

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO RIO GRANDE DO NORTE  
CAMPUS DE NATAL  
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA**

**LUANA SILVESTRE FERNANDES**

**UTILIZAÇÃO DE BIORREATOR A MEMBRANAS NO  
TRATAMENTO DE EFLUENTES VISANDO O REÚSO NÃO POTÁVEL  
DA ÁGUA**

**NATAL  
2016**

**LUANA SILVESTRE FERNANDES**

**UTILIZAÇÃO DE BIORREATOR A MEMBRANAS NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTES VISANDO O REÚSO NÃO POTÁVEL DA ÁGUA**

Monografia apresentada ao Departamento de  
Ciência e Tecnologia como requisito para a  
obtenção do título de bacharel em Ciência e  
Tecnologia.

Orientador: Ms. Maria Helena de Freitas

**NATAL  
2016**

**LUANA SILVESTRE FERNANDES**

**UTILIZAÇÃO DE BIORREATOR A MEMBRANAS NO TRATAMENTO DE  
EFLUENTES VISANDO O REÚSO NÃO POTÁVEL DA ÁGUA**

Aprovada em \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

---

Profª Ms. Maria Helena de Freitas- Orientador  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

---

Prof. Dr. Norberto de Kassio Vieira Monteiro  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

---

Profª Dra. Andrea Jane da Silva  
Universidade do Estado do Rio Grande do Norte

Dedico este trabalho aos meus pais, sem eles eu não seria capaz de realizar este sonho.

## RESUMO

O lançamento inadequado de efluentes devido à falta de um tratamento eficaz tem conduzido a um cenário constante de degradação ambiental dos corpos aquáticos receptores do efluente. A importância da preservação dos recursos hídricos remete à busca por tecnologias eficientes, as quais tenham a capacidade de fornecer um efluente tratado com baixa presença de poluentes e contaminantes, diminuindo os impactos causados pelo seu lançamento. Neste sentido, diante dos desafios atuais relacionados à escassez dos recursos hídricos, a tecnologia do biorreator à membrana (MBR), a qual é a junção do processo de separação por membranas com tratamento biológico por lodos ativados, tem se mostrado como uma alternativa eficaz, uma vez que é capaz de gerar um efluente tratado, possibilitando em alguns casos o reúso da água. Diante disso, decidiu-se empreender esta pesquisa cujo objetivo é analisar a partir de estudos já realizados a utilização de biorreator a membrana no tratamento de efluentes visando o reúso não potável da água. Para se alcançar esse objetivo, foi realizada pesquisa bibliográfica, organizada em três etapas: pesquisa e seleção de trabalhos acadêmicos disponíveis em banco de dados confiáveis (Banco de tese da Capes, Revista Scielo e base de programas de pós-graduação), compilação dos estudos relacionados à temática aqui abordada e, por fim, leitura e análise do material compilado. Sendo assim, os resultados obtidos pelos estudos apresentados neste trabalho revelam que a aplicação desta tecnologia para o tratamento de efluentes é viável, por diversas características, dentre as quais destacamos como principal: a elevada eficiência no tratamento dos efluentes comparado ao sistema de tratamento convencional de efluentes possibilitando o seu reúso.

**Palavras-chave:** Biorreator. Efluentes. Membrana. Tratamento. Reúso.

## **ABSTRACT**

The Improper disposal of effluents due to lack of effective treatment is conducted at a constant setting of environmental degradation of effluent water bodies receptors. The importance of preserving water resources refers to the search for efficient technologies, which have the ability to provide a treated effluent with low presence of pollutants and contaminants, reducing the impacts caused by its release. In this sense, given the current challenges related to the scarcity of water resources, the technology of bioreactor membrane (MBR), which is the combination of membrane technology with biological treatment by activated sludge, has been shown as an effective alternative, since it is able to produce a treated effluent, in some cases allowing the reuse of water. Therefore, it was decided to undertake this study conducted to analyze from previous studies using the membrane bioreactor in wastewater treatment aimed at non-potable water reuse. To achieve this goal, bibliographic research was carried out, organized in three stages: research and selection of academic papers available in reliable database (Bank of thesis of Capes, Magazine Scielo and base of graduate programs), compilation of studies related to the issue discussed here, and finally, reading and analysis the compiled material. Thus, the results obtained by the studies presented in this paper show that the application of this technology for wastewater treatment is feasible for various characteristics, among which we highlight as the main: high efficiency in effluent treatment compared to conventional treatment system effluent and enabling its reuse.

**Keywords:** Bioreactor. Membrane. Reuse. Treatment. Wastewater.

## AGRADECIMENTOS

À Deus, que sempre esteve ao meu lado, me capacitando, motivando e inspirando para a realização deste trabalho. Obrigada, meu Deus, por me permitir chegar aqui com êxito e bravura.

Aos meus pais, Ednalda e José Israel, que são meu alicerce, o meu porto seguro e que sempre guiaram meus passos para o alcance dos meus sonhos.

A todos os meus familiares, sobretudo à minha avó, Maria, pelos inúmeros ensinamentos, cuidados e pelo imensurável amor que lhe tenho, o qual me permite também chamá-la de mãe. A todos que souberam compreender minhas ausências e sempre foram uma fortaleza na minha vida.

À minha orientadora, Profa. Maria Helena, pela atenção e pela disponibilidade para ajudar no desenvolvimento deste trabalho.

A todos os meus professores, com destaque à minha Profa. Andrea Jane, pela ajuda indispensável, pelo empenho e pela enorme contribuição, a qual foi fundamental para elaboração deste trabalho.

Às minhas amigas, Zaira e Geovana, pela amizade incondicional e pela convivência diária que nos tornou irmãs; pelo companheirismo, pelas muitas horas de estudos compartilhadas e pelos tão maravilhosos anos de convivência na Universidade e em casa.

A todos os meus amigos, que sempre acreditaram na minha capacidade, por todo o apoio, incentivo, inúmeros conselhos e por contribuir significativamente nesta jornada.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	11
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	14
2.1. TRATAMENTO DE EFLUENTES.....	14
2.2. PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS .....	15
2.3. PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS .....	17
2.3.1. Principais características das membranas.....	22
2.3.2. Fenômenos da Polarização de Concentração e “ <i>Fouling</i> ”.....	24
<b>3. TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES: BIORREADORES COM MEMBRANAS</b> .....	26
3.1. PROCESSOS DE BIORREADORES A MEMBRANAS .....	26
<b>3.1.1. Comparações entre os processos de MBR e TCE</b> .....	31
3.2. INCRUSTAÇÕES DAS MEMBRANAS UTILIZADAS EM MBR .....	33
<b>3.2.1. Características das Membranas que contribuem para o <i>fouling</i></b> .....	35
<b>3.2.2. Características da Biomassa que contribuem para o <i>fouling</i></b> .....	39
<b>3.2.3. Condições operacionais que contribuem para o <i>fouling</i></b> .....	42
<b>3.2.4. Estratégia de controle e remoção de incrustação</b> .....	44
3.3. APLICAÇÕES DOS BIORREADORES COM MEMBRANAS .....	46
<b>4. CONCLUSÕES</b> .....	59
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	61

## LISTA DE FIGURAS

1- Representação esquemática do processo de separação por membranas.....	17
2- Módulo de membranas de fibras ocas.....	19
3- Módulos de membranas tubulares.....	20
4- Módulo espiral utilizando membranas planas.....	20
5- Módulo tipo placa e quadro.....	21
6- Seletividade em processos com membranas.....	22
7- Comparação da variação do fluxo permeado ao longo do tempo para o processo de filtração convencional e para filtração tangencial.....	25
8- Módulo de membranas externo ao reator.....	28
9- Módulo de membranas submersas ao reator. ....	29
10- Configuração utilizada usualmente no tratamento com MBR de módulos submersos.....	29
11- Crescimento do mercado dos MBR nos Estados Unidos.....	31
12- Representação do sistema de MBR.....	32
13- Representação do sistema de TCE.....	32
14- Processo de colmatação.....	34
15- Fatores que afetam o fouling.....	35
16- Variação de fluxo crítico em função da velocidade superficial de gás.....	46
17- Amostra do lodo ativado e do permeado coletados após um dos experimentos.....	48
18- Ilustrações do esgoto bruto, do lodo ativado no tanque de aeração e do permeado, respectivamente.....	50
19- Amostra do esgoto bruto e do permeado.....	50
20- Pontos de amostragem.....	53
21- Variação de cor do efluente com o tipo de tratamento.....	53
22- Aspecto do efluente antes e após o tratamento utilizando o processo biológico e biológico + ultrafiltração ( MBR).....	55

**LISTA DE TABELAS**

1- Visão geral do processo de filtração por membranas e suas características.....	22
2- Valores típicos de fluxo em membranas.....	23
3- Causas e efeitos relacionados à formação de flocos.....	41
4- Resultados das análises do lodo e do permeado.....	48
5- Resultados das análises do esgoto bruto e do efluente tratado.....	49
6- Ensaios físicos químicos e metodologia.....	52
7- Unidades de biorreator a membrana em implantação.....	56
8- Descrição das unidades-piloto de MBR.....	58

## 1. INTRODUÇÃO

Os recursos hídricos são um bem valioso, sendo essenciais para inúmeras atividades humanas. Em termos de quantidade total, a água disponível em nosso planeta é bem superior à necessária aos diversos usos da humanidade. Porém, o crescimento exagerado da demanda e a degradação da qualidade das águas são fatores que vêm provocando, em várias regiões, problemas de escassez dos recursos hídricos. Estima-se que atualmente mais de um bilhão de pessoas vivam sob condições insuficientes de disponibilidade de água para consumo e que, em 25 anos, cerca de 5,5 bilhões de pessoas estarão vivendo em áreas de quase total escassez de recursos hídricos (SETTI et al., 2001).

A deterioração do meio ambiente é um aspecto que afeta diretamente a questão de escassez da água. Na grande maioria das cidades brasileiras ainda ocorre o lançamento inadequado dos efluentes industriais, agrícolas e esgotos domésticos que são considerados os principais fatores que vêm contribuindo para a degradação ambiental. Uma das principais consequências deste lançamento inadequado é a poluição das fontes de suprimento tornando essas fontes inviabilizadas para o abastecimento da população. Vale ressaltar os inúmeros problemas sanitários que são causados por águas contaminadas, como por exemplo, as diversas infecções e doenças que podem causar para a sociedade. Diante disso, o tratamento dos efluentes/esgotos se mostra essencial para a manutenção da qualidade da água de corpos receptores, bem como do ambiente e da saúde da população.

Na busca pela melhoria da qualidade dos recursos hídricos e preservação das fontes naturais, a utilização de tecnologias para tratamento de efluentes que possibilitem alcançar padrões de qualidade compatíveis com o reúso é fundamental. A alternativa de reúso de efluentes tratados permite uma economia significativa da água, preservando as fontes de suprimento e podendo ser utilizada diretamente em processos onde exija uma água de menor qualidade.

Um processo que possibilita o tratamento da água para reúso é a associação da tecnologia de separação por membranas ao processo convencional de lodos ativados. Este conjunto de processos é denominado Biorreator com Membranas (MBR). A integração da tecnologia de separação por membranas em processos convencionais de lodos ativados representa uma inovação importante na evolução da tecnologia de tratamento biológico de efluentes. Em comparação com as técnicas convencionais, os reatores com membranas produzem efluente de melhor qualidade, uma vez que retêm completamente a biomassa. Isso torna possível o controle do tempo de retenção celular de forma independente do tempo de retenção hidráulica. Além disso, a degradação dos poluentes é muito mais eficiente em função da maior concentração de microorganismos no sistema (KIPPER, 2009, p.17).

Uma das principais vantagens que a utilização de MBR proporciona é que o efluente tratado pode ser usado como água de reúso para fins não potáveis, como para irrigação de plantações, áreas verdes e jardins, em descargas sanitárias, lavagem de pisos e equipamentos, entre outras. Essa reutilização pode contribuir em uma mudança positiva nas questões ambientais, uma vez que visa à preservação dos recursos hídricos.

No entanto, a principal desvantagem enfrentada na utilização de (MBR) consiste nas limitações dos processos de separação por membranas devido à formação de incrustações (fouling), o que provoca consequências como a redução do fluxo permeado, alto consumo de energia e queda no desempenho das membranas. A incrustação depende de vários fatores que estão relacionadas à membrana, à biomassa e às condições operacionais. Diante disto, o grande desafio do (MBR) é a obtenção de um melhor entendimento destes fatores, buscando meios que minimizem a incrustação nas membranas. Este desafio tem proporcionado o desenvolvimento de inúmeros estudos em busca de soluções para estas limitações.

Neste contexto, diante da crescente necessidade de tecnologias que proporcionem economia de água através do reúso, o objetivo geral deste trabalho é analisar estudos já realizados sobre a utilização de biorreator a membrana no tratamento efluentes visando o reúso não potável água. Entre os objetivos específicos pretende-se avaliar as características que viabilizam a utilização de biorreator com membranas no tratamento de efluentes para o reúso dos mesmos e as vantagens e desvantagens desta utilização.

No desenvolvimento deste trabalho foram realizadas as seguintes etapas metodológicas: (1) por meio de um levantamento bibliográfico buscar indicadores e estabelecer as principais características da viabilidade da utilização de biorreator a membranas no tratamento de efluentes que permitam o reúso dos mesmos; (2) com base em estudos já existentes, expor as vantagens, benefícios, e a eficácia do biorreator com membranas quando aplicado. Além disso, será apresentada também uma comparação entre os processos de biorreator com membranas (MBR) e tratamento convencional de efluentes (TCE) expondo o destaque da utilização desta tecnologia.

Para o desenvolvimento deste estudo, realizou-se a pesquisa bibliográfica.

A pesquisa bibliográfica é um apanhado geral sobre os principais trabalhos já realizados, revestidos de importância, por serem capazes de fornecer dados atuais e relevantes relacionados com o tema. O estudo da literatura pertinente pode ajudar a planificação do trabalho, evitar publicações e certos erros, e representa uma fonte indispensável de informações, podendo até orientar as indagações. (MARCONI; LAKATOS, 2003, p.158).

Através da pesquisa bibliográfica foi feito um estudo comparativo da tecnologia abordada no trabalho com o tratamento convencional de efluentes, por meio de referenciais teóricos já publicados, abordando e discutindo as várias contribuições do trabalho. Sendo assim, nosso trabalho será baseado principalmente em trabalhos já elaborados como artigos, dissertações, livros, entre outros.

O presente trabalho está estruturado em 5 seções, como descrito a seguir. Na primeira seção é feita uma introdução do trabalho apresentando a o objetivo geral, os objetivos específicos, a metodologia utilizada para alcançar os objetivos da dissertação e a estrutura da monografia.

Na segunda seção são apresentados de forma breve os fundamentos teóricos do tratamento de efluentes e dos lodos ativados. É feito também uma abordagem geral sobre alguns aspectos relevantes dos processos de separação por membranas e uma breve apresentação dos fenômenos de Polarização de Concentração e “Fouling”.

Na terceira seção, os conceitos introduzidos anteriormente são usados como base para discutir a utilização de biorreatores com membrana (MBR) no tratamento de efluentes visando o reúso não potável. Apresenta-se uma visão geral sobre as configurações de biorreatores com membranas, as principais características desta tecnologia e suas vantagens e desvantagens. Em seguida, uma comparação entre os processos de MBR e TCE. E são apresentadas as incrustações das membranas enfocando no processo de biorreatores a membranas. Entre os aspectos que influenciam nas incrustações, foram estudados os fatores relacionados à membrana, à biomassa e às condições operacionais. Apresentamos brevemente um tipo de estratégia para controlar ou diminuir as incrustações. E em seguida, as aplicações da tecnologia de MBR e os aspectos que viabilizam seu uso.

Finalizando esta monografia, na última seção, são relatadas as principais considerações gerais e conclusões obtidas.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. TRATAMENTO DE EFLUENTES

A cada ano cresce no Brasil a demanda por sistemas de tratamento de efluentes, devido ao aumento populacional juntamente com a possibilidade de escassez dos recursos hídricos devido ao seu uso desenfreado, faz surgir à necessidade de tratamento dos efluentes, fazendo com que cada vez mais se busquem alternativas viáveis para manter o abastecimento da população e o tratamento adequado aos resíduos líquidos gerados pela mesma (RENTZ, 2015).

O processo de tratamento de efluentes é normalmente adotado pela eficiência na remoção ou diminuição dos poluentes presentes na água. Este tratamento pode ser realizado através de três processos diferentes, de forma individual ou uma combinação destes processos: processos físicos, químicos e biológicos.

De acordo com Kipper (2015), o tratamento dos efluentes pode ser dividido em três etapas, sendo elas:

No tratamento primário são removidos normalmente sólidos suspensos, metais pesados (dissolvidos), óleos e gorduras. Esta remoção ocorre através de métodos físicos, tais como a sedimentação e a flotação (utilizando sedimentadores e flotadores). E os sólidos dissolvidos são removidos utilizando tratamentos físico-químicos. Geralmente, a principal função do tratamento primário é preparar o efluente para o tratamento secundário, a fim de aumentar a sua eficiência.

O tratamento secundário atua diretamente na remoção de matéria orgânica biodegradável dissolvida e dos nutrientes: nitrogênio e fósforo. Os processos utilizados no tratamento secundário podem ser subdivididos em tratamentos biológicos aeróbios e anaeróbios. No tratamento aeróbio a remoção se dá pela incorporação dos poluentes solúveis nas células dos microrganismos e em seguida são removidos pelo decantador secundário. Já no tratamento anaeróbio as bactérias consomem o substrato produzindo gases, em geral o metano, que logo serão removidos do sistema. O processo biológico escolhido depende de três fatores, sendo eles: o volume de efluente a ser tratado, a biodegradabilidade e a disponibilidade de espaço físico.

