mudança para tecnologias mais eficientes em termos de economia de água proporciona imenso potencial para aumentar a produtividade da água. Estas mudanças serão mais rápidas se o preço da água for mais representativo do que o seu valor. Com esta consciência crescente, cada nação vem se preparando ao longo do tempo para a valorização e valorização de seus recursos naturais (CETESB, 2016).

Dada a importância da água, conforme Sadr *et al.* (2015), um desafio global de crescente preocupação é a diminuição dos recursos de água doce, provocando uma prática crescente em muitas comunidades para complementar a disponibilidade de água doce: a reutilização da água.

2.2 Reuso da Água

Esta seção aborda as aplicações de água de reuso e as técnicas utilizadas para a sua produção.

De acordo com SABESP (2015), “Reuso é a utilização da água por mais de uma vez, depois de um tratamento adequado. O reuso planejado da água faz parte de um programa global recomendado pela Organização das Nações Unidas e pela Organização Mundial da Saúde. Esse programa pretende alcançar três importantes elementos: proteção da saúde pública, manutenção da integridade dos ecossistemas e uso sustentado da água”.

Conforme Kunz *et al.* (2002), os problemas ambientais tornaram-se mais críticos e frequentes nas últimas décadas, principalmente devido ao crescimento populacional e ao aumento da atividade industrial. Com isto, os problemas causados pela ação do homem atingiram dimensões catastróficas e podem ser observados nas mudanças da qualidade do solo, do ar e da água.

O rápido crescimento da população, especialmente nos países em desenvolvimento, a poluição das águas superficiais e subterrâneas, a distribuição irregular dos recursos hídricos e períodos severos de seca, forçaram a procurar novas fontes de abastecimento de água, considerando águas residuais uma fonte adicional para atender a esta demanda (SILVA; TORRES; MADERA, 2008).

A gestão dos recursos hídricos tem sido fortemente influenciada pelo problema de uma real escassez de água doce no mundo. No meio industrial, o aumento dos custos com o tratamento de efluentes reflete essa tendência, suscitando um novo paradigma quanto à racionalização do seu uso, à adequação de tratamento e à aplicabilidade crescente de técnicas de reuso. É nesse sentido que se torna importante promover a criação e a implantação de estratégias que viabilizem a racionalização do uso da água, contrapondo a equivocada tendência de se tratar esse recurso natural como abundante e, desse modo, disponível infinitamente (MIERRE; YOKOYAMA; PESSOA, 2011).

Michael-Kordatou *et al.* (2015) informam que a reutilização de águas residuais é atualmente considerada mundialmente como o elemento mais crítico da gestão sustentável da água. A matéria orgânica do efluente dissolvido presente em águas residuais urbanas tratadas biologicamente, consiste de uma mistura heterogênea de compostos orgânicos refratários com diferentes estruturas e origens variadas, incluindo matéria orgânica natural, dissolvida, produtos microbianos solúveis, produtos farmacêuticos e resíduos de produtos para cuidados pessoais,

subprodutos de desinfecção, e outros, que podem atingir o ambiente aquático por intermédio de aplicações de descarga e reutilização.

A reutilização de águas residuais contribui significativamente para um uso eficiente e sustentável da água (HAAKEN *et al.*, 2014).

Ainda conforme Michael-Kordatou *et al.* (2015), a reutilização das águas residuais urbanas é considerada como um componente importante das práticas de gestão sustentável de águas residuais em todo o mundo, principalmente para aplicações não-potáveis. Efluente de esgoto tratado é amplamente reutilizado para fins de reabastecimento de água de superfície e subterrânea.

A discussão sobre a viabilidade técnica, econômica e ambiental da reutilização de água em processos industriais tem sido uma preocupação constante. Algumas tecnologias utilizadas na reutilização de água podem não ser economicamente viáveis para pequenas e médias indústrias, cuja água para reutilização não requer pureza. É, portanto, necessário desenvolver outras técnicas que atendam a todos os segmentos de mercado (BORDONALLI; MENDES, 2009).

A questão desses efluentes nos leva a uma reflexão sobre os atuais modos de produção e hábitos de consumo, tornando necessária a adoção de novos valores e a reflexão sobre o modo de vida do ser humano. A dimensão ambiental foi incorporada ao processo de produção das indústrias e à gestão empresarial, inclusive como base para redução de custos e aumento da rentabilidade, através de medidas de minimização, reutilização e reciclagem dos efluentes líquidos gerados pelos diversos processos industriais (SANTOS; MIGUEL, 2002).

A contaminação de águas naturais tem sido um dos grandes problemas da sociedade moderna. Desta forma, a economia de água em processos produtivos ganhou atenção especial pelo valor agregado atribuído a este bem, por meio de princípios como consumidor pagador e poluidor pagador recentemente incorporados em nossa legislação (KUNZ *et al.*, 2002).

Geralmente não existe apenas uma variável responsável pela qualidade e variabilidade do efluente. Dependem de variações na carga afluente, das condições ambientais nos reatores, da natureza do esgoto a ser tratado, da presença de substâncias tóxicas, da variabilidade inerente aos processos de tratamento biológico e de falhas mecânicas e humanas no sistema. Todos esses fatores podem levar a

problemas e instabilidade nos processos, o que causará efeitos adversos na qualidade do efluente (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005b).

Kunz *et al.* (2002) colocam que uma visão moderna com relação a efluentes industriais deve se basear não somente no tratamento deste (tecnologias “end of pipe”), mas na busca constante pela minimização de resíduos gerados por tecnologias limpas, ou seja, o pensamento deve ser voltado para a fonte do efluente dentro da fábrica e não apenas como resolver o problema após sua geração.

Os efluentes das estações de tratamento de esgotos entregues em corpos de água são uma grande preocupação para a maioria dos países. As legislações, políticas e resoluções ambientais buscam definir tanto na seleção dos locais de despejo como no nível de tratamento necessário e adequado para garantir que os impactos ambientais possam ser controlados dentro de níveis aceitáveis (PASSARINI, 2011).

De acordo com Tomazela (2006), a agricultura, principalmente nos países em desenvolvimento, apresenta o maior percentual de consumo de água quando comparado aos setores doméstico e industrial que juntos, consomem somente cerca de 30% do total disponível.

Dadas às necessidades do setor agropecuário na expansão do agronegócio, diretamente associadas à alta taxa de crescimento da população mundial e considerando a possibilidade de escassez de recursos hídricos em várias regiões do mundo, investir em pesquisas sobre o tratamento e posterior reutilização de águas residuais na agricultura é a garantia do processo contínuo de desenvolvimento sustentável que garantirá a manutenção e sobrevivência de todos os setores que necessitam de água.

A difusão e maior aceitação das técnicas utilizadas no tratamento de águas residuais em áreas rurais ainda não são realidade no Brasil. Apesar do aumento de especialistas na elaboração de projetos nesta área e de eventos para divulgar os benefícios dessas tecnologias, ainda há rejeição por parte dos empresários do setor agrícola (TOMAZELA, 2006).

Reutilização de águas residuais tratadas para irrigação agrícola é uma abordagem bem estabelecida para lidar com a escassez de água em ambientes semiáridos e áridos. Recentemente, usos adicionais de águas residuais tratadas surgiram, incluindo o aumento de vazões e restauração do ecossistema aquático (ZAIBEL *et al.*, 2016).

Conforme Santos e Miguel (2002), a questão ambiental é hoje um dos assuntos que preocupa toda a humanidade, estando também cada vez mais integrada ao conceito de modernidade empresarial. O aumento populacional, a industrialização e o incremento nas atividades humanas foram os principais motivos da multiplicação dos efluentes líquidos orgânico, inorgânico e sanitário. A questão destes efluentes nos obriga a refletir sobre os meios atuais de produção e hábitos de consumo, fazendo-se necessária a adoção de novos valores e a reflexão sobre o nosso modo de vida.

A dimensão ambiental foi incorporada ao processo de produção industrial e de gestão empresarial, inclusive como base para a realização de reduções de custos e aumento da rentabilidade, com a incorporação de medidas para minimizar, reutilizar e reciclar os efluentes líquidos gerados (BORDONALLI; MENDES, 2009).

No artigo de Goh *et al.* (2016), é acrescentado que o crescimento da população, urbanização e industrialização aumentaram as demandas por recursos hídricos confiáveis. Os efeitos da mudança climática, que também estão intimamente ligados ao rápido crescimento, complicaram ainda mais e exacerbou o equilíbrio entre oferta e demanda de água. Com esta pressão conjunta, espera-se que as questões ligadas ao estresse hídrico e escassez sejam difundidas e aumentem significativamente para os anos vindouros.

A consciência crescente para os impactos de longo alcance da escassez de água e deterioração da qualidade da água sobre o meio ambiente e a humanidade tem gerado esforços consideráveis na busca de soluções sustentáveis para combater o desafio global em curso. Entre as muitas estratégias adotadas para fornecer água potável acessível e segura, tratamento de águas residuais é considerado uma solução promissora para atender a demanda sempre crescente e aliviar os problemas alarmantes (ANG *et al.*, 2015; ELIMELECH; PHILLIP, 2011).

O incentivo ao tratamento de esgoto, melhorando seu efluente para a obtenção de uma água de reuso com qualidade que possa substituir em parte o consumo industrial ou de irrigação, ou até aumentar a disponibilidade para o consumo humano deve ser uma das prioridades do Brasil e do mundo (OLIVEIRA NETO *et al.*, 2015).

Atualmente existem várias opções para aumentar as fontes de água doce, como o tratamento de fontes de água locais de baixa qualidade, a reciclagem e reutilização da água. Estas opções por si só não serão suficientes para satisfazer esta necessidade. A dessalinização de água do mar oferece o potencial para uma fonte abundante e constante de água fresca, purificada dos vastos oceanos e, embora ela deva ser considerada depois que todas as outras opções sejam utilizadas, deve ser vista como um componente crucial no portfólio de opções de abastecimento de água (ELIMELECH; PHILLIP, 2011).

A comunidade científica e industrial vem pensando estrategicamente e olhando além do horizonte em utilizar plenamente a tecnologia de membrana como a candidata de baixo custo para as necessidades de uma gama crescente de purificação e separação, tais como tratamento de água e efluentes, salobra e dessalinização de água do mar. Na verdade, avanços recentes têm testemunhado o potencial e a confiabilidade da aplicação de membranas e sistemas de membrana comercialmente disponíveis para aliviar as questões da água (YUAN; HE, 2015; YIN; DENG, 2015). As tecnologias de membranas impulsionadas por pressão, tais como osmose reversa há muito tempo ganharam grande interesse global para oferecer soluções mais eficazes a preços acessíveis para alcançar a água de qualidade promissora, impondo uma pegada menor da estação de tratamento de água.

Geralmente, as membranas dedicadas para a dessalinização são concebidas e formuladas para alcançar alto rendimento e seletividade, exibindo uma integridade mecânica elevada e resistência à incrustação com custos mínimos de processamento (ESFAHANI *et al.*, 2015). No entanto, o desenvolvimento de membrana de tamanho único que atenda a todos os níveis de interesse comercial continua a ser um grande desafio.

O tratamento não adequado de efluentes pode representar um aumento na degradação ambiental em detrimento da qualidade de vida, além de requerer normalmente médios investimentos nos processos de tratamento. Como se sabe, a variável econômica exerce grande influência quando se quer definir a melhor tecnologia disponível para tratamento dos efluentes líquidos gerados, que até certo ponto é influenciada por fatores relativamente independentes das necessidades de controle da poluição (SANTOS; MIGUEL, 2002).

“Com a implantação da Legislação sobre recursos hídricos no Brasil, uma das consequências mais marcantes é a outorga e cobrança pelo uso e qualidade da água devolvida ou não ao meio ambiente. Assim, aos poucos, todos serão responsabilizados e deverão resolver o problema dos resíduos poluentes da água gerados em seus domínios, de modo a produzir uma renda que será destinada principalmente à implantação de estações de tratamento de esgoto” (TOMAZELA, 2006).

Assim, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), em sua Resolução 357 classificou os corpos de água, além de outras diretrizes, e especificamente, sofreu retificações gerando a Resolução 430 de 13 de Maio de 2011, que apresenta as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementando e alterando a primeira.

O reuso da água, então, tem como variáveis a sua aplicação, a técnica utilizada para o tratamento do efluente, a viabilidade econômica e as regras e diretrizes envolvidas na sua produção.

