

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL

Maria Clara Rodrigues de Lima

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REATORES DE ULTRAFILTRAÇÃO NO  
POLIMENTO DE EFLUENTE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM SÉRIE.**

JOÃO PESSOA

2018

MARIA CLARA RODRIGUES DE LIMA

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REATORES DE ULTRAFILTRAÇÃO NO  
POLIMENTO DE EFLUENTE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM SÉRIE.**

Trabalho de Conclusão de Curso que apresenta à Coordenação do Curso de Química Industrial do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Químico Industrial.

Orientador: Prof. Dr. José Soares.

JOÃO PESSOA

2018

L732e Lima, Maria Clara Rodrigues de

Estudo Da Eficiência De Reatores De Ultrafiltração No Polimento De Efluente De Lagoas De Estabilização Em Série/ Maria Clara Rodrigues de Lima. – João Pessoa, 2018.

74f. il.:

Orientador: Prof. Dr. José Soares.

Monografia (Curso de Graduação em Química Industrial)  
Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Membranas filtrantes. 2. Ultrafiltração. 3. Permeado. 4. Água de reuso .5. Lagoas de estabilização em série. I. Título

BS/CT/UFPB

CDU. 2.ed 543(043.2)

MARIA CLARA RODRIGUES DE LIMA

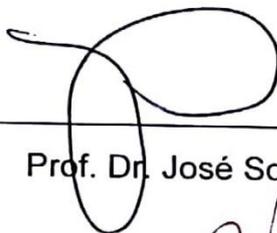
**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REATORES DE ULTRAFILTRAÇÃO NO  
POLIMENTO DE EFLUENTE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM SÉRIE.**

Trabalho de Conclusão de Curso que apresenta à Coordenação do Curso de Química Industrial do Centro de Tecnologia da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos para obtenção do título de Químico Industrial.

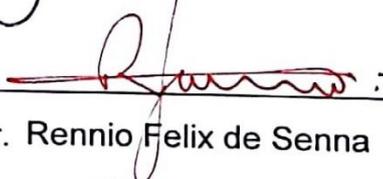
Data: 15 de Junho de 2018

Resultado: Aprovado, Nota: 10,0

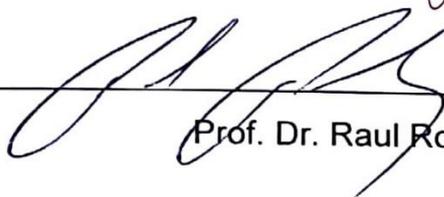
**Banca Examinadora**



Prof. Dr. José Soares



Prof. Dr. Rennio Felix de Senna



Prof. Dr. Raul Rosenhaim

JOÃO PESSOA

2018

## **DEDICATÓRIA**

Aos meus amados pais Ana e Jaime, que me impulsionaram nessa jornada de conhecimento, me apoiando incondicionalmente durante o curso de graduação e por me incentivarem a dar sempre o meu melhor.

À minha estimada tia Lela, que hoje faz morada no céu e me acompanhou lá de cima nos últimos anos da graduação, me abençoando e me guiando com sua vista privilegiada.

À minha preciosa avó Lindinalva, pelo seu zelo e dedicação constantes.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me permitido avançar no caminho que escolhi e por me proporcionar chegar até aqui.

À minha família, por serem meus maiores incentivadores ao crescimento moral e intelectual.

Aos meus Pais, por serem meus maiores exemplos dentro e fora da vida acadêmica.

Às minhas irmãs Mariana e Beatriz que acreditaram em mim em todos os momentos difíceis.

À minha avó Lindinalva Rodrigues por sempre me apoiar e se dedicar em ser a melhor avó do mundo em todos os momentos.

Ao meu amigo e companheiro nessa jornada, Danilo Leite, por ter sempre me apoiado frente às dificuldades e por fazer parte dos momentos mais felizes que vivi durante a graduação.

Aos meus Avós Maria dos Santos, Jaime dos Santos e minha tia Ana Flávia dos Santos, por terem me acolhido no primeiro ano de graduação e por me ensinarem lições valiosas sobre a vida.

Ao meu primo Lucas Diniz por me auxiliar com o software R e compartilhar seus conhecimentos em estatística.

Aos meus amigos que me apoiaram e aliviaram as tensões antes e durante a escrita do trabalho, sempre com boas risadas e amizade leve: Vanessa Maria da Silva, Harrison Castro e Mykaela Dias. Em especial à Jessica Rafaella Marques, que me auxiliou com seu inglês impecável na escrita da tradução do resumo do presente trabalho e à Thais Barros que me auxiliou com seus conhecimentos em AutoCad.

À Universidade Federal da Paraíba e seu corpo docente, em especial aos Professores Carlos Bispo, Mércia Almeida, Ana Flávia e Izabel Cristina, à coordenação do curso, à direção e à administração que oportunizaram o futuro que hoje vislumbro, proporcionado pela confiança no mérito e ética aqui presentes.

Ao meu Orientador Prof. Dr. José Soares, pelo conhecimento transmitido, pelas correções e pelos incentivos durante a escrita do trabalho.

Ao Prof. Dr. Rennio Felix de Senna, pelo acompanhamento durante o meu estágio e experimentação do trabalho dentro do projeto BRAMAR.

À técnica de Laboratório Simone Ferreira pelo seu serviço e suporte nas análises laboratoriais e disponibilidade para auxiliar na experimentação do trabalho.

À Vera Kohlgrüber e Sanda Vukovic pela assistência durante o estágio e pelo conhecimento passado de forma precisa e rica.

Aos queridos Matheus Carvalho e Camila Porto pelo apoio dentro do projeto BRAMAR e pela ajuda com dúvidas, análises e horários.

A ISA – RWTH Aachen University pela oportunidade única e preciosa de conhecer e estudar a tecnologia das membranas filtrantes, umas das quais mais se comenta e estuda na área de recursos hídricos nos últimos anos.

A todos do projeto BRAMAR pela oportunidade de estudo, por me receberem de forma acolhedora, pela parceria e pela ajuda dada durante meu tempo no projeto.

## **EPÍGRAFE**

“O homem antes de mais nada, precisa entender que não é apenas um elemento ocupando o espaço terrestre, faz parte de um imenso universo de vidas, que compõem este planeta, preservá-las significa garantir a sua própria existência”.

(Francisco de Assis Bezerra)

## RESUMO

Nos últimos anos no Brasil, o calor e a falta de chuva foram os grandes causadores do baixo nível das represas, deixando algumas regiões em estado de alerta e sujeitas a racionamento. O uso de membranas filtrantes no pós-tratamento de esgoto (polimento de efluentes) tem sido cada vez maior para a produção de uma água de reuso de qualidade suficiente para que possa ser reutilizada em diversos setores. Essa tecnologia quando utilizada em larga escala diminui a utilização de água potável advinda das concessionárias de distribuição para fins menos nobres, gerando economia e reduzindo os níveis de escassez de água. Assim, esse trabalho teve como objetivo verificar a eficiência de reatores de ultrafiltração no polimento de efluentes de lagoas de estabilização em série para produção de permeado com elevado grau de pureza. Além de avaliar a possibilidade de reuso do permeado para irrigação irrestrita, descarga de banheiros, limpeza de pisos e pátios, combate à incêndios, etc. Para isso, o efluente antes já tratado biologicamente em lagoas de estabilização em série (duas lagoas anaeróbias em série e uma lagoa facultativa secundária), na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA), foi filtrado em uma membrana de ultrafiltração. Em Consequente, o permeado era coletado e armazenado para próprio uso da estação piloto de ultrafiltração (lavagem ácida e alcalina das membranas e backwash). O efluente proveniente das lagoas e os permeados da filtração eram coletados e enviados ao laboratório para análise de pH, condutividade, sólidos totais, nitrogênio amoniacal, coliformes totais e termotolerantes, DBO (demanda bioquímica de oxigênio), DQO (demanda química de oxigênio), SDT (sólidos dissolvidos totais), SDF (sólidos dissolvidos fixos) e SDV (sólidos dissolvidos voláteis). Foi possível concluir que a membrana de ultrafiltração apresentou ótimos índices de eficiência na remoção de coliformes termotolerantes, turbidez, DBO, DQO e sólidos suspensos totais. Tornando possível o uso do seu permeado como água de reuso de classe 2, 3 e 4, de acordo com a NBR 13.969/1997 da ABNT, fazendo-se necessário apenas acrescentar a etapa de desinfecção (adição de cloro) no fim do processo de ultrafiltração afim de garantir níveis de cloro residual compatíveis com os da norma.

**Palavras-chave:** Membranas filtrantes. Ultrafiltração. Permeado. Água de reuso. Lagoas de estabilização em série.

## ABSTRACT

In recent years in Brazil, the heat and the lack of rain were the major causes of the low level of dams, leaving some regions in alert and subject to rationing. In this sense, the use of filter membranes in sewage aftertreatment (effluent polishing) has been increasing to produce a reuse water of sufficient quality so that it can be reused in several sectors, in order to reduce the utilization of potable water from concessionaries for less noble purposes, generating savings and reducing levels of water shortage. Thus, the objective of this work was to verify the efficiency of the ultrafiltration reactors in the effluent polishing of stabilization ponds in series for the production of permeate with high purity, as well as to evaluate the possibility of reuse of the permeate for unrestricted irrigation, flushing toilets, cleaning of floors and yards, firefighting, etc. To this end, the effluent previously treated biologically in stabilization ponds in series (two anaerobic ponds in series and a secondary facultative pond), in the Sewage Treatment Plant of the Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA), was filtrated on an ultrafiltration membrane, whose permeate was collected and stored for the use of the ultrafiltration pilot station (acid and alkaline washing and backwash). The effluent from the ponds and the filtration permeates were collected and sent to the laboratory for analysis of pH, conductivity, total solids, ammoniacal nitrogen, total and thermotolerant coliforms, biochemical oxygen demand (BOD), chemical oxygen demand (COD), TDS (total dissolved solids), FDS (fixed dissolved solids) and VDS (volatile dissolved solids). It was possible to conclude that the ultrafiltration membrane presented excellent efficient indexes in the removal of thermotolerant coliforms, turbidity, BOD, COD and total suspended solids. Making it possible to use its permeate as reuse water of class 1, 2, 3 and 4, according to the NBR (Norma Brasileira) 13.969 / 1997 ABNT (Agência Brasileira de Normas Técnicas), making it necessary to only add the disinfection (chlorine addition) step at the end of the ultrafiltration process, in order to ensure levels of residual chlorine compatible with those of the Brazilian norm quoted above.

**Key-words:** Filter membranes. Ultrafiltration. Permeate. Reuse water. Stabilization ponds in series.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Módulo de membranas em configuração planar.....	26
<b>Figura 2:</b> Módulo de membranas em configuração tubular.....	27
<b>Figura 3:</b> Módulo de membranas em configuração de fibra oca.....	27
<b>Figura 4:</b> Módulo de membranas em configuração espiral.....	28
<b>Figura 5:</b> Esquema do Processo de Filtração por Membranas.....	31
<b>Figura 6:</b> Fotografia aérea via satélite da ETE.....	36
<b>Figura 7:</b> Dimensões do reator de ultrafiltração usado na pesquisa.....	39
<b>Figura 8:</b> Container da Planta Piloto de Ultrafiltração antes de sua instalação A) Vista Lateral B) Vista Frontal.....	39
<b>Figura 9:</b> Módulos de Ultrafiltração de membrana tubular: à esquerda reator 1, à direita reator 2.....	40
<b>Figura 10:</b> C) Tanques de Armazenamento do permeado e Tanque de Alimentação, respectivamente. D) Painel de Controle do Operador.....	40
<b>Figura 11:</b> Estações de Dosagem localizadas na parte traseira do Container.....	41
<b>Figura 12:</b> Filtros de areia usados no pré-tratamento do efluente.....	43
<b>Figura 13:</b> Vista frontal do container com o buffer tank localizado a sua direita.....	44
<b>Figura 14:</b> Vista traseira do container, com o reuse tank e waste tank localizados a sua direita.....	44
<b>Figura 15:</b> Tubulação com padrão sinuoso usada para promover a mistura do efluente com coagulante.....	45
<b>Figura 16:</b> Detalhes das membranas de diâmetro 0,9mm e 1,5mm.....	47
<b>Figura 17:</b> Aparência das membranas Multibore® tubulares usadas nos módulos de ultrafiltração. As menores medindo 0.9 mm e as maiores 1.5mm.....	47
<b>Figura 18:</b> Vista superior do interior de um reator preenchido por membranas tubulares de 0.9mm no fim da sua vida útil.....	48
<b>Figura 19:</b> Seção transversal da membrana Multibore® de ultrafiltração.....	49
<b>Figura 20:</b> Direção do fluxo no módulo de ultrafiltração nos modos de filtração e de retrolavagem.....	49
<b>Figura 21:</b> Distribuição radial do fluxo no modo de filtração e retrolavagem.....	50
<b>Figura 22:</b> Esquema do Ciclo de Operação na configuração FB/ FFB/ BWB/ FFB.....	53
<b>Figura 23:</b> Esquema do Ciclo de Operação na configuração FT/ FFT/ BWT/ FFT.....	54
<b>Figura 24:</b> Esquema dos Ciclos de Operação nas configurações FB/ BWB e FT/BWT, respectivamente.....	55

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Tipos de membranas mais utilizados e suas principais características. ....	25
<b>Tabela 2:</b> Tipo de força motriz aliada ao processo de filtração. ....	30
<b>Tabela 3:</b> Classificação da qualidade da água de reuso de acordo com sua finalidade de uso. ....	34
<b>Tabela 4:</b> Informações técnicas da planta piloto de Ultrafiltração. ....	37
<b>Tabela 5:</b> Informações técnicas dos reatores de ultrafiltração. ....	38
<b>Tabela 6:</b> Informações Técnicas das Membranas Utilizadas nos Reatores de Ultrafiltração. ....	46
<b>Tabela 7:</b> Informações Técnicas sobre as condições para as limpezas químicas das membranas (CEB e CIP).....	52
<b>Tabela 8:</b> Descrição das análises e seus métodos de execução. ....	56
<b>Tabela 9:</b> Eficiência de Remoção das membranas de UF nos parâmetros monitorados. ....	64
<b>Tabela 10:</b> Valores das médias para os parâmetros estudados. ....	67
<b>Tabela 11:</b> Dados coletados das análises em comparação com os dados da norma NBR 13.969/1997. ....	67

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico 1:</b> Eficiência de Remoção de coliformes termotolerantes.....	59
<b>Gráfico 2:</b> Eficiência de Remoção da demanda bioquímica de oxigênio.....	59
<b>Gráfico 3:</b> Eficiência de Remoção demanda química de oxigênio.....	60
<b>Gráfico 4:</b> Eficiência de Remoção de nitrogênio amoniacal.....	60
<b>Gráfico 5</b> Eficiência de Remoção de condutividade.....	61
<b>Gráfico 6:</b> Eficiência de Remoção de turbidez.....	61
<b>Gráfico 7:</b> Eficiência de Remoção de sólidos totais.....	62
<b>Gráfico 8:</b> Eficiência de Remoção de sólidos totais fixos.....	62
<b>Gráfico 9:</b> Eficiência de Remoção de sólidos totais voláteis.....	63

## LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ANA – Agência Nacional de Águas.

ISA - RWTH - Institut für Siedlungswasserwirtschaft der RWTH Aachen (tradução: Instituto de Gestão Urbana da Água - RWTH Aachen University).

BRAMAR - Brazil Managed Aquifer Recharge.

CAGEPA – Companhia de Água e Esgoto da Paraíba.

CEB - Chemically Enhanced Backwash, em português Retrolavagem Quimicamente Melhorada.

CIP Chemical Clean In Place, em português Limpeza Química Localizada.

CNRH - Conselho Nacional de Recursos Hídricos.

CT – Coliformes Termotolerantes.

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio.

DQO – Demanda Química de Oxigênio.

EF – Amostra proveniente do Efluente Final do tratamento dado ao esgoto.

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto.

F – Amostra do efluente final após passar por filtro de areia.

I.C. – Intervalo de Confiança.

MF- Microfiltração.

NH<sub>3</sub> – Nitrogênio amoniacal.