O tratamento terciário ou tratamento avançado é responsável pela remoção de contaminantes específicos, melhorando a qualidade dos efluentes tratados a fim de proporcionar o reúso do efluente como fonte de água. Algumas funções comuns do tratamento terciário são a remoção de fósforo através da coagulação química, a remoção do nitrogênio

através de reações de nitrificação-desnitrificação em reatores biológicos, a remoção de compostos orgânicos, da cor residual e a remoção de solutos dissolvidos através de processos de separação com membranas.

## 2.2. PROCESSOS DE LODOS ATIVADOS

O processo de lodo ativado pode ser definido como a produção de uma biomassa ativa formada por microrganismos que são capazes de estabilizar os contaminantes presentes no efluente.

O processo de lodos ativados foi descoberto acidentalmente na Grã-Bretanha em 1913 por Gilbert John Fowler quando foram realizados experimentos que produziram um efluente altamente tratado. Aceitando que o lodo tinha sido ativado (de forma semelhante ao carvão ativado), o processo foi nomeado de lodo ativado. O que realmente tinha ocorrido foi posteriormente compreendido, isto é, havia sido criado um meio para concentrar organismos biológicos. Atualmente a tecnologia de lodos ativados é a mais difundida para o tratamento de água residuárias (KIPPER, 2015, p.22).

De acordo com Von Sperling (1996), as partes que integram a etapa biológica do sistema de lodos ativados são: tanque de aeração, decantador e recirculação de lodo. É no tanque de aeração onde ocorrem as reações bioquímicas para a degradação da matéria orgânica e matéria nitrogenada. A biomassa utiliza do substrato presente no esgoto bruto para seu desenvolvimento. Em seguida, o conteúdo do tanque é direcionado ao decantador e é no decantador onde ocorre a sedimentação dos sólidos (biomassa), separando os sólidos do efluente tratado e permitindo que o efluente final saia clarificado. Os sólidos sedimentados no fundo do decantador são recirculados para o tanque de aeração, a fim de garantir uma alta concentração de biomassa no mesmo, o que é responsável pela elevada eficiência do sistema.

Para um bom funcionamento dos processos de biodegradação que ocorrem nos reatores biológicos é importante levar em consideração alguns parâmetros operacionais, tais como: A carga orgânica, o tempo médio de retenção de sólidos, a sedimentabilidade do lodo, e o tempo de retenção hidráulica. Levando em consideração a importância do conhecimento destes parâmetros, estes serão brevemente apresentados a seguir.

"O tempo de retenção hidráulica (TRH) é um dos parâmetros fundamentais para o projeto e operação dos biorreatores. Ele é geralmente expresso em horas (KIPPER, 2009, p.10)". Este é definido pela equação apresentada a seguir.

$$TRH = \frac{V}{Q}$$

Onde,  $V$  é o volume do biorreator ( $m^3$ ) e  $Q$  é a vazão de permeado do processo ( $m^3.h^{-1}$ ).

Em geral, o custo do processo está relacionado com os valores de TRH. Em pequenos valores de TRH o custo do processo diminui, no entanto, o uso de tempos reduzidos de retenção hidráulica acarreta em uma diminuição da capacidade de processamento de picos de carga orgânica. Além disso, a redução de TRH deve ser compensada por um aumento na concentração de biomassa, com o intuito de produzir uma biodegradação eficiente, o que não ocorre geralmente nos sistemas convencionais (KIPPER, 2009).

“A carga orgânica mássica ( $A/M$ ) é a relação entre a massa de substrato que é alimentada diariamente no reator e a massa de microrganismos contida nesse reator, e é expresso em  $Kg\ DQO.kgSSV^{-1}.d^{-1}$  (KIPPER, 2009, p.10)”. Conforme a equação:

$$\frac{A}{M} = \frac{Q \cdot S_o}{V \cdot x}$$

Onde,  $Q$  é a vazão ( $m^3. s^{-1}$ )  $S_o$  é a concentração de substrato na alimentação ( $Kg.m^{-3}$ ),  $V$  é o volume do biorreator ( $m^3$ ) e  $x$  é a concentração de sólidos suspensos voláteis do meio reacional ( $kg.m^{-3}$ ).

“A carga volumétrica ( $Cv$ ), expressa em  $kg\ DQO$  ou  $kg\ DBO.m^{-3}.d^{-1}$ , é uma variável menos importante que a relação  $A/M$ , mas fornece informação da quantidade mínima de oxigênio requerida no tanque de aeração para degradação do substrato (KIPPER, 2009, p.11).” A qual é dada pela seguinte equação:

$$Cv = \frac{Q \cdot S_o}{V}$$

Em um biorreator, a concentração microbiana é uma variável de processo importante, visto que esta apresenta uma dependência com a taxa de degradação. A concentração de biomassa pode ser controlada pelo reciclo de lodo adensado nos decantadores. Neste contexto, a utilização da variável tempo de retenção celular (TRC) ou idade do lodo pode ser utilizada para este controle. Ela é definida pela relação entre a massa microbiana presente no reator e a massa extraída diariamente do processo (KIPPER, 2009, p.11)

A Equação (4) representa o tempo médio de retenção celular dentro do reator, a qual é expressa em dias.

$$TRC = \frac{V \cdot x}{W x_u}$$

Onde,  $W$  é a vazão da corrente concentrada em biomassa extraída do decantado ( $m^3 \cdot d^{-1}$ ) e  $x_u$  é a concentração do lodo decantado, dada em ( $mg \cdot l^{-1}$ ).

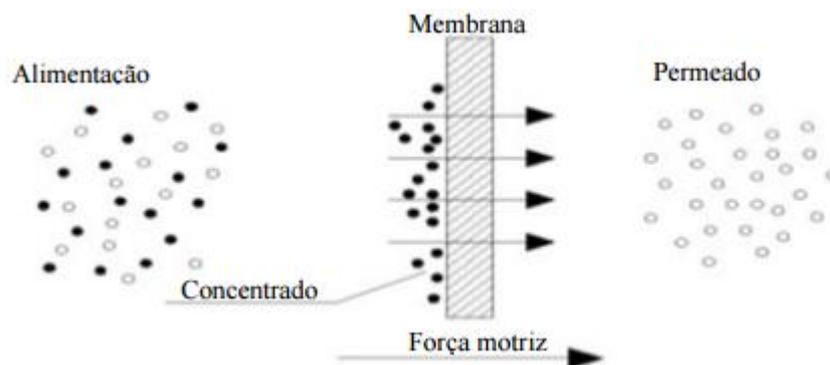
### 2.3. PROCESSOS DE SEPARAÇÃO POR MEMBRANAS

Dentre as mais diversas definições, os processos de separação por membranas (PSM) podem ser entendidos como um processo de filtração que utiliza membranas onde estas membranas atuam como uma barreira semipermeável e seletiva que separa duas fases, restringindo, total ou parcialmente, o transporte de uma ou várias espécies químicas presentes nas soluções. Para que ocorra o transporte destas espécies é necessária à existência de uma força motriz.

Segundo Reif (2006) citado por Belli (2015, p.36), a produção e utilização de membranas sintéticas vêm sendo realizadas há décadas. No entanto, foi a partir dos últimos 50 anos que estas membranas ganharam maior importância como processo de separação, sobretudo no setor industrial.

O princípio dos PSM consiste em forçar a passagem da solução problema contra a superfície da membrana através de uma força motriz, onde a membrana irá reter determinados componentes (concentrado) e permitirá a passagem de outros (permeado) (DAVIS, 2010), conforme representado na figura abaixo.

**Figura 1:** Representação esquemática do processo de separação por membranas.



**Fonte:** Adaptado por REIF, 2006.

O processo de separação por membranas fundamenta-se na utilização de um gradiente de potencial químico/potencial mecânico como força motriz para realizar a separação da solução. Em função da força motriz empregada, os processos de separação por membranas podem ser divididos em três categorias diferentes (MULDER, 1991; NOBREGA et al., 2003): Processos que utilizam gradiente de pressão como força motriz, processos que utilizam gradiente de concentração como força motriz e processos que utilizam gradiente de potencial elétrico como força motriz.

Segundo Habert, Borges e Nóbrega (2006), as membranas podem ser classificadas de acordo com a sua porosidade e morfologia. Em relação à porosidade, as membranas podem ser porosas ou densas, sendo esta característica definida pela superfície da membrana em contato com a solução a ser separada. As membranas porosas possuem poros superficiais de tamanhos variados, dependendo do processo ao qual se destinam. Quando as membranas são densas, ou seja, não há poros na superfície em contato com a solução a ser processada e a permeação dos componentes ocorre através de espaços intermoleculares na matriz do material que constitui a membrana.

Quanto à morfologia, as membranas podem ser classificadas de formas distintas, como: integrais onde são constituídas por um material ou compostas onde são constituídas por mais de um material. Quando as membranas apresentam as mesmas características morfológicas ao longo da sua espessura são chamadas de simétricas ou isotrópicas e de forma contrária, as membranas são chamadas de assimétricas ou anisotrópicas quando apresentam características diferentes.

Para a utilização das membranas em processos de filtração em estações de tratamento de água e efluentes ou nas indústrias, a conformação da membrana se dá sob a forma de módulos compactos. Os módulos devem conter os seguintes elementos: membranas, estruturas capazes de suportar pressão, vácuo ou corrente elétrica aplicada pelo sistema, canais para alimentação e para remoção do permeado. Algumas características também importantes são a simplicidade de manuseio e facilidade de limpeza.

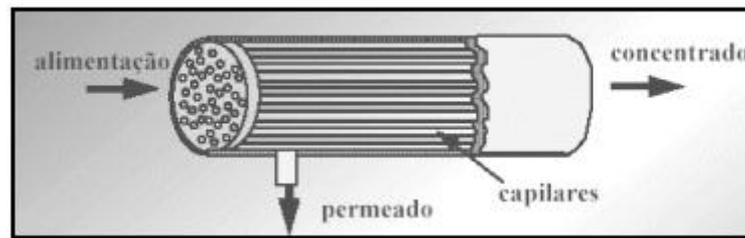
Os tipos de módulos de membranas mais comuns são: módulos com fibra oca, módulos tubulares, módulos espirais, módulos com placas e quadro.

Os sistemas utilizados na microfiltração e na ultrafiltração constituídos por fibras ocas atravessam o módulo inteiro e são fixadas nas extremidades por meio de uma resina que serve para vedação e para a separação dos compartimentos de água de alimentação e

permeado. Esses sistemas podem ser alimentados (1) pelo interior da fibra, sendo o permeado coletado no interior do cilindro ou (2) pelo interior do tubo, sendo o permeado recolhido nas extremidades do tubo após percolação pelo lúmen das fibras ocas (CONSTANZI, 2007, p 46-47).

Neste sentido, a seguir pode-se observar uma figura a qual representa o módulo de membranas de fibras ocas.

**Figura 2:** Módulo de membranas de fibras ocas

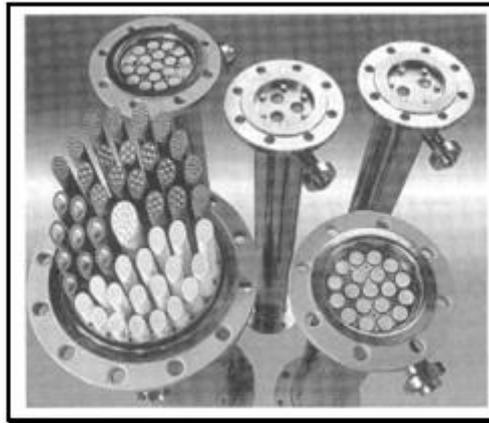


**Fonte:** HABERT et al., 2003.

Os módulos tubulares são tubos revestidos internamente com a membrana, estes são considerados os módulos mais simples em relação aos outros módulos. O diâmetro interno destes tubos podem variar de 6 a 40mm e em relação a densidade de empacotamento, estes módulos apresentam uma densidade relativamente baixa. Estes módulos, geralmente, não necessitam de pré-tratamento para água de alimentação e mostram facilidade em termos de limpeza (CONSTANZI, 2007).

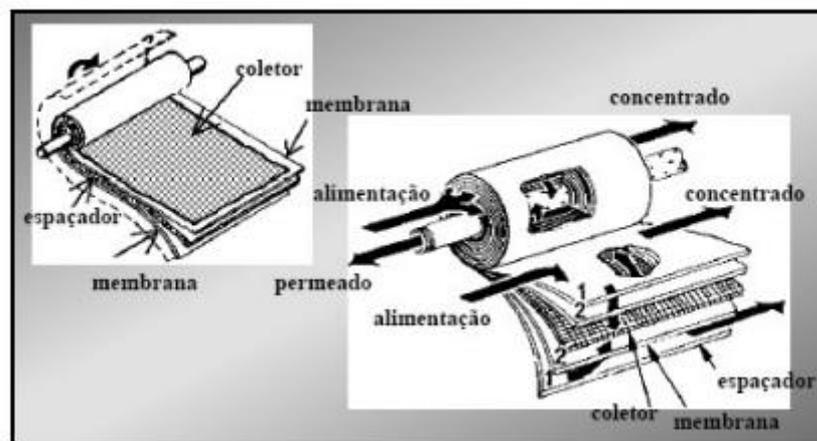
O líquido a ser tratado é bombeado através do tubo, passando pela parte interior da membrana, produzindo um fluxo lateral de permeado através das paredes, de modo que o produto seja coletado na parte externa do tubo e o concentrado continue fluindo através deste (PISETTA, 2011, p.64).

Desta forma, pode-se observar uma figura representando alguns módulos de membranas tubulares.

**Figura 3:** Módulos de membranas tubulares

**Fonte:** DECOL, 2003.

No que diz respeito ao módulo de membranas em espiral, este módulo consiste em um conjunto de tubos de pressão de PVC ou aço inoxidável e de elementos ou cartuchos de membrana inseridos no interior no tubo. Do modo como é formado o sistema, o fluxo que o atravessa percorre um caminho em espiral. O líquido que alimenta o módulo segue em uma direção paralela ao tubo coletor com o intuito de reduzir o depósito de partículas pelo aumento da turbulência (CONSTANZI, 2007). Sendo assim, será apresentado abaixo uma figura a qual representa o módulo espiral utilizando membranas planas.

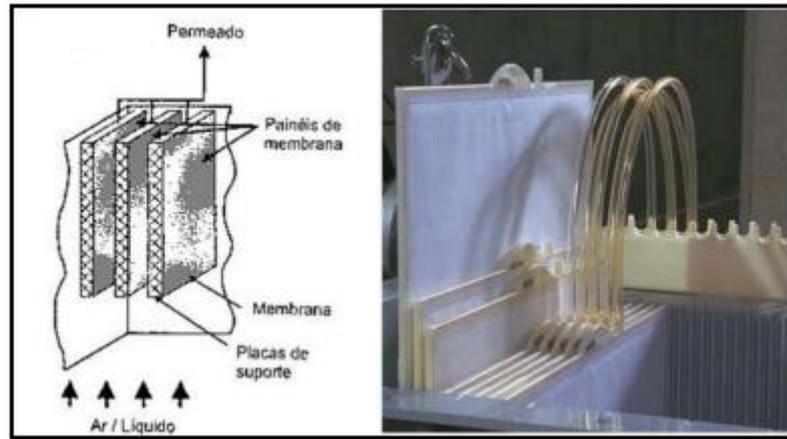
**Figura 4:** Módulo espiral utilizando membranas planas

**Fonte:** HABERT et al., 2003.

O sistema é composto basicamente por camadas alternadas de membranas planas e placas de suportes intercaladas às quais são empilhadas na vertical ou horizontal. A densidade de empacotamento deste sistema pode ser considerada relativamente pequena e varia de 100 a

400 m<sup>2</sup>.m<sup>-3</sup> (CONSTANZI, 2007). Este sistema pode ser observado conforme a figura a seguir.

**Figura 5:** Módulo tipo placa e quadro



**Fonte:** DECOL, 2003; CENTROPROJEKT DO BRASIL, 2004.

Os processos de filtração com membranas mais utilizados são: Microfiltração (MF), Ultrafiltração (UF), Nanofiltração (NF) e Osmose Inversa (OI). Os dois principais fatores que distinguem estes processos são a pressão exercida sobre a membrana e o tamanho dos poros, o que altera a capacidade de retenção das partículas de cada processo (VAN DER BRUGGEN et al., 2003).

Na tabela abaixo podem ser observadas os principais tipos de filtrações e algumas das suas características como pressão, tamanho dos poros, mecanismo de separação e aplicações.

**Tabela 1:** Visão geral do processo de filtração por membranas e suas características.

	<b>Microfiltração (MF)</b>	<b>Ultrafiltração (UF)</b>	<b>Nanofiltração (NF)</b>	<b>Osmose Inversa (OI)</b>
Pressão (bar)	0,1 – 2	0,1 – 5	3 – 20	5 – 120
Tamanho dos poros	> 50 nm	2 – 50 nm	< 2 nm	< 2 nm
Mecanismo de separação	Exclusão por tamanho	Exclusão por tamanho	Efeitos de carga	Solução - Difusão
Aplicações	Clarificação Pré-tratamento Remoção de bactérias	Remoção de macromoléculas, bactérias e vírus	Remoção de íons multivalentes	Dessalinização das águas e remoção de toda matéria orgânica

**Fonte:** Adaptação de Metcalf e Eddy 2003 e Van Der Bruggen et al. 2003.

### 2.3.1. Principais características das membranas

De acordo com Pelegrin (2004), as características mais importantes das membranas são: porosidade, seletividade e fluxo permeado. Vale ressaltar que estas características são responsáveis pela determinação do desempenho ou da eficiência de uma membrana.

A porosidade é a relação existente entre a parte sólida e os poros da membrana, ou seja, pode ser considerada como a quantidade de vazios encontrados em sua estrutura (PELEGRIN, 2004).