2.3 Tratamento da Água no sistema produtivo de água potável

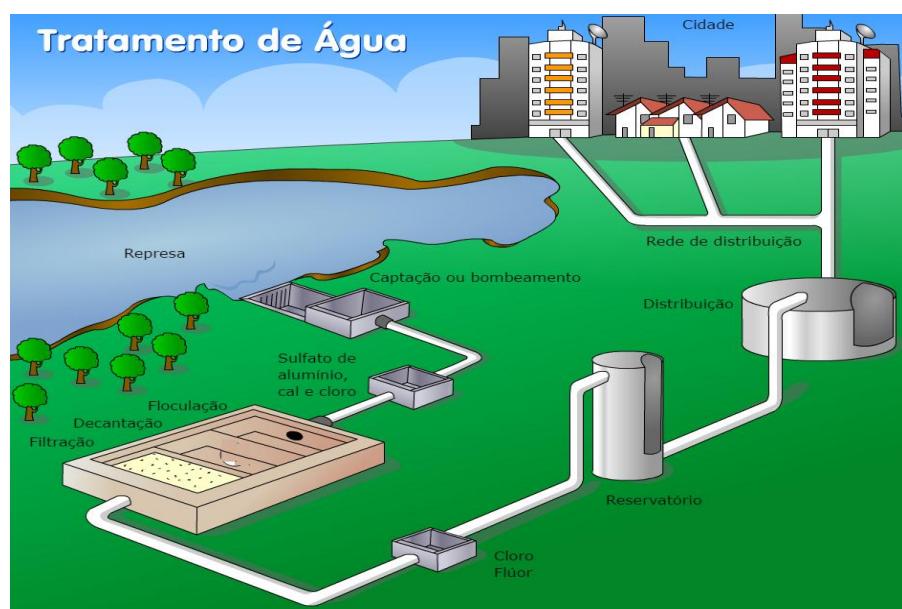
Nesta seção apresentam-se os procedimentos utilizados pelas empresas de saneamento básico para o tratamento de água para a produção de água potável.

Conforme SABESP (2015), o processo convencional de tratamento de água é dividido em fases e em cada uma delas existe um rígido controle de dosagem de produtos químicos e acompanhamento dos padrões de qualidade:

- ✓ Pré-cloração – facilita a retirada de matéria orgânica e metais.
- ✓ Pré-alcalinização – ajustar o potencial hidrogeniônico (pH) aos valores exigidos nas fases seguintes do tratamento.
- ✓ Coagulação – para que as partículas de sujeira fiquem eletricamente desestabilizadas e mais fáceis de agregar.
- ✓ Floculação – serve para provocar a formação de flocos com as partículas.
- ✓ Decantação – separar os flocos de sujeira formados na etapa anterior.
- ✓ Filtração – reter a sujeira que restou da fase de decantação.
- ✓ Pós-alcalinização – feita a correção final do pH da água, para evitar a corrosão ou incrustação das tubulações.
- ✓ Desinfecção – garante que a água fornecida chegue isenta de bactérias e vírus até a casa do consumidor.
- ✓ Fluoretação – O flúor também é adicionado à agua. A substância ajuda a prevenir cárries.

A Figura 5 apresenta de forma simplificada as etapas do processo de tratamento de água convencional, desde a captação até a distribuição ao consumidor final.

Figura 5 - Tratamento de água



Fonte: SABESP (2015)

2.4 Tratamento de esgoto – geração de efluentes

Para um melhor entendimento sobre reuso de água e tratamento de efluentes, nesta seção apresentam-se as definições sobre tratamento de esgoto.

A classificação dos esgotos, ou seja, dos despejos provenientes das diversas modalidades do uso e da origem das águas, se divide em dois grupos: os esgotos sanitários adjuntos a uma parcela de águas pluviais, águas de infiltração e, eventualmente, uma outra parcela de despejos industriais (PASSARINI, 2011).

Conforme SABESP (2015), o tratamento de esgotos consiste na remoção de poluentes e o método a ser utilizado depende das características físicas, químicas e biológicas. Na Região Metropolitana de São Paulo, o método utilizado nas grandes estações de tratamento é por lodos ativados, existindo uma fase líquida e outra sólida.

O método foi desenvolvido na Inglaterra em 1914, o qual consiste num sistema que degrada a matéria orgânica usando uma massa de micro-organismos que forma flocos e é continuamente recirculada sempre com a presença de oxigênio (SABESP, 2015).

Ainda conforme esta empresa, o processo é estritamente biológico e aeróbio, no qual o esgoto bruto e o lodo ativado são misturados, agitados e aerados em unidades conhecidas como tanques de aeração. Após este procedimento, o lodo é enviado para o decantador secundário, onde a parte sólida é separada do esgoto tratado. O lodo sedimentado retorna ao tanque de aeração ou é retirado para tratamento específico.

As Figuras 6 e 7 ilustram resumidamente as etapas do tratamento de esgoto, dividido nas fases líquida e sólida.

Figura 6 - Tratamento de esgoto fase líquida



Fonte: SABESP (2015)

Uma vez separada a parte líquida da parte sólida do esgoto, os dois processos são executados, onde a parte líquida tratada, gerando o efluente, é devolvida aos corpos d'água e a parte sólida gera os resíduos destinados aos aterros sanitários.

Figura 7 - Tratamento de esgoto fase sólida



Fonte: SABESP (2015)

2.4.1 Técnicas convencionais de tratamento de esgoto

Nesta sub-seção apresentam-se as formas de tratamento de esgoto utilizadas pela maior empresa de saneamento básico da América Latina.

De acordo com SABESP (2015) para tratar o esgoto, são realizados diversos procedimentos diferentes, um para cada tipo de situação ou necessidade.

Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente – É um reator fechado. O tratamento biológico ocorre por processo anaeróbio, isto é, sem oxigênio. A decomposição da matéria orgânica é feita por micro-organismos presentes num manto de lodo.

O esgoto sai da parte de baixo do reator e passa pela camada de lodo que atua como um filtro. A eficiência atinge de 65% a 75% e, por isso, é necessário um tratamento complementar que pode ser feito por meio da lagoa facultativa. É um mecanismo compacto e de fácil operação.

Lagoa facultativa – Tem de 1,5 a 3 metros de profundidade. O termo "facultativo" refere-se à mistura de condições aeróbias e anaeróbias (com e sem oxigenação). Em lagoas facultativas, as condições aeróbias são mantidas nas camadas superiores das águas, enquanto as condições anaeróbias predominam em camadas próximas ao fundo da lagoa.

Embora parte do oxigênio necessário para manter as camadas superiores aeróbias seja fornecido pelo ambiente externo, a maior parte vem da fotossíntese das algas, que crescem naturalmente em águas com grandes quantidades de nutrientes e energia da luz solar.

As bactérias que vivem nas lagoas utilizam o oxigênio produzido pelas algas para oxidar a matéria orgânica. Um dos produtos finais desse processo é o gás carbônico, que é utilizado pelas algas na sua fotossíntese.

Este tipo de tratamento reduz grande parte do lodo, e é ideal para comunidades pequenas, normalmente situadas no interior do Estado.

Lagoa anaeróbia – Neste caso, as lagoas são profundas, entre 3 e 5 metros, para reduzir a penetração de luz nas camadas inferiores. Além disso, é lançada uma grande carga de matéria orgânica, para que o oxigênio consumido seja várias vezes maior que o produzido.

Este tipo de tratamento ocorre em duas etapas. Na primeira, as moléculas da matéria orgânica são quebradas e transformadas em estruturas mais simples. Já na segunda, a matéria orgânica é convertida em metano, gás carbônico e água.

Lagoa aerada – O processo necessita de oxigênio e a profundidade das lagoas varia de 2,5 a 4,0 metros. Os aeradores servem para garantir oxigênio no meio e manter os sólidos bem separados do líquido (em suspensão). A qualidade do esgoto que vem da lagoa aerada não é adequada para lançamento direto, pelo fato de conter uma grande quantidade de sólidos. Por isso, são geralmente seguidas por outras, quando a separação dessas partículas pode ocorrer.

Baias e valas de infiltração – Trata-se de um tratamento complementar que consiste na passagem do esgoto por um filtro instalado no solo, formado por pedregulho e areia.

Flotação – É um processo físico-químico, no qual uma substância coagulante ajuda na formação de flocos de sujeira. Com isso, as partículas ficam mais concentradas e fáceis de serem removidas. Para ajudar no tratamento, a água é pressurizada, formando bolhas que atraem as partículas, fazendo com que elas flutuem na superfície. O lodo formado é enviado a uma estação de tratamento de esgotos.

Lagoa de maturação – São lagoas de baixa profundidade, entre 0,5 a 2,5 metros, que possibilitam a complementação de qualquer outro sistema de tratamento de esgotos. Ela faz a remoção de bactérias e vírus de forma mais eficiente devido à incidência da luz solar, já que a radiação ultravioleta atua como um processo de desinfecção.

As eficiências destas técnicas de tratamento de esgoto foram analisadas no estudo de desempenho de Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) (OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005a; OLIVEIRA; VON SPERLING, 2005b).

Os resultados obtidos no trabalho realizado em 166 Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs) por Oliveira e Von Sperling (2005a) mostraram um percentual muito elevado de ETEs da modalidade fossa séptica seguida de filtro anaeróbio que apresentou desempenho abaixo do esperado, considerando praticamente todos os constituintes. Apenas para coliformes fecais (CF) este comportamento não foi verificado.

De acordo com os mesmos autores, no caso das lagoas facultativas, um percentual também bastante elevado de ETEs mostrou eficiências de remoção de demanda química de oxigênio (DQO), sólidos suspensos totais (SST) e nitrogênio total Kjeldahl aquém das expectativas. No entanto, boas eficiências de remoção de fósforo total (PT) e CF foram observadas. O desempenho obtido pelos reatores Anaeróbicos de Fluxo Ascendente em Manto de Lodo ou reatores “Upflow Anaerobic Sludge Blanket” (UASB) seguidos de pós-tratamento foi o que melhor se ajustou aos dados de literatura, considerando praticamente todos os constituintes.

O reuso de efluentes de ETEs, embora traga vantagens frente a crescente demanda por água e a deterioração dos mananciais de abastecimento, ainda está associado a contestações, com relação aos efeitos relacionados a sua utilização. Mesmo os efluentes de ETEs de tratamento avançado podem conter organismos patogênicos, além de compostos químicos (geralmente de origem industrial) cujo efeito na saúde dos seres vivos ainda é, muitas vezes, desconhecido. Quanto ao uso agrícola, há ainda outras questões relativas à saúde a serem observadas, tais quais: o potencial de contaminação da água subterrânea e o efeito da qualidade da água residiária sobre as plantas e o solo. Assim, é necessário que se proceda a uma avaliação abrangente sobre as características dos efluentes gerados e os riscos potenciais associados a sua utilização em cada atividade (BNDS, 2014).

Desta forma, algumas pesquisas têm sido realizadas para melhorar a qualidade da água de reuso proveniente de ETEs, como mostrado por Passarini *et al.* (2014), na qual indica que reutilizar a água de esgoto tratado por processo de separação por membrana tem um elevado potencial de aplicação na irrigação, pois apresentaram resultados melhores do que a água controle. Além disso, todos os parâmetros estavam dentro dos padrões brasileiros de qualidade da água.

De acordo com os resultados dos estudos feitos por Al-Harbi, Khan e Özgür (2016), a água de esgoto de uma fábrica de mármore contendo partículas de tamanho micrométrico e sub-micrométrico poderia ser clarificada sem qualquer obstrução da membrana através de filtração periódica, usando uma membrana super-hidrófila fabricada em multicamadas, que é uma boa candidata para processos de filtração de alto volume em aplicações industriais.

2.5 Técnicas de separação por membranas

A partir desta seção estudaram-se assuntos relativos à separação por membranas. É um processo conhecido há séculos, como a filtragem.

Draper (1836) mencionou que os interstícios que existem em uma grande variedade de corpos podem ser encarados como um grande sistema de tubos capilares, para o qual se deve esperar que corpos de todos os tipos pudessem passar. Uma gota de água, colocada sobre uma pedra porosa ou giz, penetra rapidamente, mas o valor da observação é perdido, porque é comum. Se na água houvesse uma matéria corante, seria verificado que, em penetrando no giz, a cor seria deixada na superfície. Mas os princípios de lugar comum aqui novamente ditam uma resposta pronta, que os interstícios do giz podem ser muito pequenos para admitir que a matéria corante passe, ou talvez alguma incongruência de forma possa gerar uma barreira.

Embora sem comprovação em seu artigo, Stebbins Jr. (1886) previa que a partir da realização de experimentos, seria verificado, em primeiro lugar, que os filtros são capazes de produzir um bom suprimento de água e seria executado por um longo tempo sem entupimento e, segundo, que a água filtrada através deles seria praticamente isenta de micro-organismos, o que seria um ponto de grande importância.