NF – Nanofiltração.

NMP – Número Mais Provável.

NBR – Norma Brasileira.

OI – Osmose Inversa.

PAC – Policloreto de Alumínio.

pH- Potencial Hidrogeniônico.

PLC - Programmable Logical Controller.

SST – Sólidos Suspensos Totais.

SDF – Sólidos Dissolvidos Fixos.

SDT – Sólidos Dissolvidos Totais.

SDV – Sólidos Dissolvidos Voláteis.

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica.

U1 – Amostra de permeado do Reator 1 de ultrafiltração.

U2 - Amostra de permeado do Reator 2 de ultrafiltração.

UF – Ultrafiltração.

UFC – Unidades Formadoras de colônia.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	<b>19</b>
<b>2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>21</b>
2.1	Objetivo Geral .....	21
2.2	Objetivos Específicos .....	21
<b>3</b>	<b>Revisão Bibliográfica</b> .....	<b>22</b>
3.1	Esgoto Sanitário.....	22
3.2	Tratamento Biológico de Esgotos.....	23
3.2.1	Lagoa Anaeróbia.....	23
3.2.2	Lagoa Facultativa.....	23
3.3	Filtração com Membranas.....	24
3.3.1	Principais Membranas Usadas em Processos de Separação.....	28
3.3.2	Processo de Separação Por Membranas .....	30
3.4	Águas de Reuso.....	31
3.4.1	Classificação dos Tipos de Reuso.....	32
3.4.2	Utilização do Permeado de Membrana de Ultrafiltração.....	33
<b>4</b>	<b>Materiais e Métodos</b> .....	<b>36</b>
4.1	Efluente Utilizado na Ultrafiltração.....	36
4.2	Características da Planta Piloto de Ultrafiltração.....	37

4.2.1	Configuração da Planta Piloto de Ultrafiltração .....	39
4.3	Obtenção dos Permeados.....	42
4.3.1	Razão entre Permeado e Concentrado .....	45
4.4	Membranas .....	45
4.5	Funcionamento das Membranas e dos Reatores de UF.....	48
4.6	Limpeza das Membranas .....	50
4.6.1	Retrolavagem (Backwash) .....	50
4.6.2	Fluxo direto ou Descarga Direta (Forward Flush) .....	51
4.6.3	Retrolavagem Quimicamente Melhorada (CEB).....	51
4.6.4	Limpeza Química Localizada (CIP) .....	52
4.7	Ciclos de Operação.....	53
4.8	Métodos Analíticos .....	55
4.8.1	Coletas.....	55
4.9	Análise Estatística .....	57
<b>5</b>	<b>Resultados e Discussões.....</b>	<b>58</b>
5.1	Eficiência das Membranas .....	58
5.2	Reuso do Permeado .....	66
<b>6</b>	<b>Conclusão.....</b>	<b>69</b>
<b>7</b>	<b>Referências.....</b>	<b>70</b>

<b>8</b>	<b>Apêndice A : Esquema da Planta Piloto de Ultrafiltração .....73</b>
----------	--

## 1 Introdução

A qualidade da água dos mananciais brasileiros se encontra comprometida devido ao lançamento de forma indiscriminada de esgotos em estado bruto ou com tratamento insuficiente advindos de origem doméstica e/ou industrial. Segundo a Agência Nacional de águas tal prática agrava os impactos ambientais e sociais frutos da escassez de água em certas regiões por causar poluição hídrica, em grande parte das vezes, irremediável a curto prazo.

A prática do reuso de água vem se tornando cada vez mais necessária para diminuir os índices de poluição hídrica. O reuso ajuda a reduzir a descarga de poluentes em corpos receptores, conservando os recursos hídricos para o abastecimento público e uso na agricultura. Além do mais, funciona como uma fonte alternativa de abastecimento para fins que não necessitem de água potável, diminuindo os custos no tratamento de água para abastecimento público.

O reuso planejado de águas residuais não é um conceito novo e já é praticado há muitos anos (SCHNEIDER et al., 2001). No Brasil, entretanto, as águas residuais não são aproveitadas como poderiam, isso se dá devido à falta de uma legislação específica que oriente e delimite o tema no país. A lei que mais se aproxima do tema é a Lei N° 9433/97, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos que apresenta vários dispositivos que apontam o reuso como uma importante alternativa para a racionalização do uso da água. Porém, essa lei não traz especificações que priorizem a segurança do meio ambiente e dos usuários, tanto no quesito manuseio como no consumo da água de reuso.

Visando o reuso de água residuais já foram desenvolvidas várias tecnologias, uma delas é a tecnologia de membrana filtrante, que vem se destacando e ganhando espaço, pois esse método permite que seja alcançado um grau de pureza da água que não é obtido pelos métodos de tratamento biológico convencionais. Os sistemas de tratamento de esgoto sanitários, em geral, resultam em bom nível de redução de carga orgânica. No entanto, somente, tratamentos avançados levam a uma

significativa redução bacteriológica, e a remoção de contaminantes que permitem reuso para fins mais nobres (STEPHEENSON, 2000; FANE et al., 2000).

Algumas das principais vantagens na utilização das membranas no pós-tratamento de efluentes, segundo XIA et al. (2005) são: produção de água com elevado grau de pureza, constância na qualidade da água produzida, baixa utilização de produtos químicos, pouco espaço necessário para as instalações e a facilidade de automação e operação do sistema.

As técnicas de filtração em membranas mais empregadas são a Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF), Nanofiltração (NF) e Osmose Inversa (OI). Os dois principais fatores que diferenciam cada uma delas são a pressão exercida sobre a membrana e o tamanho dos poros superficiais, o que altera a capacidade de retenção das partículas (VAN DER BRUGGEN et al., 2003).

A pesquisa realizada neste trabalho foi feita através do projeto BRAMAR (Brazil Managed Aquifer Recharge), que é um projeto de pesquisa e tecnologia alemão-brasileiro que vem melhorando o gerenciamento integrado de recursos hídricos no Nordeste semiárido do Brasil. A reutilização de água e a recarga de aquífero gerenciada também vem sendo estudadas em seu papel como elementos-chave de estratégias de desenvolvimento sustentável pelo projeto.

Neste trabalho foi utilizada a tecnologia de Membranas de Ultrafiltração no polimento de efluentes sanitários tratados biologicamente na Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (CAGEPA), através de uma planta-piloto de ultrafiltração instalada na ETE da CAGEPA pela ISA-RWTH Aachen University, gerenciada também pela ISA-RWTH Aachen University com ajuda da Universidade Federal da Paraíba.

## **2 Objetivos**

### **2.1 Objetivo Geral**

Verificar a eficiência de reatores de UF no polimento de efluentes de lagoas de estabilização em série para produção de permeado com elevado grau de pureza.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Analisar as características do efluente antes e depois do processo de ultrafiltração, verificando o grau de remoção de nitrogênio amoniacal, SDT, SDF, SDV, DBO, DQO, condutividade, turbidez e coliformes termotolerantes no efluente tratado.
- Estudar a possibilidade de reutilização do permeado como água de reuso em ambientes urbanos, para culturas alimentares (processadas e não processadas) e para culturas não alimentares.

### **3 Revisão Bibliográfica**

#### **3.1 Esgoto Sanitário**

O esgoto sanitário, segundo definição da norma brasileira NBR 9648 (ABNT, 1986) é o “despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária”. Essa mesma norma define ainda esgoto doméstico sendo o “despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas”, efluente industrial como “despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos”, água de infiltração como “Toda água, proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações” e por fim contribuição pluvial parasitária como “a parcela do deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede de esgoto sanitário”.

Segundo a ANA (Agência Nacional de Águas), em média, a constituição do esgoto sanitário consiste em 99,9% de água e apenas 0,1% de sólidos, sendo que cerca de 75% desses sólidos, são constituídos de matéria orgânica em processo de decomposição. Os esgotos domésticos contêm grande número de substâncias contaminantes e que podem ser separadas em três categorias principais (ROQUES, 1980):

- As matérias dissolvidas, orgânicas ou minerais, biodegradáveis ou não;
- As matérias coloidais e/ou emulsões (graxas, óleos solúveis, etc.);
- As matérias em suspensão, orgânicas ou minerais.

O efluente utilizado no presente estudo adveio do tratamento biológico de esgoto sanitário com a presença majoritária de esgoto doméstico e minoritária de água e infiltração e contribuição pluvial parasitária, sendo o efluente industrial ausente na sua composição.

## **3.2 Tratamento Biológico de Esgotos**

O tratamento biológico dos esgotos consiste basicamente na estabilização de matéria orgânica pela sua oxidação ou fermentação (a depender do tipo do processo: aeróbio ou anaeróbio) que se dá através de agentes biológicos como bactérias, protozoários e algas. Essa degradação pode ocorrer por meio do tratamento biológico aeróbio, anaeróbio ou misto (parte aeróbia, parte anaeróbia).

Este tipo de tratamento pode ocorrer através de lagoas de estabilização, que costumam ser classificadas em facultativas, anaeróbias, aeradas (ou aeróbias) e de maturação, ou ainda através de reatores aeróbios ou anaeróbios, filtros biológicos, disposição no solo podendo ser essa modalidade de infiltração lenta, infiltração rápida, infiltração sub-superficial, escoamento superficial e terras úmidas construídas, etc. Neste capítulo, nos limitaremos a falar das lagoas de estabilização, pois são elas que compõe o módulo de tratamento que foi parte do objeto de estudo deste trabalho.

### **3.2.1 Lagoa Anaeróbia**

Neste caso o tratamento ocorre na ausência de oxigênio dissolvido. A carga orgânica projetada na lagoa é suficientemente alta e demanda mais oxigênio do que é repassado através da interface água-ar. A fase anaeróbia é mais lenta se comparada a aeróbia, pois as bactérias anaeróbias têm taxa metabólica e de reprodução mais lenta do que as bactérias aeróbias. A decomposição da matéria orgânica é parcial, as lagoas anaeróbias conferem apenas um tratamento biológico primário, entretanto, o processo pode ser interrompido neste estágio para o uso em irrigação com restrição, por exemplo. O tempo de detenção hidráulico fica entre 1 a 5 dias.

### **3.2.2 Lagoa Facultativa**

Aeróbia na superfície, facultativa no meio e anaeróbia nas regiões mais profundas. O esgoto afluente que entra continuamente em uma extremidade da lagoa,

sai continuamente na extremidade oposta. Ao longo deste percurso, que demora vários dias, e na presença de oxigênio fornecido pela fotossíntese, uma série de eventos contribui para a purificação dos esgotos. Parte da matéria orgânica em suspensão tende a sedimentar, vindo a constituir o lodo de fundo. Este lodo sofre processo de decomposição por microrganismos anaeróbios. A matéria orgânica dissolvida, conjuntamente com a matéria orgânica em suspensão de pequenas dimensões, não sedimenta, permanecendo dispersa na massa líquida, onde sua decomposição se dá por bactérias facultativas, que têm a capacidade de sobreviver tanto na presença, quanto na ausência de oxigênio. Pode ser classificada como primária (quando recebe esgoto bruto) ou secundária (quando recebe esgoto que já recebeu algum tratamento biológico). O tempo de detenção fica entre 2 a 6 dias.

### **3.3 Filtração com Membranas**

A utilização de membranas em processo de tratamento e purificação de água potável, não potável e salobras tem se destacado bastante em comparação a outros métodos devido às vantagens no consumo de energia, especificidade e facilidades de scale-up. Essa tecnologia tem sido bastante aceita tanto nas áreas industriais (química, farmácia, biotecnologia, etc.) como em processos de purificação e tratamento de água e efluentes, para produção de água de reuso (pós-tratamento de efluentes).

A filtração com membranas consiste no processo físico de separação de substâncias de diferentes propriedades auxiliado por membranas. De acordo com o tamanho dos poros das membranas a serem utilizadas é que se denomina o tipo da filtração: microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração e a osmose reversa.

As membranas podem ser feitas de material orgânico, como por exemplo acetato de celulose, polisulfona, polipropileno, a poliamida e o poliácridonitrilo, ou inorgânico, se destacando as membranas preparadas a partir de materiais cerâmicos, tais como alumina, zircônio, sílica e hematite. Comparando os materiais orgânicos e inorgânicos é possível concluir que as membranas inorgânicas algumas vantagens,

como maior vida útil e permitem operar em intervalos alargados de pH e temperatura. Entre as desvantagens, estão o seu elevado custo e a pouca flexibilidade por serem materiais duros e quebradiços e com baixa resistência ao impacto. Os materiais orgânicos predominam na fabricação de membranas filtrantes.

A tabela abaixo mostra diferentes tipos de filtração segundo o tamanho dos poros da membrana, material retido, entre outros:

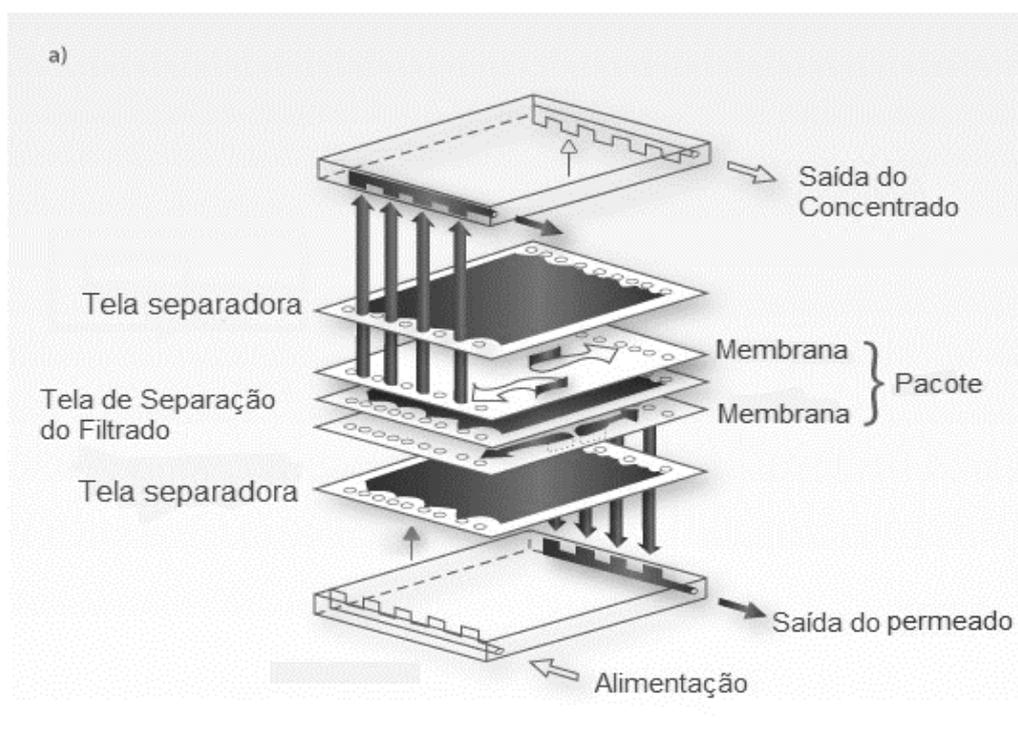
**Tabela 1:** Tipos de membranas mais utilizados e suas principais características.