De acordo com Layane (2004, p.24), “a porosidade pode ser mensurada através da relação entre a parte superficial da membrana (poros/m<sup>2</sup>), pode se referir a toda membrana.” Conforme representado na equação a seguir.

$$\epsilon = 1 - DM/DP$$

Onde:

$\epsilon$ : Porosidade (adimensional);

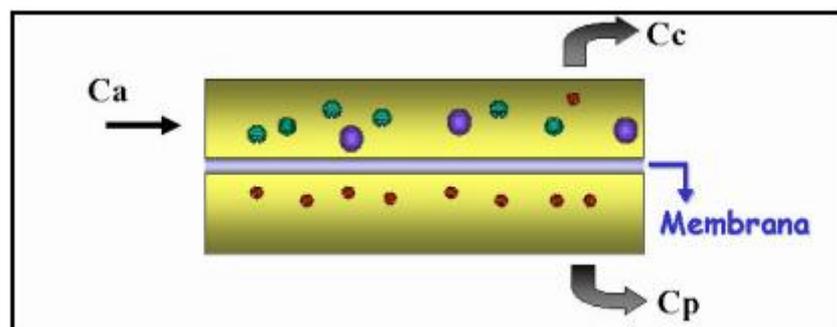
DM: Densidade da membrana (Kg/m<sup>3</sup>);

DP: Densidade do polímero (Kg/m<sup>3</sup>).

A seletividade é geralmente expressa pelo coeficiente de retenção (R) ou pelo fator de separação ( $\alpha$ ), onde mede a eficiência de retenção dos compostos presentes na solução. Ela é representada pela retenção, quando se trata de misturas líquidas aquosas, em que o soluto é retido total ou parcialmente pela membrana. No caso de misturas gasosas e de líquidos orgânicos, onde o soluto passa preferencialmente pela membrana, a seletividade é representada pelo fator de separação (BARBOSA, 2009).

Segundo VIANA (2004, p.16), com base na figura abaixo, “pode se calcular o valor de R” :

**Figura 6:** Seletividade em Processos com Membranas



**Fonte:** Viana, 2004.

Onde  $C_a$  é a concentração do composto na alimentação,  $C_c$  a concentração no concentrado e  $C_p$  a concentração do composto no permeado.

$$R(\%) = \left(1 - \frac{C_p}{C_a}\right) \cdot 100$$

De acordo com Layane (2014, p.26), “o fluxo de permeado membrana é definido como o volume que permeia através da membrana por unidade de área e tempo.” Conforme representado na equação:

$$J_p = \frac{Q_p}{A}$$

Em que:

$J_p$ : Fluxo do permeado (L/h.m<sup>2</sup>);

$Q_p$ : Vazão do permeado (L/h);

$A$ : Área (m<sup>2</sup>).

Cabe salientar que além das principais características apresentadas pelas membranas, na tabela a seguir é importante observar os valores típicos de fluxo utilizados em projetos de sistemas de separação por membranas, uma vez que é necessário determinar e especificar todas estas características antes de aplicar este processo.

**Tabela 2:** Valores típicos de fluxo em membranas

<b>Processo</b>	<b>Fluxo (L.h<sup>-1</sup>.m<sup>-2</sup>)</b>
Osiose Reversa	15 a 25
Nanofiltração	20 a 30
Ultrafiltração <sup>a</sup>	25-50
Microfiltração <sup>a,b</sup>	Não há uma regra geral, podem ser considerados valores de 50 a 70 <sup>c</sup>

a - em geral, é recomendável a realização de ensaios para determinação do fluxo.

b - de acordo com dados de alguns fornecedores, estes valores podem ser maiores ou menores.

c - acrescentado por J. C. Mierzwa.

**Fonte:** Mierzwa, 2006.

### 2.3.2. Fenômenos da Polarização de Concentração e “Fouling”

Os fenômenos da polarização de concentração e “fouling” ou incrustação das membranas são responsáveis por causar uma redução no fluxo permeado, e consequentemente, aumento da demanda de energia no sistema e redução da eficiência das membranas.

Os processos de separação por membranas podem ser operados de duas formas, sendo elas: a forma clássica, denominada filtração convencional, ou em fluxo cruzado, denominada filtração tangencial.

Conforme Barbosa (2009) existe um fenômeno chamado polarização de concentração e este é uma característica comum em processos seletivos. Na filtração convencional, a solução ou suspensão é pressionada contra a membrana e, considerando que a membrana é total ou parcialmente seletiva aos compostos, haverá a retenção de substâncias sobre sua superfície, causando a formação de uma camada polarizada. Assim, ocorre um aumento de concentração na interface membrana/solução e, dependendo das substâncias que compõem esta camada próxima à superfície da membrana, se inicia um movimento retrodifusivo em direção ao seio da solução, estabelecendo-se rapidamente um perfil de concentração dos compostos na região próxima à interface membrana/solução e assim ocorre o fenômeno de polarização.

Quando a filtração é tangencial, o nível da polarização é função direta das condições hidrodinâmicas do escoamento da solução de alimentação no interior do módulo, ou seja, quanto maior a velocidade de escoamento tangencial, as partículas poderão ser arrastadas, e por consequência menor será a polarização por concentração (GASPAR, 2010, p.17).

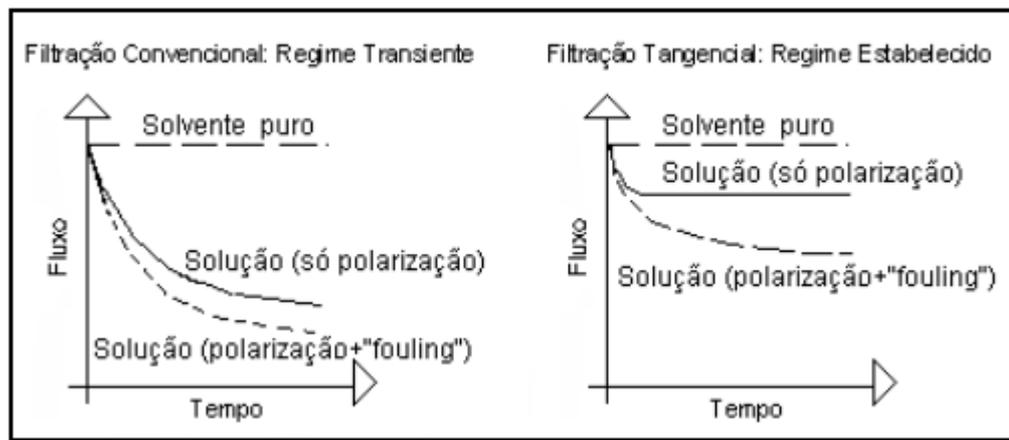
Algumas medidas podem ser tomadas para que seja controlada a formação da zona de polarização como: escolha do material constituinte da membrana, determinação de um bom módulo, a aplicação de baixas pressões, entre outras. Porém, não é possível extinguir o fenômeno de polarização de concentração, com isto sempre haverá uma queda de fluxo do permeado. E o fouling é outro processo que ocorre no sistema de PSM, o qual também é responsável por uma queda de fluxo do permeado.

O “fouling” pode ser entendido como o conjunto de fenômenos capazes de provocar uma queda no desempenho da membrana com o tempo, quando se trabalha com uma solução ou suspensão e suas conseqüências são total ou parcialmente irreversíveis. Os principais fenômenos que contribuem para o “fouling” são: Bloqueio dos poros da membrana, adsorção de partículas na superfície da membrana e/ou no interior de seus poros devido a interações entre os solutos presentes na solução a ser tratada e o material da membrana, formação de cama gel. Altas concentrações de soluto na

superfície da membrana podem causar sua precipitação, formando uma camada gel (VIANA, 2004, p. 18).

Na figura abaixo, é possível observar a influência da polarização de concentração e do “fouling” na redução do fluxo permeado ao longo do tempo na filtração convencional e na filtração tangencial.

**Figura 7:** Comparação da variação do fluxo permeado ao longo do tempo para o processo de filtração convencional e para filtração tangencial



**Fonte:** Viana, 2004.

Quando o sistema possui boas condições operacionais isto irá influenciar diretamente o processo, permitindo uma diminuição nos efeitos da polarização de concentração e do fouling e consequentemente minimizando a queda do fluxo permeado ao longo do tempo. Neste sentido, um aumento na velocidade tangencial no módulo das membranas, na filtração tangencial, ocasionará uma diminuição na espessura da camada que se encontra polarizada e irá diminuir também a concentração na superfície da membrana. Outro fator importante que tem grande influencia é a pressão, uma vez que o aumento da pressão pode causar um aumento da espessura da camada que se deposita sobre a superfície da membrana, o que poderia ocasionar uma diminuição do fluxo permeado à medida que houvesse um aumento da pressão.

### **3. TÉCNICAS ALTERNATIVAS DE TRATAMENTO DE EFLUENTES: BIORREADORES COM MEMBRANAS**

O tratamento biológico é um sistema consolidado no processo de tratamento de efluentes. Conforme Von Sperling (2005), o processo ocorre com uma concentração de microrganismos, os quais podem ser aeróbios (ocorrem na presença de oxigênio (O<sub>2</sub>)) ou anaeróbios (ocorrem com ausência de oxigênio), estes serão encontrados no reator biológico que podem possuir um sistema de aeração e adição de nutrientes. O efluente que alimenta o sistema é monitorado e tem algumas características que devem ser pré-definidas, este efluente irá passar pelo reator e será alterado pelos microrganismos, com intuito de biodegradar os compostos orgânicos e remover os contaminantes.

Alguns parâmetros são necessários para que o tratamento biológico atinja o nível adequado de degradação exigido pela legislação. Um destes parâmetros é a necessidade de manter condições ideais no meio, como, pH, temperatura, ausência de substâncias tóxicas inibidoras, e entre outras. Outros parâmetros também são importantes, como a adsorção das substâncias presentes no meio pelas bactérias e a assimilação destas substâncias pela célula (MENZEL, 2009).

São diversos os tipos de sistemas disponíveis de tratamento biológico sendo que os que são comumente utilizados são os processos por lodos ativados, filtros biológicos, biodiscos e entre outros (VON SPERLING, 2005). Vale ressaltar que para que haja uma escolha adequada de qual sistema utilizar é necessário conhecer o efluente que será tratado.

Uma tecnologia que vem apresentando características significativas para o tratamento de efluentes é o biorreator a membrana (MBR), este é uma combinação de processos, onde faz a junção do processo de lodo ativado com o processo de separação por membranas, visando alcançar um tratamento altamente eficiente dos efluentes possibilitando o reúso da água.

#### **3.1. PROCESSOS DE BIORREADORES A MEMBRANAS**

Diante da atual situação dos recursos hídricos e sua possível escassez, torna-se fundamental o uso de tecnologias para o tratamento de efluentes permitindo a obtenção de efluentes tratados que possam servir de água para reúso. Sendo assim, pode-se ressaltar que o reúso para fins não potáveis representam um potencial a ser explorado, uma vez que podem substituir e reduzir a utilização de água tratada e potável.

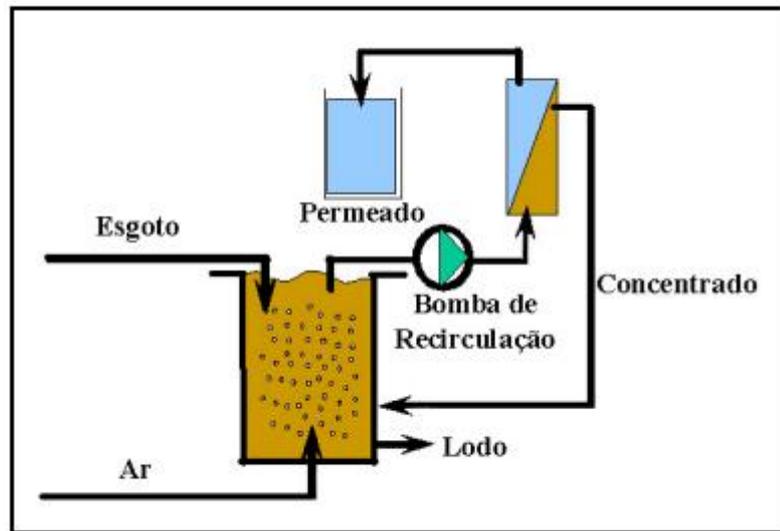
O processo de lodos ativados convencional (LAC) é uma tecnologia já reconhecida mundialmente para o tratamento de esgotos. No entanto, a eficácia deste processo depende diretamente do bom funcionamento do decantador secundário. Alguns fatores se mostram essenciais para estes processos, como grandes volumes para garantir a adequada separação dos sólidos da fase líquida e um controle sistemático do reator visando evitar a produção de um lodo de má qualidade. Ainda que ocorra uma boa operação no processo torna-se necessário na maioria das vezes um tratamento terciário para permitir o reúso do efluente. Em termos de remoção de coliformes, a eficiência do processo LAC é visivelmente baixa e usualmente insuficiente para atender os requisitos de qualidade dos corpos receptores. (VON SPERLING, 2002).

Assim que as membranas comerciais de micro e ultrafiltração estavam disponíveis no mercado, no final dos anos 60 um projeto foi apresentado ao mercado. O projeto original foi introduzido por Smith, DiGregorio e Talcott (1969) onde foi feita uma combinação do uso de reatores de lodo ativado com membranas filtrantes operando em um fluxo tangencial.

Nesse contexto, surgiu a combinação do processo de tratamento de efluentes e do processo separação por membranas, resultando no que chamamos de biorreator com membrana (MBR).

O biorreator com membrana pode ser entendido como um processo híbrido que faz a junção do reator biológico com membranas filtrantes. Estes sistemas são semelhantes ao tratamento convencional de efluentes (TCE), no entanto, se diferem pelo método de separação do lodo ativado e da água tratada. Nestes processos, as membranas de microfiltração ou ultrafiltração atuam retendo a biomassa e substituindo os decantadores das estações de tratamento biológico convencional o que permite a obtenção de um efluente de boa qualidade, visto que as membranas tendem a reter completamente a biomassa (HOLBROOK, MASSIE e NOVAK, 2005).

Comercialmente estão disponíveis dois tipos de MBR para o tratamento de efluentes domésticos ou industriais, sendo eles: os módulos de membrana ser submersos no tanque de aeração Figura (9) e módulos acoplados externamente ao reator Figura (8). Estes reatores podem ter os módulos de membrana em configuração do tipo casco-tubo, placa e quadro ou fibra oca.

**Figura 8:** Módulo de membranas externo ao reator

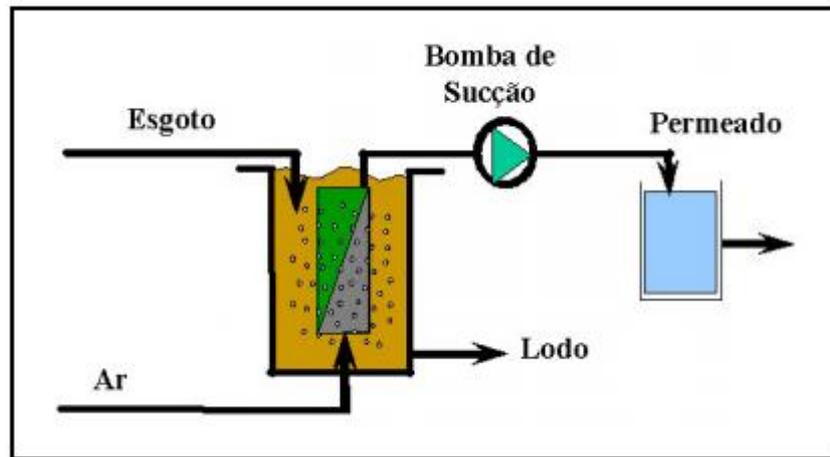
Fonte: Viana, 2004

No MBR com módulo externo o conteúdo é bombeado aos módulos de membranas, geralmente tubulares, acoplados externamente do tanque aerado, onde ocorre a filtração. O processo opera em fluxo cruzado, ou seja, a solução ou suspensão escoam paralelamente à superfície da membrana, enquanto o permeado é transportado transversalmente à mesma. A velocidade tangencial no módulo promove a turbulência próxima à membrana necessária para arrastar as partículas sólidas que tenderiam a se depositar sobre a superfície da membrana (KIPPER, 2009).

A velocidade de circulação dentro dos módulos tubulares é geralmente alta, segundo Ueda et al. (1997), de cerca de 4 m.s<sup>-1</sup>, o que ocasiona uma alta perda de carga e, com isso, alto consumo energético, que pode chegar a ser 10 vezes maior do que o dos processos convencionais de lodos ativados (BRINDLE e STEPHENSON, 1996). Embora o MBR com módulo externo seja considerado simples, estável e de fácil operação, apresenta um alto consumo energético devido ao uso de bomba de recirculação e das altas tensões de cisalhamento produzidas pela circulação da suspensão, que, por sua vez, pode causar danos e reduzir o fluxo do permeado.

No início da década de 1990, através de incentivos do governo japonês para o programa de reúso da água tornou possível o desenvolvimento de um novo tipo sistema. A reutilização do processo surgiu a partir de Yamamoto et al. (1989) de utilizar membranas submersas no biorreator, este processo ficou conhecido como Biorreator com Membranas Submersas (BRMS).