Segundo Mierzwa (2002), os processos de separação por membranas utilizam membranas sintéticas, porosas ou semipermeáveis, para separar da água, partículas sólidas de pequenos diâmetros, moléculas ou até mesmo compostos iônicos dissolvidos.

Filtração por membranas pode ser grosseiramente definida como um processo de separação que usa membranas semipermeáveis para dividir o fluxo em duas porções: retido ou concentrado e permeado (DE LUCA; MONTEGGIA, 2003).

Inicialmente os processos de separação por membranas poderiam ser comparados com os de filtração convencional, porém várias características fazem com que sejam distintos, entre as quais: o fluxo de água é paralelo às membranas; compostos orgânicos e inorgânicos dissolvidos também podem ser separados; a

pressão utilizada na separação por membranas é significativamente maior (MIERZWA, 2002).

Seis diferentes tecnologias de membranas são aplicadas para a produção de água potável e industrial (SCHIPPERS; KENNEDY; SALINAS, 2013):

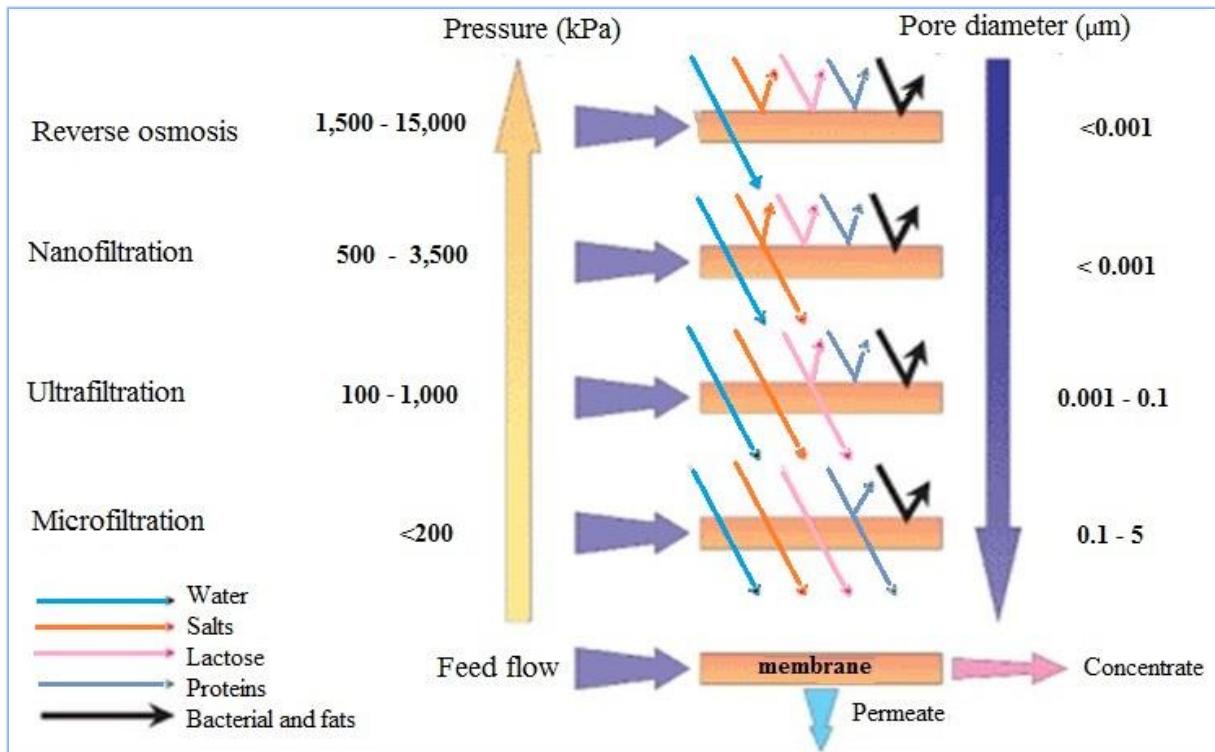
- ✓ eletro-diálise;
- ✓ eletro-dionização;
- ✓ osmose reversa;
- ✓ nanofiltração;
- ✓ ultrafiltração;
- ✓ microfiltração.

Basicamente o que difere cada uma das categorias é o diâmetro dos poros das membranas e o tipo e intensidade da força motriz utilizada para que seja realizada a separação dos contaminantes (MIERZWA, 2002).

Dentre os processos de separação por membranas para tratamento de água, destacam-se a microfiltração, ultrafiltração, a nanofiltração e a osmose reversa, que utilizam pressão hidráulica como força motriz para separar a água dos contaminantes (MIERZWA *et al.*, 2008).

A Figura 8 apresenta as características de pressão, diâmetro dos poros e a retenção de cada processo de separação por membranas.

Figura 8 - Características dos processos de separação por membranas



Fonte: Mierzwa *et al.* (2008)

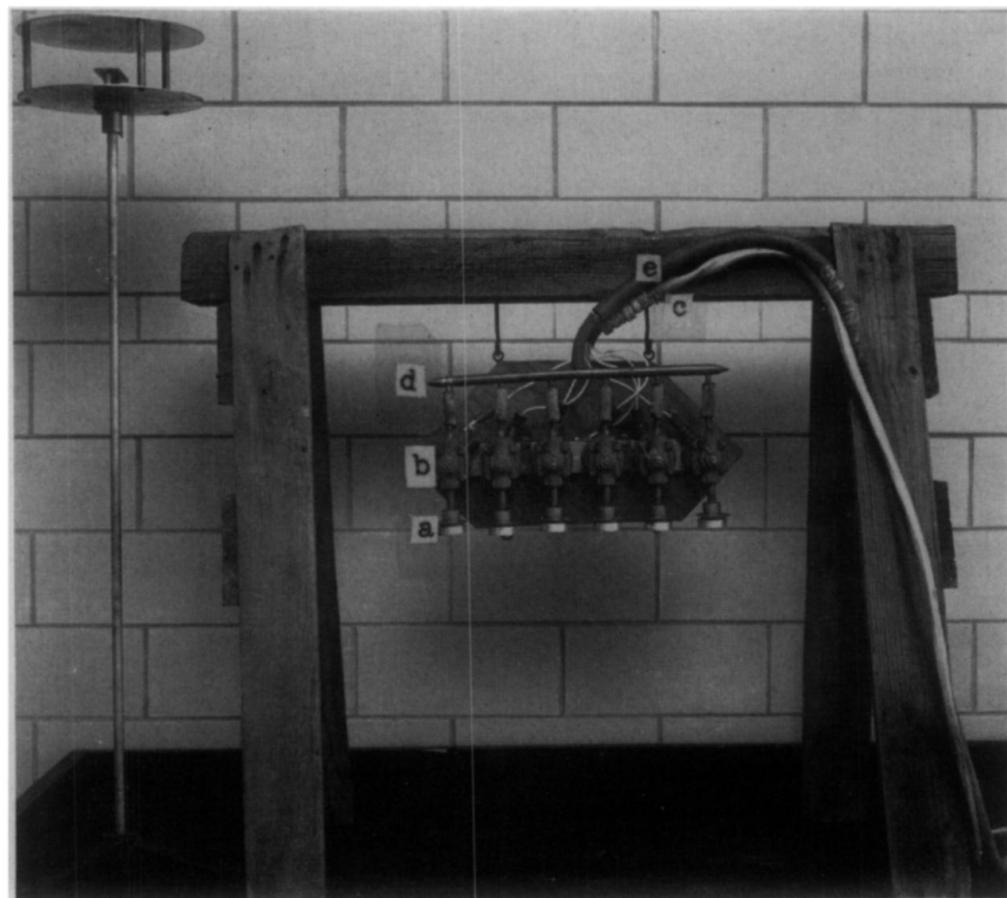
2.6 Aplicações utilizando membranas filtrantes

Esta seção teve seu foco voltado às inúmeras aplicações nas quais a utilização de membranas filtrantes foi possível.

Várias foram e são as aplicações das membranas filtrantes. Em um artigo relatando experiência realizada sobre concentração de pólen no ar (GURNEY; CRYST, 1955) foi descrita como um filtro de síntese, conhecido como membrana de filtro molecular. Um filtro de 1 polegada de diâmetro, da espessura do papel e que contém 5 por 10 poros por centímetro quadrado. Partículas tão pequenas quanto 0,2 microns são quantitativamente removidas de uma corrente de ar que passa através do filtro. Uma bomba compacta simples está disponível para a obtenção de amostras únicas de qualquer volume desejado de ar.

Na Figura 9 está uma foto de parte do aparelho utilizado na experiência.

Figura 9 - Parte do aparelho que contém os filtros moleculares de membrana e um amostrador de gravidade convencional.



Fonte: Gurney; Cryst (1955)

Esta parte do aparelho foi fotografada no laboratório. Durante a realização da experiência, estava localizada em um telhado desobstruído seis andares acima do solo.

Uma membrana de filtro molecular está presente em cada uma das cabeças de metal (a). Válvulas elétricas (b) estão ligadas ao aparelho de controle por meio de fios que saem através do condutor (c). Quando cada uma das válvulas, por sua vez está aberta, o ar passa através do filtro para dentro do tubo de metal (d) e para dentro do tubo (e), que está ligado a uma bomba de vácuo.

Dasgupta *et al.* (2015) expõe que as indústrias têxteis possuem uma posição importante no setor industrial global por causa de suas inegáveis contribuições para a satisfação das necessidades humanas básicas e para a economia mundial. Estas indústrias são, porém, grandes consumidores de água, corantes e outros produtos químicos tóxicos. Os efluentes gerados a partir de cada etapa de processamento

compreendem quantidades substanciais de recursos não utilizados. Os efluentes, se descarregados sem tratamento prévio, tornar-se-ão potenciais fontes de poluição ao meio ambiente. O tratamento de efluentes têxteis heterogêneos, portanto, exige a aplicação de tecnologias ambientalmente benignas, com potencial de recuperação de água de qualidade apreciável. Estas características podem ser observadas em várias técnicas inovadoras baseadas em filtragem por membranas.

Na última década, dessalinização da água do mar por osmose reversa tem um papel cada vez mais importante para o fornecimento de água potável em muitos países, devido aos efeitos da mudança do clima e crescimento populacional nas cidades costeiras. A dessalinização da água do mar por osmose reversa requer alta pressão de bombeamento para forçar as moléculas de água através de uma membrana semipermeável contra a pressão osmótica, enquanto rejeita íons de sal. Este processo atinge 40% a 50% de recuperação de água e o restante, solução de salmoura de 50% a 60%, é geralmente descarregado de volta para o mar (ZHANG *et al.*, 2015).

Um estudo experimental realizado por Gan (1999) avaliou o desempenho do fluxo e a eficiência de retenção de sólidos de um sistema de membrana cerâmica na microfiltração de um efluente primário de esgoto municipal. A importância da dimensão dos poros da membrana e as condições de funcionamento da microfiltração sobre a remoção de sólidos em suspensão e redução de sólidos dissolvidos totais é demonstrada. Com os parâmetros de membrana definidos adequadamente (por exemplo, tamanho de poro), este processo mostrou ser capaz de produzir um permeado de melhor qualidade do que as normas reguladoras relativas ao tratamento de águas residuais urbanas ditam sobre redução de sólidos totais e suspensos.

A aplicação de membranas cerâmicas para tratamento de água produzida em campos petrolíferos tem sido considerada como uma tecnologia muito promissora, principalmente devido à eficiência de separação de óleo e graxa e a robustez do processo (WESCHENFELDER *et al.*, 2015).

De acordo com Suárez *et al.* (2015), o tratamento por membrana pode ser considerado uma fonte primária de separação em plantas de processamento de alimentos, sendo particularmente bem integrada na indústria de laticínios e bastante popular no tratamento de águas residuais e de recuperação. Em comparação com

técnicas de separação convencionais, oferece fácil implementação, flexibilidade considerável, compacidade e boa automação que, juntamente com a diminuição dos custos de instalação e operação, faz do processo de membrana uma alternativa confiável, ambientalmente amigável, competitiva e economicamente rentável frente a outras técnicas.