	<b>Osmose Inversa</b>	<b>Nanofiltração</b>	<b>Ultrafiltração</b>	<b>Microfiltração</b>
<b>Porosidade</b>	<0.001 µm	<0.001 µm	0.1 - 0.001 µm	10 - 0.01 µm
<b>Material retido</b>	Componentes de alto peso molecular (ex.: proteínas), cloreto de sódio (íons), glicose, aminoácidos	Componentes de alto peso molecular (ex.: proteínas), íons mono e divalentes, oligossacarídeos, íons polivalentes negativos.	Vírus, polissacarídeos, proteínas e macromoléculas.	Partículas, argila e bactérias.
<b>Material da Membrana</b>	Acetato de celulose (podendo ser acetato de di ou tri-acetato.)	Acetato de celulose (podendo ser acetato de di ou tri-acetato.)	Material cerâmico, Acetato de celulose, Polissulfona, Polifluoridifluoreto de polivinilo.	Material cerâmico, Polissulfona, Polifluoridifluoreto de polivinilo.
<b>Módulo</b>	Tubular, espiral, "plate-and-frame"	Tubular, espiral, "plate-and-frame"	Tubular, fibra oca, espiral, "plate-and-frame"	Tubular, fibra oca

**Fonte:** Adaptado de Membrane Filtration Handbook, Jorgen Wagner, 2001.

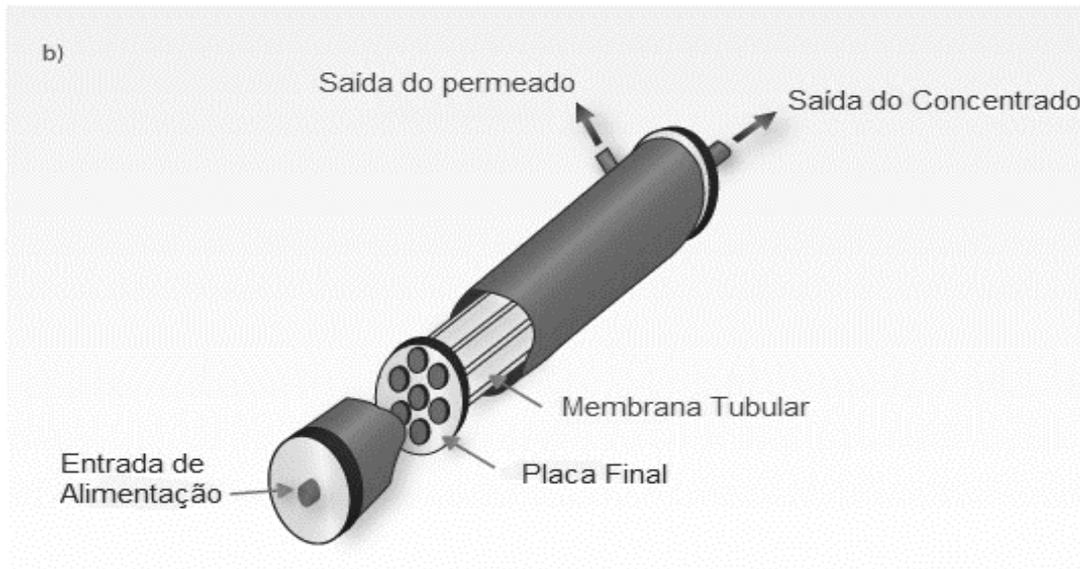
As membranas são utilizadas em diversas configurações: **tipo planar, tubular, fibra ocas e em espiral**. As membranas planares formam uma configuração do tipo “plate and frame”, isto é, são dispostas paralelamente, separadas por espaçadores e suportes porosos. A configuração **tubular** é constituída por tubos de material polimérico ou cerâmico, cujo diâmetro normalmente é superior a 10 mm, inseridos dentro de módulos de geometria cilíndrica. **As fibras ocas** são usadas na forma de cartuchos contendo centenas de fibras de pequeno diâmetro (interno) que variam entre 100 a 500  $\mu\text{m}$ . A grande vantagem desta configuração é a elevada densidade de empacotamento. São bastante utilizados em MF e UF. A configuração em **espiral** é uma das mais comuns nas indústrias que operam com processos de separação por membranas, principalmente MF, UF e OI. Ela é constituída por membranas planares, suportes e espaçadores que são fixados e enrolados em redor de um tubo coletor central por onde flui o permeado. As configurações seguem ilustradas na figuras a seguir:

**Figura 1:** Módulo de membranas em configuração planar.



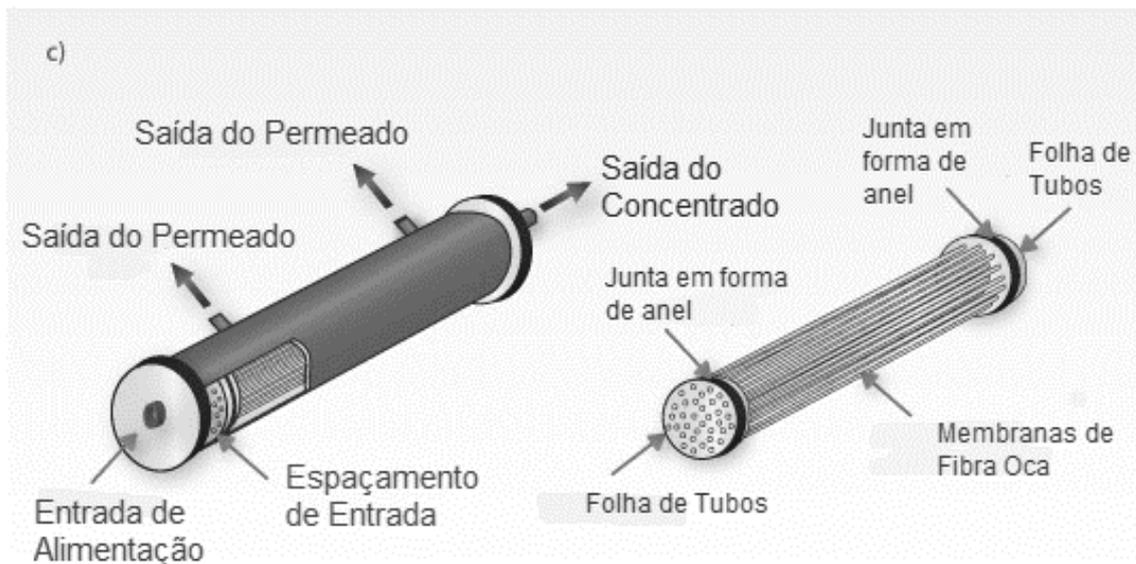
**Fonte:** <<http://labvirtual.eq.uc>> acesso em 07/03/2018

**Figura 2:** Módulo de membranas em configuração tubular.



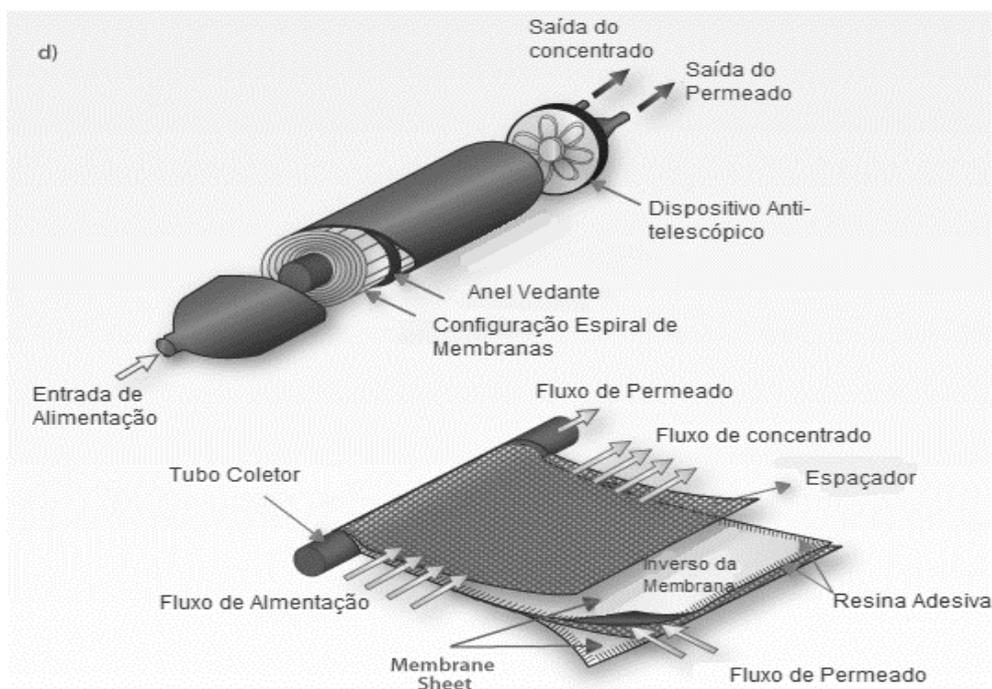
**Fonte:** <<http://labvirtual.eq.uc>> acesso em 07/03/2018

**Figura 3:** Módulo de membranas em configuração de fibra oca.



**Fonte:** <<http://labvirtual.eq.uc>> acesso em 07/03/2018

**Figura 4:** Módulo de membranas em configuração espiral.



**Fonte:** <<http://labvirtual.eq.uc>> acesso em 07/03/2018

### 3.3.1 Principais Membranas Usadas em Processos de Separação

#### ❖ Osmose Inversa (OI)

A OI é um processo para dessalinizar água usando membranas que são permeáveis à água, mas essencialmente impermeáveis ao sal. A água pressurizada contendo sais dissolvidos entra em contato com o lado da alimentação da membrana; A água empobrecida de sal é retirada como um permeado de baixa pressão (Baker, R.W 2004). Esse processo é indicado para quando se deseja reter solutos de baixa massa molar, tais como sais inorgânicos ou pequenas moléculas orgânicas como glicose. O nome Osmose inversa se deve ao fato de que neste tipo de processo o fluxo permeado é no sentido inverso do fluxo osmótico normal (HABERT, BORGES e NOBREGA, 2006).

### ❖ **Nanofiltração (NF)**

Mais recentemente, foram produzidas membranas com rejeições mais baixas de cloreto de sódio, em comparação com as de OI, mas com permeabilidades de água muito maiores. Essas membranas, que se enquadram em uma região de transição entre membranas puras de OI e membranas puras de UF, são chamadas de osmose reversa de baixa pressão ou mais comumente, membranas de NF. Tipicamente, as membranas de NF possuem rejeições de cloreto de sódio entre 20 e 80% e pontos de corte de peso molecular para solutos orgânicos dissolvidos de 200-1000 Da (Baker, R.W 2004).

### ❖ **Ultrafiltração (UF)**

A UF usa uma membrana finamente porosa para separar água e microsolutos de macromoléculas e coloides. O diâmetro médio dos poros da membrana está no 10-1000 nm (Baker, R.W 2004). Esse tipo de tratamento é indicado quando se deseja separar soluções que contenham macromoléculas e com solutos com uma ampla faixa de massa molar. Sendo assim, este tipo de membrana é capaz de reter não só materiais em suspensão como também partículas e moléculas dissolvidas no solvente.

### ❖ **Microfiltração (MF)**

A MF refere-se a processos de filtração que utilizam membranas porosas para separar partículas em suspensão com diâmetros entre 0,1 e 10 $\mu$ m. Assim, membranas de microfiltração ficam entre membranas de UF e filtros convencionais (Baker, R.W 2004). Neste tipo de processo apenas o material em suspensão fica retido, enquanto o solvente e o material dissolvido nele permeiam a membrana. A microfiltração é indicada para a retenção de bactérias, protozoários, maioria dos vírus e materiais em suspensão e emulsão.

### 3.3.2 Processo de Separação Por Membranas

No presente trabalho definir-se-á membrana como uma barreira de permeabilidade seletiva, que separa duas soluções, permitindo a passagem de substâncias entre as duas fases, quando aplicada uma força motriz que força o solvente a atravessar a membrana.

Os principais processos de membranas utilizam como força motriz o gradiente de potencial químico e/ou o gradiente de potencial elétrico (no caso particular de espécies iônicas). Como a maioria dos processos ocorrem em condições isotérmicas, o gradiente de potencial químico é expresso em termos do gradiente de pressão, concentração ou pressão parcial.

**Tabela 2:** Tipo de força motriz aliada ao processo de filtração.

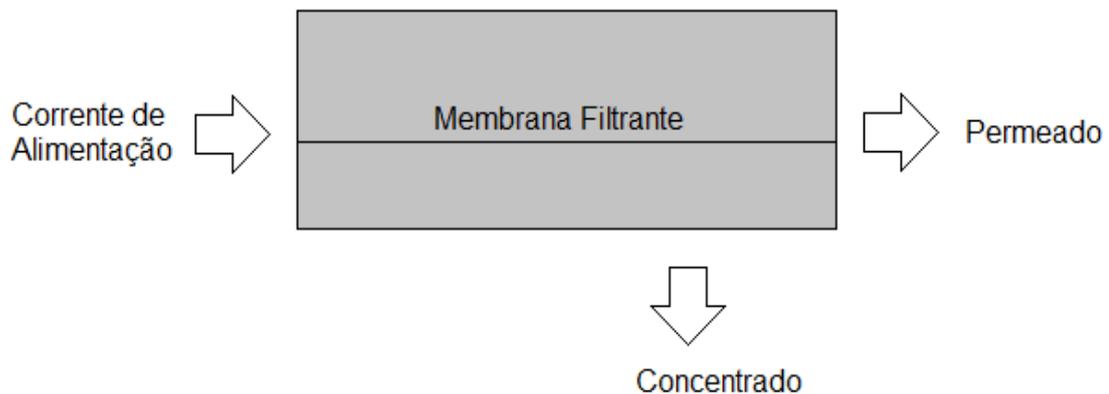
<b>Processo</b>	<b>Força Motriz</b>
Osmose Inversa	Gradiente de pressão 20 – 100 bar
Nanofiltração	Gradiente de pressão 1,5 – 40 bar
Ultrafiltração	Gradiente de pressão 0,5 – 5 bar
Microfiltração	Gradiente de pressão 0,1 – 1 bar

**Fonte:** Adaptação Petrus (1997)

No processo de filtração, o solvente é forçado a atravessar uma membrana semipermeável pela aplicação de uma força motriz, o que resulta na obtenção de um permeado (filtrado) e de um concentrado (material que é retido pelas membranas). Em outras palavras, a corrente de alimentação é inserida em escoamento tangencial ao longo da superfície da membrana e se divide em duas correntes, a corrente do permeado e a corrente do concentrado. A corrente do concentrado é tem em sua

composição basicamente partículas e solutos rejeitados pela membrana, enquanto a composição da corrente de permeado é composta por solvente ou solução clarificada.

**Figura 5:** Esquema do Processo de Filtração por Membranas



**Fonte:** Adaptação Chamon (2011)

### 3.4 Águas de Reuso

A intensificação dos processos de urbanização nas últimas décadas tem implicado no aumento da demanda de água para irrigação, abastecimento e diluição de esgotos, resultando em pressões cada vez maiores sobre os mananciais hídricos. O reuso de água pode trazer benefícios econômicos, sociais e ambientais para as comunidades em que se insere, sendo uma alternativa sustentável para o aumento da oferta de água. Esta prática pode ser um importante elemento do sistema de tratamento e disposição final de efluentes, diminuindo a carga poluente que chega aos corpos d'água. (MILLER, 2006).

A opção pelo reuso da água visa, principalmente, garantir o atendimento às demandas exigidas para o desenvolvimento das diversas atividades humanas, possibilitando, dessa forma, que as aspirações por uma melhor qualidade de vida possam ser atingidas (MIERZWA, 2002).

O reuso de água consiste na utilização de água residuária, que se encontra dentro dos padrões exigidos para sua utilização nas modalidades pretendidas. Segundo o Conselho Nacional de Recursos Hídricos (CNRH), águas residuárias podem ser: esgoto, água descartada, efluentes líquidos de edificações, indústrias, agroindústrias e agropecuária, tratados ou não.

### **3.4.1 Classificação dos Tipos de Reuso**

Segundo a resolução nº 54 de 2005 do CNRH, as modalidades, diretrizes e critérios gerais para a prática do reuso direto não potável de água são:

I - Reuso para fins urbanos: utilização de água de reuso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações, combate a incêndio, dentro da área urbana;

II - Reuso para fins agrícolas e florestais: aplicação de água de reuso para produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;

III - Reuso para fins ambientais: utilização de água de reuso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;

IV - Reuso para fins industriais: utilização de água de reuso em processos, atividades e operações industriais; e,

V - Reuso na aquicultura: utilização de água de reuso para a criação de animais ou cultivo de vegetais aquáticos.

A qualidade da água utilizada e o objeto específico do reuso, estabelecerão os níveis de tratamento recomendados, os critérios de segurança a serem adotados e os custos de capital, operação e manutenção associados. As possibilidades e formas potenciais de reuso dependem, evidentemente, de características, condições e fatores locais, tais como decisão política, esquemas institucionais, disponibilidade técnica e fatores econômicos, sociais e culturais (HESPANHOL, 2002).