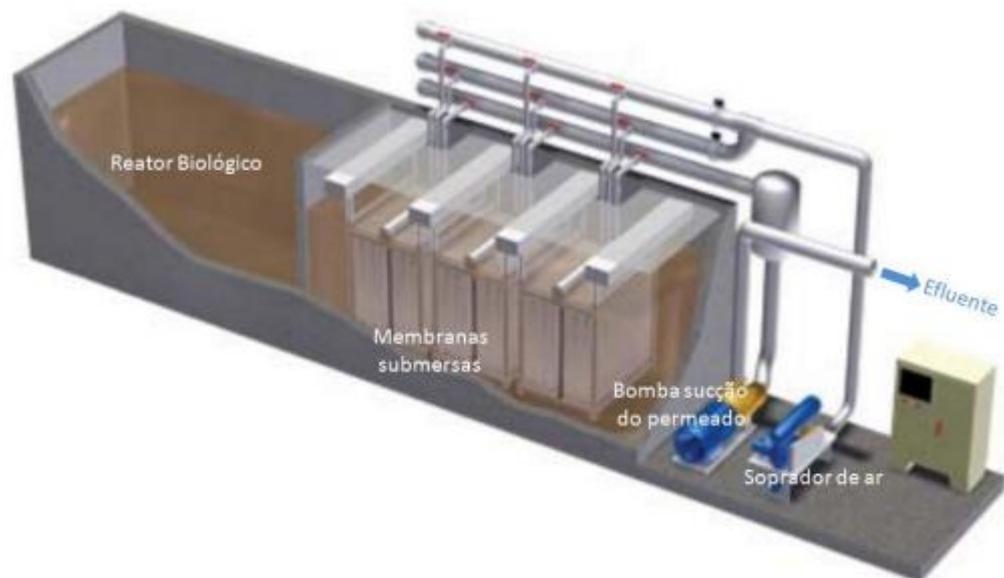
**Figura 9:** Módulo com membranas submersas ao reator



**Fonte:** Viana, 2004.

No biorreator de membranas com módulo de submerso (SMBR), o módulo ou feixe de membrana é imerso no tanque aerado e o conteúdo do biorreator encontra-se em contato com a superfície externa das membranas. O permeado normalmente é obtido através da sucção do conteúdo do reator das membranas. A diferença de pressão provocada pela coluna de líquido no interior do reator e/ou aplicando-se vácuo no lado do permeado são responsáveis por ocasionar esta obtenção do permeado (KIPPER, 2009). A configuração de SMBR utilizada usualmente está representada na figura (10).

**Figura 10:** Configuração utilizada usualmente no tratamento com MBR de módulos submersos



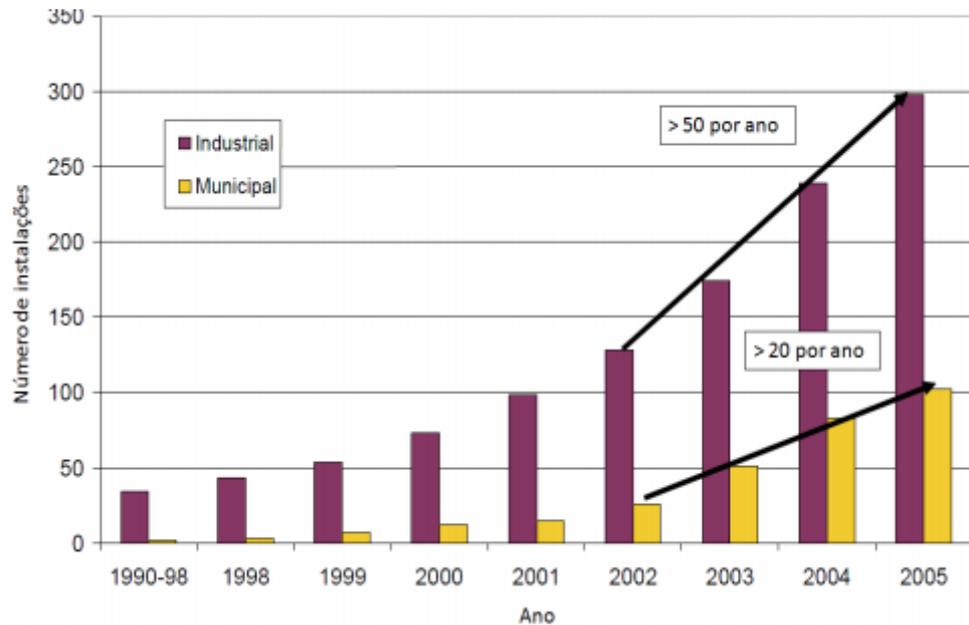
**Fonte:** Dias, 2009.

Geralmente, os sistemas de membranas submersas utilizam membranas com configuração do tipo fibra ocas ou placa plana. Enquanto as membranas planas são instaladas verticalmente, as fibras ocas podem ser instaladas verticalmente ou horizontalmente. Uma vez que o fluxo de bolhas ascendente move-se axial ou transversalmente às fibras promovem uma turbulência para minimizar o depósito de partículas na superfície da membrana, gerando um efeito similar ao fluxo cruzado (KIPPER, 2009).

A presença da turbulência no tranque aerado e o efeito das bolhas são fatores suficientes para produção de condições de operação satisfatórias onde o fluxo é mantido praticamente constante e a taxa de aumento de pressão transmembrana é relativamente baixa. As tensões de cisalhamento exercidas sobre a suspensão são moderadas e responsáveis pelo desprendimento das partículas do conteúdo depositadas na superfície da membrana, consequentemente tem-se um conteúdo com melhores características. Vale ressaltar que, segundo Ueda et al. (1997) e Cui, Chang e Fane (2003) em geral o fluxo do permeado é baixo ( $15-30 \text{ L.m}^{-2}.\text{h}^{-2}$ ), no entanto, constante, isto porque a pressão transmembrana é limitada nessa configuração e o mecanismo de limpeza não é tão eficaz.

Ambos módulos de membranas, tanto o externo quanto o submerso apresentam vantagens distintas. Apesar do módulo de membranas submersas apresentarem fluxos permeados menores comparado aos obtidos com o módulo de membranas externo, os módulos submersos apresentam um baixo consumo energético, diferentemente do módulo externo.

Conforme Zheng et al. (2009), a tecnologia de biorreator à membrana apresenta grandes perspectivas futuras, uma vez que vem sendo incorporada cada vez mais no mercado mundial, alcançando uma taxa de crescimento anual médio de 10,9%, chegando a alcançar 100% em países como a China. Na figura (11) é possível notar o crescimento do número de instalações municipais e industriais utilizando a tecnologia de MBR nos Estados Unidos.

**Figura 11:** Crescimento do mercado dos MBR nos Estados Unidos

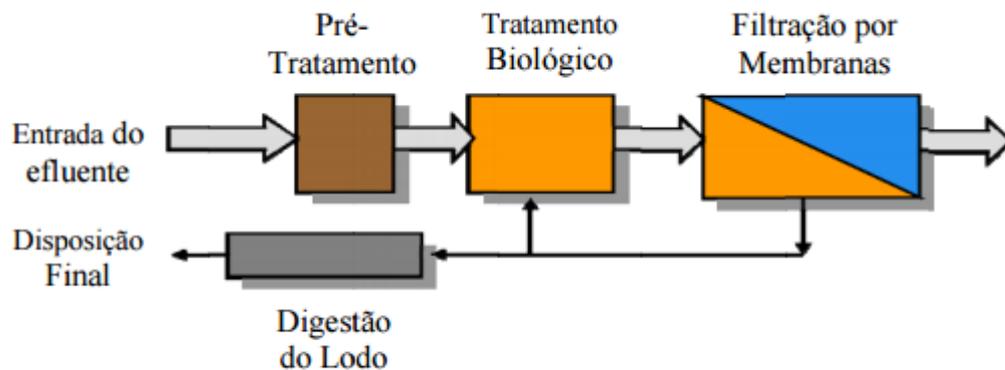
Fonte: Lesjean e Huisjes, 2008.

Em termos de aplicação, Lesjean e Huisjes (2008) aponta que para o mercado industrial, o MBR é considerado por muitas indústrias, a tecnologia disponível mais viável para o tratamento de efluentes. Ainda salientam que para estações de tratamento de esgotos municipais, embora não consolidado, apresentam perspectivas positivas.

### 3.1.1. Comparações entre os processos de MBR e TCE

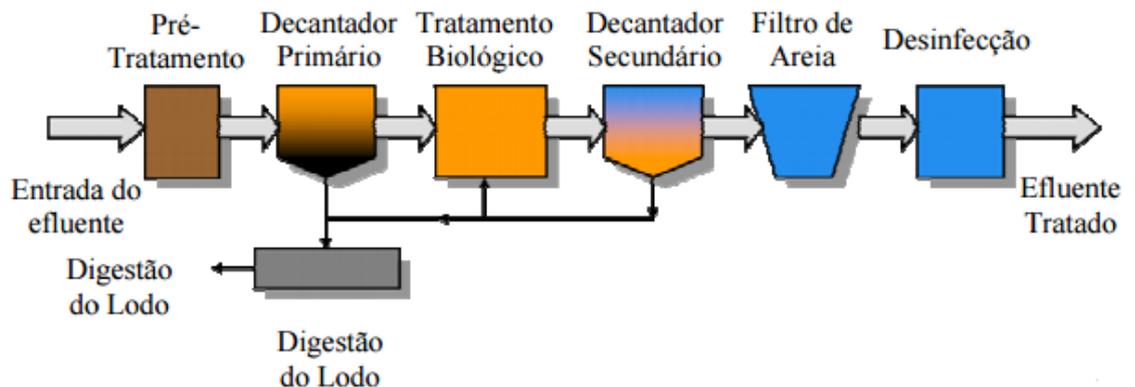
Os processos de biorreatores com membranas são bem semelhantes ao tratamento convencional de efluentes, no entanto se diferem pelo sistema de separação do lodo ativado da água tratada. Ao ser feita uma comparação do processo de biorreatores com membranas com as técnicas convencionais é possível notar inúmeras vantagens. Nas figuras (12) e (13) são apresentados dois fluxogramas de tratamento do mesmo efluente que será utilizado como exemplo para uma comparação entre os tratamentos.

**Figura 12:** Representação do sistema de MBR



Fonte: Kipper, 2009.

**Figura 13:** Representação do sistema de TCE



Fonte: Kipper, 2009.

A primeira comparação feita é em relação ao número de etapas envolvidas em cada processo. Enquanto que no TCE são necessárias 7 etapas, no sistema de MBR são utilizadas apenas 4. Nos MBRs, as membranas substituem o decantador secundário e o filtro de areia do TCE, permitindo a produção de um efluente tratado com alta qualidade, uma vez que possuem membranas que retêm totalmente a biomassa. No mais, com um efluente tratado e livre de microrganismos, o processo elimina a necessidade de uma etapa de desinfecção (KIPPER, 2009).

Em sistemas de TCE são inaceitáveis concentrações elevadas de biomassa, uma vez que podem causar problemas como a sobrecarga do processo de clarificação subsequente e a dificuldade de transferência adequada de quantidades de oxigênio. Sendo assim, no TCE, o

dimensionamento do decantador secundário é diretamente dependente da concentração de biomassa no reator biológico e da sedimentação do lodo (KIPPER, 2009).

Visto que no sistema de MBR não há necessidade do decantador secundário, é possível trabalhar com concentrações muito altas de biomassa no reator biológico, ou seja, pode-se trabalhar nos MBRs com cargas bem maiores de efluentes do que no TCEs.

Comparado com os processos de lodos ativados convencionais, os MBR apresentam importantes vantagens operacionais como a independência entre o tempo de retenção de sólidos e o tempo de retenção hidráulica, a utilização de altas concentrações de biomassa implicam na degradação mais eficiente dos poluentes e permitem vantagens como a redução da área necessária das unidades de tratamento e diminuição da geração de lodo, o que proporciona em uma redução nos custos do processo (BRINDLE E STEPHENSON, 1996). Vale ressaltar, que estas características podem permitir até a instalação de MBRs em condomínios e centros comerciais.

“Ainda pode ser considerada a vantagem econômica e ambiental em relação à redução de uso de agentes químicos no processo de tratamento, tais como floculantes, coagulantes, produtos para correção de pH, desinfetante, entre outros (KIPPER, 2009, p. 18).”

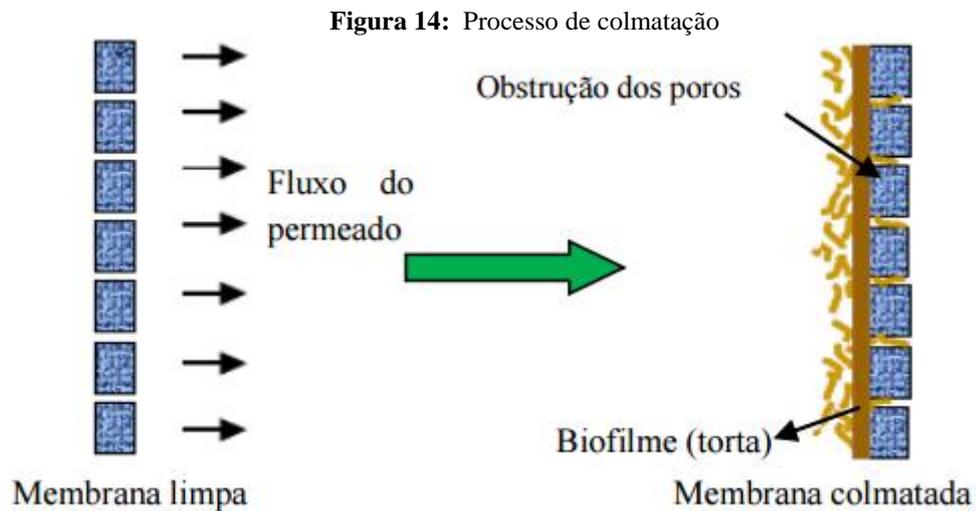
Embora o MBR seja bastante empregado na atualidade, a polarização de concentração e o "fouling" ainda são fatores limitantes para difundir a aplicação desta tecnologia em escala comercial, uma vez que estes fatores são responsáveis por provocar uma queda no desempenho da membrana e no fluxo permeado.

### 3.2. INCRUSTAÇÕES DAS MEMBRANAS UTILIZADAS EM MBR

Uma das principais limitações da aplicação de MBR refere-se à formação de incrustações nas membranas (fouling) do processo. Este fenômeno é responsável pela redução do fluxo permeado, alto consumo energético e necessidade de limpezas frequentes das membranas ou até substituição das mesmas (LIAO et al., 2004), o que conseqüentemente aumenta os custos operacionais.

Diante dessa limitação e devido ao seu impacto econômico e nas condições operacionais do reator, as pesquisas acerca das incrustações em MBR tem se tornado cada vez maiores, chegando a representar 31% de todas as publicações sobre a tecnologia de biorreatores com membranas (SANTOS, MA e JUDD, 2011).

O processo de preenchimento dos poros (colmatção) ocorre inicialmente pela formação de biofilme sobre a membrana, a partir da fixação de microcolônias de bactérias. Uma vez aderido à superfície da membrana, o biofilme, também conhecido como torta, exige um aumento da pressão transmembrana com o intuito de superar essa barreira e manter o fluxo do permeado constante. Isto acaba atraindo mais biomassa à sua superfície e logo aumentando a formação de biofilme (BELLI, 2015, p.55).



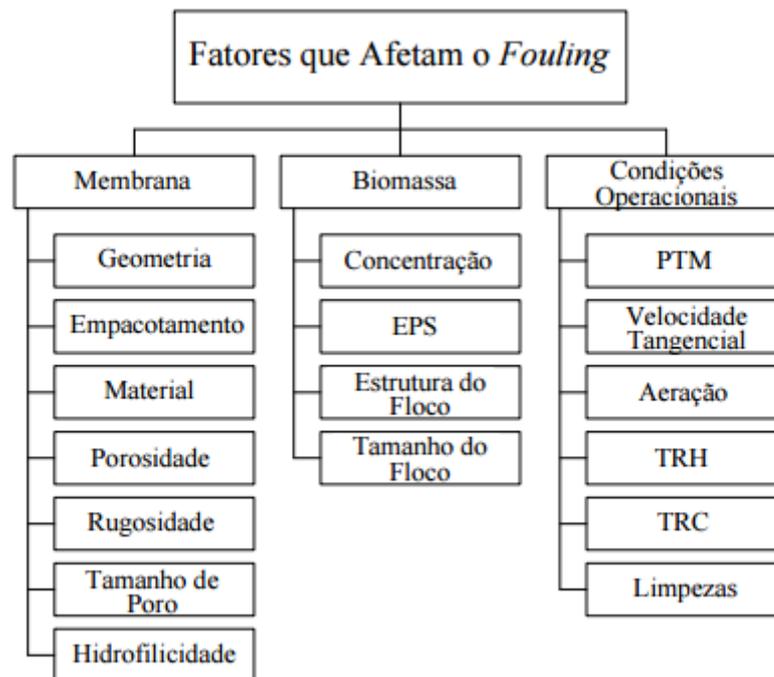
**Fonte:** Belli, 2015

Conforme a figura (14), a incrustação (fouling) está associada ao entupimento dos poros da membrana e/ou o depósito de lodo em sua superfície, e este fenômeno está relacionado com um conjunto de fatores que são responsáveis por provocar uma redução do fluxo permeado das membranas com o tempo. Os principais fatores que contribuem para incrustação são: (1) depósito de flocos de lodo na superfície da membrana; (2) adsorção de partículas na superfície da membrana, também chamada de torta, e/ou no interior de seus poros; (3) bloqueio dos poros da membrana; (4) formação de uma camada gel, ocasionando altas concentrações de soluto na superfície da membrana e conseqüentemente diminuição do fluxo permeado.

No caso de MBRs, o fouling causado por componentes inorgânicos não é considerado um mecanismo dominante, pois estes compostos estão presentes em pequena quantidade e são suficientemente pequenos para passarem pelos poros das membranas. No entanto, compostos orgânicos como proteínas e polissacarídeos podem representar uma parcela importante da incrustação em MBRs, visto que estes compostos são majoritários no interior do reator e há formação de biofilme ou adesão de produtos do metabolismo da biomassa à superfície das membranas, por este motivo, o fouling normalmente é chamado de biofouling (KIPPER, 2009, p. 24).

Uma série de fatores pode influenciar o biofouling formado nos MBRs. Estes fatores são associados a interações físico-químicas entre o biofluido e a membrana e podem ser apresentados em fatores como às condições operacionais, às características da membrana e às características da biomassa, os quais são classificados conforme a figura (16). Diante da significativa importância destes fatores será feita uma discussão de cada um destes aspectos a seguir (KIPPER, 2009).