Indústrias de mineração, petroquímica, de aço, têxteis e de alimentos produzem águas residuais oleosas. O óleo pode ser categorizado com base no diâmetro das gotas de óleo livres ($> 150 \mu\text{m}$), dispersos (20-150 μm), ou óleo emulsionado ($< 20 \mu\text{m}$). Óleo livre pode ser removido facilmente por clonagem, porque o tempo de estabilização necessária é curto. Flotação por ar dissolvido é utilizado para aumentar a flutuabilidade das gotas de óleo menores, de modo que o tempo de estabilização possa ser reduzido. Alternativamente, os produtos químicos coagulantes como orde-emulsionantes podem ser adicionados para aumentar o tamanho da gotícula de óleo, o que também resulta em um tempo de sedimentação mais curto. No entanto, estes métodos não são eficazes no tratamento de óleo emulsionado. A maneira mais eficaz para remover o óleo emulsionado é usando membranas. Separação por membrana oferece maior eficiência de remoção de óleo, menor custo de energia e design mais compacto em relação à clonagem, flotação por ar dissolvido e ao tratamento químico (CHOONG; LIN; RUTLEDGE, 2015).

As tecnologias de membranas para tratamento de águas residuais têm surgido nos últimos anos como um importante método de purificação em vários processos industriais para evitar a poluição dos recursos hídricos causada por diferentes fontes. Outro tópico sobre o desenvolvimento da tecnologia de membrana que também se tornou cada vez mais popular é o da fabricação de membranas para atender a grandes volumes de separação sólido / líquido com propósitos tais como beber, tratamentos de água agrícola e de resíduos, que exigem uma produção em massa de baixo custo, nas quais as membranas de cerâmica micro-porosa possuem as propriedades desejáveis (AL-HARBI; KHAN; ÖZGÜR, 2016).

Zhang *et al.* (2014), em seu trabalho, informaram que as membranas de fluoreto de polivinilideno (PVDF) são amplamente utilizadas em muitas aplicações devido à sua boa estabilidade físico-química, a sua resistência à oxidação e ao cloro. Contudo, quando utilizadas no tratamento com águas residuais, elas são facilmente contaminadas por poluentes, degradando suas propriedades devido à

hidrofobicidade e à fraca capacidade anti-compactação, o que resulta na redução de fluxo e tempo de vida da membrana e limita a sua aplicação em larga escala.

De acordo com os mesmos autores, para melhorar as capacidades de integração da membrana PVDF, os nanotubos de sílica fosforilada (PSNTs) foram dopados com PVDF para preparar uma membrana composta PVDF / PSNTs por meio de uma técnica de inversão de fase. As membranas compostas PVDF / PSNTs foram expostas a águas residuais contendo óleo, sendo analisados os efeitos sob pressão e temperatura de operação sobre os fluxos. Os parâmetros ótimos são: a pressão operacional é de 0,1 MPa, a temperatura de operação de 25 °C. Com o uso de lavagem física e limpeza química, as membranas de PVDF / PSNTs poderiam ainda manter um alto fluxo de permeação e longa vida útil.

Assim, os autores exploraram e analisaram o mecanismo de interação entre PSNTs e membrana de PVDF e o mecanismo anti-incrustante da membrana composta de PVDF / PSNTs. Os resultados mostraram que hidrofilicidade e as propriedades anti-incrustantes e de anti-compactação podem ser melhoradas e, portanto, a membrana composta PVDF / PSNTs é desejável no tratamento de águas residuais contendo óleo e esgoto.

Conforme Luo *et al.* (2014), nenhum tratamento específico está disponível para assegurar a remoção completa de vários micropoluentes devido às suas propriedades diversas. Processos confiáveis, capazes de eliminar as substâncias a granel bem como os micropoluentes, ainda estão a ser desenvolvidos.

Visões sobre as alternativas foram colocadas e dentre elas citou-se os processos por membrana.

Estes mesmos autores informaram que a retenção de micropoluentes em processos de membrana pode ser geralmente conseguida por exclusão de tamanho, por membrana de adsorção e por repulsão de cargas. Apesar de microfiltração e ultrafiltração serem processos comprovados para eliminar eficientemente a turbidez, geralmente o problema dos micropoluentes são mal removidos, pois os tamanhos dos poros da membrana são muito maiores do que os tamanhos moleculares dos micropoluentes. No entanto, micropoluentes podem ser removidos por meio de adsorção nos polímeros da membrana, bem como a interação com matéria orgânica natural em águas residuais.

3. METODOLOGIA E PROCEDIMENTOS DE PESQUISA

Neste trabalho realizou-se inicialmente uma pesquisa exploratória na literatura que analisou a importância e a situação atual água doce no mundo e em particular no Estado de São Paulo. Face à crise hídrica constatada, a pesquisa voltou-se para possíveis alternativas de reestabelecimento de equilíbrio entre a crescente demanda e a produção de água potável. A alternativa de reuso da água direcionou a pesquisa para a eficiência atual das técnicas utilizadas para o tratamento de esgoto sanitário.

Para conhecer as atuais técnicas e analisar as novas técnicas, como a filtragem por membrana, continuou-se com a pesquisa exploratória e elaborou-se um questionário de questões abertas a serem dirigidas à um responsável de uma grande empresa de saneamento do Estado de São Paulo, obtendo-se dados que basearam a realização de experimentos que, de acordo com Marconi; Lakatos (2003) consistem em investigações de pesquisa empírica cujo objetivo principal é o teste de hipóteses que dizem respeito a relações de tipo causa-efeito.

Ainda conforme os mesmos autores, a característica da pesquisa documental é que as fontes de coleta de dados estão restritas a documentos, escritos ou não, constituindo o que se denomina de fontes primárias. Estas podem ser feitas no momento em que o fato ou fenômeno ocorre, ou depois.

3.1 Pesquisa Bibliográfica

A pesquisa bibliográfica, ou de fontes secundárias, abrange toda bibliografia já tornada pública em relação ao tema de estudo, desde publicações avulsas, boletins, jornais, revistas, livros, pesquisas, monografias, teses, material cartográfico etc., até meios de comunicação orais: rádio, gravações em fita magnética e audiovisuais: filmes e televisão. Sua finalidade é colocar o pesquisador em contato direto com tudo o que foi escrito, dito ou filmado sobre determinado assunto, inclusive conferências seguidas de debates que tenham sido transcritos por alguma forma, quer publicadas, quer gravadas (MARCONI; LAKATOS, 2003).

3.2 Elaboração do Questionário

Um questionário foi montado contendo perguntas que pudessem fornecer dados para o levantamento de custo de produção da água, bem como as dimensões da planta de tratamento de água por membranas filtrantes. Como na pesquisa bibliográfica não foi encontrado trabalho de pesquisa sobre levantamento de custos reais em uma planta de tratamento de esgoto com membranas filtrantes, então se pensou em questões que fossem chaves para fornecer os dados necessários para a pesquisa. As questões foram as seguintes:

- 1) Qual é o tipo de filtragem por membranas utilizado?
- 2) Qual é o tipo de membrana utilizado?
- 3) Como é formada a planta de filtragem por membranas?
- 4) Qual é a capacidade de produção de água de reuso?
- 5) Como é o processo de retrolavagem?
- 6) Quais são os produtos químicos e as dosagens utilizadas para a limpeza química?
- 7) Qual é o custo de cada kit de membranas?
- 8) Qual é o tempo de vida do kit de membranas?
- 9) Qual é a qualidade da água de reuso?

Para a coleta dos dados, realizou-se uma visita *in loco* para entrevistar o responsável por uma ETE de uma grande empresa de saneamento do Estado de São Paulo, onde o processo de filtragem por membranas é utilizado para tratar o efluente da ETE, gerando uma água de reuso com a qualidade exigida pelas empresas consumidoras deste tipo de produto.

O preenchimento do questionário foi feito por entrevista pessoal, na qual o autor perguntou as questões citadas acima e preencheu de acordo com as

respostas do entrevistado. Confirmou-se, após a entrevista, se as respostas estavam de acordo com o que lhe foi questionado.

A entrevista transcorreu informalmente, em forma de diálogo, sendo descrito pelo entrevistado o panorama da planta de produção de água de reuso com a utilização de membranas filtrantes.

De acordo com o entrevistado, utiliza-se na planta a técnica de ultrafiltração com membranas filtrantes para a produção de água de reuso à partir do efluente sanitário originado na ETE.

Ainda conforme o entrevistado, são utilizadas membranas modelo MBR Koch de 0,05 µm, formando uma solução composta de 9 tanques de membranas. Estes tanques acomodam 64 módulos (*kit's*) de membranas de 1500 m², totalizando uma área de filtragem de 96000 m². Cada *kit* de membranas possui um custo aproximado de US\$ 200.000,00 (duzentos mil dólares) e uma vida útil de 7 anos.

Com esta composição, a planta possui uma capacidade de produção de água de reuso de 1000 l/s (litros por segundo), porém atualmente estão produzindo 400 a 500 l/s. Informou também que é possível alcançar a capacidade de filtrar 27 litros / m² x hora, graças aos processos de retrolavagem.

O processo de retrolavagem da ultrafiltração acontece de forma automática, em ciclos de 6 minutos, ou seja, filtra-se durante 6 minutos e realiza-se uma retrolavagem de alguns instantes. É realizada uma limpeza química diariamente, quinzenalmente e semestralmente, com produtos e dosagens diferentes. Diariamente é realizada limpeza química com Hipoclorito de Sódio, com 30 litros por tanque. Este produto é utilizado na limpeza semestral com a dosagem de 2400 litros por tanque. Na lavagem quinzenal, é utilizado Ácido Cítrico na dosagem de 60 litros por tanque e na lavagem semestral 600 litros por tanque.

O valor comercial para a água de reuso depende das exigências de fornecimento e da forma de distribuição ou entrega aplicada.

Da ETE, o efluente que vai para a filtração por membranas, gerado pela técnica de lodo ativado, é em torno de 30%. O restante, em torno de 1350 l/s, é destinado para lançamento no Córrego dos Meninos, da localidade, obedecendo aos padrões exigidos (ANEXO III).

Da ETE são destinados diariamente para aterros sanitários em torno de 200 toneladas de placas de lodo desidratados.

3.3 Cálculos dos custos do processo

Os custos serão calculados com base em dados coletados pela entrevista com o responsável da ETE, em dados dos encargos sociais (ZANLUCA, 2016) e em preços de venda de água de abastecimento (SABESP, 2016).

As análises comparativas dos custos foram realizadas em função de dados publicados em SABESP (2016), no sistema tarifário aplicado para a população da região metropolitana de São Paulo.

A Tabela 1 apresenta uma parte do sistema tarifário, evidenciando os valores mais comumente aplicados aos consumidores finais.

Tabela 1 - Sistema Tarifário - RMSP

Região Metropolitana de São Paulo - Sistema Tarifário - Vigência à partir de 12/05/2016		
Classes de Consumo	Tarifas de água (R\$)	Tarifas de esgoto (R\$)
m3/mês		
Residencial / Normal		
0 a 10	22,38 / mês	22,38 / mês
11 a 20	3,50 / m ³	3,50 / m ³
21 a 50	8,75 / m ³	8,75 / m ³
acima de 50	9,64 / m ³	9,64 / m ³
Comercial / Normal		
0 a 10	44,95 / mês	44,95 / mês
11 a 20	8,75 / m ³	8,75 / m ³
21 a 50	16,76 / m ³	16,76 / m ³
acima de 50	17,46 / m ³	17,46 / m ³
Industrial		
0 a 10	44,95 / mês	44,95 / mês
11 a 20	8,75 / m ³	8,75 / m ³
21 a 50	16,76 / m ³	16,76 / m ³
acima de 50	17,46 / m ³	17,46 / m ³

Fonte: Adaptado pelo Autor de SABESP Tarifas (2016)

Os encargos financeiros sobre os salários são baseados em Zanluca (2016), para a situação de empresa não optante pelo Simples. Neste caso, o custo percentual deve ser acrescido do Descanso Semanal Remunerado (DSR), e pode ser calculado como segue na Tabela 2:

Tabela 2 - Encargos Sociais e Trabalhistas

Encargos Sociais e Trabalhistas	(%)	(%)
Encargos Trabalhistas		
13º Salário		9,75 %
Férias		13,00 %
DSR - Descanso Semanal Remunerado		16,99 %
Encargos Sociais		
INSS	20,00 %	
SAT/RAT até	3,00 %	
Salário Educação	2,50 %	
INCRA/SEST/SEBRAE/SENAT	3,30 %	
FGTS	8,00 %	
FGTS/Provisão de Multa para Rescisão	4,00 %	
Total Previdenciário		40,80 %
Previdenciário s/ 13º/Férias/DSR		16,21 %
SOMA BÁSICA		96,75 %

Fonte: Zanluca (2016)

Na Tabela 3 estão apresentados os dados coletados na entrevista realizada e em pesquisas sobre a planta, que proporcionaram a elaboração das estimativas de custos do processo de tratamento por membranas.