### **3.4.2 Utilização do Permeado de Membrana de Ultrafiltração**

No Brasil, a ausência de leis e resoluções que orientem a prática do reuso de água e que assegurem essa técnica, é responsável pela dificuldade de difusão da prática. Nos últimos anos foram realizados muitos estudos nessa área, porém ainda é escasso o número de documentos e materiais técnicos que viabilizem projetos e implantações de estruturas para o reuso de água em escala real.

Países como Alemanha, França, Holanda e Estados Unidos já vêm utilizando as tecnologias de membranas filtrantes há mais tempo para o tratamento de águas, devido a uma legislação mais restritiva para descarte de efluentes, reuso e potabilização nesses países. Em entrevista à Revista TAE em 2014, Bueno avalia a situação do Brasil face à tecnologia de membranas e conclui: “No Brasil estamos vendo um crescimento muito grande que foi iniciado há alguns anos atrás no mercado industrial. Este foi o primeiro setor a identificar as vantagens técnicas e comerciais das membranas para tratamento de efluentes. Agora, finalmente o setor municipal, impulsionado pela crise da água, legislações mais restritivas e potencial de venda de água de reuso, estão começando a olhar mais para as tecnologias de membranas”.

A NBR 13.969/1997 da ABNT, título “Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação”, apresenta alternativas de procedimentos técnicos para o projeto, construção e operação de unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos de tanque séptico para o tratamento local de esgotos. A norma também traz em seu conteúdo diretrizes para o reuso dos esgotos através de uma classificação de usos previstos, que variam em função da qualidade da água de reuso, que depende do fim ao qual ela será destinada.

**Tabela 3:** Classificação da qualidade da água de reuso de acordo com sua finalidade de uso.

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

(\*) Para a classe 4 é necessário que o efluente tenha níveis de oxigênio dissolvido acima de 2 mg/L e as atividades devem ser interrompidas pelo menos 10 dias antes da colheita.

**Fonte:** NBR 13.969/1997, ABNT.

Mesmo sendo uma das únicas normas com abrangência nacional a nortear o reuso de água no país, a NBR 13.969/1997 encontra-se ultrapassada. É possível chegar a essa conclusão comparando-a com os mais recentes estudos e diretrizes para o reuso de esgotos sanitários. Neste caso, há a necessidade do uso de diretrizes e estudos mais bem elaborados para a implantação de um sistema de reuso.

No Brasil já existe leis de abrangência estadual que dispõem sobre a política de reuso de água não potável. A exemplo disso, temos a Lei Nº 16033 de 20/06/2016 que estabelece critérios para o reuso de água não potável no Estado do Ceará. Essa lei tem por objetivo viabilizar e estimular a prática do reuso no estado em questão. Tal fato coloca o Estado do Ceará como um exemplo a ser seguido pelos demais estados brasileiros e também como incentivo à produção nacional de novas leis com diretrizes atualizadas sobre o reuso de água residuárias de forma segura e planejada.

Os permeados provenientes de microfiltração e ultrafiltração em sua grande maioria são reutilizados para irrigação e em usos urbanos não potáveis, como os citados pela NBR 13969/1997, podendo ter suas diretrizes aplicadas nesse caso. Já os permeados de nanofiltração e osmose inversa tem seus usos direcionados para as indústrias, tendo várias aplicabilidades como por exemplo: fluido de resfriamento, fluido de aquecimento, geração de energia, etc. Para os dois últimos casos, faz-se necessário conhecer bem os parâmetros necessários para o tipo de indústria e o tipo de aplicação para saber que diretrizes aplicar no processo.

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Efluente Utilizado na Ultrafiltração

O Efluente tratado que foi filtrado na planta piloto de ultrafiltração proveio da Estação de Tratamento de Esgoto – Unidade Mangabeira, da Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA), localizada no município de João Pessoa – PB, no bairro de Mangabeira, onde a pesquisa foi realizada.

O tratamento do esgoto na ETE consistia em etapas física e biológica. Os processos unitários eram de gradeamento e sedimentação de sólidos mais grosseiros e o tratamento biológico era feito através de Lagoas de Estabilização em série. A ETE foi projetada no ano de 1982 e sua configuração era dada em três módulos de tratamento: duas lagoas anaeróbias e uma lagoa facultativa, como é possível observar na figura 6:

**Figura 6:** Fotografia aérea via satélite da ETE.



**Fonte:** Google Maps (2018).

A Paraíba possui sistema de esgotamento em 22 cidades. Atualmente a ETE - Unidade Mangabeira trata o esgoto dos bairros de Gramame, Grotão, Valentina, João Paulo II, Funcionários I e II, Jardim São Paulo, Bancários, Monsenhor Magno, Ernesto Geisel e Mangabeira.

Como dito anteriormente, o tratamento ocorria através de três módulos e cada módulo operava com duas lagoas anaeróbias seguidas de uma facultativa. Os efluentes gerados em cada módulo eram reunidos e encaminhados para a zona de mistura para posterior lançamento no Rio Cuiá. Todas as lagoas eram alimentadas de forma contínua com tempo de detenção hidráulico (TDH) de 1,8 dias.

#### 4.2 Características da Planta Piloto de Ultrafiltração

A unidade de Ultrafiltração utilizada nessa pesquisa, foi instalada pela ISA-RWTH Aachen University e consistiu em uma planta piloto projetada individualmente para processar efluentes pré-tratados para ensaios em escala piloto. O próprio processo de filtração e os procedimentos de operação necessários seguiram as diretrizes da Inge GmbH, Flurstrasse 27, 86926 Greifenberg. A planta foi projetada para operação contínua.

As principais características da planta piloto utilizada na pesquisa são apresentadas na Tabela 4, de acordo com informações do fabricante:

**Tabela 4:** Informações técnicas da planta piloto de Ultrafiltração.

<b>Parâmetros de Operação</b>	
<b>Fluxo de alimentação máxima</b>	0,7 m <sup>3</sup> / h
<b>Pressão de alimentação</b>	0,5 - 3 bar
<b>Temperatura de alimentação</b>	2 - 40 ° C
<b>Nível de ruído</b>	<75 dB (A) (dentro)
<b>Classificação de potência requerida</b>	400 V 3PH, N, PE, 50/60 Hz, 32 A
<b>Grau de proteção</b>	IP 55

<b>Parâmetros de Operação</b>	
<b>Dimensões do Container</b>	6.000 x 2.400 x 2.900 mm (C x L x A)
<b>Peso do Container</b>	4,5 toneladas

**Fonte:** Adaptação Operation Manual EN DEA-15-113 Rev0x (2016).

Os reatores utilizados na pesquisa eram preenchidos com membranas tubulares. A alimentação aplicada foi sob pressão. O esquema de filtração consistia no efluente tratado passando pela membrana de dentro para fora, deixando-o livre de partículas. O concentrado era lavado em intervalos regulares. Este processo era reforçado por procedimentos de descarga regulares com permeado. Com uma dada frequência, era realizado um backwash (retrolavagem) reforçado com produtos químicos, para remover as incrustações resultantes do processo de filtração nas membranas. Na Tabela 5 seguem informações detalhadas acerca dos reatores que compunham os módulos de filtração:

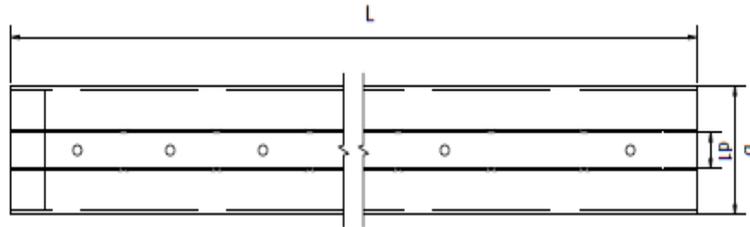
**Tabela 5:** Informações técnicas dos reatores de ultrafiltração.

<b>Área da Membrana</b>	4,0 m <sup>2</sup>
<b>Comprimento (L)</b>	960,0 ± 1,5 mm
<b>Diâmetro externo do Módulo (D)</b>	100,0 mm
<b>Diâmetro Interno da conexão de filtrado (d1)</b>	28,4 mm
<b>Peso (W)</b>	4,5 Kg
<b>Material de Corpo do Reator</b>	PVC-U, branco
<b>Material de Tubo de Filtração</b>	PVC-U, branco
<b>Material dos Conectores de Filtrado</b>	PVC-U, branco

**Fonte:** Technical Specifications dizzer P, Inge GmbH – Ultra Filtration (2014)

Na Imagem 7 é possível visualizar as proporções do reator com maior clareza:

**Figura 7:** Dimensões do reator de ultrafiltração usado na pesquisa.



**Fonte:** Technical Specifications dizzer P, Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

#### 4.2.1 Configuração da Planta Piloto de Ultrafiltração

A planta piloto foi projetada dentro de um container (Figura 8), nas proporções de 6.000 x 2.400 x 2.900 mm (C x L x A), como citado na Tabela 4, e continha os dois reatores de ultrafiltração (Figura 9), dois tanques, sendo um de alimentação e o outro de armazenamento do permeado, além de toda parte hidráulica (tubulações e conexões, bombas, registros), bombonas de coagulante e reagentes químicos (para limpeza dos reatores e ajuste de pH), painel de controle do operador, filtros de areia etc.

**Figura 8:** Container da Planta Piloto de Ultrafiltração antes de sua instalação A) Vista Lateral B) Vista Frontal



**Fonte:** Acervo Autora

**Figura 9:** Módulos de Ultrafiltração de membrana tubular: à esquerda reator 1, à direita reator 2.



**Fonte:** Acervo Autora

O tanque de alimentação dos módulos e de armazenamento do permeado ficavam localizados no interior do contêiner (Figura 10 - C), conectados com o sistema hidráulico da planta. O painel de operação (Figura 10 - D), com sistema automático de PLC (Programmable Logical Controller, em português “Controlador Lógico Programável”) controlava todos os processos da estação de ultrafiltração em um sistema automático, exceto alguns como a limpeza CIP e a dosagem de coagulante, que eram realizadas no “manual mode” (modo manual), também ficava localizado no interior do container, próximo a sua entrada.

**Figura 10:** C) Tanques de Armazenamento do permeado e Tanque de Alimentação, respectivamente. D) Painel de Controle do Operador



**Fonte:** Acervo Autora.

A planta piloto era equipada com seis estações de dosagem: P0510, P0520, P0530, P0540, P0550 e P0560. Elas eram utilizadas para dosar os reagentes (coagulante PAC, NaOH, NaOCl, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) e bombeá-los até seu ponto de uso, nas caixas de dosagem correspondentes: T0510, T0520, T0530, T0540, T0550 e T0560, respectivamente:

- Bomba P0540: adição de coagulante no reator 1;
- Bomba P0550: adição de coagulante no reator 2;
- Bomba P0510: Ajuste de pH no reator 1;
- Bomba P0520: Ajuste de pH no reator 2;
- Bomba P0530: adição de ácido nos reatores 1 e 2 para limpeza CEB ácida
- Bomba P0560: adição de hipoclorito de sódio nos reatores 1 e 2 para CEB alcalina

A disposição dessas estações dosadoras era de maneira justaposta, com identificação nas bombonas e nas bombas correspondentes, como é possível visualizar na Figura 11:

**Figura 11:** Estações de Dosagem localizadas na parte traseira do Container.



**Fonte:** Acervo Autora.

#### **4.2.2 Operacionalização da Planta Piloto de UF**

A planta piloto foi projetada como um sistema de dois reatores para uso independente, de modo que o Reator 1 podia ser operado separadamente ou em conjunto com o Reator 2. Todas as operações da planta foram realizadas com a ajuda do sistema automático de PLC (Programmable Logical Controller, em português “Controlador Lógico Programável”) via painel do operador no local. Todos os dados e informações relevantes do processo eram exibidos no painel do operador. O acesso ao menu de operação e às listas de set-point do processo variável era protegido por senha.

#### **4.3 Obtenção dos Permeados**

O efluente que alimentava a planta piloto de ultrafiltração era bombeado da lagoa facultativa do módulo 1 da ETE, armazenado em um tanque localizado ao lado da planta piloto de ultrafiltração, o buffer tank (tanque amortecedor em tradução livre), representado na figura 13. Esse efluente era ainda bombeado do buffer tank, passado por um filtro de areia (figura 12) para então ser armazenado em um outro tanque, nesse caso o feed tank, ou tanque de alimentação (localizado dentro da planta piloto), assim, o efluente filtrado pelos reatores 1 e 2 era proveniente do feed tank.

Durante o bombeamento do efluente do feed tank para os reatores, era introduzido na corrente uma quantidade pré-estabelecida de coagulante PAC (policloreto de alumínio), afim de agrupar as partículas coloidais e evitar a obstrução dos poros das membranas, facilitando também a limpeza das mesmas. O coagulante era misturado ao efluente em uma zona de turbulência gerada pela encanação disposta em padrão sinuoso (figura 15).

No modo de filtração, o efluente era tratado sendo forçado através da membrana de ultrafiltração. Os contaminantes no efluente, eram bloqueados pela superfície de filtração, acumulando-se na superfície interna dos capilares da membrana. Após a filtração, o permeado era direcionado para o permeate tank

(tanque do permeado), localizado dentro da planta piloto de ultrafiltração. Quando o volume de permeado excedia o volume do permeate tank, o conteúdo era redirecionado para o reuse tank (tanque de reuso), localizado do lado de fora da planta piloto de ultrafiltração, representado na figura 14. O conteúdo do permeate tank e reuse tank era utilizado para os procedimentos de limpeza das membranas.

O concentrado resultante das filtrações juntamente com os efluentes gerados pelos diferentes tipos de limpezas das membranas, eram redirecionados para o waste tank (tanque de resíduos), localizado do lado de fora da planta piloto de ultrafiltração, representado na figura 14. O conteúdo do waste tank, quando o mesmo se encontrava em sua máxima capacidade, era redirecionado para o módulo de lagoas anaeróbias da ETE, afim de ser reincorporado no processo de tratamento biológico.

Nota: No apêndice A é possível observar melhor a dinâmica do processo de ultrafiltração através de um esquema prático.

**Figura 12:** Filtros de areia usados no pré-tratamento do efluente.



**Fonte:** Acervo Autora.

**Figura 13:** Vista frontal do container com o buffer tank localizado a sua direita



**Fonte:** Acervo Autora.

**Figura 14:** Vista traseira do container, com o reuse tank e waste tank localizados a sua direita.



**Fonte:** Acervo Autora.

**Figura 15:** Tubulação com padrão sinuoso usada para promover a mistura do efluente com coagulante



**Fonte:** Acervo Autora.

#### **4.3.1 Razão entre Permeado e Concentrado**

A razão entre o permeado produzido e o concentrado proveniente da filtração, era chamada de “eficiência de permeado”. Esta razão (eficiência de permeado), depende das configurações que foram utilizadas na operação de filtração, como duração da filtração, fluxo de filtração, duração da retrolavagem e fluxo de retrolavagem. Nos experimentos deste trabalho, foram utilizadas eficiências de permeado entre 50 e 80%.

#### **4.4 Membranas**

As membranas utilizadas eram de dois tamanhos diferentes, com um diâmetro externo de 0,9mm e 1,5mm, e diâmetro interno de, respectivamente, 4,0mm e 6,0mm. Elas foram fornecidas pela empresa inge GmbH, sediada na cidade de Greifenberg, na Alemanha.