**Figura 15:** Fatores que afetam o fouling



**Fonte:** Kipper, 2009, adaptado do trabalho de Chang et al. 2002 e Liao et al. 2004.

### 3.2.1. Características das Membranas que contribuem para o *fouling*

Dentre as características da membrana que contribuem no fenômeno de fouling, destacam-se a geometria da membrana, o empacotamento, o material da membrana, a porosidade, a rugosidade, o tamanho de poro e a hidrofiliçidade. Cabe salientar que estas características não atuam independentemente, pois elas podem se relacionar umas com as outras.

No que diz respeito ao aspecto da “Geometria e Empacotamento da membrana”, em sistemas de SMBRs, a membrana pode variar em termos de geometria, sendo configuradas de diferentes formas, como placas verticais, fibras ocas verticais ou horizontais (filtração do exterior para o interior) ou, mais dificilmente, como tubos (filtração do interior para o

exterior). Ainda que a configuração tubular geralmente seja a escolhida para os processos de módulo externo, o efeito do tamanho do lúmen no fouling em SMBRs foi analisado (CHANG e JUDD (2002), LE-CLECH, ALVAREZ-VAZQUEZ, et al., 2003). Devido certas características as fibras ocas tendem a ser mais propensas ao fouling e requerem lavagens e tratamentos químicos com certa frequência.

Uma discussão bastante interessante com relação aos desempenhos relativos de fibras ocas e placas verticais foi realizada por Gunder e Krauth (1998) e destacou que as membranas de placas verticais possuem um melhor desempenho hidráulico. Operando na mesma duração de tempo foi utilizada dois tipos de SMBRs semelhantes, usando esgoto doméstico como amostra, com o intuito de comparativo (JUDD, 2002). As principais mudanças observadas eram devido às diferentes condições operacionais e de manutenção.

Outro parâmetro importante para as membranas é a densidade de empacotamento. A alta densidade de empacotamento (área superficial de membrana por unidade de volume do módulo) acarretam uma diminuição da área transversal do módulo, conduzindo em maiores velocidades de escoamento do lodo e um bloqueio causado por sólidos grossos. Enquanto densidades baixas de empacotamento exigem um aumento na vazão de recirculação pelo módulo para manter a velocidade tangencial, o que aumenta o consumo energético. Sendo assim, torna-se necessária o estudo destes fatores a fim de garantir um bom desempenho da membrana, garantindo a limpeza eficiente do módulo e uma diminuição do custo energético (VIANA, 2004).

Em seguida, pode-se apresentar as características do material da membrana, uma vez que o material da membrana também é um aspecto que tem grande influência no fouling.

A fabricação das membranas pode ser feitas dos mais diversos materiais orgânicos e inorgânicos, onde estes podem ser poliméricas, metálicas, cerâmicas ou líquidas.

Embora apresentarem características como resistência química e física, suportarem elevadas temperaturas e grandes faixas de pH, as membranas cerâmicas não são a melhor opção para MBRs devido ao seu alto custo. No entanto, são utilizadas de forma satisfatória no tratamento de efluentes industriais (SCOTT et al., 1998, LUONSI et al., 2002).

As membranas cerâmicas necessitam de altas pressões de operação e alta turbulência e em geral são utilizadas em módulos externos, logo, exigem grande consumo energético. E ao apresentar características como alto custo de produção e alto consumo energético de operação, estas são consideradas inviáveis em termos econômicos.

Embora recentemente alguns módulos de membranas metálicas tenham apresentado bom desempenho hidráulico e fácil remoção do fouling quando utilizadas em MBRs

anaeróbios para tratamento de efluentes, a maior parte das membranas utilizadas em MBRs são poliméricas e mostram um comportamento distinto quando materiais diferentes são usados para sua confecção.

Fang e Shi (2005) fizeram estudos sobre membranas apresentando tamanho de poros semelhantes e utilizando materiais poliméricos distintos em sua fabricação (fluoreto de polivinilideno (PVDF), éster de celulose (CE) e polietersulfona (PES)). Embora submetidas às mesmas condições operacionais e apresentarem tamanhos de poros semelhantes, foram apresentados comportamentos diferentes em relação ao fouling. Enquanto o fouling era principalmente devido à formação da torta para as membranas de PVDF e de CE, o bloqueio dos poros foi responsável por cerca de 85% da resistência hidráulica total quando a membrana de PES foi utilizada.

Como resultado geral, a membrana PES apresentou uma resistência ao fouling de 50% mais alta que as membranas de PVDF e de CE. Ainda foi relatado que a microestrutura da membrana, o material e a distribuição de tamanhos de poros afetam diretamente o fouling de sistemas MBRs (FANG e SHI, 2005).

Os efeitos da porosidade e rugosidade possuem aspectos característicos e estes apresentam contribuições diretas para a incrustação.

Conforme Fang e Shi (2005) foram testadas em paralelo, quatro membranas de MF com tamanho de poros semelhantes observou-se que a rugosidade e a porosidade são consideradas as principais razões para os diferentes comportamentos de fouling apresentados. As condições operacionais eram as mesmas para as quatro membranas, sob uma pressão transmembrana constante, produzindo fluxos permeados inicialmente distintos. Uma membrana com alta densidade de pequenos poros cilíndricos uniformes apresentou características de menor propensão ao fouling. Enquanto as outras três membranas com microestrutura esponjosa mostraram-se mais propensas ao fouling devido à alta porosidade das mesmas.

Em um estudo realizado por He *et al.* (2005) foi relatado que pode existir uma influência da rugosidade na formação de fouling. Segundo os autores, membranas mais rugosas apresentam uma estrutura superficial mais propensa para a fixação dos microrganismos do que as membranas com superfícies menos rugosas.

Os efeitos do tamanho dos poros (e distribuição de tamanho dos poros) no fouling tem uma relação direta com a distribuição de tamanho das partículas, tornando complexa a obtenção dos resultados.

Espera-se um bloqueio ou restrição do poro quando o tamanho de partícula for menor que o tamanho do poro. Sendo assim, largos poros como os da membrana de microfiltração (MF) devem apresentar maior tendência ao fouling comparado com membranas de ultrafiltração (UF). No entanto, somente através da informação de tamanho de poros não é possível prescrever o desempenho hidráulico, bem como a relação entre estes dois aspectos. A constante mudança das características da biomassa e a larga faixa de distribuição de poros das membranas são as principais responsáveis pela complexidade na obtenção de resultados consistentes (KIPPER, 2009).

O tempo de operação também é considerado um fator influente na determinação do tamanho dos poros da membrana. Conforme exemplificado no estudo de He et. al. (2005), onde foram testadas membranas com diferentes massas molares de corte ( 20, 30, 50 e 70kDa) observando o efeito do tempo de duração do experimento sobre a tendência de fouling. Os resultados obtidos mostraram que os piores desempenhos foram observados nas de 20kDa e 70kDa quando comparadas as demais. Para os experimentos de curta duração, houve grande perda na permeabilidade da membrana de 20kDa. Enquanto para experimentos de longa duração, com regulares limpezas hidráulicas e químicas, a membrana 70kDa apresentou grandes taxas na formação de fouling ( perda de 94% da permeabilidade inicial).

Com base nesses estudos, pode-se concluir que nas mesmas condições operacionais, as membranas com pequenos poros rejeitam uma maior quantidade de partículas dissolvidas, resultando em um aumento da resistência na camada de torta ao fluxo permeado. Já as membranas com maiores poros apresentam maior rugosidade superficial, com maior quantidade de lacunas a serem preenchidas pelas partículas do lodo ativado, com isto, permitindo a formação do fouling e provocando uma maior queda no fluxo permeado.

Outros aspectos contribuintes para a formação da incrustação nas membranas é a hidrofobicidade e hidrofobicidade da membrana. Membranas hidrofílicas possuem uma característica de afinidade com a água o que favorece seu transporte. No entanto, se a membrana apresentar excessivamente características hidrofílicas, isto pode causar efeitos negativos na mesma, prejudicando seu desempenho e proporcionando um colapso em seus poros. Já as membranas hidrofóbicas possuem afinidade com as características hidrofóbicas dos solutos, interações hidrofóbicas que ocorrem entre os mesmos e células microbianas, sendo assim devido a intensidade dessas interações espera-se que a taxa de incrustação seja maior em membranas hidrofóbicas do que em membranas hidrofílicas (YU et al., 2005).

Alguns estudos apresentados por Chang, Bag e Lee (2001), Choi et al. (2002) e Chang e Lee (1998) mostram que a biomassa possui características hidrofóbicas, embora sejam

níveis distintos de hidrofobicidade. Estas características fazem com que a afinidade da biomassa e, conseqüentemente, a aderência à superfície de membranas hidrofóbicas seja maior do que a observada no uso de membranas hidrofílicas.

Em contrapartida, nas investigações de Fang e Shi (2005), os resultados obtidos mostravam que a formação de maiores incrustações ocorria em membranas mais hidrofílicas, devido à maior deposição de incrustantes de natureza hidrofílica e à maior porosidade destas membranas.

Cabe salientar que o efeito da hidrofobicidade das membranas e sua interação com a suspensão de biomassa resultam em um fenômeno de alta complexidade onde envolvem fatores como estados fisiológico da biomassa, características do substrato e as condições de operação (KIPPER, 2009).

### **3.2.2. Características da Biomassa que contribuem para o *fouling***

Entre as propriedades da biomassa que contribuem para a incrustação da membrana estão a concentração de microrganismos, a concentração de EPS e a estrutura e tamanho do floco.

A concentração de biomassa apresenta características importantes na formação de incrustação. Geralmente, mantidos os outros parâmetros constantes, o aumento de concentração de sólidos suspensos totais (SST) leva à diminuição do fluxo permeado. Porém, esse efeito pode ser minimizado à medida que há um aumento na turbulência sobre a membrana.

Define-se entre 15.000 e 30.000 mg.L<sup>-1</sup> a faixa ideal de concentração de SST. Todavia, vale salientar que, para módulos submersos, altas concentrações podem dificultar a promoção de turbulência que tem a função de evitar o depósito de partículas na superfície da membrana. Elevadas concentrações de lodo apresentam um aumento da viscosidade do lodo o que prejudica o processo de MBR (KIPPER, 2009).

Os SST que estão presentes no reator biológico são divididos em três categorias de partículas: sólidos suspensos, coloidais e sólidos dissolvidos ou solutos. Esta classificação se baseia diretamente no tamanho das partículas, e estas partículas afetam diferentemente o comportamento da membrana e, conseqüentemente, contribuem para o *fouling* (RENZ, 2015). Isto faz com que vários autores procurem estudar e investigar melhor a influência destas partículas.

O depósito de sólidos suspensos sobre a superfície da membrana tende a formar uma torta, onde se torna o fator que mais afeta o fluxo de um MBR em operação, porém, este fator pode ser minimizado através de melhorias nas condições hidrodinâmicas. E dependendo da faixa de concentração de sólidos suspensos pode exercer uma influência positiva. Um estudo realizado detalhadamente, apresentou um comportamento obtido por Rosenberger et al. (2005), em que, aumentando a concentração de sólidos suspensos até uma faixa de 6g/L e acima de 15g/L, ocorreu uma redução na incrustação, enquanto valores na faixa de de 8 a 12g/L, não foi relatado efeito significativo neste caso.

Neste contexto, destaca-se a importância de aperfeiçoar a tensão de cisalhamento sobre a membrana, uma vez que esta melhoria seja suficiente para prevenir à formação da torta sobre a membrana, porém isto não pode causar um aumento elevado da concentração de sólidos dissolvidos e coloidais. Pois esta melhoria tem o intuito de minimizar os efeitos causados pelo fenômeno de incrustação, evitar a deterioração da qualidade do permeado e manter o desempenho da membrana (VIANA, 2004).

Segundo Chang et al. (2002) os efeitos das substâncias poliméricas extracelulares (EPS) são considerados os importantes influentes para formação de fouling devido a sua natureza agregativa.

Os EPS são uma complexa mistura de proteínas, carboidratos, polissacarídeos, DNA, lipídeos e substâncias húmicas que são constituintes da matriz de flocos e de biofilmes. Os EPS são também categorizados, na literatura, de acordo com sua origem (ligado às células ou livres em solução), natureza química (proteínas, carboidratos, ácidos húmicos, etc.) ou tamanho físico (dissolvido, coloidal ou particulado) (KIPPER, 2009, p.33).

Nos estudos feitos por Meng et al. (2006) foi apresentado que o aumento da concentração de EPS solúvel no lodo permite um aumento na viscosidade dinâmica da suspensão de biomassa, provocando maior acúmulo de EPS e depósito de partículas do lodo na superfície da membrana, conseqüentemente, causando uma redução do fluxo permeado.

Outras características da biomassa que se destacam devido sua intensa participação na formação de incrustação são as características do floco. Conforme Kipper (2009, p.38), “as características do floco são dependentes das condições de operação do biorreator (TRC, TRH, razão A/M, intensidade de aeração) que influenciam nas características físicas e biológicas dos microrganismos”.

Em geral, os microrganismos que se encontram no lodo podem ser divididos em dois grupos, sendo eles: Os decompositores e os consumidores.

Os decompositores constituem 95% da população, são em sua maioria bactérias, heterotróficas, protozoários e também alguns fungos. Estes são responsáveis pela degradação do substrato presente no efluente. Já os consumidores são os protozoários fagotróficos e metazoários que se alimentam de bactérias e protozoários, vale ressaltar que estes são de suma importância na manutenção do balanço ecológico do sistema (KIPPER, 2009).

Os microrganismos que estão presentes na biomassa servem para indicar as características do lodo, de forma macroscópica e microscópica. É possível, através de um monitoramento constante das espécies que se desenvolvem no lodo ativado compreender e destacar os problemas operacionais do processo e indicar meios para solucionar ou amenizar os mesmos, de uma forma que facilite as condições operacionais.

A estrutura do floco está fortemente relacionada às condições de operação dos sistemas de MBRs. Se as condições de velocidade tangencial forem demasiadamente elevadas elas podem promover a diminuição do tamanho do floco e provocar a formação de tortas mais compactas na superfície da membrana (KIPPER, 2009, p. 40).

Jenkins, Richard e Daigger (1993) apresentam uma classificação das causas e efeitos dos problemas voltados para a formação de flocos nos processos, esta classificação é mostrada na tabela abaixo.

**Tabela 3:** Causas e efeitos relacionados à formação de flocos

Denominação	Causa	Efeito
Crescimento disperso	Baixa produção de EPS; lodo jovem	Sedimentação ruim; alta turbidez
Lodo viscoso ( <i>bulking</i> não filamentoso)	Elevada produção de EPS	Sedimentação ruim; aparecimento de espuma
Microflocos	Formação de flocos esféricos	Baixo IVL; elevada turbidez
Lodo intumescido ( <i>bulking</i> filamentoso)	Excesso de bactérias filamentosas	Sedimentação ruim; alto IVL; Baixa taxa de desidratação do lodo
Manta ascendente	Ocorrência de nitrificação	Formação de espuma, devido ao arraste de sólidos pelas bolhas de nitrogênio no decantador

Fonte: Kipper, 2009.

Desta forma, é importante, buscar a utilização de meios para amenizar tais efeitos ou destruir a estrutura do lodo. Um exemplo destes meios seria o uso de uma bomba centrífuga para recirculação do lodo nos sistemas de módulo externo, onde se é possível obter uma destruição mais rápida do lodo, permitindo um aumento na concentração de solutos e pequenos coloidais.

### **3.2.3. Condições operacionais que contribuem para o *fouling***

As condições de operação também possuem certa contribuição para o *fouling*, podendo ser negativamente ou positivamente. Sendo assim, torna-se relevante o conhecimento destes fatores para minimizar as incrustações que se desenvolvem nas membranas. Entre os fatores contribuintes temos a PTM, a velocidade tangencial, aeração, TRH, o TRC e condições e frequência das limpezas.

A pressão transmembrana (PTM) é uma condição operacional importante em MBR e está diretamente relacionada com o fluxo permeado. Segundo Viana (2004), diante de pressões relativamente baixas, o fluxo permeado tende a aumentar juntamente com a pressão. Todavia, quando há um aumento constante na pressão operacional este aumento pode provocar a polarização de concentração o que é considerado um fator responsável pela diminuição do fluxo permeado.

Através de estudos de Gunder e Krauth (1998) foram mostradas que altas pressões não apresentam obrigatoriamente fluxos mais elevados e que estas ainda podem proporcionar à formação de uma torta irreversível na superfície da membrana. Os autores destacam que, há uma relação direta da PTM com as partículas, pois quanto maior a PTM, mais rápido as partículas tendem a se depositar sobre a superfície da membrana.

Neste contexto, pode-se observar que para operação de longos períodos onde a PTM será elevada, embora inicialmente a operação apresente um fluxo maior, o fluxo tende a cair rapidamente. Este decréscimo de fluxo pode atingir valores muitas vezes menores que os valores de fluxo em sistemas operados com pressões menores.

A velocidade tangencial destaca-se como uma condição operacional de tamanha influência para o fenômeno de *fouling*.

"Em geral, quanto maior a velocidade tangencial do lodo no módulo, maior o fluxo permeado. O aumento da velocidade tangencial aumenta o carregamento de partículas que se depositam sobre a superfície da membrana (VIANA, 2004, p. 52)".

Conforme Kipper (2009), a velocidade tangencial destaca-se como um aspecto importante no dimensionamento do reator, principalmente para os SMBRs. Onde o aumento

da velocidade aumenta a taxa de cisalhamento na superfície da membrana o que permite uma melhora no transporte da membrana para o seio da solução.

Em um estudo apresentado por Tardieu e colaboradores (1998), citado por Defrance et al. (2000) foi relatado que em um sistema MBR para tratamento de esgotos utilizando membranas cerâmicas a uma velocidade de 3 m/s e PTM de 1,0 bar, apenas em 10% da superfície da membrana ocorreu a deposição de biomassa. No entanto, com uma redução na velocidade para 0,5 m/s, houve rapidamente uma formação de incrustação onde uma torta espessa de 50 - 80 foi depositada sobre a superfície da membrana.