Tabela 3 - Dados da planta - processo de tratamento por membranas filtrantes

Custo do Conjunto de Membranas, CCM (US\$)*	200.000,00
Quantidade de Conjuntos de Membranas, QCM (Unidade)	9,00
Tempo de Vida Útil do Conjunto de Membranas, TVUCM (Anos)	7,00
Percentual de Gasto Estimado em Manutenção, PGEM (%)	4,00
Vazão de Água de Reuso na Planta, VARP (m ³ /s)	1,00
Preço Médio de Venda, PMV (R\$/m ³)	1,70
Total de Funcionários na Planta, TFP (3 turnos)	24
Salários Médios, SM (US\$)	2.000,00
Encargos Financeiros sobre salários, EF (%)	96,75
Investimento Inicial do Projeto, IIP (R\$)**	364.000.000,00
Período Contratual do Projeto, PCP (Anos)	41

*Cotação do Dólar Nov/2012: US\$ 1,00 = R\$ 2,14 (Fonte: Uol Economia, 2016)

** Fonte: SABESP Notícias (2016)

A partir dos dados fornecidos pelo questionário presentes na Tabela 3, calculou-se o custo real com a aquisição dos kits de membranas, produtos químicos para manutenção e implantação do processo de filtragem por membranas na planta. Desta forma, os custos foram calculados pelo uso das seguintes Equações: (PASSARINI *et al.*, 2014)

Para o cálculo do Custo Estimado do Tratamento Anual (CETA), em dólares por ano, foi utilizada a Equação 1, com os dados da Tabela 3:

$$\text{CETA} = \frac{\text{CCM} \times \text{QCM}}{\text{TVUCM}} \quad (1)$$

$$\text{CETA} = \frac{200.000 \times 9}{7} = 257.142,86 \text{ US\$/ano}$$

Já para se obter o Custo Estimado do Tratamento Mensal (CET), dividiu-se o custo anteriormente calculado por 12 meses que compõem um ano, sendo expresso pela Equação 2:

$$\text{CET} = \frac{\frac{\text{CCM} \times \text{QCM}}{\text{TVUCM}}}{12} \quad (2)$$

$$\text{CET} = \frac{257.142,86}{12} = 21.428,57 \text{ US\$/mês}$$

Para o cálculo do Custo Estimado do Tratamento e Manutenção Anual (CETMA), considerando os custos de manutenção, em dólares, foi acrescido ao valor calculado pela Equação 1 o percentual de 4% referente à manutenção do sistema, conforme Equação 3:

$$\text{CETMA} = \left(\frac{\text{CCM} \times \text{QCM}}{\text{TVUCM}} \right) + \frac{\{[(\text{CCM} \times \text{QCM})] \times \text{PGEM}\}}{\text{TVUCM}} \quad (3)$$

$$\text{CETMA} = \left(\frac{\text{CCM} \times \text{QCM}}{\text{TVUCM}} \right) + \frac{\{[(200.000 \times 9)] \times 0,04\}}{7}$$

$$\text{CETMA} = 267.428,57 \text{ US\$/ano}$$

Já para se obter o Custo Estimado do Tratamento e Manutenção Mensal (CETM), dividiu-se o custo anteriormente calculado por 12 meses que compõem um ano, sendo expresso pela Equação 4:

$$\text{CETM} = \frac{\left(\left(\frac{\text{CCM} \times \text{QCM}}{\text{TVUCM}} \right) + \frac{\{[(\text{CCM} \times \text{QCM})] \times \text{PGEM}\}}{\text{TVUCM}} \right)}{12} \quad (4)$$

$$\text{CETM} = \frac{267.428,57}{12} = 22.285,71 \text{ US\$/mês}$$

Para o cálculo do Custo Estimado com Funcionários (CEF), em dólares, utilizou-se a Equação 5, ainda sobre os valores apresentados na Tabela 3:

$$\text{CEF} = \text{TFP} \times \text{SM} \quad (5)$$

$$\text{CEF} = 24 \times 2.000 = 48.000,00 \text{ US\$/mês}$$

Para se obter o Custo Estimado com Funcionários e Encargos (CEFE), custo este mensal e em dólares, considerando os encargos financeiros, foi aplicado o percentual correspondente (ZANLUCA, 2016), conforme Equação 6:

$$\text{CEFE} = (\text{TFP} \times \text{SM}) \times (1 + \text{EF}) \quad (6)$$

$$\text{CEFE} = 48.000 \times 1,9675 = 94.440,00 \text{ US\$/mês}$$

Para o cálculo dos Custos Totais da Planta (CTP), em dólares, foi utilizada a Equação 7, que soma os resultados das Equações 4 e 6:

$$\text{CTP} = (\text{CETM}) + (\text{CEFE}) \quad (7)$$

$$\text{CTP} = 22.285,71 + 94.440,00 = 116.725,71 \text{ US\$/mês}$$

A conversão para a moeda nacional, resultando nos Custos Totais da Planta em Reais (CTPR), foi feita de acordo com a Equação 8, tomando como base a cotação do Dólar de Novembro de 2012 e multiplicando pelo valor obtido na Equação 7:

$$\text{CTPR} = (\text{CTP}) \times 2,14^* \quad (8)$$

$$\text{CTPR} = 116.725,71 \times 2,14 = 249.793,02 \text{ R\$/mês}$$

Para o cálculo do Investimento Mensal Estimado em Reais (IMER), foi utilizada a Equação 9, com os dados do Investimento Inicial do Projeto (IIP) e o Período Contratual do Projeto (PCP) convertido de anos para meses:

$$\text{IMER} = \frac{\text{IIP}}{\text{PCP} \times 12} \quad (9)$$

$$\text{IMER} = \frac{364.000.000}{41 \times 12} = 739.837,40 \text{ R\$/mês}$$

Para converter o valor encontrado pela Equação 9 em dólares, resultando no Investimento Mensal Estimado (IME), utilizou-se a Equação 10 com a mesma cotação do Dólar da Equação 8:

$$\text{IME} = \frac{\text{IIP}}{\frac{\text{PCP} \times 12}{2,14}} \quad (10)$$

$$\text{IME} = \frac{739.837,40}{2,14} = 345.718,41 \text{ US\$/mês}$$

Para o cálculo do volume da Produção de Água de Reuso (PAR) mensal, considerou-se a vazão apresentada na Tabela 3 e convertida para a unidade de medida desejada, conforme Equação 11:

$$\text{PAR} = \text{VARP} \times 60 \times 60 \times 24 \times 30 \quad (11)$$

$$\text{PAR} = 1 \times 60 \times 60 \times 24 \times 30 = 2.592.000 \text{ m}^3/\text{mês}$$

Para o cálculo do Custo Mínimo da Água de Reuso (CMAR) operacional, em dólares, realizou-se a soma do valor obtido pela Equação 4 com o da Equação 6 e este resultado dividido pelo valor obtido pela Equação 11, conforme Equação 12 abaixo:

$$\text{CMAR} = \frac{(\text{CETM} + \text{CEFE})}{\text{PAR}} \quad (12)$$

$$\text{CMAR} = \frac{(22.285,71 + 94.440)}{2.592.000} = 0,0450 \text{ US\$/m}^3$$

A conversão do resultado da Equação 12 para a moeda nacional, resultando no Custo Mínimo da Água de Reuso em Reais (CMARR), se fez pela multiplicação com a cotação do Dólar de Nov/2012, conforme Equação 13:

$$\text{CMARR} = \left(\frac{(\text{CETM} + \text{CEFE})}{\text{PAR}} \right) \times 2,14 \quad (13)$$

$$\text{CMARR} = 0,0450 \times 2,14 = 0,10 \text{ R\$/m}^3$$

O Lucro Unitário (LU) do metro cúbico da água de reuso foi calculado subtraindo o Custo Mínimo da Água de Reuso em Reais (CMARR) do Preço Médio de Venda (PMV), conforme Equação 14:

$$\text{LU} = \text{PMV} - \text{CMARR} \quad (14)$$

$$\text{LU} = 1,70 - 0,10 = 1,60 \text{ R\$/m}^3$$

O Custo Estimado Total da Água de Reuso (CETAR) por metro cúbico foi calculado dividindo-se o Investimento Mensal Estimado (IME) em dólares pela Produção de Água de Reuso (PAR) mensal, conforme Equação 15:

$$\text{CETAR} = \frac{\text{IME}}{\text{PAR}} \quad (15)$$

$$\text{CETAR} = \frac{345.718,41}{2.592.000} = 0,13 \text{ US\$/m}^3$$

A Equação 16 foi utilizada para a conversão do resultado da Equação 15 para o Custo Estimado Total da Água de Reuso em Reais (CETARR), tomando como base a cotação do Dólar de Novembro de 2012:

$$\text{CETARR} = \frac{\text{IME}}{\text{PAR}} \times 2,14 \quad (16)$$

$$\text{CETARR} = 0,13 \times 2,14 = 0,28 \text{ R\$/m}^3$$

3.4 Experimentos com membranas filtrantes

Nesta seção descreve-se o processo metodológico pertinente ao planejamento experimental com a utilização de tecnologia de filtragem por membranas.

Os experimentos foram realizados no laboratório do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Nove de Julho – Uninove.

Devido à não liberação de resultados de análises laboratoriais de amostras do concentrado e do permeado da planta estudada neste trabalho, por motivo de sigilo industrial, foram colhidas amostras do efluente de uma ETE localizada na região metropolitana de São Paulo, que passaram pelo processo de filtragem por membranas de 0,1 µm, com o objetivo de verificar se a qualidade do permeado obtido apresentaria dados semelhantes aos do permeado gerado em larga escala pela ETE, que utiliza membranas de 0,05 µm.

Utilizou-se para os experimentos os seguintes equipamentos:

- ✓ Bomba de vácuo da marca VIX com selo CE (Comunidade Europeia);

Figura 10 - Bomba de vácuo



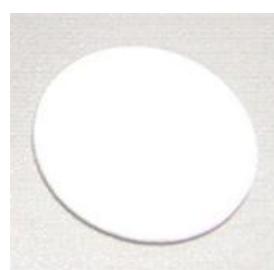
- ✓ Conjunto de filtração à vácuo em vidro, comercializado por RBR Vidros, composto por um funil de 300 mL com tampa, uma garra tipo alicate em alumínio, acoplador de vácuo e receptor do líquido filtrado;

Figura 11 - Conjunto de filtração



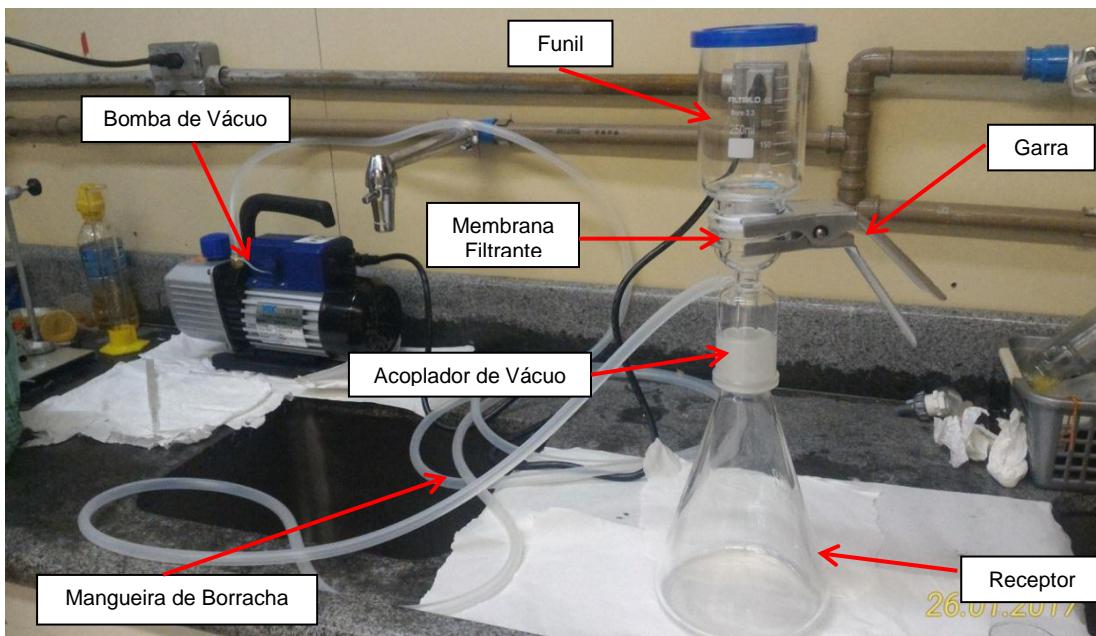
- ✓ Membrana de filtração PTFE Hidrofílico de 47 mm x 0,1 µm, comercializada por Saint Vallen Biotecnologia Ltda.