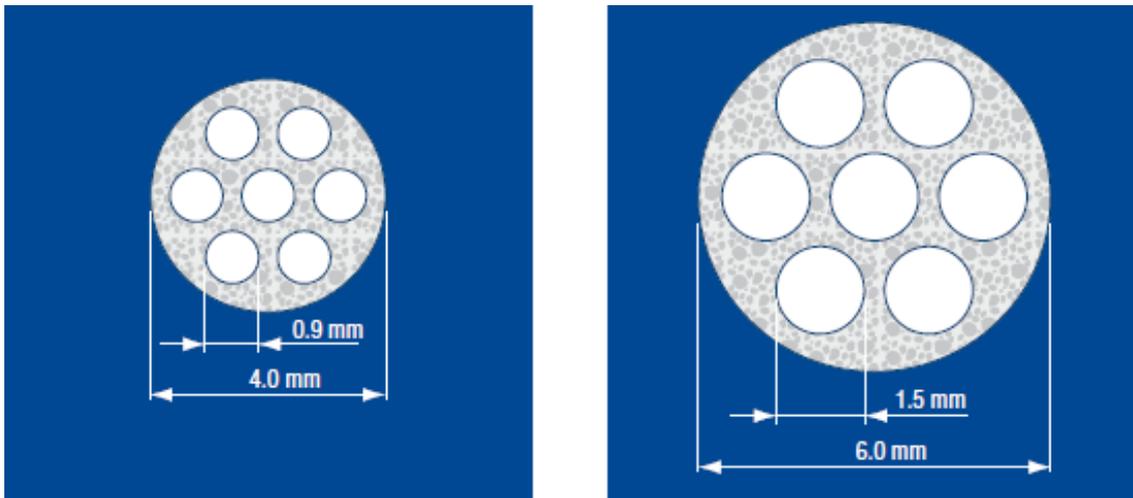
**Tabela 6:** Informações Técnicas das Membranas Utilizadas nos Reatores de Ultrafiltração.

<b>Dados da Membrana Multibore® 0.9</b>	
Tipo da Membrana	Tubular
Número de capilares por fibra	7
Diâmetro Interno	0,9 mm
Diâmetro externo	4,0 mm
Tamanho do Poro	20 nm
Pressão de Ruptura	>10 bar
Material	PES (polietersulfona)
<b>Dados da Membrana Multibore® 1.5</b>	
Tipo da Membrana	Tubular
Número Capilares por fibra	7
Diâmetro Interno	1,5 mm
Diâmetro externo	6,0 mm
Tamanho do Poro	20 nm
Pressão de Ruptura	>10 bar
Material	PES (polietersulfona)

**Fonte:** Technical Specifications dizzer P, Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

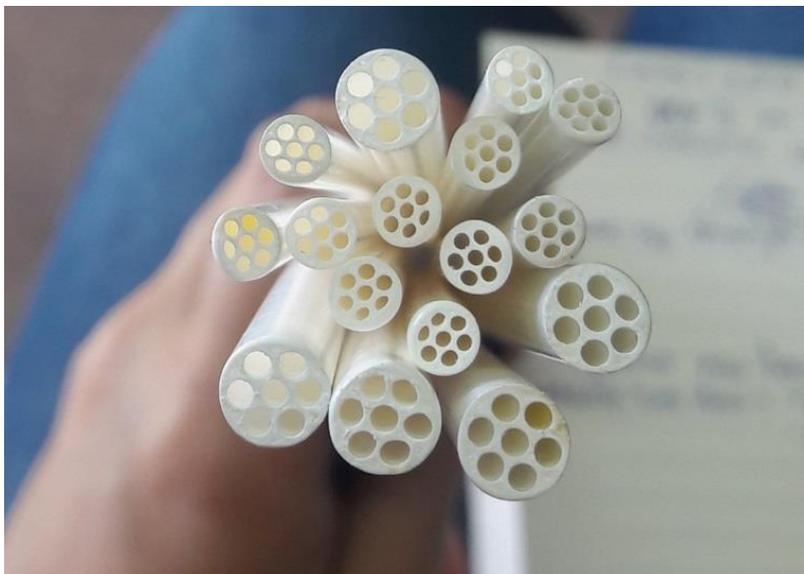
Na figura 16 é possível visualizar as proporções das membranas com maior clareza e na figura 17 e 18 observar a aparência real das membranas:

**Figura 16:** Detalhes das membranas de diâmetro 0,9mm e 1,5mm



**Fonte:** Operator's Manual 2.1 Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

**Figura 17:** Aparência das membranas Multibore® tubulares usadas nos módulos de ultrafiltração. As menores medindo 0,9 mm e as maiores 1,5mm.



**Fonte:** Acervo Autora.

**Figura 18:** Vista superior do interior de um reator preenchido por membranas tubulares de 0.9mm no fim da sua vida útil.



**Fonte:** Acervo Autora.

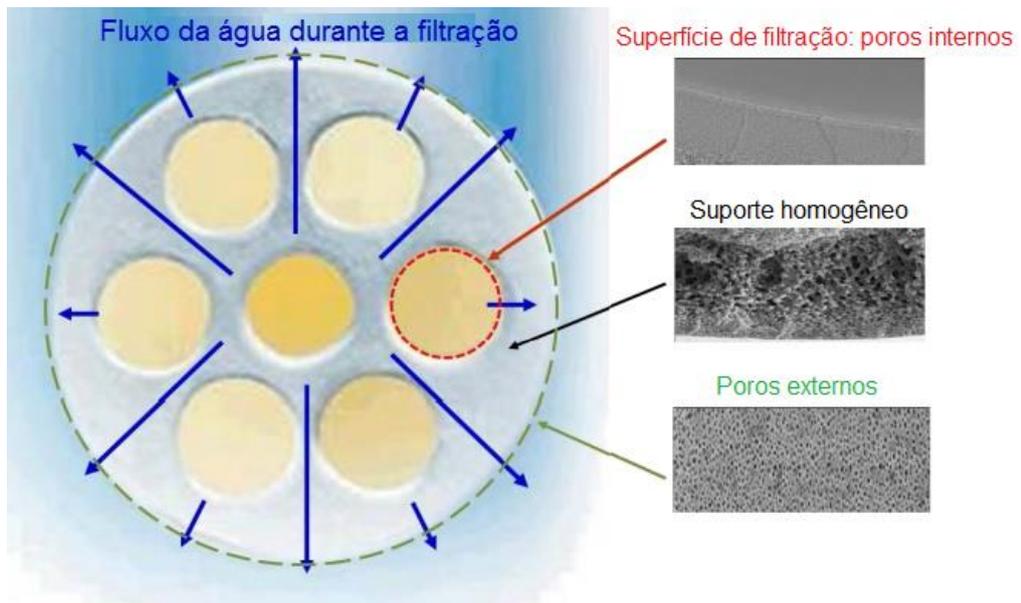
#### **4.5 Funcionamento das Membranas e dos Reatores de UF**

As membranas utilizadas, são conhecidas como “integrais” pois foram produzidas utilizando apenas um material (polietersulfona = PES). A superfície de filtração localizada no interior dos sete capilares apresentava resistência extremamente baixa à permeação.

As membranas de UF Multibore® utilizadas, operavam "de dentro para fora", o que significa que a água fluía de dentro para fora dos capilares no modo de filtração (figura 19) e fluía na direção inversa, no modo de retrolavagem (backwash), explicado melhor no item 4.6.1.

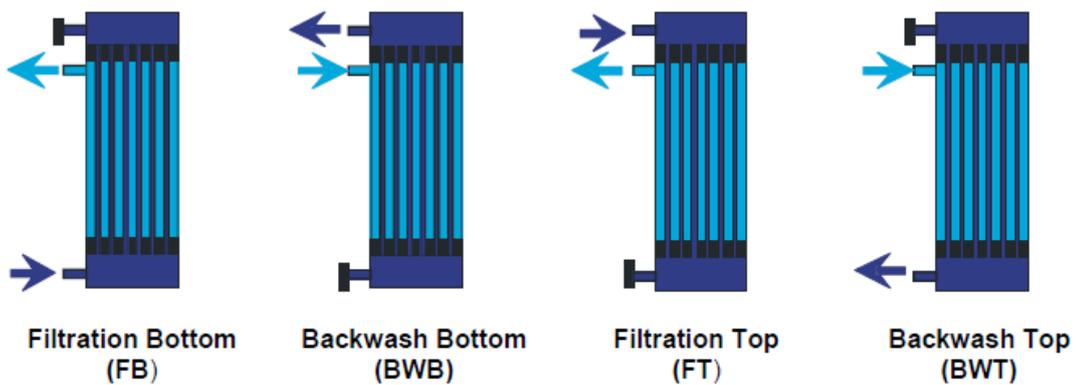
A operação de filtração e limpeza nos reatores de UF podia ser operada ainda de duas formas: de cima para baixo (top-to-bottom ou apenas Top) ou de baixo para cima (bottom-to-top ou apenas Bottom), como é possível observar na figura 20. Nas filtrações que se sucederam durante o estudo ambos os modos foram usados.

**Figura 19:** Seção transversal da membrana Multibore® de ultrafiltração.



**Fonte:** Operator's Manual 2.1 Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

**Figura 20:** Direção do fluxo no módulo de ultrafiltração nos modos de filtração e de retrolavagem.



**Fonte:** Operator's Manual 2.1 Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

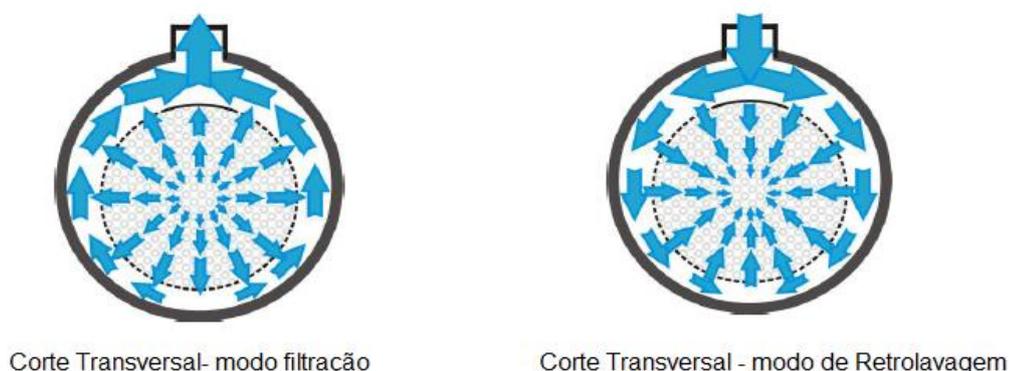
## 4.6 Limpeza das Membranas

Para esta planta piloto de UF, eram quatro as formas de limpeza das membranas: backwash (retrolavagem), forward flush (descarga direta ou fluxo direto), limpeza química CEB (Chemically Enhanced Backwash em português “Retrolavagem Quimicamente Melhorada) e a limpeza química CIP (Chemical Clean In Place, em português Limpeza Química Localizada). A limpeza dos módulos, assim como a Filtração, também era operada tanto de cima para baixo (top-to-bottom ou simplesmente Top), como de baixo para cima (bottom-to-top ou simplesmente Bottom).

### 4.6.1 Retrolavagem (Backwash)

A retrolavagem consistia numa limpeza utilizando apenas o permeado, gerado pelos próprios módulos de UF, no fluxo inverso ao fluxo do modo de filtração, ou seja, o permeado fluía de fora para dentro dos capilares. Essa limpeza tinha como objetivo a desobstrução dos poros da membrana, podendo acontecer antes, durante (em intervalos periódicos programáveis) e depois da filtração. Na figura 22 é possível observar a diferença entre o fluxo do modo de filtração e do modo de retrolavagem, e na Figura 23 o esquema de retrolavagem no módulo de UF:

**Figura 21:** Distribuição radial do fluxo no modo de filtração e retrolavagem.



**Fonte:** Operator’s Manual 2.1 Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

#### **4.6.2 Fluxo direto ou Descarga Direta (Forward Flush)**

O fluxo direto, segundo o fabricante das membranas, tinha seu uso aconselhável antes de uma retrolavagem, ao ser filtrado um efluente com altas concentrações de sólidos. Essa limpeza também podia ser usada para remover sólidos do sistema que foram soltos da membrana por uma retrolavagem, reduzindo assim a quantidade de permeado necessária para a retrolavagem posterior. O fluxo direto também servia para garantir que nenhum resíduo proveniente de uma retrolavagem pudesse retornar à membrana em um estágio de filtração subsequente.

Nessa limpeza, o fluxo de permeado não perpassava a membrana de um lado a outro, ela apenas varria os sólidos das paredes da membrana de forma tangencial. Essa etapa no processo era opcional, quando utilizada, a limpeza de fluxo direto era executada antes e/ ou após uma retrolavagem.

#### **4.6.3 Retrolavagem Quimicamente Melhorada (CEB)**

A limpeza CEB era utilizada para aumentar a eficácia da retrolavagem convencional. Ela tinha como objetivo remover partículas orgânicas que pudessem ter se depositado nas membranas e no módulo de UF, assim como partículas inorgânicas e precipitações de outras naturezas. A CEB era executada após um número definido de ciclos de operação, sendo sempre executada após uma retrolavagem.

As limpezas CEB realizadas eram sempre cáustica/ácida, ou seja, após CEB alcalino era realizado um CEB ácido, formando uma única etapa CEB, o CEB cáustico/ácido. Ao contrário de uma retrolavagem padrão, a CEB era executada em ambas as direções, em sucessão (primeiro de baixo para cima e depois de cima para baixo) para haver garantia que a solução de limpeza era distribuída uniformemente pelo módulo de UF. A base e o ácido usados para a limpeza CEB foram hidróxido de sódio (NaOH) e ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), ambos em concentrações a 30%.

#### 4.6.4 Limpeza Química Localizada (CIP)

Este método era o mais eficaz para restaurar o desempenho da membrana, combatendo os tipos de incrustações que eram difíceis de remover usando a retrolavagem convencional ou retrolavagem quimicamente aprimorada (CEBs). O CIP era realizado introduzindo uma solução química nos módulos e desligando o sistema de membrana por um período de tempo maior do que o necessário para os métodos convencionais de limpeza.

As principais diferenças entre o método CEB e o método CIP são seus níveis de automação, frequência e intensidade. Como regra, o CIP é necessário apenas uma ou duas vezes por ano. A limpeza CIP era realizada semi-automaticamente ou manualmente, em contraste com a CEB que era geralmente realizada várias vezes por semana integrada ao sistema operacional da planta automática. Para este tipo de limpeza era utilizado o reagente hipoclorito de sódio (NaOCl), com concentração a 30%.

Na tabela de nº 7 seguem algumas especificações técnicas do fabricante para as limpezas CEB e CIP.

**Tabela 7:** Informações Técnicas sobre as condições para as limpezas químicas das membranas (CEB e CIP).

<b>Limpeza/ Desinfecção Química</b>	<b>Membrana Multibore® 0.9 e 1.5</b>
Cloro Livre	Max. 200 ppm Max. 200,000 ppm x h (em pH ≥ 9.5)
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (Peróxido de Hidrogênio)	Max. 500 ppm
NaOH (Hidróxido de Sódio)	pH máximo = 13
Ácido	pH mínimo = 1

**Fonte:** Inge GmbH – Ultra Filtration.

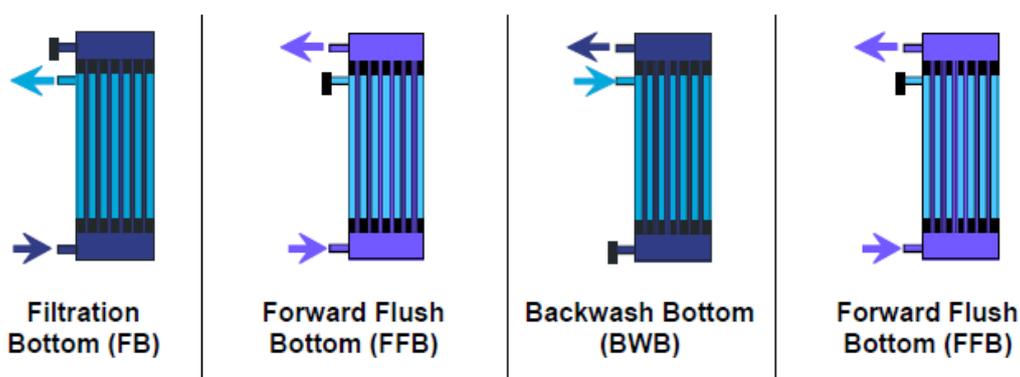
## 4.7 Ciclos de Operação

As filtrações nos módulos de ultrafiltração aconteciam em ciclos de operação, ou seja, em uma sequência de operações, compreendendo uma sequência de filtração seguida por uma sequência de limpeza. A sequência de limpeza incluía pelo menos uma retrolavagem, embora pudesse incluir várias retrolavagens e fluxos diretos.