Em MBR, o processo de aeração destaca-se por apresentar características positivas para estes sistemas. Um destas características é que a turbulência proporcionada pela aeração é responsável por promover uma velocidade tangencial sobre a membrana, o que tem a capacidade de promover uma remoção eficaz da torta que se deposita sobre superfície da mesma.

De forma geral, quanto maior a intensidade de aeração maior será a turbulência promovida e mais eficiente será a remoção da torta. Porém, deve-se ter cuidado com vazões de ar muito elevadas, principalmente nos módulos submersos com membranas tipo fibra oca, a fim de evitar o rompimento das fibras (KIPPER, 2009, p.44).

O tempo de retenção celular (TRC) e o tempo de retenção hidráulica (TRH) fazem parte do conjunto de fatores que contribuem para o fouling, tornando-se necessário o conhecimentos dos seus efeitos.

Conforme Kipper (2009), alguns efeitos são apresentados quando se tem um aumento do TRC, entre eles pode-se destacar a maior concentração de biomassa, possibilidade do aumento da produção de EPS e a diminuição no tamanho dos flocos. Sendo assim, apresenta uma imensa vantagem, pois para valores elevados de TRC proporciona uma degradação mais eficiente.

Nos MBRs as variáveis TRH e TRC são totalmente independentes. Do ponto de vista prático, um TRC elevado promove uma maior concentração de lodo ativado e associado a um TRH pequeno possibilita um tratamento eficiente em um curto espaço de tempo, entretanto problemas de fouling mais intenso podem ocorrer nesta condição. Um pequeno TRH promove uma maior disponibilidade de nutrientes aos microorganismos e um maior crescimento biológico, sendo que a qualidade do permeado está ligada ao TRH, dependendo da concentração de lodo utilizada (KIPPER, 2009, p. 45 - 46).

Neste contexto, percebe-se que o desenvolvimento de incrustações das membranas MBR é considerado inevitável. Com isso, as técnicas de limpeza torna-se uma prática de suma importância, pois são formas utilizadas com intuito recuperar o fluxo permeado perdido

devido os efeitos causados pela formação de incrustações e manter um bom desempenho da membrana.

Normalmente, a técnica de operação empregada para manutenção de fluxo permeado estável consiste de permeação, obtida por sucção, alternada com retrolavagem, em que uma porção do permeado é bombeada no sentido inverso ao da permeação. Alguns autores utilizam, ao invés de permeado, ar para realizar a operação de retrolavagem. Períodos de relaxação da membrana onde nenhuma operação é realizada também têm sido utilizados para recuperação do fluxo permeado (KIPPER, 2009, p. 46).

A retrolavagem ocorre empurrando as partículas que estão aderidas à estrutura dos poros para o líquido e com isto removendo parcialmente a torta formada na superfície das membranas. Esta técnica é caracterizada pela frequência, duração e vazão, onde estas características possuem certa relação com as condições operacionais dos MBRs e às características da solução a ser tratada.

A utilização de retrolavagem possibilita que um sistema opere com uma estabilidade do fluxo permeado em longos períodos de tempo. Côté et al. (1997) mostraram o trabalho da operação de um sistema durante um ano com retrolavagens de 15s a cada 15min e limpezas proporcionadas por retrolavagens com uma frequência de 1 vez por semana durando 15 minutos. Os resultados obtidos mostraram que a remoção da matéria orgânica é melhor quando comparados os sistemas convencionais de tratamento e que não houve necessidade de retirar membranas para realização da limpeza.

#### **3.2.4. Estratégia de controle e remoção de incrustação**

Os aspectos relacionados às características da membrana, da biomassa e das condições operacionais contribuem intensamente para a incrustação das membranas. Neste sentido, além de conhecê-los para estabelecer um bom desempenho das membranas no MBR e melhorar as condições de operação do sistema, torna-se necessária à busca por estratégias de controle e remoção desta limitação. Estas estratégias envolvem métodos físicos e químicos e consistem na identificação e gerenciamento de boas condições hidrodinâmicas para operação.

O aperfeiçoamento das condições hidrodinâmicas mostra-se um meio essencial para minimização e prevenção da incrustação das membranas. Neste sentido, torna-se importante apresentar os aspectos importantes relativos à obtenção de melhores condições hidrodinâmicas de operação para um sistema MBR. Dentre os mais diversos aspectos foi selecionado o principal para ser abordado, sendo ele: a importância de controle da aeração e seus efeitos globais em um sistema MBR.

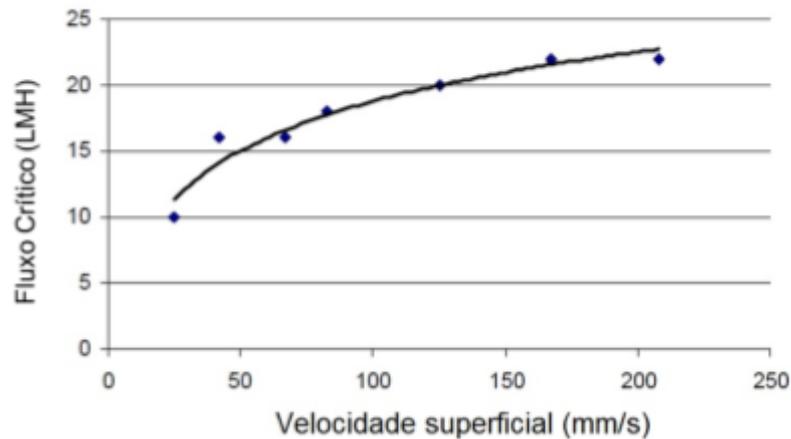
As bolhas geradas pela utilização de aeração em sistemas de SMBR são caracterizadas pela presença de três funções principais, sendo elas: (1) fornecer oxigênio aos microorganismos; (2) manter o lodo ativado em suspensão e (3) limitar a formação da incrustação a qual se dá pela deposição de partículas na superfície das membranas (RENZ, 2015). Cabe salientar que uma importância maior é voltada para a última função, uma vez que a maioria dos SMBRs possuem uma configuração em que as bolhas entram em contato com a superfície da membrana, e como a aeração tem a capacidade de gerar uma turbulência e promover tensões de cisalhamento isto irá permitir a remoção total ou parcial da torta que se deposita sobre a superfície da mesma.

Alguns trabalhos na literatura relatam a existência de um valor limite para a vazão de aeração. Estudos apresentados por Ueda et al. (1997) chegam a conclusão que a aeração reduz a incrustação até um valor máximo de vazão em um sistema de MBR e, que, acima deste valor, não observou um grande efeito no comportamento da pressão transmembrana.

Os resultados obtidos por Chua et al. (2002) e Delgado et al. (2008) apresentam características semelhantes, onde a taxa de incrustação decresce significativamente devido um aumento da velocidade superficial de gás no processo, atingindo um valor limite de vazão de aeração positivo. O estabelecimento de um valor máximo para a vazão de aeração pode estar associado ao fato de que a velocidade de ascensão das bolhas não é proporcional à taxa de aeração, ou seja, acima de determinado valor, o efeito deste aumento não influenciaria na velocidade superficial de gás (Nguyen cong duc et al., 2008).

“O efeito benéfico da aeração também pode ser visto através de um aumento no fluxo permeado, onde a velocidade superficial de gás influencia o fluxo crítico. Novamente pode ser observado um patamar de eficiência com o aumento da taxa de aeração (RENZ, 2015, p.38).” Conforme apresentado na figura a seguir.

**Figura 16:** Variação de fluxo crítico em função da velocidade superficial de gás



**Fonte:** Renz, 2015, Adaptado de Howell et al., 2004.

No trabalho desenvolvido por Meng et al. (2008), notou-se a existência de alguns efeitos negativos da aeração, onde um alto nível de aeração resultou na quebra dos flocos e promoveu a liberação de partículas coloidais e solúveis, agravando a formação de incrustação na superfície da membrana. Sendo assim, relata-se que em níveis elevados de aeração, as partículas tendem a ser menores, o que permite um aumento da chance de ocorrer as incrustações no interior dos poros devido à maior presença de partículas solúveis e coloidais (Wu et al., 2011).

### 3.3. APLICAÇÕES DOS BIORREADORES COM MEMBRANAS

A busca por tecnologias que tenham a capacidade de realizar um tratamento eficiente de água, efluentes e esgoto é uma tentativa de conservar os recursos hídricos, uma vez que estes apresentam possibilidade de escassez. Sendo assim, é notável a importância de apresentar formas e técnicas que mostrem seu potencial quando aplicado. Com isto, escolhemos a tecnologia de MBR no tratamento de efluentes, visto que esta tecnologia tem se tornado uma alternativa viável e eficaz quando aplicada.

Vale ressaltar a relevância de selecionar determinados estudos para apresentar a viabilidade da aplicação da tecnologia de MBR, como por exemplo, a aplicação desta tecnologia na indústria, face à grande importância e ao alto consumo da água nestas atividades.

Desta forma, selecionamos alguns estudos que utilizam a técnica de biorreatores com membranas por meio de pesquisa de trabalhos acadêmicos disponível na internet. Os estudos escolhidos envolvem diferentes aplicações da tecnologia de MBR, como, tratamento de esgotos domésticos, tratamento de efluentes de aterro industrial e tratamento de efluentes de refinaria de petróleo. Decidimos apresentar a seguir um percurso onde descreve as características de cada estudo (objetivo do estudo, objeto de estudo), a metodologia empregada, os parâmetros analisados e os resultados obtidos de tais análises, com o intuito de mostrar a viabilidade da aplicação tecnologia de MBR com base nos dados apresentados pelos estudos.

O estudo 1 se trata do “Biorreator com membrana aplicado ao tratamento de esgotos domésticos: avaliação do desempenho de módulos de membranas com circulação externa”. Este estudo foi realizado por Priscilla Zuconi Viana, o qual é uma tese apresentada ao instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, em 2004. Este estudo teve como objetivo principal avaliar o comportamento das membranas em um MBR visando o tratamento de esgotos domésticos. O módulo de membranas foi alimentado com lodo ativado, sendo o concentrado (corrente retida pela membrana) recirculado para o tanque, mantido aerado. O permeado foi obtido por diferença de pressão positiva.

Este trabalho apresenta uma metodologia experimental onde esta é dividida por etapas. Na primeira etapa o estudo relata a fabricação e caracterização das membranas usadas. Em seguida, são apresentados os procedimentos experimentais dos testes realizados no sistema preliminar, no sistema montado para realização dos ensaios em batelada e no sistema montado para realização dos experimentos em modo contínuo. Ainda descreve os métodos adotados para análise dos parâmetros relacionados à eficiência do tratamento. Cabe salientar que as maiorias dos testes feitos utilizavam o lodo da estação de tratamento de esgotos da Penha (ETE - Penha), localizada no Rio de Janeiro. A seguir serão apresentadas as análises de alguns dos testes realizados no trabalho e os resultados obtidos.

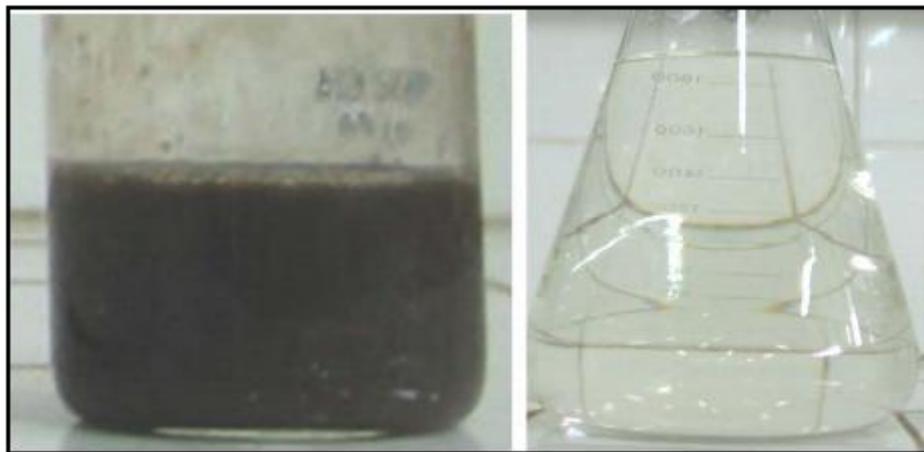
Em um dos testes apresentados pelo estudo, foram realizadas análises de DQO, DBO, SST e CF de cada amostra coletada para o estudo e análises de DQO, DBO, SST, CF e *Escherichia coli* das amostras do permeado coletado nos testes. As análises foram realizadas no Laboratório de Engenharia do Meio Ambiente (LEMA), da Poli - UFRJ. Na tabela a seguir são apresentadas as médias dos resultados obtidos para cada parâmetro adotado (quatro amostras de lodo ativado e quatro de permeado).

**Tabela 4:** Resultados das análises do lodo e do permeado

Parâmetro	Lodo ativado	Permeado
DQO (mg/L)	9.360	27
DBO (mg/L)	4.314	2
SST (mg/L)	7.927	<0,5
CF (NMP/100 mL)	1.200.000	0
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	-	0

**Fonte:** Viana, 2004.

Segundo os dados do estudo, a qualidade do permeado obtido pode ser observada na tabela acima. O mesmo se apresentou sempre com ausência de coliformes fecais e *Escherichia coli*. A concentração de sólidos suspensos do permeado está abaixo do limite de detecção. Os valores de DBO e de concentração de SST do efluente tratado atendem perfeitamente as exigências de controle estabelecidas pela DZ-215-R.3 (FEEMA, 2002), que permite concentração máxima variando de 180 a 40 mg/L, tanto para SST, como para DBO, de acordo com a carga orgânica lançada diariamente. Uma amostra do lodo ativado e do permeado coletados após um dos experimentos pode ser observada na Figura (17).

**Figura 17:** Amostra do lodo ativado e do permeado coletados após um dos experimentos

**Fonte:** Viana, 2004

Em outro teste, para avaliação da eficiência do tratamento foram realizadas análises físico-químicas e bacteriológicas do esgoto que alimentava o tanque de aeração (proveniente da ETE Penha), da amostra de permeado coletada e do lodo ativado. Os resultados são apresentados na tabela a seguir.

**Tabela 5:** Resultados das análises do esgoto bruto e do efluente tratado.

<b>Parâmetro</b>	<b>Esgoto bruto</b>	<b>Permeado</b>
DQO (mg/L)	723	18
DBO (mg/L)	238	≤2
SST (mg/L)	438	0,8
SSV <sup>a</sup> (mg/L)	380	-
CF (NMP/100mL)	11.000.000	0
<i>Enterococcus</i> (NMP/100mL)	350.000	0
<i>Escherichia coli</i> (NMP/100mL)	-	0
Turbidez (FAU) <sup>b</sup>	-	0,3
Cor (PtCo) <sup>c</sup>	-	21

<sup>a</sup> SSV = sólidos suspensos voláteis

<sup>b</sup> FAU = unidades de atenuação de formazina

<sup>c</sup> PtCo = unidades de platina - cobalto

**Fonte:** Viana, 2004

Neste teste, conforme os dados dos estudos pode-se observar pelos resultados das análises do esgoto bruto e do efluente tratado que a eficiência de remoção da DQO foi aproximadamente 98% e da DBO foi maior que 99%. A concentração de sólidos suspensos totais no permeado é desprezível e não foi detectada, no permeado, a presença de *Enterococcus* e *Escherichia coli*. Apenas como parâmetro de referência, as eficiências típicas de remoção de sistemas de lodos ativados convencionais para DQO, DBO, SST e CF se apresentam na faixa de 85 -90, 85 – 95, 85 – 95 e 60 – 90, respectivamente.

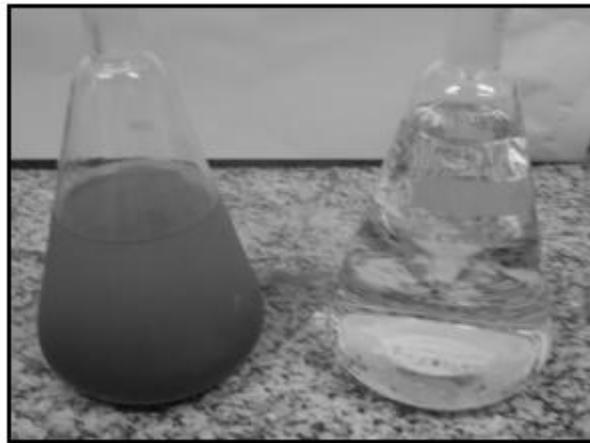
Nas fotos da figura (18) podem ser visualizadas as ilustrações do esgoto bruto, do lodo ativado no tanque de aeração e do permeado no tanque de coleta do mesmo. Enquanto a figura (19) apresenta a foto de uma amostra do esgoto bruto a ser tratado (coletado na ETE-Ilha do Governador) e do permeado.

**Figura 18:** Ilustrações do esgoto bruto, do lodo ativado no tanque de aeração e do permeado, respectivamente.



**Fonte:** Viana, 2004

**Figura 19:** Amostra do esgoto bruto e do permeado.



**Fonte:** Viana, 2004

Diante dos experimentos realizados neste trabalho que foi apresentado, o estudo conclui que efluente tratado apresentou sempre qualidade excelente e praticamente constante. No que diz respeito ao permeado, diante das características do mesmo, este pode ser reutilizado para diversos fins que exijam qualidade de água não potável, mas sanitariamente segura, como para irrigação de jardins, lavagem de pisos, para descarga dos vasos sanitários, etc. O autor ainda acrescenta que para que processos convencionais de tratamento de esgotos gerem um efluente tratado com a qualidade do permeado obtido no trabalho é necessário acrescentar um tratamento terciário para desinfecção do efluente, além da área para instalação destes tratamentos serem, em sua maioria, significativamente maiores.