Figura 12 - Membrana de filtração



Para a execução dos experimentos, foram conectados os equipamentos de acordo com a seguinte sequência: a bomba de vácuo foi ligada ao acoplador de vácuo através de uma mangueira flexível de borracha e a membrana filtrante foi colocada entre o funil e o acoplador de vácuo, prensados pela garra e conectados no receptor do líquido filtrado, conforme Figura 13.

Figura 13 - Conexão dos equipamentos para filtração



A amostra de efluente foi caracterizada de acordo os métodos descritos pela APHA (2012) e citados na Resolução 357 CONAMA (2005). As análises realizadas no efluente foram: pH, temperatura, sólidos totais dissolvidos, material flutuante, odor, resíduos sólidos sedimentáveis, condutividade, densidade, turbidez, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), coliformes totais e bactérias heterotróficas.

Para iniciar o processo, inseriu-se o efluente no tanque de armazenamento de amostras (funil), acionou-se a bomba de vácuo, dando partida ao processo e consequentemente, marcando o tempo no cronometro. Mediú-se a vazão do permeado a cada fração de 25 mL, para se obter o perfil de fluxo do processo de filtração. Observou-se a passagem do permeado pela membrana, medindo-se a variação de temperatura no tanque receptor durante o processo. Ao final do processo, foram feitas as mesmas análises do pH, temperatura, sólidos totais dissolvidos, material flutuante, odor, resíduos sólidos sedimentáveis, condutividade, densidade, turbidez, oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), coliformes totais e bactérias heterotróficas no permeado (APHA, 2012), possibilitando um comparativo entre o efluente gerado na ETE e o permeado obtido pela utilização de membranas filtrantes.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Custos

Com base nos dados coletados na Tabela 3, foi possível estimar custos da operação da planta de filtragem por membranas com o uso das Equações de 1 a 14, gerando os valores constantes na Tabela 4.

O custo estimado do tratamento considerou o custo da quantidade total de conjuntos de membranas, ou seja, 9 conjuntos à US\$ 200.000,00 cada, e o tempo de vida de cada conjunto de 7 anos, calculado em Dólar e para um período mensal. Para se obter este custo considerando a manutenção do sistema, foi utilizado o acréscimo de um percentual de 4%, que é o usualmente utilizado. Para o custo estimado com funcionários, considerou-se 3 jornadas de trabalho de 8 horas, realizadas por 8 funcionários em cada jornada e salários médios de U\$ 2.000,00. O percentual utilizado dos encargos financeiros sociais incidentes nos custos com funcionários foi de 96,75% (ZANLUCA, 2016). Assim, foi possível estimar os custos totais da planta e o custo operacional mínimo para a produção de água de reuso. Conhecendo o preço médio de venda de 1,70 R\$/m³ apresentado na Tabela 3, calculou-se o lucro unitário de 1,60 R\$/m³ estimado.

Tabela 4 - Custo mensal de operação da planta

Custo Estimado do Tratamento Mensal, CET (US\$/mês)	21.428,57
Custo Estimado do Tratamento e Manutenção, CETM (US\$/mês)	22.285,71
Custo Estimado com Funcionários, CEF (US\$/mês)	48.000,00
Custo Estimado com Funcionários e Encargos, CEFE (US\$/mês)	94.440,00
Custos Totais da Planta, CTP (US\$/mês)	116.725,70
Custos Totais da Planta em Reais, CTPR (R\$/mês)	249.793,02
Custo Mínimo da Água de Reuso, CMAR (US\$/m ³)	0,0450
Custo Mínimo da Água de Reuso em Reais, CMARR (R\$/m ³)	0,10
Lucro Unitário, LU (R\$/m ³)	1,60

O lucro unitário por metro cúbico da água de reuso apresentou uma variação significativa comparando-se com o custo operacional da sua produção, como pode-se observar na Tabela 4.

Sendo a água de reuso gerada pela ETE destinada para uso industrial, pode-se considerar como base de comparação de preços o valor referente ao fornecimento Industrial com consumo acima de 50 m³/mês (Tabela 1). Pode-se observar que o custo real mensal de produção da água de reuso (Tabela 5) está muito aquém do preço praticado para qualquer classe de consumo.

A Tabela 5 foi gerada considerando-se o investimento inicial para a implementação de filtragem por membranas na ETE e a capacidade de produção de água de reuso. Com estes dados, calculou-se o custo estimado total da água de reuso.

Comparando-se o valor de 0,28 R\$/m³ com o preço médio de venda da água de reuso produzida na ETE, de 1,70 R\$/m³ (Tabela 3), pode-se avaliar que o processo de produção utilizando filtragem por membranas é financeiramente vantajoso para seus investidores.

Comparando-se o preço médio de venda da água de reuso com o valor tarifário de 17,46 R\$/m³ para consumo acima de 50 m³/mês apresentado na Tabela 1, para a classe de consumo industrial, verifica-se que, caso os usuários desta classe de consumo aumentem a utilização de água de reuso para fins não potáveis, reduzindo o uso de água tratada, podem gerar economias proporcionais em valores significativos.

Com os dados levantados na Tabela 3 e os calculados na Tabela 4, e levando-se em consideração que são estimativas realizadas baseadas nestes dados, pode-se verificar que a produção de água de reuso é financeiramente favorável, uma vez que praticando o PMV (Preço Médio de Venda), o consumidor final obtém a uma economia de 90,26% sobre cada metro cúbico consumido, conforme Equação 17:

$$\% \text{ economia} = \frac{(\text{Tarifa Indústria} - \text{PMV})}{\text{Tarifa Indústria}} \times 100 \quad (17)$$

Onde:

$$\text{PMV} = 1,70 \text{ R\$ / m}^3 \text{ (Tabela 1)}$$

$$\text{Tarifa Indústria} = 17,46 \text{ R\$ / m}^3 \text{ (Tabela 3)}$$

$$\% \text{ economia} = \frac{(17,46 - 1,70)}{17,46} \times 100 = 90,26\%$$

Conforme Mierzwa *et al.* (2008), "...uma das alegações para que os sistemas de separação por membranas não sejam considerados no tratamento de água para abastecimento público é o seu elevado custo, sem que, no entanto, isto seja devidamente comprovado. Uma das possíveis causas para que se tenha esta percepção é o fato do Brasil não produzir membranas, além do número limitado de empresas que atuam no mercado, mesmo assim com um foco para aplicações industriais, em geral, de pequeno porte. Tal condição tem influência direta nos critérios de formação de preços dos sistemas de separação por membranas, comprometendo uma avaliação mais criteriosa da viabilidade econômica da utilização de processos baseados na tecnologia de membranas para tratamento de água de abastecimento".

Tabela 5 - Custo real mensal de produção

Investimento Mensal Estimado em Reais, IMER (R\$/mês)	739.837,40
Investimento Mensal Estimado, IME (U\$\$/mês)	345.718,41
Produção de Água de Reuso, PAR (m ³ /mês)	2.592.000
Custo Estimado Total da Água de Reuso, CETAR (US\$/m ³)	0,13
Custo Estimado Total da Água de Reuso em Reais, CETARR (R\$/m ³)	0,28

Além de propiciar ao consumidor final uma economia significativa, a planta pode proporcionar à ETE o seguinte Lucro Mensal Estimado (LME), resultado da multiplicação da Produção de Água de Reuso (PAR) pelo Lucro Unitário (LU), conforme Equação 18:

$$\text{LME (Lucro Mensal Estimado)} = \text{PAR} \times \text{LU} \quad (18)$$

$$\text{LME} = 2.592.000 \times 1,60 = \text{R\$ } 4.147.200,00$$

O Lucro Mensal Estimado de R\\$ 4.147.200,00 permite o cálculo do retorno de investimento estimado para cada ano de operação da planta. É conseguido através da equação 19, onde utiliza-se a sigla da expressão em inglês *Return On Investment* (ROI) para representá-lo:

$$\text{ROI} = \text{Lucro Mensal Estimado} \times 12 \quad (19)$$

$$\text{ROI} = 4.147.200,00 \times 12 = \text{R\$ } 49.766.400,00$$

Com este valor de ROI, pode-se calcular através da Equação 20 o tempo de recuperação, em anos, cuja expressão em inglês é *Payback*, do Investimento Inicial do Projeto (IIP) constante na Tabela 3:

$$\text{Payback} = \frac{\text{IIP}}{\text{ROI}} \quad (20)$$

$$\text{Payback} = \frac{364.000.000}{49.766.400} = 7,31 \text{ anos}$$

Desta forma, verificou-se que o investimento na técnica de separação por membranas pode proporcionar vantagens financeiras tanto para o investidor como para o usuário final do produto que, neste caso, é a água de reuso, o que demonstra também a sua viabilidade econômica.

Oliveira e Von Sperling (2005) avaliaram a eficiência de remoção de contaminantes em 166 ETEs brasileiras e verificaram que as técnicas utilizadas no

tratamento de esgoto apresentaram resultados onde todos os parâmetros não estavam de acordo com os valores esperados descritos pela literatura técnica.

Como verificado, o processo de separação por membranas é mais eficiente que os atuais processos de tratamento de esgoto. Logo, ao se fazer todo o tratamento de uma cidade utilizando o processo de tratamento por membranas, a qualidade das águas dos rios e lagos onde ocorrem os despejos dos efluentes retornariam ao melhor nível possível, o que possibilitaria a recuperação total dos meios ambientes aquáticos e de todos os sistemas ecológicos que deles dependem. Como consequência, futuramente, reduzir-se-iam também os custos com o tratamento das águas captadas destes corpos d'água.

Além das vantagens ecológicas, a possível utilização direta como água de reuso para atendimento de parte da demanda da agricultura e das indústrias aumentaria a disponibilidade de água potável para o consumo humano. No caso da agricultura, isto já havia sido provado pelo trabalho de Passarini et al. (2014), para uma ETE da cidade de Campinas, SP.

4.2 Experimentos de filtração do efluente e esgoto de uma ETE no sistema de membranas filtrantes

Antes de iniciar-se os experimentos, apresentou-se que, de acordo com a entrevista realizada em uma grande empresa de saneamento, utiliza-se na planta a técnica de ultrafiltração com membranas filtrantes para a produção de água de reuso à partir do efluente sanitário originado na ETE, atingindo uma qualidade de água 50% superior ao exigido pelos padrões de potabilidade (ANEXO I; ANEXO II), cumprindo o contratado pela empresa consumidora.

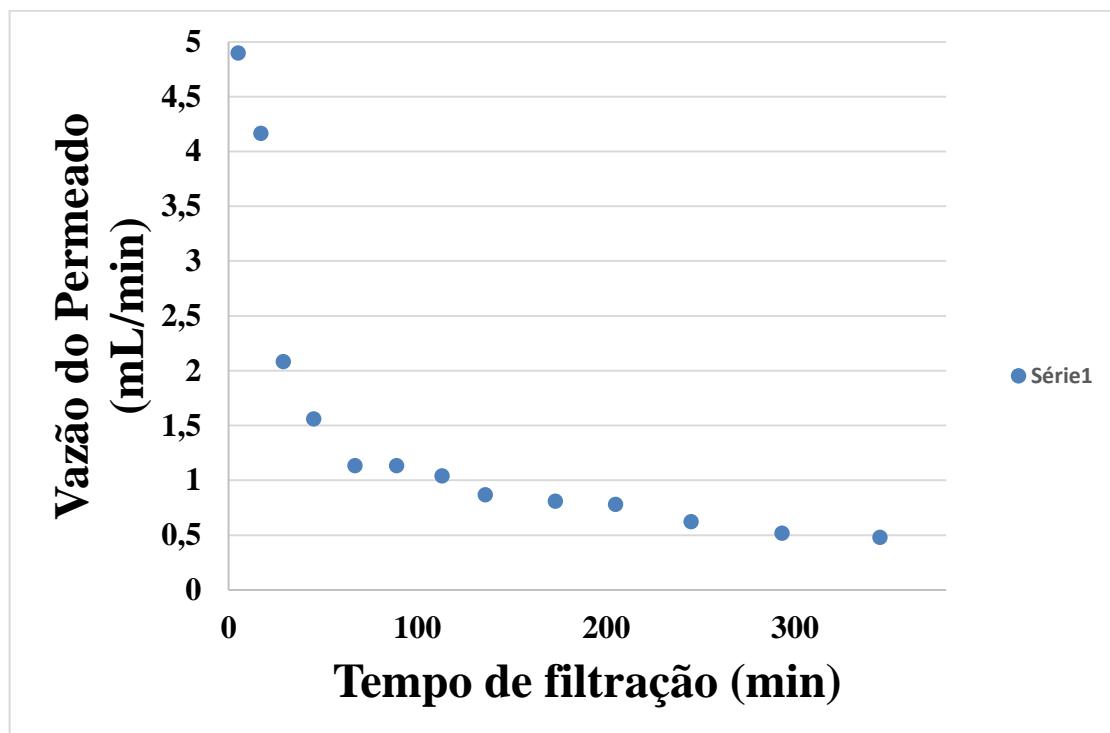
Contudo, este percentual pode ser alterado de acordo com a mistura aplicada do efluente com a água de reuso. Quando esta qualidade não é atingida, é utilizada a técnica de osmose inversa com nanofiltração no permeado não conforme, alcançando assim os parâmetros ora contratados.