Em geral, os módulos foram operados com diferentes ciclos operacionais, afim de testar a capacidade de recuperação das membranas e seu tempo de vida útil operando vezes sob condições adversas, vezes sob condições mais favoráveis. Os ciclos de filtração utilizados totalizaram quatro, que eram as únicas combinações possíveis dentro do método de trabalho que aconselhava o fabricante.

- ❖ **Ciclo de Operação 1- FB/ FFB/ BWB/ FFB: Filtration Bottom** (filtração no modo de baixo para cima), **Forward Flush Bottom** (fluxo direto no modo de baixo para cima), **Backwash Bottom** (retrolavagem no modo de baixo para cima) e por fim, novamente **Forward Flush Bottom** (fluxo direto no modo de baixo para cima).

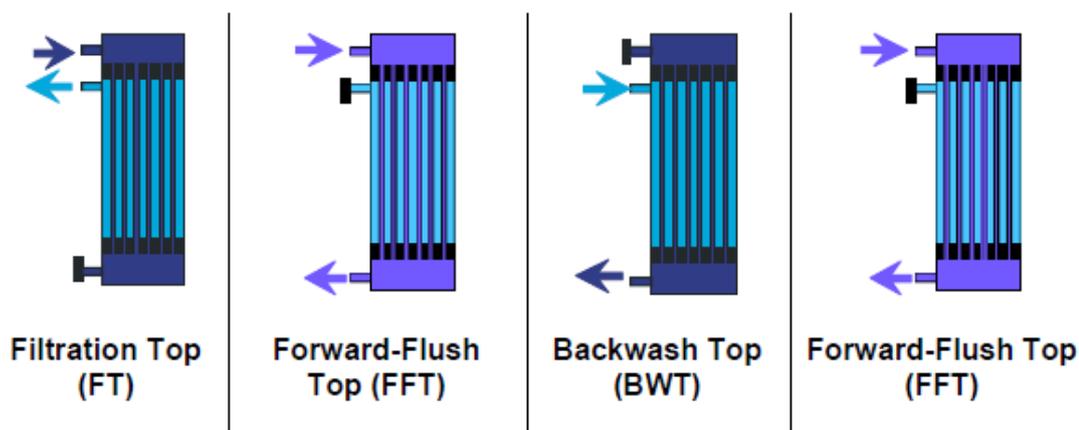
**Figura 22:** Esquema do Ciclo de Operação na configuração FB/ FFB/ BWB/ FFB.



**Fonte:** Imagem adaptação de Operator's Manual 2.1 Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

- ❖ **Ciclo de Operação 2 – FT/ FFT/ BWT/ FFT: Filtration Top** (filtração no modo de cima para baixo), **Forward Flush Top** (fluxo direto no modo de cima para baixo), **Backwash Top** (retrolavagem no modo de cima para baixo) e **Forward Flush Top** (fluxo direto no modo de cima para baixo).

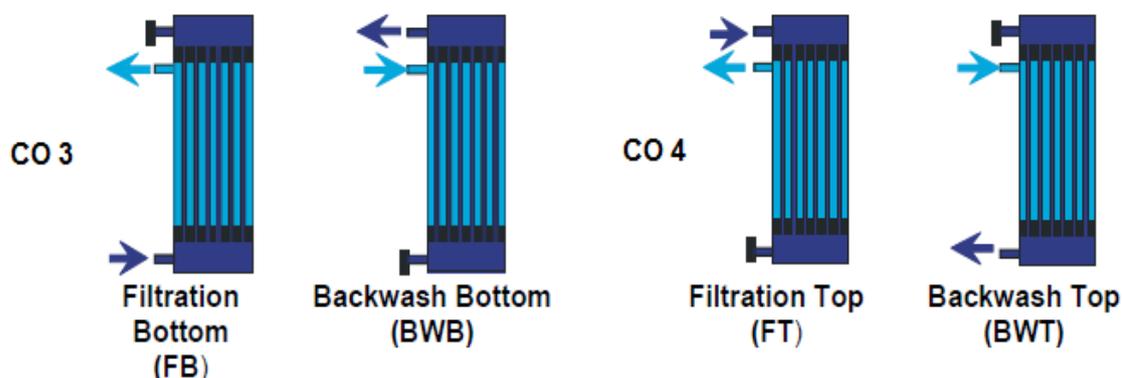
**Figura 23:** Esquema do Ciclo de Operação na configuração FT/ FFT/ BWT/ FFT.



**Fonte:** Imagem adaptação Operator's Manual 2.1 Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

- ❖ **Ciclo de Operação 3 – FB/ BWB: Filtration Bottom** (filtração no modo baixo para cima) seguida de **Backwash Bottom** (retrolavagem no modo de baixo para cima).
- ❖ **Ciclo de Operação 4 – FT/ BWT: Filtration Top** (filtração no modo de cima para baixo) seguida de **Backwash Top** (retrolavagem no modo de cima para baixo).

**Figura 24:** Esquema dos Ciclos de Operação nas configurações FB/ BWB e FT/BWT, respectivamente.



CO = Ciclo de Operação

Fonte: Imagem adaptação Operator's Manual 2.1 Inge GmbH – Ultra Filtration (2014).

## 4.8 Métodos Analíticos

### 4.8.1 Coletas

As coletas eram realizadas semanalmente, sendo as primeiras coletas realizadas no mês de abril de 2017, se encerrando no mês de novembro do mesmo ano. Foram realizadas um total aproximado de 30 coletas. As amostras coletadas eram o efluente após passar pelos filtros de areia, localizados na planta piloto, codificada como “F” e os permeados dos dois reatores de UF, identificados como “U1” (amostra do reator 1) e “U2” (amostra do reator 2).

Os parâmetros analisados nas coletas foram: Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), Demanda Química de Oxigênio (DQO), Nitrogênio Amoniacal ( $\text{NH}_3$ ), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF), Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV), pH, condutividade e coliformes Termotolerantes. As análises de DBO, DQO,  $\text{NH}_3$  e turbidez foram realizadas no Laboratório de Tecnologia Química (LTQ) situado na Universidade Federal da Paraíba (UFPB), já as análises de Sólidos Dissolvidos Totais (ST), Sólidos Dissolvidos Fixos (SDF), Sólidos Dissolvidos Voláteis (SDV), pH, condutividade e Coliformes Termotolerantes (CT) foram

realizadas no Laboratório de Análises e Monitoramento de Efluentes da CAGEPA (LAMEC) situado na ETE- Mangabeira, estação onde estava alocada a planta piloto de UF.

Na tabela a seguir estão listados as análises e os métodos utilizados para sua execução:

**Tabela 8:** Descrição das análises e seus métodos de execução.

<b>Análise</b>	<b>Método</b>	<b>Frequência</b>
DBO	Método Oxitop com Equipamento OxDirect versão 001/006.	Semanal
DQO	Kit Test'n Tube da Hach Ref. 2125825 e 2125925.	Semanal
NH3	Kit Test'n Tube da Hach Ref. 2606945.	Semanal
SDT	Gravimétrico - Standard Methods ed. 2005.	Semanal
SDF	Gravimétrico - Standard Methods ed. 2005.	Semanal
SDV	Diferença entre sólidos totais e sólidos fixos totais.	Semanal
pH	pHmêtro Hach modelo Sension + pH 31	Semanal
Condutividade	Condutímetro WTW modelo Cond 330i	Semanal
CT	Standard Methods ed. 2005	Semanal

#### **4.9 Análise Estatística**

O tratamento estatístico realizado com os dados das análises reunidos consistiu no cálculo da média e do desvio padrão para a população amostral de cada parâmetro analisado. Para as eficiências de remoção trabalhou-se com um nível de confiança de 95% (significância de 5%). A população amostral em todos os parâmetros foi igual a 20, exceto para as análises de turbidez e coliformes, com respectivamente 3 e 11 dados.

## 5 Resultados e Discussões

### 5.1 Eficiência das Membranas

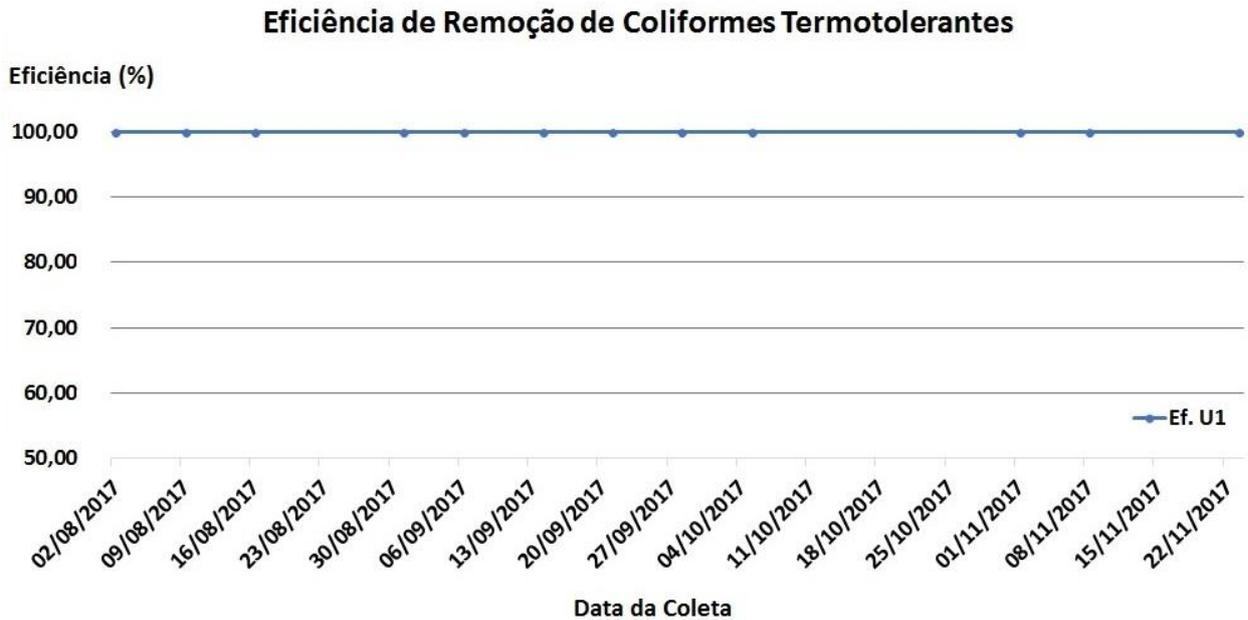
Segundo o fabricante Inge®, as membranas de ultrafiltração Multibore® removem com segurança partículas, bactérias e vírus de uma variedade de fontes de água, mesmo que existam flutuações na qualidade da água de alimentação. Porém não há uma eficiência definida. Isto é devido à razão de que a membrana UF não é feita para remover produtos orgânicos. É apenas uma membrana que separa partículas, retendo partículas cujo tamanho é maior que o tamanho dos poros da membrana.

Portanto, não há eficiências para a remoção de DBO, DQO, NH<sub>3</sub>, turbidez, entre outros, previstas pelo fabricante, pois não há garantia de remoção das mesmas. Um exemplo que podemos dar é quando se tem uma água residual contendo grande concentração de DQO solúvel, não se terá alta eficiência de tratamento usando as membranas de UF. Porém, se houver a mesma concentração devido a presença de lodo, consistindo em flocos de lodo, haverá uma redução do mesmo no permeado, resultando em uma eficiência maior no tratamento. Portanto, não é possível o fornecimento desses valores de eficiência para este tratamento.

Porém, para o estudo em questão, foi calculado os índices de remoção para cada parâmetro monitorado, ou seja, a eficiência da membrana na remoção de DBO, DQO, NH<sub>3</sub>, turbidez, CT, ST, STV, STF e condutividade.

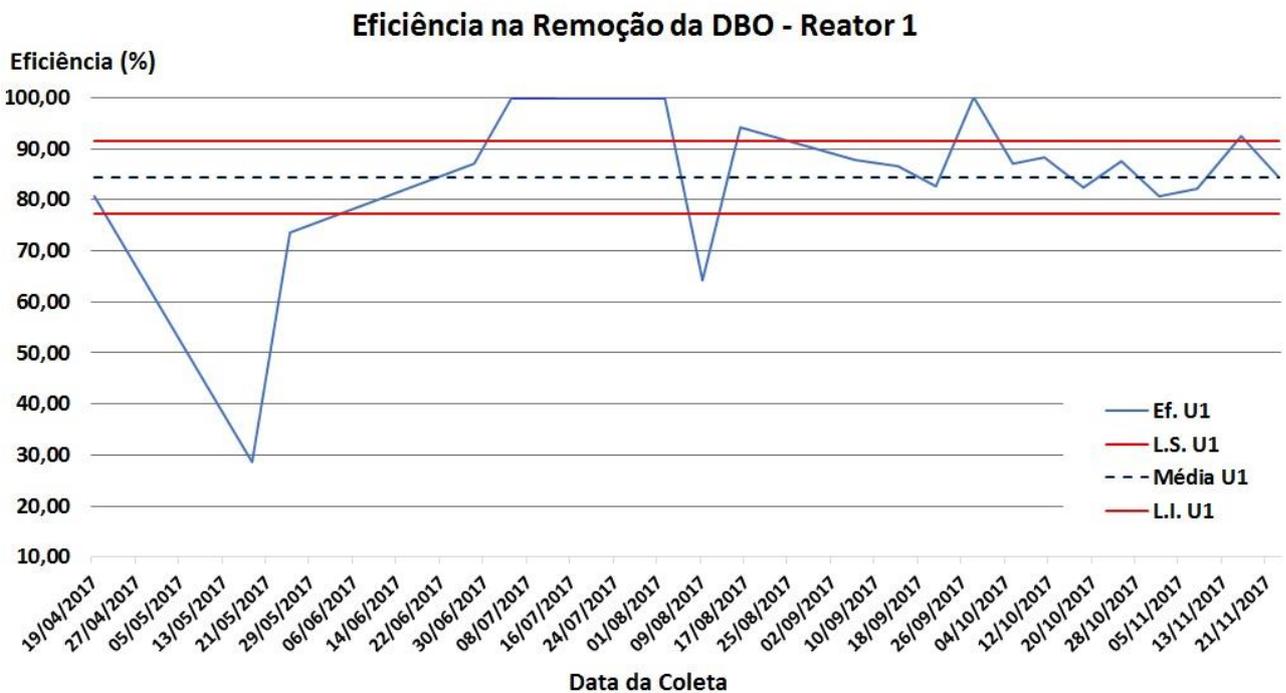
Os gráficos abaixo apresentam os resultados obtidos para o reator 1 durante o monitoramento dos parâmetros, deixando claro o nível de remoção que foi feito pela membrana. Não são exibidos os gráficos para o reator 2 tendo em vista o comportamento extremamente semelhante ao reator 1. As eficiências de remoção de ambos os reatores encontram-se expressos na tabela 9.

**Gráfico 1:** Eficiência de remoção de coliformes termotolerantes.



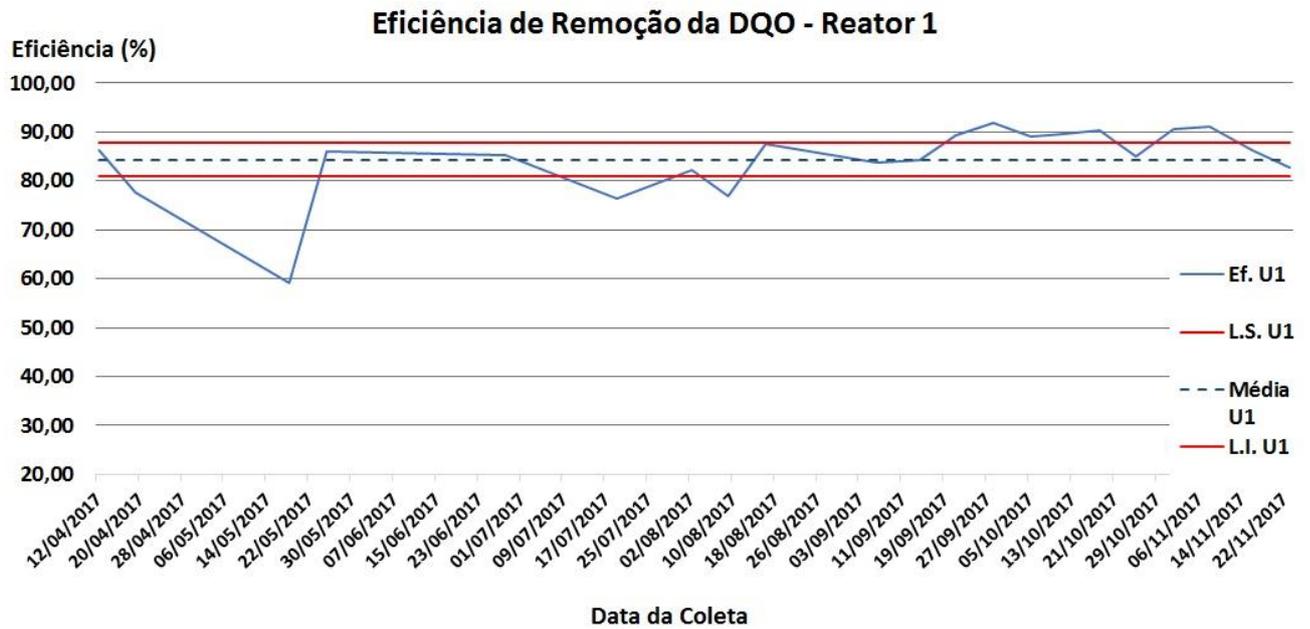
Para a eficiência na remoção dos coliformes termotolerantes não foi possível a análise estatística de intervalo de confiança, pois o valor de desvio padrão para os valores das eficiências de remoção foi igual a zero.