O estudo 2 se trata da "Aplicação de biorreator com membranas no tratamento de efluentes de aterro industrial." Este estudo foi realizado por Ane-Mery Pisetta Gorigoitía, o qual é uma dissertação apresentada ao Programa de Mestrado Profissional em Meio Ambiente Urbano e Industrial do do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a Universität Stuttgart, em 2011. Este estudo teve como

objetivo geral avaliar o desempenho da utilização de sistema de biorreator com membranas no tratamento de efluente de aterro industrial, a fim de melhorar o tratamento do efluente, tendo em vista os aspectos ambiental, técnico, econômico e legal. O experimento foi realizado na estação de tratamento de efluentes oriundos de aterro industrial, situada no município de Blumenau, Estado de Santa Catarina, Brasil. O local denomina-se Central de Tratamento de Resíduos de Blumenau – CTRB, de propriedade da empresa Momento Engenharia Ambiental Ltda.

O efluente de aterro, o objeto de estudo deste trabalho, é proveniente de central de tratamento de resíduos localizada em Blumenau-SC. Este efluente recebe tratamento convencional por meio de lodos ativados e processo de tratamento físico-químico. Embora o resultado deste tratamento apresente um efluente que atenda as condições estabelecidas pela legislação, a empresa criou um Programa de Gestão Ambiental (PGA) com o objetivo de melhorar a qualidade do efluente lançado. Para o estudo, foram selecionados os parâmetros de DQO, Cor, Turbidez, Sólidos e Toxidade como parâmetros passíveis das melhorias a serem obtidas. Cabe ressaltar que foram previstas visitas técnicas a aterros na Alemanha com o objetivo de verificar os aspectos técnicos e econômicos da operação de um sistema de MBR.

O estudo relata que foi avaliado o desempenho do uso de biorreator com membranas no tratamento de efluente de aterro industrial, em termos de aspectos ambientais, técnicos, econômicos e legais, em comparação com processos convencionais de tratamento. A configuração em teste permitiu a avaliação do sistema biológico por lodos ativados associado ao processo físico-químico em comparação com sistema biológico por lodos ativados associado ao processo de filtração com membranas (ultrafiltração), denominado MBR.

Para realização deste estudo, foram determinadas 5 etapas para avaliar a aplicação e estas serão apresentadas a seguir.

**1ª Etapa** – Visita técnica às estações de tratamento de efluente de aterro, que utilizem o processo de separação de sólidos por membranas, verificando detalhes da operação, custos e eficiências obtidas, bem como atendimento à legislação;

**2ª Etapa** – Estabelecimento de uma parceria visando a realização de um projeto em conjunto, para avaliação da utilização do sistema de separação de sólidos por membranas, mediante a implantação de uma planta piloto de ultrafiltração, na estação de tratamento de efluentes da Central de Tratamento de Resíduos de Blumenau, em substituição ao processo de separação de sólidos por decantação, apropriando custos, condições operacionais, monitorando eficiências obtidas e outras variáveis de processo;

**3ª Etapa** – Avaliação dos resultados alcançados no ensaio piloto, por critérios ambientais, técnicos, econômicos e legais;

**4ª Etapa** – Verificação, com base na avaliação dos resultados do teste piloto, a possibilidade de substituição da etapa de decantação secundária e tratamento físico-químico, pelo processo de separação de sólidos por membranas;

**5ª Etapa** – Comparação das diferenças entre o uso do sistema MBR no Brasil e o uso do mesmo na Alemanha.

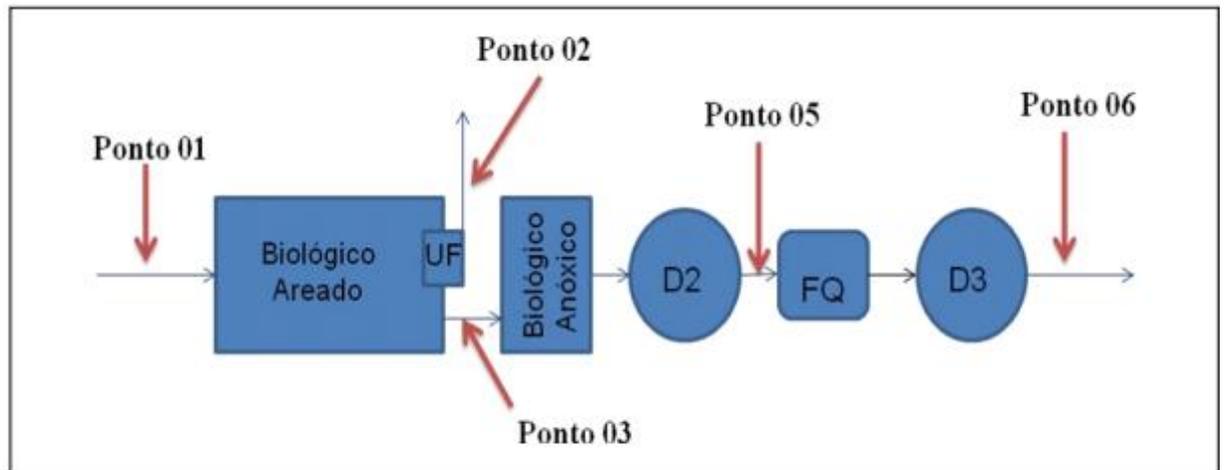
Para as análises dos parâmetros físico-químicos foram realizados testes em cubetas da Dr. Lange. A seguir será apresentada uma tabela das análises físico-químicas realizadas, mostrando o método utilizado para cada análise e o padrão seguido.

**Tabela 6:** Ensaio físico químico e metodologia.

<b>Análise</b>	<b>Método</b>	<b>Padrão</b>
Cor Aparente, expressa em Pt/Co	Fotometria. Fotômetro Cadas Dr. Lange, comprimento de onda $\lambda$ 455 nm	SMEWW 2120. C-1
Turbidez (T), expressa em NTU	Método Nefelométrico. Turbidímetro Hach 2100P.	SMEWW 2130 B
Demanda Química de Oxigênio (DQO) expressa em mg/L	Tubo fechado. Oxidação com dicromato. Método Colorimétrico. Cubetas Dr. Lange	SMEWW 5220 A
Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) expressa em mg/L	Respirometria com revelação e quantificação fotométrica. Colorimetria: Cubetas Dr. Lange.	SMEWW 5210 B/6b
Fósforo Total (PT), expresso em mg/L	Colorimetria. Cubetas Dr. Lange.	SMEWW 4500-P A; 4500-P C
Sólidos Suspensos Totais (SST), expresso em mg/L	Filtração com Whatmann GF/A, seco a 105°C	SMEWW 2540 D

Fonte: Pisseta, 2011.

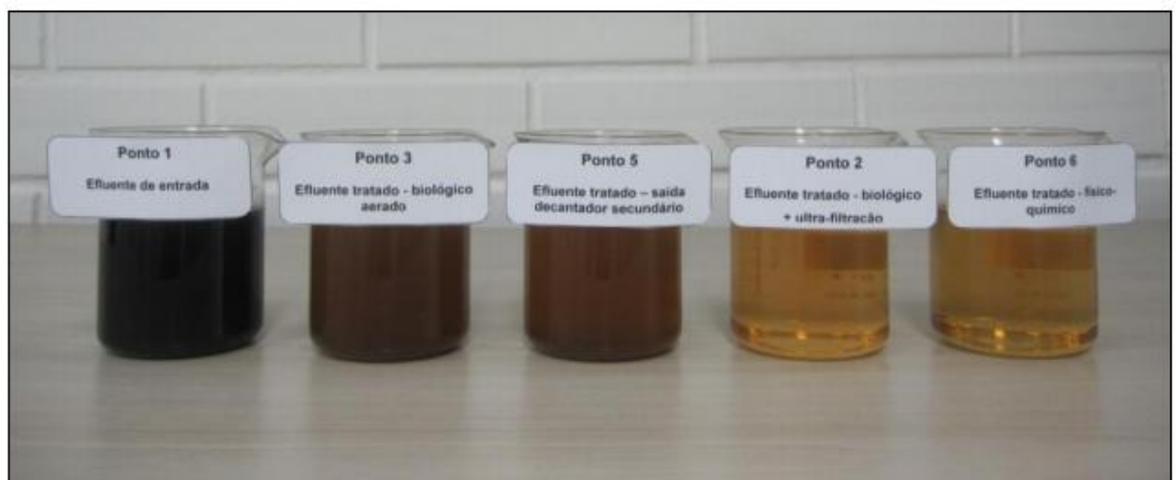
Para a avaliação da eficiência de remoção de poluentes foi realizada tomando-se como base o processo de tratamento biológico, ponto 03, comparado ao tratamento por membranas, ponto 02 e ao tratamento físico químico, ponto 06. Todos estes, relacionados com as concentrações de poluentes na corrente de entrada do reator biológico, que é o ponto 01, conforme apresentado na figura abaixo.

**Figura 20:** Pontos de amostragem

**Fonte:** Pisseta, 2011.

A seguir serão abordados os parâmetros analisados nesse estudo para identificar e apresentar as principais características de cada processo usado.

Cabe ressaltar que a cor apresentada pelos efluentes é dada pelos componentes dispersos na água. Sendo assim, no que diz respeito à remoção de cor, conforme os dados do estudo é possível notar que todos os processos que foram empregados removem significativamente a cor do efluente em relação à coloração do efluente de entrada. Nota-se também que o processo físico-químico apresentou os melhores resultados em relação aos demais processos. Na figura (21) abaixo será mostrada a variação de cor do efluente em cada processo de tratamento.

**Figura 21:** Variação de cor do efluente com o tipo de tratamento

**Fonte:** Pisseta, 2011.

Fazendo uma análise comparativa é possível notar que embora o processo físico-químico comparado ao processo de separação por membranas apresente melhores resultados, o processo por membranas possui eficiência idêntica sem a necessidade de adição de produtos químicos, sendo este um fator relevante em termos ambientais. Além disso, quando se compara a eficiência obtida nos tratamentos por Ultrafiltração (UF) e Biológico (Bio), verifica-se que o processo por UF é mais eficiente na remoção de cor. Esta eficiência se manteve acima de 80% nos primeiros cinco dias de testes e chegou a ocorrer um decréscimo no sétimo dia, mas retornou a melhorar na sequência.

No outro parâmetro, que se trata da remoção de DQO, a mesma é obtida de modo quase que uniforme entre os processos testados. Foi também observado que o processo biológico é que remove a maior parcela de DQO, cabendo pouco aos processos de ultrafiltração e físico químico. Já em outra análise, comparando os sistemas biológicos e ultrafiltração, os resultados identificam os pontos em que as tecnologias se completam de modo a apresentarem, quando em conjunto, um MBR, expondo uma remoção satisfatória.

Na remoção de turbidez, foi notado que o processo mais eficiente foi por UF oriunda do processo biológico de tratamento. Isto porque em nenhum momento o resultado da decantação (sobrenadante do decantador secundário), se mostra mais eficiente do que a UF.

O processo de separação por membranas é nitidamente, conforme os dados, é o melhor processo empregado quando o objetivo é a separação de sólidos. Os dados mostram as altas eficiências obtidas pelo emprego deste processo, quando comparado aos processo físico-químico e biológico com decantação convencional por gravidade.

Analisando os resultados apresentados pelos dados do estudo, foi possível notar que não houve acréscimo dos valores de toxicidades em virtude da adição de produtos químicos ao efluente na etapa de tratamento físico químico. Ou melhor, os testes de ecotoxicidades provaram que o processo físico químico não agrega componentes tóxicos ao efluente tratado e que o reator biológico é que é o responsável pela diminuição da toxidade no efluente.

Os outros parâmetros analisados como a remoção de carga orgânica (DBO) e remoção de nutrientes (Nitrogênio em diversas formas e fósforo) mostram melhorias relacionadas bem mais ao processo de tratamento biológico, do que ao processo de separação de sólidos por membranas ou o processo de tratamento físico-químico.

De um modo geral, os dados relatam que ambos os processos empregados, físico químico e ultrafiltração, associados ao reator biológico, proporcionam bons resultados e devem ser consideradas como tecnologias viáveis em termos de eficiência de remoção de

poluentes. A figura (22) a seguir mostra o aspecto do efluente de estudo antes e depois dos processos avaliados.

**Figura 22:** Aspecto do efluente antes e após o tratamento utilizando o processo biológico e biológico + ultrafiltração (MBR).



**Fonte:** Pisseta, 2011.

A Figura (22) mostra o resultado da aplicação do processo biológico associado ao processo de separação por membranas, que neste caso, é a membrana UF. O efluente final deste processo é límpido, mas mantém boa parte da coloração oriunda do tratamento biológico. Foi relatado também que a etapa que remove a coloração, neste caso, é a etapa biológica. Isto se deve ao fato de que no reator biológico é adicionado carvão ativado em pó, justamente com a finalidade de remover cor.

Com base nos resultados obtidos, o estudo concluiu que: É tecnicamente possível substituir o sistema convencional pelo sistema de MBR, pois o MBR melhora a eficiência no reator biológico por meio do aumento do teor de sólidos e consequentemente aceleração da degradação. Do ponto de vista ambiental, tal substituição é viável e indicada, uma vez que se trata de uma tecnologia limpa e livre da adição de produtos químicos ao efluente.

O estudo 3 é outro trabalho relevante que aponta aspectos característicos e positivos do uso da tecnologia de MBR é a "Gestão da demanda de água na indústria de refino de petróleo: desafios e oportunidades de racionalização." Este estudo foi realizado por Felipe Ramalho Pombo, o qual é uma tese de Doutorado apresentada ao programa de Pós-graduação em Planejamento Energético, da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, em 2011. Este estudo tem como objetivo geral a realização de uma análise das possibilidades de racionalização do uso da água em refinarias de petróleo no Brasil. Este trabalho se caracteriza por apresentar algumas tecnologias, as quais se mostram viáveis para o tratamento de água,

tendo como objetivo minimizar o desenfreado consumo hídrico nas refinarias de petróleo e possibilitar o reúso da água após a aplicação de tais tecnologias de tratamento.

A metodologia empregada neste trabalho é uma junção de apresentações de diversos dados bibliográficas com duas aplicações de Análise Pinch e também com a realização de uma análise das experiências internacionais e nacionais de racionalização do uso da água em refinarias de petróleo. Na realização das duas aplicações de Análise Pinch foram traçadas curvas compostas de concentração, apresentando método tabulares e foram mostradas as redes ótimas de distribuição de água para as refinarias em estudo. Cabe salientar que utilizaremos apenas a parte bibliográfica deste estudo, sem utilizar a parte de aplicações de Análise Pinch.

Inúmeras refinarias da Petrobras estão optando pelos biorreatores a membrana para o reúso dos seus efluentes. Um dado importante exposto pelo trabalho é uma tabela na qual é possível observar as unidades de biorreator a membrana em implantação conforme apresentada por Santiago (2009).

**Tabela 7:** Unidades de biorreator a membrana em implantação.

<b>Unidade</b>	<b>Descrição</b>	<b>Capacidade (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Operação</b>
REVAP	Nova ETDI	300	2009
CENPES	Nova ETDI	65	2010
REPAR	Nova ETDI	400	2011
COMPERJ	Novo empreendimento	1100	2012
RNEST	Novo empreendimento	600	2012
REGAP	Novo biológico	750	n.d.
LUBNOR	Nova ETDI	66	n.d.

Nota: n.d. - não disponível.

**Fonte:** Pombo, 2011.

O estudo apresenta uma seção onde relata as experiências nacionais. Conforme CENPES (2004), uma destas experiências brasileiras, é um grupo de consultores da Petrobras, no âmbito do projeto "Reúso de Efluentes de Refinarias", que avaliaram as melhores tecnologias disponíveis no mercado mundial e selecionaram as consideradas de maior potencial de aplicação. A partir deste projeto foram construídas plantas-piloto na refinaria

Gabriel Passos (REGAP), a qual é localizada em Minas Gerais e tem uma capacidade de processamento de 151 mil barris/dia.

Segundo a CENPES (2004), nestas experiências, foram considerados duas formas de tratamento. A primeira forma consistiu na avaliação dos processos para a remoção de íons cloretos (dessalinização), ou seja, a osmose inversa ou a eletrodialise reversa. Para empregar esses processos exigisse diversos graus de pré-tratamento, com o intuito de remover os sólidos em suspensão e compostos que podem provocar a formação de incrustação nas membranas. A segunda forma era a aplicação de biorreator a membrana (MBR). O efluente do sistema de flotação faz a passagem pelo filtro para reduzir mais ainda o teor de óleo, com o objetivo de proteger as membranas. Cabe acrescentar que o efluente do MBR expõe uma alta qualidade, o que reduz a necessidade de pré-tratamento para a etapa de remoção de íons.

Com relação às plantas piloto da REGAP, Torre et al. (2008) relataram um estudo que foi conduzido utilizando unidades-piloto de biorreator a membrana submerso, com membranas poliméricas de microfiltração. Os resultados alcançados neste trabalho permitiram considerar o MBR como uma tecnologia apropriada para o pré-tratamento de uma unidade de dessalinização da água (osmose inversa ou eletrodialise reversa), permitindo seu uso em produção de vapor ou alimentação de torre de resfriamento. Duas unidades-piloto são abordadas, uma delas com configuração de placa plana (Kubota), o módulo da membrana foi submerso em um tanque de aeração (tanque/reator biológico), e a outra unidade-piloto com configuração de fibra oca (Zenon), as membranas estavam acopladas num tanque externo (tanque de membrana). Os resultados serão relatados a seguir e as características das unidades-piloto são resumidas na tabela a seguir.

**Tabela 8:** Descrição das unidades-piloto de MBR

<b>Unidade-piloto</b>	<b>A, Kubota</b>	<b>B, Zenon</b>
Origem da tecnologia	Japão	Canadá
Configuração da membrana	Chapa plana	Fibra oca
Módulo da membrana (submersa)	Tanque de aeração	Tanque de membrana
Material da membrana	PES	PVDF
Diâmetro de poro ( $\mu\text{m}$ )	0,40	0,04
Capacidade hidráulica (fluxo) ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	0,5-2,0	1,2-1,8
Área total da membrana ( $\text{m}^2$ )	60	70
Fluxo de permeado ( $\text{L}/\text{m}^2\text{h}$ )	7-28	14-28

Nota: PES - *Polyethersulfone*; PVDF - *Polyvinylidene fluoride*.