O processo de limpeza e de retrolavagem na osmose inversa também é feita de forma automática, como o das membranas apresentada na seção 3.2 deste trabalho. Porém, como seu uso não é constante, pois somente é utilizado em casos

de não conformidade do permeado, realiza a filtração e a retrolavagem logo na sequência.

Os experimentos realizados utilizaram o efluente de uma ETE da região metropolitana de São Paulo coletado antes do seu despejo no córrego local. As amostras do efluente coletadas foram filtradas com o uso de membranas, apresentando uma vazão do permeado de acordo com a Curva de filtração apresentada na Figura 14:

Figura 14 - Curva de filtração



Nota-se que a vazão diminui com o passar do tempo, o que já era previsto, em função do acúmulo dos resíduos retidos pela membrana.

As amostras do efluente coletado e do permeado obtido foram encaminhadas para análise da empresa Alfa Laboratórios de Análise e Diagnóstico Ambiental Ltda, objetivando a confirmação de que a qualidade do permeado atingiu valores próximos ou melhores do que os exigidos pelos padrões de potabilidade, uma vez que os dados sobre a qualidade do permeado gerado pela ETE visitada

foram passados pela entrevista pessoal, apenas informando que estariam 50% superiores aos padrões estabelecidos.

Na Tabela 6 estão os resultados das análises químicas realizadas nas amostras do efluente e do permeado, que foram comparadas com as normas de despejo de efluentes em corpos d'água, no caso rios tipo 2 (CONAMA, 2005), e da potabilidade da água (MS, 2004).

O laboratório de análises químicas utilizou em suas análises as referências da APHA, AWWA, WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater, 22th edition. Washington DC.: American Public Health Association, 2012.*

Tabela 6 - Comparativo Efluente x Permeado x Padrões

Parâmetros	Efluente da ETE	Permeado	CONAMA 357/05
Condutividade Elétrica 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	600 \pm 0,10	743 \pm 0,10	-
DBO _(5, 20°C) (mg O ₂ /L)	19 \pm 2	14 \pm 2	10
DQO (mg O ₂ /L)	75 \pm 2	67 \pm 2	90
OD (mg O ₂ /L)	7,2 \pm 0,1	7,5 \pm 0,1	> 4,0
Temperatura (°C)	26,0 \pm 0,5	18,5 \pm 0,5	~ 20
pH	6,9 \pm 0,1	7,2 \pm 0,1	6 - 9
Densidade (g/L)	0,9857 \pm 0,0031	0,9852 \pm 0,0020	-
Turbidez (NTU)	7,39 \pm 0,01	1,32 \pm 0,01	100
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	1440 \pm 242,5	740,0 \pm 121,6	500
Resíduos minerais (mg/L)	200,0 \pm 20,0	193,3 \pm 23,1	-
Resíduos Sólidos Sedimentáveis (mL/L)	4,7 \pm 0,6	0 \pm 0	1,0
Material flutuante	Presente	Ausente	Ausente
Odor	Presente	Ausente	Ausente
Coliformes Totais (NMP/100 mL)	1600	0	1000
Bactérias Heterotróficas (UFC/mL)	1100	0	500

Pode-se observar que a maioria dos parâmetros está de acordo com os padrões e normas utilizados para as análises.

Cabe ressaltar que uma ETE, normalmente, conforme a resposta do entrevistado, realiza um tratamento no esgotamento sanitário para gerar um efluente adequado para despejo em corpos d'água ou rios tipo 4 (CONAMA, 2005), que não são destinados ao abastecimento para consumo humano.

Desta forma, realizaram-se as comparações com normas e padrões de despejo em rios cujas águas são destinadas ao abastecimento para consumo humano, obtendo resultados que demonstram a viabilidade técnica de obter uma água de reuso de qualidade melhorando sua produção com a utilização da técnica de membranas filtrantes.

Na Figura 15 pode-se observar a diferença na turbidez e coloração do efluente da ETE comparado com o permeado obtido da filtração por membranas.

Figura 15 - Efluente da ETE e permeado obtido da filtração por membranas



Este índice de turbidez alcançado pela filtração por membranas está melhor que o exigido pelos padrões de potabilidade, conforme a Tabela 6.

5. CONCLUSÕES

Várias já são as aplicações com o uso da técnica de filtragem por membranas, incluindo-se a produção de água potável. Contudo, poucos são os trabalhos que tratam da produção de água potável à partir de efluentes sanitários. A técnica de filtragem por membranas mostrou-se ser uma alternativa capaz de alcançar este objetivo.

Neste trabalho foi exposto o caso de uma grande empresa de saneamento, que produz água de reuso à partir de efluentes sanitários utilizando membranas filtrantes com uma qualidade 50% superior ao exigido pelos padrões de potabilidade e, juntamente com os resultados dos experimentos realizados, demonstrou sua viabilidade técnica.

Também verificou-se neste trabalho uma utilização para produção em larga escala de água de reuso com um retorno de investimento bastante favorável. Os resultados indicaram permitir economia financeira para o consumidor final de 90,26% para cada metro cúbico de água de reuso utilizado e para o investidor, por estas estimativas, um retorno de investimento atrativo, com *payback* em 7,31 anos, para um contrato de 41 anos, demonstrando desta forma a viabilidade econômica do uso de membranas filtrantes para produção de água de reuso.

Os experimentos demonstraram que a filtração por membranas possui condições técnicas de gerar uma água de reuso adequada para o abastecimento do consumo humano.

Assim, foi possível verificar que a utilização da técnica de filtragem por membranas para tratamento de efluentes sanitários possui condições técnicas, financeiras e econômicas favoráveis para a produção de água de reuso de qualidade, podendo minimizar os impactos causados pela atual crise hídrica.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Dando continuidade aos estudos iniciados por este trabalho, sugere-se para os próximos trabalhos avaliações para a utilização do processo de produção de água de reuso por meio de membranas filtrantes diretamente no efluente de entrada de uma ETE e no esgotamento sanitário de instalações de menor porte, verificando se a eficiência do processo se repete.

Pequenas e médias indústrias, ou até mesmo instalações residenciais, estimulando o uso de membranas filtrantes e, consequentemente, incentivando a sua produção para atendimento desta demanda, possibilitariam a redução dos custos de sua produção.

Avaliar o impacto cultural e social no Brasil da reutilização do esgotamento sanitário, tratado por meio deste processo, para fins potáveis poderia auxiliar na conscientização e no investimento na tecnologia na busca de formas alternativas para o combate à escassez mundial de água doce.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-HARBI, O. A.; KHAN, M. M.; ÖZGÜR, C. Designing of a low cost super-hydrophilic membrane for wastewater treatment. **Materials and Design**, n. 96, p. 296-303, 2016.

ANA, AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL), **Relatório ANA - Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2013**, Brasília – DF, 2013.

. **Relatório ANA - Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2014**, Brasília – DF, 2014.

. **Relatório ANA - Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: 2015**, Brasília – DF, 2015.

ANG, W. L.; MOHAMMAD, A. W.; HILAL, N.; LEO, C. P. A review on the applicability of integrated/hybrid membrane processes in water treatment and desalination plants. **Desalination**, v. 363, p. 2-18, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.03.008>>. Acessado em 21/06/2016.

APHA, AWWA, WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater, 22 th edition. Washington DC.: American Public Health Association, 2012.

BNDS. BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL. **Guias Socioambientais – abastecimento de água e esgotamento sanitário**. Publicado em Setembro de 2014. Disponível em: <http://www.bnDES.gov.br/wps/wcm/connect/site/f533cb52-2cf3-4993-9482-94e33b8b1f52/GuiaSocioAmbiental_Agua_e_Esgoto.pdf?MOD=AJPERES&CACHEID=ROOTWORKSPACE.Z18_7QGCHA41LORVA0AHO1SIO51085-f533cb52-2cf3-4993-9482-94e33b8b1f52-lq0wl9e>. Acessado em: 27/12/2016.

BORDONALLI, A. C. O.; MENDES, C. G. N. Reúso de água em indústria de reciclagem de plástico tipo PEAD. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v.14, n.2, p. 235-244, abr./jun. 2009.

BRASIL. **Lei 9.433 de 08 de Janeiro de 1997 – Política Nacional de Recursos Hídricos**. Disponível em : <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9433.htm>. Acessado em 02/01/2017.

CETESB. COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Águas interiores**. Disponível em: <<http://aguasinteriores.cetesb.sp.gov.br/informacoes-basicas/8-2/>>. Acessado em: 22/12/2016.

CHOONG, L. T.; LIN, Y.; RUTLEDGE, G. C. Separation of oil-in-water emulsions using electrospun fiber membranes and modeling of the fouling mechanism. **Journal of Membrane Science**, n. 486, p. 229-238, 2015.

CONAMA. CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução número 357 de 17 de Março de 2005**. Ministério do Meio Ambiente, 2005.

Resolução número 430

de 13 de Maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente, 2011.

DASGUPTA, J.; SIKDER, J.; CHAKRABORTY, S.; CURCIO, S.; DRIOLI, E. Remediation of textile effluents by membrane based treatment techniques: A state of the art review. **Journal of Environmental Management**, v. 147, p. 55-72, 2015.

DE LUCA, S. J.; MONTEGGIA, L. O. – Cap. 9 - Outros processos de desinfecção. In: **Desinfecção de efluentes sanitários**. Ricardo Franci Gonçalves (coordenador), ABES (Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental), Projeto PROSAB, Rio de Janeiro, RiMa, 438 p., 2003

DRAPER, J. W. Experiments on Endosmosis. **Journal of the Franklin Institute**, v. 21, p. 177-182, Março 1836.

ELIMELECH, M.; PHILLIP, W. A. The Future of Seawater Desalination. **Energy, Technology, and the Environment, Science**, v. 333, p. 712–717, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1126/science.1200488>>. Acessado em 21/06/2016.

ESFAHANI, M. R.; TYLER, J. L.; STRETZ, H. A.; WELLS, M. J. M. Effects of a dual nanofiller, nano-TiO₂ and MWCNT, for polysulfone-based nanocomposite membranes for water purification. **Desalination**, v. 372, p. 47–56, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2015.06.014>>. Acessado em 21/06/2016.

G1 Economia. **Recursos hídricos no Brasil são mal coordenados, diz relatório da OCDE**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/economia/crise-da-agua/noticia/2015/09/recursos-hidricos-no-brasil-sao-mal-coordenados-diz-relatorio-da-ocde.html>>. Acessado em 21/11/2015.

G1 Fantástico. **Água de reúso pode ser a solução para crise hídrica, dizem especialistas**. Disponível em: <<http://g1.globo.com/fantastico/noticia/2015/02/agua-de-reuso-pode-ser-solucao-para-crise-hidrica-dizem-especialistas.html>>. Acessado em 21/11/2015.

GAN, Q. Evaluation of solids reduction and backflush technique in crossflow microfiltration of a primary sewage effluent. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 27, p. 9–14, Department of Chemical Engineering, The Queen's University of Belfast, Belfast, BT9 5AG, 1999.

GOH, P. S.; MATSUURA, T.; ISMAIL, A. F.; HILAL, N. Recent trends in membranes and membrane processes for desalination. **Desalination**, v. 391, p. 43-60, 2016.

GURNEY, C. W.; CRYST, S. Aeroallergen studies with the molecular filter membrane. **The Journal of Allergy**, p. 533-541, Department of Internal Medicine, University of Michigan Medical School, March, 1955.