**Gráfico 2:** Eficiência de remoção da da demanda bioquímica de oxigênio.



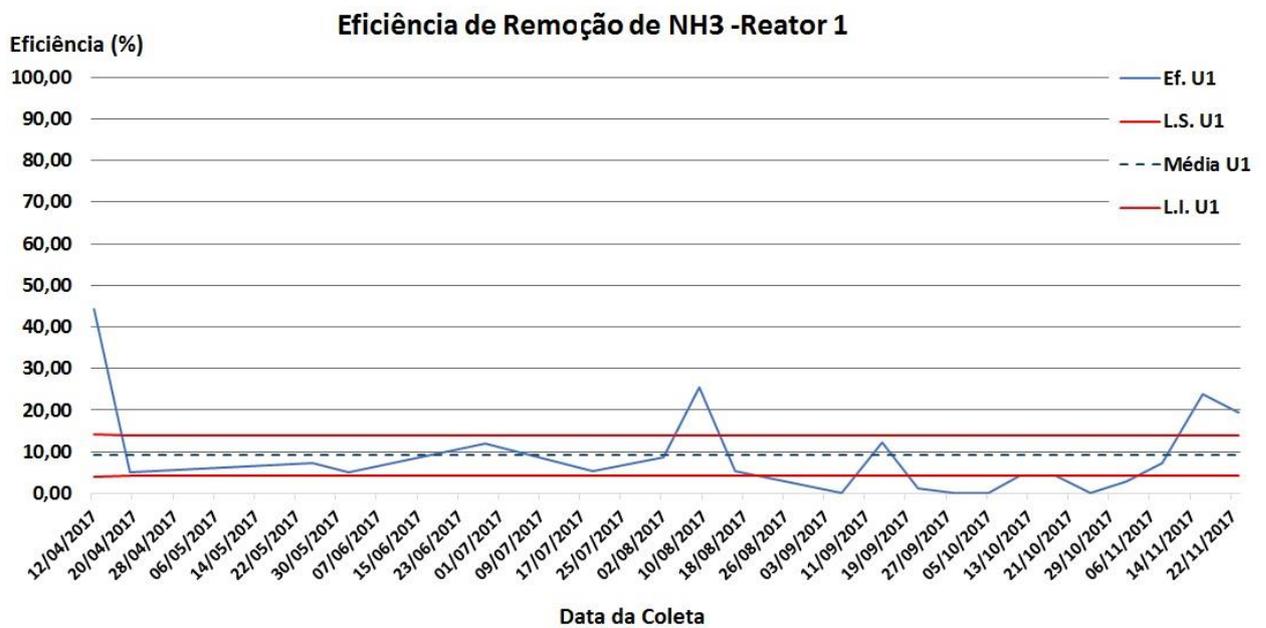
$$I.C = 84,28 \pm 7,13$$

**Gráfico 3:** Eficiência de remoção da demanda química de oxigênio



$$I.C. = 84,36 \pm 3,36$$

**Gráfico 4:** Eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal (NH<sub>3</sub>).



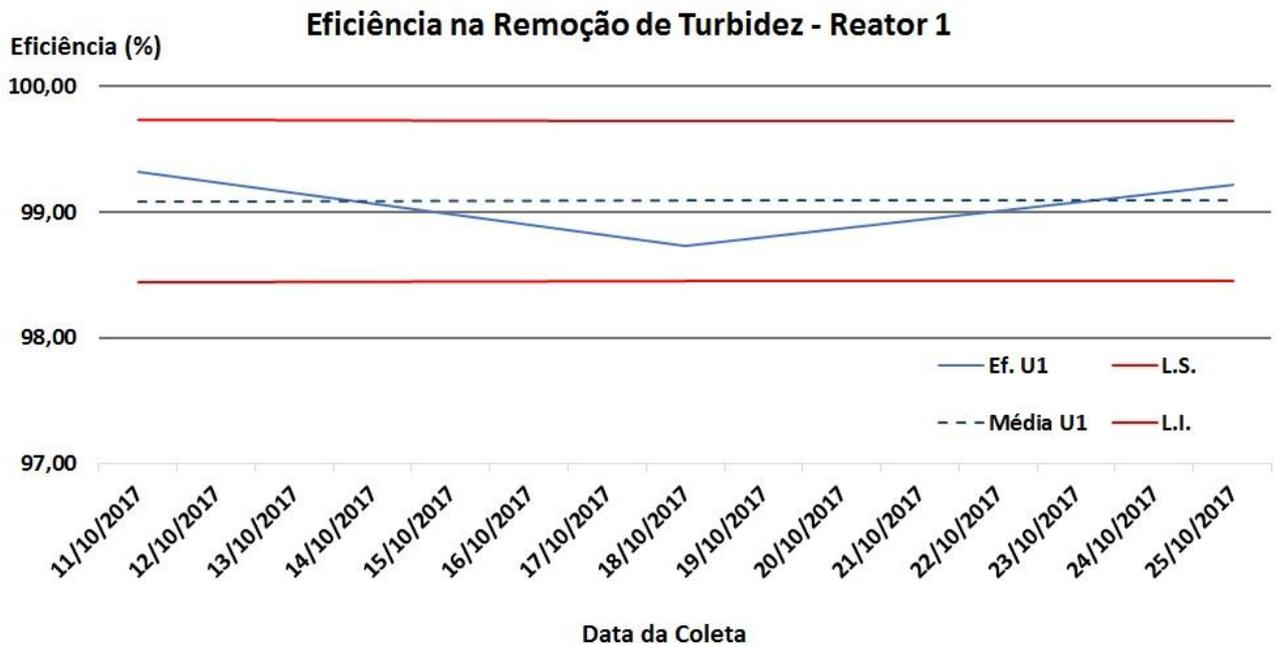
$$I.C. = 9,23 \pm 5,00$$

**Gráfico 5:** Eficiência de remoção da condutividade.



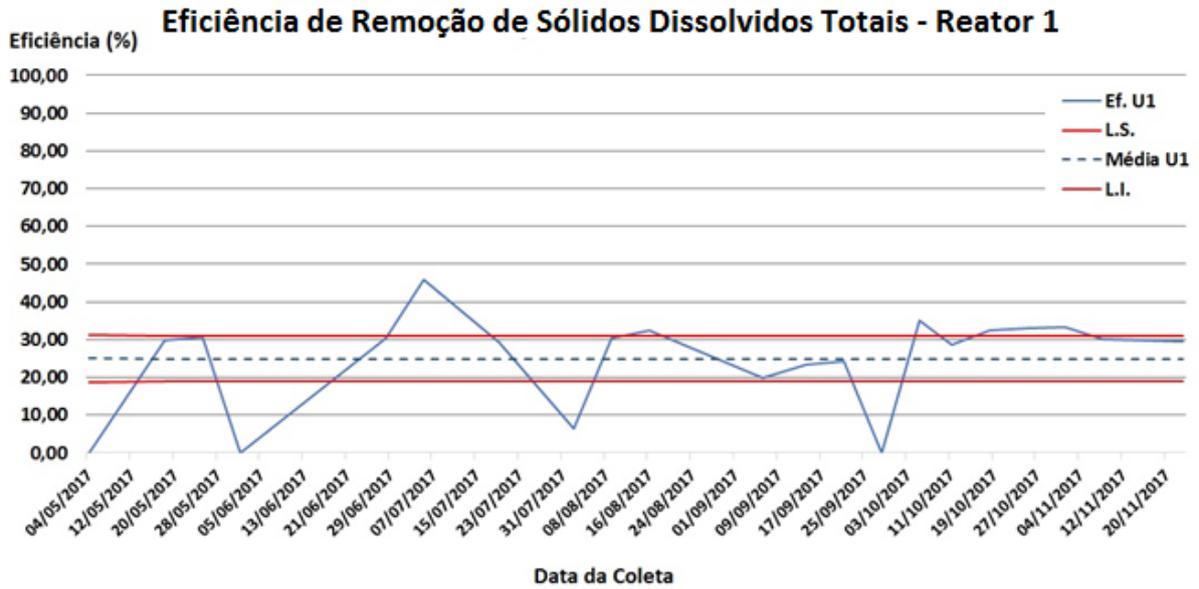
I.C. =  $3,63 \pm 3,55$

**Gráfico 6:** Eficiência de remoção da turbidez.



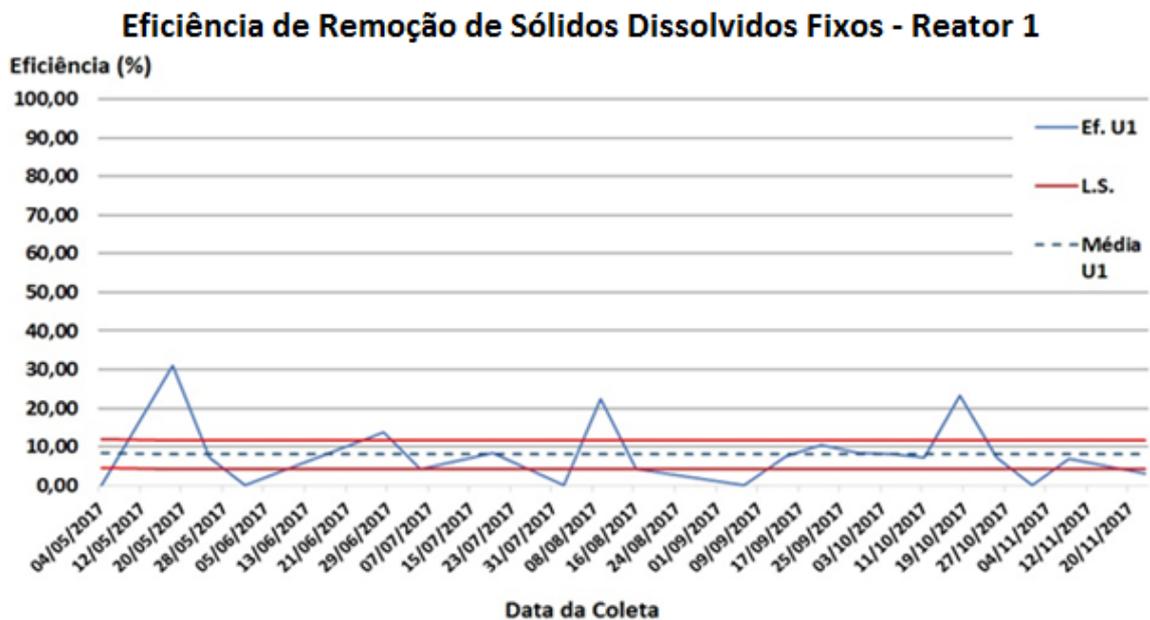
I.C. =  $99,09 \pm 0,64$

**Gráfico 7:** Eficiência de remoção de sólidos dissolvidos totais.



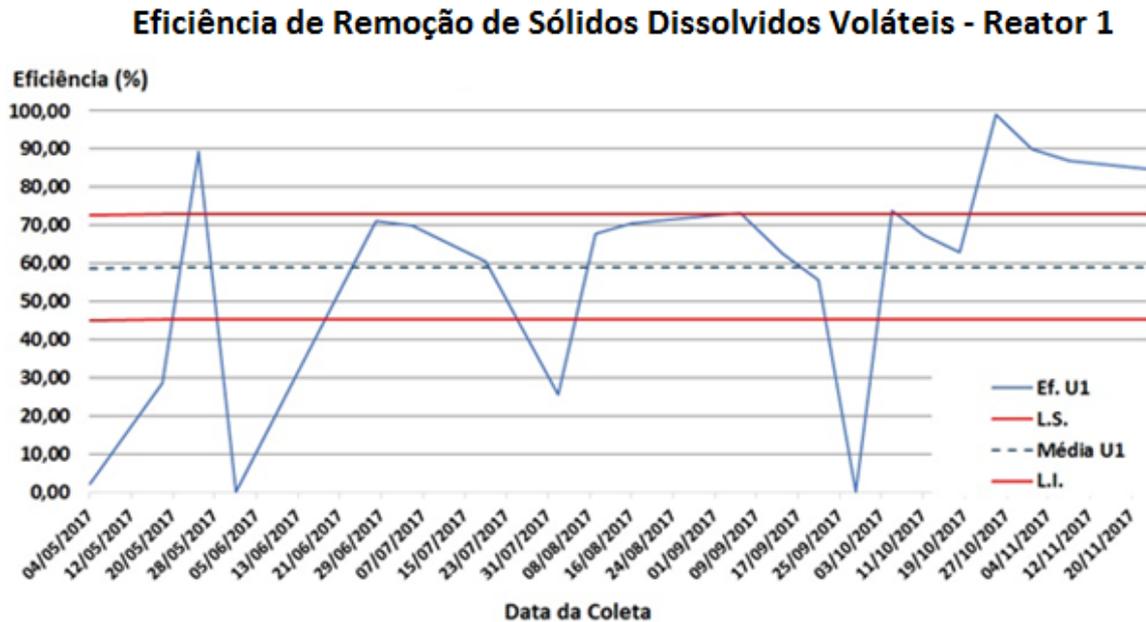
I.C.=25,01 ± 6,17

**Gráfico 8:** Eficiência de Remoção de sólidos dissolvidos fixos.



I.C.= 8,25 ± 3,79

**Gráfico 9:** Eficiência de Remoção de sólidos dissolvidos voláteis



$$I.C. = 53,25 \pm 15,16$$

Os valores atípicos nos gráficos 2 (DBO) e 3 (DQO), nas datas entre a segunda e a terceira semana do mês de maio, foi devido provavelmente à fatores operacionais da ultrafiltração, como duração da filtração, fluxo de filtração e limpeza das membranas. Outro fator que pode ser atribuído à essas eficiências de remoção abaixo das restantes observadas é a qualidade do efluente que foi filtrado, podendo estar mais concentrado devido ao clima seco e falta de chuva nesse período. Foi descartado o erro de natureza laboratorial na análise dos parâmetros, tendo em vista que para ambos foi observado o mesmo padrão de comportamento nesta semana.

Para os gráficos 7 (SDT) e 9 (SDV), a flutuação nos valores das eficiências encontradas pode ser explicada pela qualidade do efluente filtrado e pelos fatores operacionais (já explicados anteriormente) como no caso dos gráficos 2 e 3. Esses dois fatores afetam diretamente o processo de ultrafiltração. Em especial a qualidade do efluente a ser filtrado. Quando falamos de um efluente proveniente de tratamento biológico de esgoto sanitário, a reprodutibilidade dos resultados não é constante por causa da composição do esgoto variar, devido ao clima (chuva, clima muito quente e seco), falta de água na região, etc. Isso interfere na concentração de sólidos do efluente final do tratamento, assim como na concentração de outros parâmetros. Essa

variação na composição do efluente resulta em um efluente vezes com característica melhor, vezes pior, o que para esse caso significa menor ou maior concentração de sólidos, respectivamente. Isso influencia diretamente na eficiência de remoção de sólidos pela membrana filtrante, que mostrou uma variação acentuada nos valores de eficiência mostrada nesses gráficos.