**Fonte:** Pombo, 2011.

No que diz respeito ao desempenho biológico das unidades-piloto, as mesmas foram operadas em um de 6 meses, avaliando o desempenho da membrana e a qualidade da água de cada sistema de tratamento. Cada sistema-piloto de MBR tem como objetivo principal adequar os efluentes aos parâmetros requisitados pela Resolução CONAMA Nº 357/05 e garantir uma qualidade adequada para alimentar as etapas de dessalinização. Os resultados obtidos pelo estudo indicam que ambos os sistemas estudados produziram efluente com turbidez  $< 1$  NTU, DBO5  $< 5$  mg/L e NH3-N  $< 3$  mg/L<sup>19</sup>, correspondendo a 98, 97, 96 % de remoção, respectivamente (TORRES et al., 2008).

Desta forma, o estudo 3 conclui que além de se apresentar como uma alternativa viável, supondo uma refinaria com grande acesso a efluente doméstico a tecnologia apropriada seria a de biorreatores a membrana.

Portanto, foi possível notar que diante dos dados explícitos, a aplicação da tecnologia de biorreatores a membrana (MBR) em esgotos domésticos, refinaria de petróleo, no setor industrial, e entre outras atividades as quais embora não foram citadas também apresentam aspectos relevantes que caracterizam a viabilidade do uso desta tecnologia. Neste sentido, os resultados obtidos nos estudos observados relatam a ampla eficiência e eficácia da utilização da tecnologia de MBR no tratamento de efluentes/esgotos, permitindo em alguns casos o reúso dos mesmos para fins não potáveis.

#### 4. CONCLUSÕES

A busca por tecnologias que possam ser aplicadas para controlar e minimizar a poluição dos corpos receptores de efluentes que não possuem um tratamento adequado tem aumentado significativamente, uma vez que o cenário de escassez hídrica se agrava continuamente. Um fator importante que também contribui na busca por tecnologias viáveis são os efluentes industriais, os quais possuem um alto consumo hídrico e apresentam uma variabilidade e complexidade em suas matrizes, exigindo, assim, um tratamento mais rígido e eficiente. Desta forma, o estudo aqui desenvolvido aborda a tecnologia de Biorreatores a membranas (MBR), que tem se mostrado uma alternativa altamente eficaz no tratamento de efluentes, além de apresentar a capacidade de reúso da água para fins não potáveis.

Neste sentido, este trabalho selecionou e apresentou algumas das variadas aplicações da tecnologia de MBR, sendo estas utilizadas no tratamento de esgotos domésticos, tratamento de efluentes de aterro industrial e tratamento de efluentes de refinaria de petróleo. Cabe salientar que algumas características específicas levaram a seleção da apresentação da aplicação da tecnologia de MBR em refinarias de petróleo, como o fato que os maiores consumos de água neste setor ocorrem em torres de resfriamento e em caldeiras. Levando em consideração o fato que a tecnologia de MBR permite um tratamento de efluentes que podem ser reutilizados para fins não potáveis, isto possibilita o reúso de água em torres de resfriamento e em caldeiras, uma vez que são sistemas que requerem água de menor qualidade.

Assim, o estudo desenvolvido evidencia a análise da utilização da tecnologia de MBR em alguns setores, destacando as características e parâmetros que influenciam na qualidade do efluente e, baseando-se nesses fatores, as possibilidades de reúso em diferentes processos. Neste sentido, este estudo teve o intuito de ressaltar a importância da tecnologia de MBR e abordar as características que viabilizam esta tecnologia ambiental como alternativa para o tratamento de efluente visando o seu reúso da água. Vale ressaltar que a aplicação da tecnologia de MBR permite o tratamento eficiente do efluente, o qual tem a capacidade de se enquadrar nas condições exigidas pelas legislações, tanto em termos de lançamento de efluentes em corpos receptores de água como em termos de reúso para fins não potáveis.

No que diz respeito ao primeiro estudo, as características apresentadas pelo permeado permite que o mesmo possa ser reutilizado em diversos fins que exijam qualidade de água não potável, como para irrigação de jardins, lavagem de pisos, para descarga dos vasos sanitários, etc. Além disso, para que sistemas convencionais de tratamento de esgotos gerem um efluente

tratado como a qualidade do permeado obtido pelo trabalho é necessário à presença de um tratamento terciário para desinfecção do efluente.

O segundo estudo faz uma avaliação do uso de biorreator com membrana no tratamento de efluente levando em consideração os aspectos ambientais, técnicos, econômicos e legais, em comparação com processos convencionais de tratamento. Desta forma, o estudo conclui que em aspectos técnicos e ambientais, a substituição do sistema convencional pelo sistema de MBR é viável e indicada, uma vez que se trata de uma tecnologia limpa e livre da adição de produtos químicos ao efluente, além de apresentar um melhor desempenho no reator biológico devido o aumento do teor de sólidos e consequentemente aceleração da degradação. Em relação ao atendimento dos requisitos legais de lançamento de efluente, tanto o MBR como TCE são satisfatórias, no entanto, o MBR apresenta características estáveis, o que permite menos ajustes no sistema para manter os parâmetros dentro dos limites requeridos. E no que diz respeito aos termos econômicos, os custos elevados da implantação e manutenção da tecnologia de MBR tornam esta tecnologia inviável economicamente para o tratamento de efluente de aterro no Brasil.

Sendo assim, de forma geral, os resultados obtidos pelos estudos apresentados neste trabalho relatam que a aplicação desta tecnologia para o tratamento de efluentes é viável, por diversas características, como: a capacidade do processo de produzir um efluente de alta qualidade, uma vez que as membranas promovem uma elevada desinfecção do efluente, reduzindo o risco de contaminação biológica no reúso do efluente tratado, com isto apresentando benefícios ambientais. Outro fator importante é a redução que vem ocorrendo dos custos envolvidos para instalação, visto que isto é considerado um dos principais fatores limitantes da expansão e consolidação desta tecnologia.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, I. L. **Avaliação de processos de separação por membranas para geração de águas de reúso em um centro comercial**. Dissertação (Mestrado em Ciências), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

BELLI, T. J. **Biorreator à membrana em batelada sequencial aplicado ao tratamento de esgoto visando a remoção de nitrogênio total**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011

BRINDLE, K., STEPHENSON, T., The Application of Membrane Biological Reactors for the Treatment of Wastewaters. **Biotechnology and Bioengineering**, v.49, p. 601 – 610, 1996.

CENPES, Efluentes hídricos: Resultados em P & D. Avaliação de tecnologias visando ao reúso de efluentes. CENPES, Rio de Janeiro, junho de 2004.

CENTROPROJEKT DO BRASIL, 2004, “Reuso de Efluentes Industriais e Domésticos - Tecnologias Avançadas”. Seminário O Estado da Arte dos Equipamentos para Reúso de Águas, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, Abril.

CHANG, I. S., BAG, S. O., LEE, C. H. Effects of Membrane Fouling on Solute Rejection during Membrane Filtration of Activated Sludge. **Process Biochemistry**, v.36, p. 855-860, 2001.

CHANG, I. S., JUDD, S. J. Air Sparging of Submerged MBR for Municipal Wastewater Treatment. **Process Biochemistry**, v. 37, p.915-920, 2002.

CHOI, J. G., BAE, T. H., KIM, J. H., TAK, T. M., RANDALL, A. A. The Behaviour of Membrane Fouling Initiation on the Crossflow Membrane Bioreactor System. **Journal of Membrane Science**, v.203, p. 103-113, 2002.

CHUA, H. C., ARNOT, T. C., HOWELL, J. A. Controlling fouling in membrane bioreactors operated with a variable throughput. **Desalination**, v. 149, p. 225-229, 2002.

CONSTANZI, R. N. Tratamento de efluentes domésticos por sistemas integrados de lodos ativados e membrana de ultrafiltração visando o reúso de água. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2007.

CÔTÉ, P., BUISSON, H., ARAKAKI, G. Immersed Membranes Activated Sludge for the Reuse Municipal Wastewater. **Desalination**, v.113, p. 189-196, 1998.

CUI, Z. F., CHANG, S., FANE, A. G. Review - The Use of Gas Bubbling to Enhance Membrane Processes. **Journal of Membrane Science**, v. 221, pp.01-35, 2003.

DAVIS, M. Water and Wastewater Engineering. 1296 p. Mc.Graw-Hill, 2010.

DECOL, 2003, Apresentação no Software Power Point.

DEFRANCE, L., JAFFRIN, M. Y., GUPTA, B. et al. Contribution of Various Constituents of Activated Sludge to Membrane Bioreactor Fouling. **Bioresource Technology**, v. 73, p. 105-112, 2000.

DELGADO, S., VILLAROEL, R., GONZÁLES, E. Effect on the shear intensity on fouling in submerged membrane bioreactor for wastewater treatment. **Journal of Membrane Science**, v.311, p. 173-181, 2008.

DIAS, T. MBR: nova tecnologia para tratamento de efluente. **Meio Filtrante**, Ano VII, Ed. n. 36, jan./fev., 2009.

FANG, H. H. P., SHI, X. Pore Fouling of Microfiltration Membranes by Activated Sludge. **Journal of Membrane Science**, v. 264, p. 161-166, 2005.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DE ENGENHARIA DO MEIO AMBIENTE – FEEMA, DZ-215-R.3: Diretriz de Controle de Carga Orgânica Biodegradável em Efluentes Líquidos de Origem não Industrial. Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2002.

GASPAR, T. C. M. **Estudo da Aplicação dos processos de filtração com membranas para tratamento de água**. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2010.

GUNDER, B., KRAUTH, K. Replacement of Secondary Clarification by Membrane Separation - Results with Plate and Hollow Fibre Modules. **Water Science Technology**, v. 38, p. 383-393, 1998.

HE, Y., XU, P., LI, C., ZHANG, B. High-Concentration Food Wastewater Treatment by an Anaerobic Membrane Bioreactor. **Water Research**, v.39, p. 4110-4118, 2005.

HOLBROOK, R. D., MASSIE, K. A., NOVAK, J. T. A Comparison of Membrane Bioreactor and Conventional-Activated-Sludge Mixed Liquor and Biosolids Characteristics. **Water Environmental Research**, v. 77, p.323-330, 2005.

JENKINS, D., RICHARD, M. G., DAIGGER, G. T. Manual on the Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming, 2 ed., Chelsea, **Lewis Publishers, Inc.**, Michigan, 1993, Apud: BENTO, A. P. e HOFFMANN, H. Tratamento Biológico de Água Residuárias, **Capítulo 4: Microbiologia e Ecologia de Sistemas Aeróbios de Tratamento de Esgotos**, 2007.

JUDD, S. Submerged Membrane Bioreactors: Flat Plate or Hollow Fibre?. **Filtration Separation**, v. 39, p. 30-31, 2002.

KIPPER, M. S. **Biorreatores com Membranas: uma Alternativa para o Tratamento de Efluentes**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

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

- LE-CLECH, P., ALVAREAZ-VAZQUEZ, H., JEFFERSON, B., JUDD, S. Fluid Hydrodynamics in Submerged and Sidestream Membrane Bioreactors. **Water Science Technology**, v. 48, p. 113-119, 2003.
- LESJEAN, B.; HUISJES, E. H. Survey of the European MBR market: trends and perspectives. **Desalination**, v. 231, p. 71 – 81, 2008.
- LIAO, B. Q., BAGLEY, D. M., KRAEMER, H. E., LEPPARD, G. G., LISS, S. N., A Review of Biofouling and its Control in Membrane Separation Bioreactors. **Water Environmental Research**, 76 – 5, 425-436, 2004.
- LUONSI, A., LAITINEN, N., BEYER, K., LEVANEN, E., POUSSADE, Y., NYSTROM, M. Separation of CTMP Mill-Activated Sludge with Ceramic Membranes. **Desalination**, v.146, p. 399-404, 2002.
- MENG, F., YANG, F., SHI, B., ZHANG, H. A comprehensive study on membrane fouling in submerged membrane bioreactors operated under different aeration intensities. **Separation and Purification Technology**, v.59, p. 91-100, 2008.
- MENG, F., ZHANG, H., YANG, F., ZHANG, S., LI, Y., ZHANG, X. Identification of Activated Sludge Properties Affecting Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactors. **Separation and Purification Technology**, v.51, p.95-103, 2006.
- MENZEL, Uwe. **Tecnologia industrial de águas e efluentes: apostila do mestrado EDUBRAS-MAUI**. Stuttgart: 2009.
- METCALF & EDDY. **Wastewater Engineering - treatment and reuse**. 4 th ed. Boston: McGraw-Hill, 2003.
- MIERZWA, J.C. Processos de Separação por Membranas para Tratamento de Água. In: PÁDUA, V. L (coord.). **Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microrganismos orgânicos por meio de técnicas de tratamento de águas para consumo humano**. Rio de Janeiro: ABES, 2006. p. 335-380.
- MULDER, M. **Basic Principles of Membrane Technology**. Kluwer Academic Publishers, 1991.
- NGUYEN CONG DUC, E., FOURNIER, L., LEVECQ, C., LESJEAN, B., GRELIER, P., TAZI-PAIN, A. Local hydrodynamic investigation of the aeration in a submerged hollow fibre membrane cassette. **Journal of Membrane Science**, v. 321, p. 264-271, 2008.
- NOBREGA, R.; HABERT, A. C.; BORGES, C. P. **Processos de Separação com Membranas**. Rio de Janeiro: Escola piloto em engenharia química, COPPE, UFRJ, 2003.
- PELEGRIN, D. C. **Microfiltração tangencial de efluente sanitário após tratamento biológico**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

PISETTA, A. M. G. **Aplicação de biorreator com membranas no tratamento de efluentes de aterro industrial**. Universidade Federal do Paraná em parceria com o SENAI-PR e a Universitat Stuttgart, Alemanha. Curitiba, 2011.

POMBO, F. R. **Gestão da demanda de água na indústria de refino de petróleo: desafios e oportunidades de racionalização**. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

REIF, O. W. Microfiltration Membranes: Characteristics and Manufacturing. **Biochem Engin/Biotechnol**, v. 98, p. 73-103, 2006.

RENZ, I. C. **Efeito das condições hidrodinâmicas no desempenho de um Biorreator com Membranas Submersas em pressão constante**. Dissertação ( Mestrado em Engenharia Química ). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ROSENBERGER, S., EVENBLIJ, H., POELE, S., WINTGENS, T., LAABS, C. The Importance of Liquid Phase Analyses to Understand Fouling in Membrane Assisted Activated Sludge Processes-Six Case Studies of Different European Research Groups. **Journal Membrane Science**, v.263, p. 113-126, 2005.

SANTOS, A., MA, W. e JUDD, S. Membrane bioreactors: Two decades of reserach and implementation. **Desalination**, v. 273, p. 148-154, 2011.

SCOTT, J. A., NEILSON, D. J., LIU, W., BOON, P. N. A Dual Function Membrane Bioreactor System for Enhanced Aerobic Remediation of High-Strength Industrial Waste. **Water Science Technology**, v.38, p. 413-420, 1998.

SETTI, A.A; LIMA, J.E; CHAVES, A. G. et al. **Introdução ao Gerenciamento dos Recurso Hídricos**. 3 ed., Brasília, DF, Brasil, ANEEL, ANA, 2001.

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

SMITH, C. V., DIGREGORIO, D., TALCOTT, R. M. The use of Ultrafiltrarion Membranes for activated Sludge Separation, In: Proceedings of the 24th Annual Purdue Industrial Waste Conference, 1969.

TARDIEU, E., GRASMICK, A., GEUGEY, V. et al. Hydrodynamic Control of Bioparticle Deposition in a MBR Applied to Wastewater Treatment. **Journal of Membrane Science**, v. 147, p. 01-12, 1998.

TORRES, A.P.R., SANTIAGO, V.M.J., BORGES, C.P., “Performance evaluation of submerged membrane bioreactor pilot units for refinery wastewater treatment”, **Environmental Progress**, v. 27, n. 2, pp 189-194, 2008.

UEDA, T., HATA, K., KIKUOKA, Y., SEINO, O., Effects of Aeration on Suction Pressure in a Submerged Membrane Bioreactor. **Water Research** 31, n. 3,489 – 494, 1997.

VIANA, P.Z. **Biorreator com membrana aplicado ao tratamento de esgotos sanitários: avaliação do desempenho de módulos de membranas com circulação externa.** Tese do Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós Graduação e Pesquisa de Engenharia (COPPE), Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, 2004.

VON SPERLING, M. **Introdução à Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos – Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** v. 1. 2 ed., Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 1996.

VON SPERLING, M. **Lodos Ativados - Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias.** Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, Belo Horizonte, v.4, 2 ed., 2002

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de águas.** Volume 1. 3ª ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental/UFMG, 2005.

WU, J., HE, C., JIANG, X., ZHANG, M. Modeling of the submerged membrane bioreactor fouling by combined pore constriction, pore blockage and cake formation mechanisms. **Desalination**, v. 297, p. 127-134, 2011.

YAMAMOTO, K., HIASA, M., MAHMOOD, T., MATSUO, T. Direct Solid-liquid Separation using Hollow Fiber Membrane in an Activated-sludge Aeration Tank. **Water Science Technology**, v.21, p. 43-54, 1989.

YU, H. Y., XIE, Y. J., HU, M. X., WANG, J. L., WANG, S. Y., XU, Z. K. Surface Modification of Polypropylene Microporous Membrane to Improve its Antifouling Property in MBR: CO<sub>2</sub> Plasma Treatment. **Journal of Membrane Science**, v. 254, p. 219-227, 2005.

ZHENG, X., ZHOU, Y., CHEN, S., ZHENG, H., ZHOU, C. Survey of MBR market: trends and perspectives in China. **Desalination**, v. 250, p. 609 – 612, 2009.