HAKEN, D.; DITTMAR T.; SCHMALS, V.; WORCH, E. Disinfection of biologically treated wastewater and prevention of biofouling by UV/electrolysis hybrid technology: Influence factors and limits for domestic wastewater reuse. **Water Research**, n. 52, p. 20-28, 2014.

HESPAÑOL, I. A inexorabilidade do reuso potável direto. **Revista DAE**, São Paulo, v. 63 n. 198, p. 63-82, jan-abril 2015.

KUNZ, A.; PERALTA-ZAMORA, P.; GOMES DE MORAES, S.; DURÁN, N. Novas tendências no tratamento de efluentes têxteis. **Quim. Nova**, v. 25, n. 1, p. 78-82, 2002.

LUO, Y.; GUO, W.; NGO, H.H.; NGHIEM, L.D.; HAI, F.I.; ZHANG, J.; LIANG, S.; WANG, X.C. A review on the occurrence of micropollutants in the aquatic environment and their fate and removal during wastewater treatment. **Science of the Total Environment**, v. 473, p. 619-641, 2014.

MARCONI, M. A.; LAKATOS, E. M.. **Fundamentos de metodologia científica**. 5.ed. São Paulo, Editora Atlas, 2003.

MICHAEL-KORDATOU, I.; MICHAEL, C.; DUAN, X.; HE, X.; DIONYSIOU, D. D.; MILLS, M. A.; FATTA-KASSINOS, D. Review - Dissolved effluent organic matter: Characteristics and potential implications in wastewater treatment and reuse applications. **Water Research**, v. 77, p. 213-248, 2015.

MIERZWA, J. C. **O uso operacional e o reuso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria – Estudo de caso da Kodak brasileira**. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo - São Paulo – SP, 2002.

MIERZWA, J. C.; DA SILVA, M. C. C.; RODRIGUES, L. D. B.; HESPAÑOL, I. Tratamento de água para abastecimento público por ultrafiltração: avaliação comparativa através dos custos diretos de implantação e operação com os sistemas convencional e convencional com carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.13, n.1, Rio de Janeiro, jan./mar. 2008. Versão On-Line. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522008000100011>. Acessado em: 04/06/2015.

MIRRE, R. C.; YOKOYAMA, L.; PESSOA, F. L. P. Reuso de efluentes industriais em refinarias de petróleo usando o método DFA para sistemas regenerativos. **Ambi-Água**, Taubaté, v. 6, n. 3, p. 127-151, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.4136/ambi-agua.545>>.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Água**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua>>. Acessado em: 23/12/2016)

MS. MINISTÉRIO DA SAÚDE. **Portaria número 518 de 25 de Março de 2004**. Editora do Ministério da Saúde, Brasília – DF, 2004.

OLIVEIRA, S.M.A.C.; VON SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, compreendendo diversas tecnologias. Análise de desempenho. **Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES)**, v.10, n.4, p. 347-357, 2005a.

_____. _____. Influência de fatores de projeto e operação. **Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES)**, v.10, n.4, p. 358-368, 2005b.

OLIVEIRA NETO, G.C.; NAKAMURA, S.Y.; PINTO, L.F.R.; SANTANA, J.C.C. Conformidade ambiental por meio da implantação de estação de tratamento de efluentes em uma empresa do segmento de cosméticos. In: **Anais XXII Simpósio de Engenharia de Produção – SIMPEP 2015**, Bauru, SP, 2015.

ONU (Organização das Nações Unidas). Agenda 21 Global - Cap. 18 – In: **Proteção da qualidade e do abastecimento dos recursos hídricos: aplicação de critérios integrados no desenvolvimento, manejo e uso dos recursos hídricos**. Rio de Janeiro, 1992. Disponível em: <www.mma.gov.br/estruturas/agenda21/_arquivos/cap18.pdf>. Acessado em 02/01/2017.

PASSARINI, K.C. **Proposta metodológica para a recuperação de solos e a reutilização total de efluentes sanitários mediante o uso de tecnologias mais limpas**. Dissertação (mestrado). Universidade Nove de Julho – UNINOVE. São Paulo – SP, 2011.

PASSARINI, K.C.; PEREIRA M.A.; FARIAS, T.M.B.; CALARGE, F.A.; SANTANA, J.C.C. Assessment of the viability and sustainability of an integrated waste management system for the city of Campinas (Brazil), by means of ecological cost accounting. **Journal of Cleaner Production**, v. 65, p. 479-488, 2014.

SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo). **Site Sabesp**. Disponível em <<http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=49>>. Acessado em 29/05/2015.

_____. **Notícias**. Disponível em:<<http://site.sabesp.com.br/site/imprensa/noticias-detalhe.aspx?secaold=66&id=4917>>. Acessado em 19/09/2016.

_____. **Tarifas**. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/uploads/file/clientes_servicos/comunicado_03_2016.pdf>. Acessado em 20/09/2016.

SADR, S.M.K.; SAROJ, D.P.; KOUCHAKI, S.; ILEMOBADE, A.A.; OUKI, S.K. A group decision-making tool for the application of membrane technologies in different water reuse scenarios. **Journal of Environmental Management**, v. 156, p. 97-108, 2015.

SANTOS, S.G.; MIGUEL, E.N. **Oportunidades para redução de efluentes líquidos industriais: caso da OPP Química S.A.** Monografia (Especialização em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais na Indústria) – Escola Politécnica da UFBA, Salvador, 2002.

SCHIPPER, J.; KENNEDY, M.; SALINAS, S. **Introduction to Membrane technology**. UNESCO, 2013.

SILVA, J.; TORRES, P.; MADERA, C. Domestic wastewater reuse in agriculture. A review. **Agronomia Colombiana**, v.26, n.2, p. 347-359, 2008.

STEBBINS JR., J. I. I. On the efficiency of frederick breyer's "micro-membrane filter", **Journal of the American Chemical Society**, v. 8, p. 192-197, 1886.

SUÁREZ, A.; FERNÁNDEZ, P.; IGLESIAS, J. R.; IGLESIAS, E.; RIERA, F. A. Cost assessment of membrane processes: A practical example in the dairy wastewater reclamation by reverse osmosis. **Journal of Membrane Science**, n. 493, p. 389-402, 2015.

SUASSUNA, J. Artigo – A má distribuição da água no Brasil, 2004. Disponível em http://reporterbrasil.org.br/2004/04/b-artigo-b-a-ma-distribuicao-da-agua-no-brasil/?gclid=CKqSia_q1cUCFVSRHwodYz4AQA. Acessado em 22/05/2015.

TOMAZELA, A. B. G. **Avaliação de sistemas de tratamento e reuso de esgoto sanitário para fins de irrigação**. Tese (doutorado em agronomia) – Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp – Campus Botucatu, SP, 2006.

UOL Economia. **Cotações: Dólar comercial**. Disponível em: <<http://economia.uol.com.br/cotacoes/cambio/dolar-comercial-estados-unidos/?historico>>. Acessado em 11/11/2016.

UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization). The united nations world water development report 2003: Water for people Water for life. In: **WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2003**, Barcelona. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/en/loginarea/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2015-water-for-a-sustainable-world/>>. Acessado em 26/04/2016.

_____. The united nations world water development report 2015: Water for a sustainable world. In: **WWAP (United Nations World Water Assessment Programme), 2015**, Paris. Disponível em: <<http://www.unesco.org/new/en/loginarea/natural-sciences/environment/water/wwap/wwdr/2015-water-for-a-sustainable-world/>>. Acessado em 11/05/2015.

WESCHENFELDER, S.E.; MELLO, A.C.C.; BORGES, C. P.; CAMPOS, J. C. Oilfield produced water treatment by ceramic membranes: Preliminary process cost estimation. **Desalination**, n. 360, p. 81-86, 2015.

YIN, J.; DENG, B. Polymer-matrix nanocomposite membranes for water treatment, **Journal of Membrane Science**, v. 479, p. 256–275, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2014.11.019>>. Acessado em 21/06/2016.

YUAN, H.; HE, Z. Integrating membrane filtration into bioelectrochemical systems as next generation energy-efficient wastewater treatment technologies for water reclamation: a review. **Bioresource Technology**, v. 195, p. 202–209, 2015.

Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2015.05.058>>. Acessado em 21/06/2016.

ZAIBEL, I.; ZILBERG, D.; GROISMAN, L.; ARNON, S. Impact of treated wastewater reuse and floods on water quality and fish health within a water reservoir in an arid climate. **Science of the total environment**, v. 559, p. 268-281, 2016.

ZANLUCA, J. C. **Cálculos de encargos sociais e trabalhistas**. Disponível em: <<http://www.guiatrabalhista.com.br/tematicas/custostrabalhistas.htm>> Acessado em 17/11/2016.

ZHANG, P.; KNOTIG, P.; GRAY, S.; DUKE, M. Scale reduction and cleaning techniques during direct contact membrane distillation of seawater reverse osmosis brine. **Desalination**, v. 374, p. 20-30, 2015.

ZHANG, S.; WANG, R.; ZHANG, S.; LI, G.; ZHANG, Y. Treatment of wastewater containing oil using phosphorylated silica nanotubes (PSNTs)/polyvinylidene fluoride (PVDF) composite membrane. **Desalination**, v. 332, p. 109-116, 2014.

ANEXOS

Anexos da Portaria 2914/2011 do Ministério da Saúde que trata dos parâmetros da potabilidade da água e da Resolução Conama 430/2011 que dispõe sobre condições e padrões de lançamentos de efluentes:

ANEXO I - Tabela de padrão microbiológico da água para consumo humano

Tipo de água		Parâmetro	VMP(1)
Água para consumo humano		Escherichia coli(2)	Ausência em 100 mL
Água tratada	Na saída do tratamento	Coliformes totais (3)	Ausência em 100 mL
		Escherichia coli	Ausência em 100 mL
	No sistema de distribuição (reservatórios e rede)	Coliformes totais (4)	Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem menos de 20.000 habitantes Apenas uma amostra, entre as amostras examinadas no mês, poderá apresentar resultado positivo
			Sistemas ou soluções alternativas coletivas que abastecem a partir de 20.000 habitantes Ausência em 100 mL em 95% das amostras examinadas no mês

NOTAS: (1) Valor máximo permitido.

(2) Indicador de contaminação fecal.

(3) Indicador de eficiência de tratamento.

(4) Indicador de integridade do sistema de distribuição (reservatório e rede).

ANEXO II - Tabela de padrão de turbidez para água pós-filtração ou pré-desinfecção

Tratamento da água	VMP(1)
Desinfecção (para águas subterrâneas)	1,0 uT(2) em 95% das amostras
Filtração rápida (tratamento completo ou filtração direta)	0,5(3)uT(2) em 95% das amostras
Filtração lenta	1,0(3)uT(2) em 95% das amostras

NOTAS: (1) Valor máximo permitido.

(2) Unidade de Turbidez.

(3) Este valor deve atender ao padrão de turbidez de acordo com o especificado no § 2º do art. 30.

ANEXO III – Padrão para o despejo de efluentes

Parâmetros inorgânicos	Valores máximos
Arsênio total	0,5 mg/L As
Bário total	5,0 mg/L Ba
Boro total (Não se aplica para o lançamento em águas salinas)	5,0 mg/L B
Cádmio total	0,2 mg/L Cd
Chumbo total	0,5 mg/L Pb
Cianeto total	1,0 mg/L CN
Cianeto livre (destilável por ácidos fracos)	0,2 mg/L CN
Cobre dissolvido	1,0 mg/L Cu
Cromo hexavalente	0,1 mg/L Cr ⁺⁶
Cromo trivalente	1,0 mg/L Cr ⁺³
Estanho total	4,0 mg/L Sn
Ferro dissolvido	15,0 mg/L Fe
Fluoreto total	10,0 mg/L F
Manganês dissolvido	1,0 mg/L Mn
Mercúrio total	0,01 mg/L Hg
Níquel total	2,0 mg/L Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg/L N
Prata total	0,1 mg/L Ag
Selênio total	0,30 mg/L Se
Sulfeto	1,0 mg/L S
Zinco total	5,0 mg/L Zn
Parâmetros Orgânicos	Valores máximos
Benzeno	1,2 mg/L
Clorofórmio	1,0 mg/L
Dicloroeteno (somatório de 1,1 + 1,2cis + 1,2 trans)	1,0 mg/L
Estireno	0,07 mg/L
Etilbenzeno	0,84 mg/L
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,5 mg/L C ₆ H ₅ OH
Tetracloreto de carbono	1,0 mg/L
Tricloroeteno	1,0 mg/L
Tolueno	1,2 mg/L
Xileno	1,6 mg/L

Fonte: Resolução Conama 430 (2011)