Os dados de turbidez se basearam apenas em 3 datas de coleta porque infelizmente não foi possível fazer a análise com maior assiduidade. A escolha por manter os dados e apresentá-los veio da necessidade de se ter a mínima ideia possível sobre seus valores para poder compará-los com os exigidos pela NBR 13.969/1997 da ABNT. Na tabela 9 a seguir encontram-se as médias das eficiências juntamente com seus desvios padrão:

**Tabela 9:** Eficiência de Remoção das membranas de UF nos parâmetros monitorados.

<b>Parâmetro Analisado</b>	<b>Eficiência de Remoção - Reator 1 (%)</b>	<b>Eficiência de Remoção - Reator 2 (%)</b>
Coliformes Termotolerantes	100 ± 0,00	100 ± 0,00
DBO	84,28 ± 15,23	83,76 ± 18,33
DQO	84,36 ± 7,17	84,93 ± 5,77
NH <sub>3</sub>	9,23 ± 10,70	11,14 ± 11,19
Condutividade	3,63 ± 7,59	3,54 ± 7,43
Turbidez	99,09 ± 0,26	99,23 ± 0,15
ST	25,01 ± 13,18	26,37 ± 16,09
STF	8,25 ± 8,08	13,56 ± 19,45
STV	59,12 ± 29,40	53,25 ± 32,39

Os índices de remoção encontrados para os parâmetros de DBO, DQO foram excelentes, tendo em vista a não garantia do fabricante da eficiência das membranas na remoção de tais parâmetros. Já para CT e turbidez, os valores encontrados já eram esperados, pois os poros da membrana são menores que o diâmetro da *Escherichia*

*Coli*, que pode variar entre 0,5 e 1,5  $\mu\text{m}$  (até 75 vezes maior que o tamanho do poro da membrana de 0,02  $\mu\text{m}$ ), e dos sólidos suspensos presentes no efluente tratado, causadores dos níveis altos de turbidez.

Um ponto a ser esclarecido aqui é que o parâmetro de Sólidos Suspensos Totais (SST) não foi monitorado nesse estudo, devido ao seu baixíssimo nível nas amostras de permeado. Foram feitas tentativas de monitoramento, mas em todas elas os níveis de SST nos permeados U1 e U2 eram muito baixos, indetectáveis para volumes inferiores de 1,5L e até 2,5L, o que inviabilizou a realização dessa análise. Todavia, sabe-se que os níveis de SST presentes no permeado encontram-se abaixo dos níveis de 0,1mg/L (valor mínimo detectado pela balança analítica utilizada nas análises de sólidos), representando uma eficiência de remoção de praticamente 100%. Tal fato é passível de verificação de acordo com a Figura 29, onde é possível observar a diferença do efluente (F) e do permeado (proveniente dos reatores U1 e U2):

**Figura 29:** A) permeado obtido após o processo de UF e B) Efluente antes do processo de UF.



**Fonte:** Acervo Autora

Os índices encontrados para SDT mostraram um nível de remoção parcial, com níveis pouco acima de 25%. Para os SDV, os níveis de remoção encontrados foram satisfatórios, estando numa faixa de 50 a 60%. Para os SDF houve uma remoção muito deficiente, menor que 15%. Porém, os resultados encontrados para sólidos dissolvidos foram completamente normais e esperados, já que esse tipo de determinação compreende sólidos dissolvidos de tamanho aproximado de  $10^{-3}$   $\mu\text{m}$  até  $10^{-5}$   $\mu\text{m}$  e sólidos coloidais medindo até  $10^{-5}$   $\mu\text{m}$ . Dessa forma a membrana, devido a limitação do tamanho dos seus poros, não foi capaz de fazer uma remoção adequada dos sólidos dissolvidos.

O mesmo citado anteriormente ocorre com a eficiência de remoção do nitrogênio amoniacal. A membrana de UF não era apta para remoção de íons ou moléculas de tamanho tão pequeno. O valor de remoção encontrado deve-se provavelmente ao nitrogênio amoniacal que ficou impregnado nos sólidos do efluente que foram removidos no processo de UF, apresentando valores em torno de 10% de remoção.

No caso da condutividade também não houve remoção satisfatória (inferior a 5%), pois, grande parte dos compostos inorgânicos, presentes em forma de íons, (principais responsáveis por altos níveis de condutividade da água ou efluente) continuaram presentes mesmo depois do processo de filtração. O que já era esperado, devido ao fato do tamanho dos poros da membrana, já exposto anteriormente.

## **5.2 Reuso do Permeado**

Os valores médios encontrados para os parâmetros analisados nos permeados dos reatores U1 e U2 seguem na tabela 10 abaixo. Logo após tem-se a tabela 11 com dados a serem comparados com os da norma NBR 13.969/1997:

**Tabela 10:** Valores das médias para os parâmetros estudados.

Parâmetro	U1	U2
CT (UFC/100mL)	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00
DBO (mg/L)	7,29 ± 9,23	76,90 ± 7,04
DQO (mg/L)	25,95 ± 8,82	25,90 ± 9,81
NH3(mg/L)	37,31 ± 8,42	37,36 ± 9,87
pH	7,24 ± 0,30	7,12 ± 0,69
Condutividade (µs/cm)	761,38 ± 92,80	769,62 ± 102,96
Turbidez (NTU)	0,45 ± 0,1	0,38 ± 0,05
ST (mg/L)	323,62 ± 93,61	316,81 ± 107,04
STF (mg/L)	256,76 ± 41,10	244,24 ± 63,62
STV (mg/L)	66,57 ± 60,60	72,43 ± 61,05

**Tabela 11:** Dados coletados das análises em comparação com os dados da norma NBR 13.969/1997.

Parâmetro	Médias		NBR 13.969/1997			
	U1	U2	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4
CT (NMP/100mL)	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	< 200	< 500	< 500	< 5000
pH	7,24 ± 0,30	7,12 ± 0,69	6,0–8,0	-----	-----	-----
Turbidez (NTU)	0,45 ± 0,1	0,38 ± 0,05	< 5	< 5	< 10	-----
SDT (mg/L)	323,62 ± 93,61	316,81 ± 107,04	< 200	-----	-----	-----
Cloro Residual (mg/L)	-----	-----	0,5-1,5	> 0,5	-----	-----
Oxigênio Dissolvido (mg/L)	-----	-----	-----	-----	-----	>2,0

Comparando os valores encontrados de turbidez, CT, pH e sólidos totais, referentes aos presentes na NBR 13.969/1997 da ABNT na tabela 3, é possível concluir que os permeados U1 e U2 se encaixam nas categorias de classe 2, 3 e 4 de reuso de água. Sendo necessário a adição de uma etapa de desinfecção através da adição de cloro no fim do processo de UF, afim de tornar adequado com a norma os níveis de cloro residual nos permeados para a classe 2 de reuso, que define valor igual ou superior a 0,5 mg/L, tal adição pode ser feita com hipoclorito de sódio, por exemplo. Outro procedimento necessário seria o monitoramento dos níveis de oxigênio dissolvido, já que na classe 4 da norma é exigido um valor acima de 2,0 mg/L.

## **6 Conclusão**

A membrana de UF utilizada no estudo se mostrou bastante eficiente no polimento de efluentes de lagoas de estabilização em série. Apresentou índices de remoção acima de 80% para parâmetros como DQO e DBO, índices acima de 90% para turbidez e 100% para remoção de CT, além de uma alta remoção de sólidos suspensos totais e de manter os níveis de pH constantes.

O permeado obtido apresentou uma qualidade acima do esperado, podendo ser utilizado como água de reuso para lavagem de pisos, calçadas, irrigação de jardins, manutenção de lagos e canais (para fins paisagísticos), descarga de vasos sanitários, reuso em pomares, forragens e pastagens para gado, etc. Necessitando apenas adicionar uma etapa de desinfecção (adição de cloro) para garantir atendimento a NBR 13.969/1997 da ABNT.

## 7 Referências

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT.** NBR 9.648: Estudos de concepção de sistemas de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

BAKER, R. W. **Membrane technology and applications.** McGraw-Hill. Second Editions, John Wiley & Sons, Ltd: California, 2004. Disponível em: <<http://download.e-bookshelf.de/download/0000/5676/44/L-G-0000567644-0002356890.pdf>>. Acesso em: 20 de abril 2018.

BRASIL. Conselho Nacional de Recursos Hídricos. **Resolução nº 54 de 28 de novembro de 2005.** Estabelece modalidades, diretrizes e critérios para prática de reúso direto não potável de água, e dá outras providências. Disponível em: <[http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com\\_content&view=article&id=14](http://www.cnrh.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=14)>. Acesso em: 08 de abril de 2018.

BUENO, M. **Mercado de Membranas no Brasil é Promissor.** Revista Técnica do Tratamento de Água e Efluentes (TAE), edição nº 22, 2014. Disponível em: < <http://www.revistatae.com.br/edicoes.asp?link=ultima&tipo=A&edicao=22>> Acesso em: 28/03/2018.

CHAMON, R. P. **Pós-tratamento de lixiviado de aterro industrial pelo processo de osmose inversa: estudo de caso.** Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

HABERT, A. C.; BORGES, C. O.; NÓBREGA, R. **Processos de Separação com membranas.** 3ª Ed. Rio de Janeiro: Escola piloto em engenharia química, COPPE, UFRJ, 2006.

HESPANHOL, I. Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquífero. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.7, p. 75-95, 2002.

Inge GmbH Membrane Handbook. **Operator's Manual 2.1**. Alemanha, 2014.

Inge GmbH Membrane Handbook. **Technical Specifications dizzer P**. Alemanha, 2014.

Inge GmbH Ultrafiltration Handbook. **Ultrafiltration technical manual**. Alemanha, 2002.

JORGEN WAGNER, B. **Membrane Filtration Handbook: Practical Tips and Hints 2. ed.** Minnetonka : Editora Osmonics, 2001.

**ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT**. NBR 13.969: Tanques sépticos – unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos: projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

MIERZWA, J. C. **O uso racional e o reuso como ferramentas para o gerenciamento de águas e efluentes na indústria: estudo de caso da Kodak brasileira**. Tese (Doutorado em Engenharia), Universidade de São Paulo, 2002.

MILLER, G. W. Integrated concepts in water reuse: managing global water needs. **Desalination**, v. 187, p. 65-75, 2006.

PETRUS, J. C. C. **Preparação, modificação e caracterização de membranas assimétricas para clarificação de suco de frutas**. Campinas. 139p. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia de Alimentos. Universidade e Estadual de Campinas, 1997.

Projekt DEA-15-113. **Operation Manual (EN) Ultrafiltration Pilot Plant**. RWTH Aachen, 2016.

SCHNEIDER, R. P.; TSUTIYA, M. T. **Membranas filtrantes para o tratamento de água, esgoto e água de reúso**. 1ª Ed. São Paulo: Associação Brasileira De Engenharia Sanitária, 2001.

SILVA, L. P. A. **Utilização de membranas no pós-tratamento de esgoto para reúso do permeado e aproveitamento do concentrado.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014.

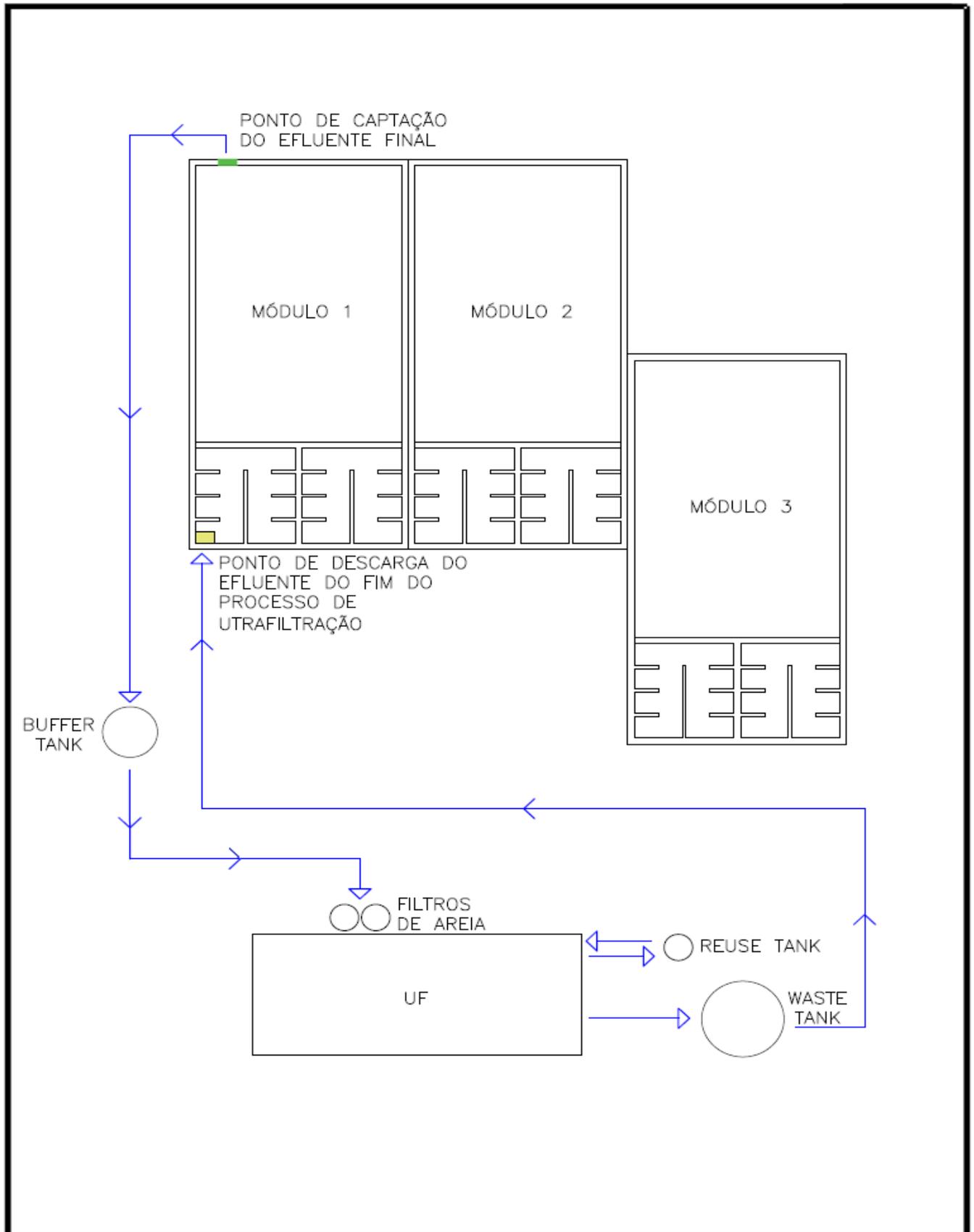
STEPHEENSON, T. et al. **Membrane Bioreactors for wastewater treatment.** Publishing IWA, London, 179 p, 2000.

ROQUES, H. **Fondements théoriques du traitement biologique des eaux.** Technique et Documentation, Paris, 1980.

VAN DER BRUGGEN, B. et al. A Review of Pressure-Driven Membrane Processes in Wastewater Treatment and Drinking Water Production. **Environmental Progress**, v. 22, p. 46-56, 2003.

XIA, S. et al. Pilot study of drinking water production with ultrafiltration of water from the Sondhuajiang river (China). **Desalination**, v. 179, p. 369-374, 2005.

## 8 Apêndice A : Esquema da Planta Piloto de Ultrafiltração



TÍTULO: ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE REATORES DE ULTRAFILTRAÇÃO  
 NO POLIMENTO DE EFLUENTE DE LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO EM SÉRIE

PROFESSOR ORIENTADOR:  
**JOSÉ SOARES**

ASSUNTO: ESQUEMA DE PLANTA PILOTO DE ULTRAFILTRAÇÃO DA ETE - MANGABEIRA

ESCALA:  
 SEM ESCALA

FOLHA:  
 01/01

AUTOR:  
 MARIA CLARA RODRIGUES DE LIMA

DATA:  
 15/06/18